

도심환경에서의 전기자동차 친환경 자율주행 속도제어 전략

허슬기* · 정용환* · 이경수*[†]

Eco-Speed Control Strategy for Automated Electric Vehicles on Urban Road

Seulgi Heo*, Yonghwan Jeong*, Kyongsu Yi*[†]

Key Words : *Motor Efficiency*(모터효율), *urban road*(도심환경), *road slope*(경사도), *Speed control*(속도제어), *preceding vehicle*(선행차량)

ABSTRACT

This paper proposes autonomous speed control strategy for an Electric Vehicle on urban road. SNU campus road is used to represent urban road situation. Motor efficiency of driving on campus circulation road can be improved by controlling velocity properly. Given information of campus road, especially slope of road, acceleration is selected from candidate, considering consumed power, human factor and driving time. To apply urban situation, preceding vehicle is also considered. With preceding vehicle, acceleration is defined according to clearance and relative velocity. Acceleration is bounded in normal range. Proposed acceleration control method is activated with proper velocity range for campus circulation road. With acceleration control, motor efficiency becomes better than driving with constant vehicle. To evaluate the performance of proposed acceleration controller, simulation study is conducted via MATLAB.

1. 서론

자동차 연비, 환경 규제가 강화됨에 따라 전기 자동차에 대한 개발 및 수요가 증가하고 있다. 또한 자율주행은 자동차 연비를 향상시킬 뿐 아니라 운전자의 안전 역시 확보할 수 있어 자동차 산업에서의 핵심 기술로 자리 잡고 있다.

내연기관 자동차의 연비를 향상시키기 위해 연료 분사 시점을 조정하는 등 꾸준한 노력이 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 이와 더불어 자동차의 속도를 제어하는 것 역시 연비를 향상시키는 데에 핵심 기술로서 이에 대해 다양한 기술이 개발 및 연구되고 있다.^{(2),(3)}

뿐만 아니라 하이브리드, 전기 자동차 등 친환경 자동차

역시 이러한 추세에 맞춰 활발하게 개발되고 있다. 친환경 자동차에 대해서도 내연기관 자동차와 마찬가지로 연비 및 모터의 효율 향상을 위한 노력이 이루어지고 있다.^{(4),(5)}

자동차의 주행 환경 중 도심은 자동차의 연료 및 배터리 소비의 상당부분을 차지한다. 도심환경은 도로의 경사 및 곡률반경이 일정하지 않을 뿐 아니라 선행차량 등 운전자가 예측하기 어려운 다양한 상황이 존재한다. 자율주행은 각 상황에서 환경에 대한 정보가 주어졌을 때, 가속 및 속도 제어를 통해 이를 보완할 수 있는 주요 기술로 기대되어 진다.^{(6),(7)}

이와 관련하여 본 연구에서는 자동차의 속도 제어 시 도로의 경사를 반영하여 주행 효율을 증대시키고자 하였다. 또한 도심 상황을 반영하기 위해 선행차량이 존재하는 경우 역시 고려하였다. 전기 자동차에 대한 수요가 증가하고 있는 현 상황을 반영하여 전기 자동차의 파워트레인(power train)을 기반으로 연구를 진행하였다.

* 서울대학교 차량동역학 및 제어연구실
E-mail : alethtk93@snu.ac.kr

2. 차량 모델링 및 제어 이론

2.1. 주행 환경 및 차량 제어

운전자가 직접 차량을 운전할 때 도로 경사의 변화에 따라 속도를 제어하기보다 일정한 속도를 유지하려는 경향이 있다. 이는 Fig. 1을 통해 알 수 있다. 선행차량, 과속 방지턱이 등장하는 부분을 제외하고 속도를 유지하려는 경향을 보인다. 이러한 주행 방식은 차량의 효율을 감소시키는 요인 중 하나이다. 따라서 도로 경사에 따라 속도를 제어하는 것을 통해 모터 효율의 향상을 기대할 수 있다.⁽⁸⁾ 가속제어를 통해 도로 경사에 따른 전기 자동차의 주행 효율을 평가하기 위해 경사도가 일정 수준 이상으로 유지되고, 경사의 변화가 존재하는 도로를 주행 환경으로 고려하였다.

뿐만 아니라 운전자에 의한 수동 주행 시 선행 차량의 속도 변화에 따른 반응이 느려 효율적이지 못한 제어가 일어날 수 있다. 선행차량에 대해 상대 속도와 상대 거리에 따라 자차량의 가속도를 제어함으로써 불필요한 가속 및 감속을 방지할 수 있다.

자차량의 모터 토크를 제어 입력 값으로 넣어주며 차량의 속도를 제어하였다. 전기 자동차의 배터리 효율 모델을 통해 속도 제어에 따른 효율 변화를 관찰하였다.

2.2. 차량 모델

2.2.1. 파워 계산

차량의 종방향 운동 모델을 통해 속도 제어에 따른 차

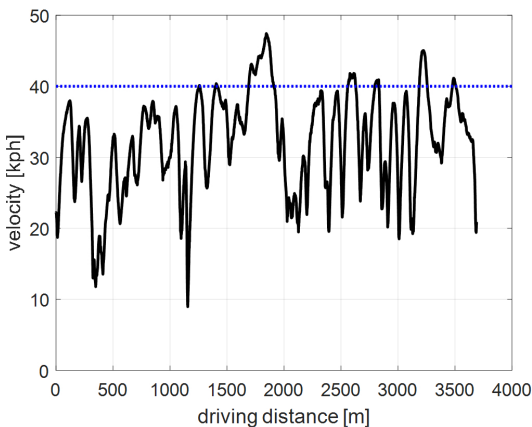


Fig. 1 Velocity profile of manual driving

량의 효율 변화를 평가하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ x(t) &= [x_1(t) \ x_2(t)]^T \end{aligned} \quad (1)$$

차량의 종방향 모델은 식 (1)과 같다. $x_1(t), x_2(t)$ 는 각각 위치 및 속도를 나타내고, $u(t)$ 는 제어 입력, 즉, 모터 토크를 나타낸다.

$$Torque = R_{wheel} \times (F_R + F_G + F_a) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_R &= W \times C_R \times \cos(\theta(t)) \\ F_G &= W \times \sin(\theta(t)) \\ F_a &= (W/g) \times \frac{dx_2}{dt}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

종방향 모델에서의 차량 토크는 식 (2)와 같다. R_{wheel} 은 차량 바퀴의 반지름을, F_R, F_G, F_a 는 각각 회전에 대한, 중력에 대한 마찰, 그리고 입력 가속도에 따른 힘을 나타낸다. 각 힘에 대한 정의는 식 (3)과 같다. W 는 차량의 무게를, $\theta(t)$ 는 차량이 위치한 도로의 경사도를 나타내며, g 는 중력가속도를 의미한다.

차량의 모터 효율을 계산할 때 주어진 토크에 대한 모터 파워 값을 필요로 한다. 전기 자동차의 모터 출력은 식 (4)와 같다. t_f 는 주행 완료 시점을, 주행 거리(driving distance)는 t_f 동안 차량이 주행한 거리를 나타낸다. 모터 속도의 경우 차량의 각속도와 모터의 계인에 의해 결정된다. 각 모터의 특성에 따라 토크 효율이 결정되며, 이에 따라 모터 파워가 결정된다.

$$\begin{aligned} motoreff &= \text{driving distance} / \int_0^{t_f} P dt \\ Power &= \text{Motor Speed} \times \frac{Torque}{Torque\ efficiency} \\ \text{Motor Speed} &= f(x_2(t), k_m) \end{aligned} \quad (4)$$

2.3. 제어 이론

2.3.1. 제어 모드 결정

주어진 차량 모델은 각 시점에서 선행차량이 존재하는 지에 따라 제어 모드가 결정된다. 선행차량의 정의는 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= x_t(t) - x_s(t) < 30m \\ \Delta v(t) &= v_t(t) - v_s(t) < 5m/s \end{aligned} \quad (5)$$

$$-3m/s^2 \leq \frac{dx_2}{dt} \leq 1m/s^2 \quad (7)$$

x_t, v_t 는 각각 다른 차량의 종방향 위치와 속도를, x_s, v_s 는 각각 자차량의 종방향 위치와 속도를 나타낸다. 상대 거리 (clearance)가 30m 미만이고, 상대 속도가 5m/s이 내인 차량에 대해 선행차량이라 정의하였다.

선행차량이 존재하는 경우 자차량의 가속도는 선행 차량의 주행 상태에 의해 결정되는 차량 추종 모드 (car following mode)를 따른다. 반면 선행차량이 없는 경우 자차량의 가속도는 모터 파워, 주행의 편안함과 주행 시간 등을 고려한 효율 주행 모드 (free flow mode)를 따른다.

주행 환경에 따른 차량 제어 시스템은 Fig. 2와 같다.

차량 추종 모드와 효율 주행 모드 두 경우 모두 차량의 속도가 각 주행 환경에 맞는 속도 범위 이내에서 제어 입력력을 계산한다. 자차량의 속도가 제한된 속도 범위를 벗어난 경우 식 (6)과 같이 제어 모드에 관계없이 제한 속도에 맞춰 속도가 제어 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dx_2}{dt} &= k \times (v_{des} - v_s) \\ k &= 0.1 \end{aligned} \quad (6)$$

또한 일반적으로 사용되는 가속도 범위를 고려하여 두 경우의 제어 모드 모두 목표 가속도를 제한하였다. 제한 범위는 식 (7)과 같다.

2.3.2. 차량 추종 모드

차량 추종 모드에서 자차량의 가속도는 선행차량과의 상대 거리와 상대 속도에 의해 결정된다.^{(9),(10)} 제어 입력인 토크를 결정하기 위한 가속도는 식 (8)과 같다. 선행 차량과의 상대 거리에 대한 오차를 최소화하고, 인간공학적 측면을 고려하여 정의한다.

$$\frac{dx_2}{dt} = a(t) = k_v \times \Delta v(t) + k_c \times (\Delta x(t) - \Delta x_{des}(t)) \quad (8)$$

식 (8)에서 k_v, k_c 는 각각 상대 속도와 상대 거리에 대한 게인 (gain) 값으로, $k_v = 1.2, k_c = 0.3$ 이다. $\Delta x_{des}(t)$ 는 상대 거리의 목표 값으로 차량의 크기를 고려하여 식 (9)과 같이 정의한다.

$$\Delta x_{des} = 10 + 0.8 \times v_s(t) \quad (9)$$

2.3.3. 효율 주행 모드

효율 주행 모드에서 자차량의 가속도는 가속도에 따른 모터 일, 제어 입력, 주행 시간인 세 가지 요소에 의해 결정된다. 세 가지 요소를 고려한 비용함수 (cost function)은 식 (10)과 같다.

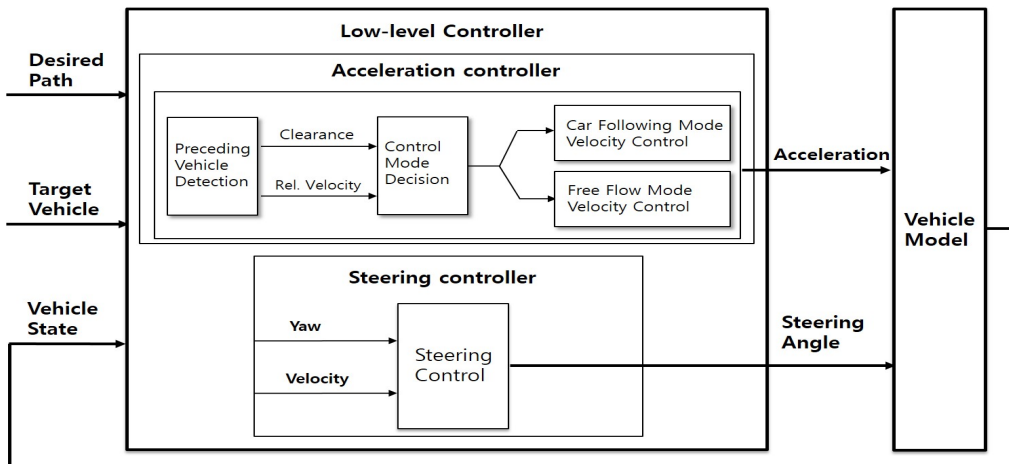


Fig. 2 Configuration of simulation environment

$$J = \sum_{k=1}^{100} \left[\left\{ k_p \times \frac{power(k)}{v_s(k)} + k_a \times a^2 + k_t \right\} \times time(k) \right] \quad (10)$$

식 (10)에서 k_p, k_a, k_t 는 각 요소에 대한 계인 값이며 각 요인의 규모(scale)와 비용함수에 미치는 영향의 중요도에 따라 값을 구하고, 비용함수를 최소화하도록 설정하였다. $k_p = 1, k_a = 410, k_t = 20$ 으로 하였다. 효율 주행 모드에서는 각 시점에서의 주행 상태만 고려한 차량 추종 모드와 달리, 자차량의 위치에서 진행 방향으로 주행 도로의 100개 지점을 가는 동안의 상태를 고려하였다. 100개 지점을 가는 동안 자차량이 소비한 모터 일, 주행 시간, 그리고 인간 공학적 측면을 고려하기 위한 제어 입력을 이용하여 비용 함수를 설계하였다. 식 (7)과 같이 제한된 범위에 속하는 가속도 값에서 0.1 간격으로 후보군을 얻었고, 41개의 후보군에 대해 각각 주행 도로의 100개 지점을 가는 동안 각 요인의 값을 누적하여 더해 비용 함수를 얻었다. 후보군 중 이를 최소화하는 가속도 값을 구하였다. 이를 통해 가속도 값에 대응하는 모터 토크를 결정하였다.

3. 차량 특성 및 시뮬레이션 환경

3.1. 차량 특성

시뮬레이션을 수행하기 위해 사용한 차량 특성은 Table 1과 같다.

3.2. 시뮬레이션 환경

도로의 경사의 변화를 반영하여 전기 자동차의 모터 효율을 평가하기 위해 경사도가 변화하는 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 이를 위해 서울대학교 캠퍼스의 교내 순환 도로를 시뮬레이션 환경으로 사용하였고, 이는 Fig. 3과 같다.

시뮬레이션의 샘플링 타임(sampling time)은 0.1s로 하였다.

Table 1 Vehicle specifications

W	1880kg
R_{wheel}	0.365m
C_R	0.012

3.2.1. 효율 향상 평가

효율 주행 모드의 모터 효율 향상 효과를 평가하기 위해, 주어진 주행 도로를 선행차량 없이 주행하도록 시뮬레이션 환경을 구축하였다.

3.2.2. 도심 환경 구현

도심 환경에서의 선행차량을 구현하기 위해 자차량이 일정 구간을 주행한 이후 선행차량이 인지되도록 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 또한 차량 추종 모드로 일정 구간을 주행한 이후 선행차량의 조건을 만족시키지 않을 때 효율 향상 모드로 전환될 수 있도록 선행차량의 속도가 증가하도록 하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1. 효율 향상 평가

속도 제어를 통한 모터 효율의 향상을 평가하기 위해

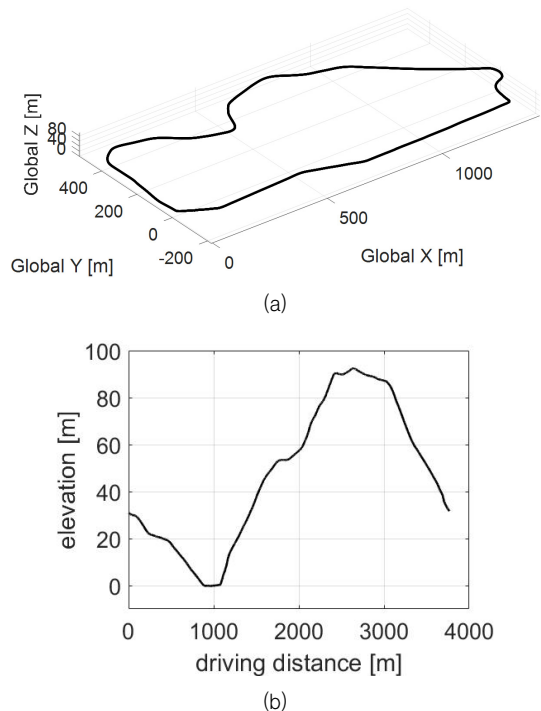


Fig. 3 Simulation Environment (a) road map (b) elevation according to driving distance

서울대학교 교내 순환 도로를 정속 주행하였을 때의 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

4.1.1. 정속 주행 시 모터 효율

서울대학교 교내 순환 도로를 33kph로 정속 주행하였을 때 속도 프로파일 및 모터 효율은 Fig. 4, Table 2와 같다.

4.1.2. 속도 제어에 따른 모터 효율

제안한 속도 제어 방법의 모터 효율 향상 효과를 평가하기 위해 선행차량이 없을 때 시뮬레이션 주행 결과를 분석하였다.

시뮬레이션에서의 초기 속도는 정속 주행에서의 경우와 속도 제어에서의 경우 모두 20kph로 동일하게 하였다.

Fig. 5에서 비용함수를 최소화하기 위한 가속도에 따라 속도가 제어되었다. 속도 제어에 의한 최소가속도는 $-1.2m/s^2$, 최대가속도는 $0.6m/s^2$ 으로 주어진 가속도 범위 내에서 제어되었다.

Table 2에서 두 경우에 대해 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 속도 제어에 의한 시뮬레이션에서 동일한 거리를

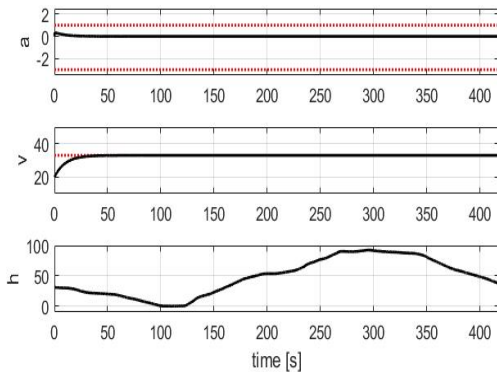


Fig. 4 Acceleration and velocity profile (a : acceleration [m/s^2], v : velocity [kph], h : elevation [m])

Table 2 Driving simulation result comparison

	constant velocity	velocity control
주행 거리	3800m	3800m
주행 시간	417.9s	511.9s
모터 효율	4.31km/kWh	4.52km/kWh

주행하는 동안 오르막에서의 속도 감소로 인해 총 주행시간이 증가한 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 주행시간을 고려한 모터 효율이 정속주행에 비해 약 4.79% 증가하였다.

4.2. 도심 환경 구현

도심 환경을 구현하기 위해 선행차량 역시 반영되었다. 주어진 시뮬레이션 환경에서 차량 추종 모드와 효율 제어 모드가 양방향으로 전환될 수 있도록 선행차량을 구현하였다.

선행차량이 존재할 때 속도 제어에 따른 시뮬레이션 결과는 Fig. 6과 같다. 선행차량은 주행거리 약 1000m 동안 인지되어 차량 추종 모드에 의해 속도가 제어되었다. 차량 추종 모드에 의해 주행된 부분을 확대하여 보면

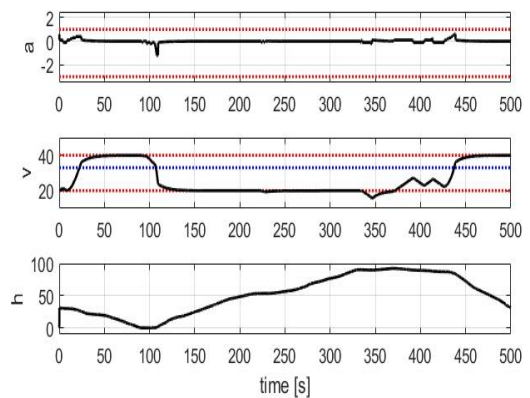


Fig. 5 Acceleration and velocity profile with velocity control (a : acceleration [m/s^2], v : velocity [kph], h : elevation [m])

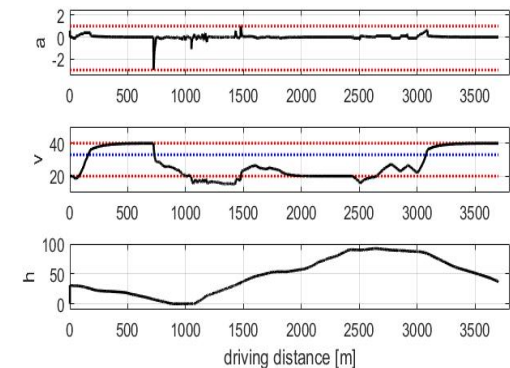


Fig. 6 Acceleration and velocity profile with preceding vehicle (a : acceleration [m/s^2], v : velocity [kph], h : elevation [m])

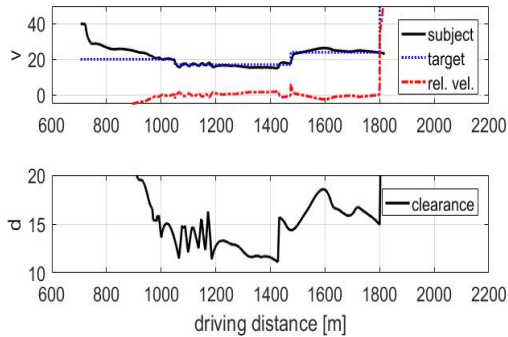


Fig. 7 Relative velocity and clearance
(v : velocity [kph], d : clearance [m])

Fig. 7과 같다. 차량 추종 모드 동안 선행차량과의 상대 거리는 평균 약 14m로 유지되었다. 그에 따른 충돌소요 시간(Time To Collision)은 평균 2.68s로 유지되었고, 최소 충돌소요시간 및 최대 충돌소요시간은 각각 약 2.26s, 3.32s이다.

5. 결론

본 연구에서는 도심 환경에서 전기 자동차의 효율을 높이기 위해 경사에 따른 속도 제어를 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 연구대상 도로에서 제안된 속도 제어에 의해 주행하였을 때, 정속으로 주행하였을 때에 비해 주행 시간이 늘어났지만, 전기 자동차의 모터 효율이 약 4.79% 증가하였다. 또한 도심환경을 구현하기 위해 선행차량이 있을 때의 속도 제어도 제안하였다.

시뮬레이션 결과, 제안된 제어 방법에 의해 선행차량이 인지된 후 선행차량과의 적절한 상대 속도 및 상대 거리가 유지되었다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업기술혁신사업(10079730, 자동차전영도로/도심로 자율주행 시스템 개발 및 성능평가)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

(1) Wayne Moore, Matthew Foster, M. Lai, X. Xie, Y. Zheng and Atsushi Matsumoto, 2011, Charge motion benefits of valve deactivation to reduce

fuel consumption and emissions in a GDi, VVA engine, SAE Technical paper.

- (2) Valerio Turri and Yeojun Kim, 2017, A model predictive controller for non-cooperative eco-platooning, American Control Conference.
- (3) Qiu Jin, Guoyuan Wu, Kanok Boriboonsomsin, and Matthew J. Barth, 2016, Power-based optimal longitudinal control for a connected eco-driving system, IEEE Transactions on intelligent transportation systems, Vol. 17, No. 10.
- (4) Naehyuck Chang, Donkyu Baek and Jeongmin Hong, 2014, Power consumption characterization, modeling, and estimation of electric vehicles, Computer-Aided Design (ICCAD).
- (5) Bijan Sakhdari, Mahyar Vajedi and Nasser L. Azad, 2016, Ecological adaptive cruise control of a plug-in hybrid electric vehicle for urban driving, 19th International conference on intelligent transportation systems (ITSC).
- (6) Abdus Samad Kamal, Masakazu Mukai, Junichi Murata and Taketoshi Kawabe, 2013, Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy, IEEE transactions on control systems technology, Vol. 21, No. 3.
- (7) M.A.S. Kamal, M. Mukai, J. Murata and T. Kawabe, 2009, Development of ecological driving system using model predictive control, ICROS-SICE International joint conference.
- (8) M.A.S. Kamal, Masakazu Mukai, Junichi Murata and Taketoshi Kawabe, 2011, Ecological vehicle control on roads with up-down slopes, IEEE transactions on intelligent transportation systems, Vol. 12, No. 3.
- (9) Sinan Oncu, Jeroen Ploeg, Nathan van de Wouw and Henk Nijmeijer, 2014, Cooperative adaptive cruise control: network-aware analysis of string stability, IEEE transactions on intelligent transportation systems, Vol. 15, No. 4.
- (10) Roman Schmied, Harald Waschl, Rien Quirynen, Moritz Diehl and Luigi del Re, 2015, Nonlinear MPC for emission efficient cooperative adaptive cruise control, International Federation of Automatic Control (IFAC).