

기동성을 위한 후륜 조향 차량의 최적 성능에 대한 연구

안국진* · 좌은혁* · 박관우* · 윤영식** · 이경수*†

An Experimental Study of Optimal Performance of Rear Wheel Steering Vehicle for Maneuverability

Kookjin Ann*, Eunhyek Joa*, Kwanwoo Park*, Youngsik Yoon**, Kyongsu Yi*†

Key Words : Optimal performance(최적 성능), Rear wheel steering vehicle(후륜 조향 차량), Assessment web(평가 웹), Step steer test(단계 조향각 시험)

ABSTRACT

This paper presents an optimal performance of rear wheel steering vehicle for maneuverability. The maneuverability of vehicle is evaluated in terms of yaw rate, body slip angle and driver input. The maneuverability of vehicle can be improved by rear wheel steering system. To obtain optimal performance of rear wheel steering vehicle, the optimal control history is designed. The high dimensional trajectory optimization problem is solved by formulating a quadratic program considering rear wheel steer input. To evaluate handling performance 7 degree-of-freedom vehicle model with actuation sub-models is designed. A step steer test is conducted to evaluate rear wheel steering vehicle. A response time, a TB factor, overshoot, and yaw rate gain are investigated through objective criteria, assessment webs. The handling performance of vehicle is evaluated via computer simulations. It has been shown from simulation studies that optimal controlled rear wheel steering vehicle provides improved performance compared to others.

1. 서론

자동차가 보편화된 이래로 차량의 민첩성, 조종성, 안정성을 향상시키기 위해 ABS(Anti-lock Braking System), ESC(Electronic Stability Control), ECS(Electronic Control Suspension), TCS(Traction Control System)과 같은 사시 제어 시스템이 개발되었다. 그중 rear wheel steering system은 1980년대부터 상용화가 이루어지기 시작했다. 후륜 조향 시스템은 작동 시 다른 사시 제어 시스템과는 달리 속도 감소가 없기 때문에 운전자에게 느껴지는 이질감이 적다.

최근 후륜 조향 시스템에 대한 연구가 진행되면서 이를 평가하기 위한 평가 방법에 대해 다양한 자동차 업체들이 연구하고 있다. 피아트⁽¹⁾에서는 단계 조향각 입력 시험과 이중 차선 변경 시험에 대해서 인덱스를 설정하여 핸들링 퀄리티를 평가하였고, 운전자의 주관적 평가와의 상관관계를 보였다. 메르세데스 벤츠⁽²⁾에서는 요 레이트와 횡방향 가속도에 대하여 웹 평가를 통해 전륜 조향각 제어, 후륜 조향 제어, 4륜 조향 제어 차량을 평가하였다. BMW⁽³⁾에서는 J-turn 시나리오를 통해 반응 시간과 차체 미끄러짐 각도의 곱인 TB 인자를 이용하여 핸들링 특성을 평가하였다. 볼보⁽⁴⁾에서는 개방 루프 정현파 입력 시험을 통하여 안정성 기준을 선정해 차량의 안정성을 평가하였다. 또한 도요타⁽⁵⁾와 가나가와 대학⁽⁶⁾에서는 운전자 모델의 매개 변수값을 통해 핸들링 퀄리티를 평가

* 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

** 현대자동차

†E-mail : akj302104@snu.ac.kr

하였다.

최적화 기법을 이용하여 차량 성능의 한계를 계산한 연구들이 진행되었다. 옥스퍼드대학교^(7,8)에서는 3D 맵 상에서 랩타임을 줄이기 위해 최적화를 진행하였고, 크랜필드대학교⁽⁹⁾와 DLR⁽¹⁰⁾에서는 시간을 최소화하기 위해 각 휠에 배분되는 토크를 최적화를 통해 결정하였다. 시간을 최소화하는 최적화 외에 사리프대학교⁽¹¹⁾에서는 차량의 핸들링 퀄리티를 향상시키기 위해 각 타이어의 토크 분배를 최적화하여 요 모멘트를 최적화했고 다임러⁽¹²⁾에서는 핸들링 퀄리티를 향상시키기 위해 능동 조향각을 최적화하여 성능 향상의 한계를 파악했다.

본 논문은 기동성을 위한 후륜 조향 장치 평가를 위하여 단계 조향각 입력 시험을 진행하였다. 또한 최적화 기반 시뮬레이션을 통해 후륜 조향 장치의 성능을 평가 웹을 통해 제시하였다.

2. 차량 모델

본 논문에서는 후륜 조향 차량의 반응을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 서스펜션을 고려한 7 자유도 3차원 모델을 설계하였다. 이 차량 모델은 비선형 파체카 타이어 모델을 포함한다. 또한 완화거리 타이어 모델과 각 휠의 컴플라이언스를 고려하여 차량 실험 데이터와 비슷한 거동을 나타낸다.

2.1. 차량 모델

최적화 시뮬레이션에는 7 자유도 3차원 모델을 사용하였다.

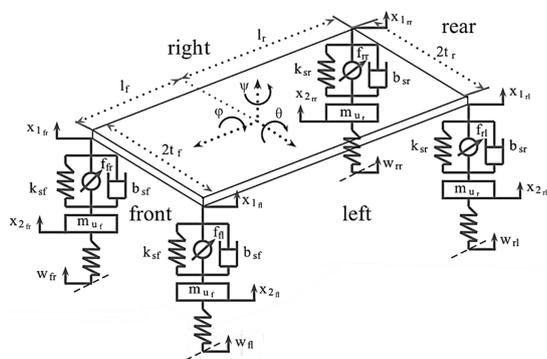


Fig. 1 완전 차량 모델

$$\begin{aligned} I_x \cdot \ddot{\phi} &= M_x - (I_z - I_y) \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\psi} \\ I_y \cdot \ddot{\theta} &= M_y - (I_x - I_z) \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \\ I_z \cdot \ddot{\psi} &= M_z - (I_y - I_x) \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m a_y &= F_{y,f} \cos(\delta_f) + F_{x,f} \sin(\delta_f) \\ &+ F_{y,r} \cos(\delta_r) + F_{x,r} \sin(\delta_r) \end{aligned} \quad (2)$$

3D 모델에서 차량의 횡방향 거동은 위와 같이 유도된다. I 는 관성 모멘트, M 은 토크, ϕ , θ , ψ 는 각각 피치 각도, 롤 각도, 요 각도를 나타낸다. 종방향 속도를 차량의 속도와 같다 가정하면 종방향 가속도는 다음과 같다.

$$a_y = v_x \cdot (\dot{\psi} + \dot{\beta}) = v_x \cdot \dot{\psi} + \dot{v}_y \quad (3)$$

후륜조향이 추가됨에 따라 차량의 횡방향거동에 영향을 준다.

2.2. 타이어 모델

각 축의 미끄러짐 각도 α_i 는 다음과 같이 정의된다. 전륜 조향 각도 δ_f 와 후륜 조향 각도 δ_r 는 미끄러짐 각도에 직접적으로 영향을 준다.

$$\alpha_f = \delta_f - \frac{l_f \cdot \dot{\psi} + v_y}{v_x}, \quad \alpha_r = \delta_r + \frac{l_r \cdot \dot{\psi} - v_y}{v_x} \quad (4)$$

파체카 타이어 모델을 적용하여 미끄러짐 각도에 따른 타이어의 횡방향 힘은 다음과 같다.

$$F_{y,i} = \mu \cdot F_{z,i} \cdot D \cdot \sin(C \cdot \arctan(B \cdot \alpha_i)) \quad (5)$$

B , C , D 는 타이어 곡선의 형태를 결정한다. M 은 도로의 마찰계수를 의미하고, F_z 는 타이어에 가해지는 하중을 나타낸다. 타이어에 수직방향 힘이 가해질 경우 횡방향 힘에 영향을 준다. 이 때에 타이어의 횡방향 힘은 다음과 같다.

$$F_y = F_{y0} \cdot \frac{\sqrt{(\mu F_z)^2 - F_x^2}}{\mu F_z} \quad (6)$$

F_{y0} 는 종방향 힘이 존재하지 않을 때 횡방향 힘을 의미한다. 미끄러짐 각도가 일정 하더라도 종방향 힘이 증가함에 따라 횡방향 힘이 감소함을 나타낸다. 타이어의 미끄러짐 각도는 완화거리 타이어(RLT) 모델을 적용하였으며, 아래 식과 같이 나타낸다.

$$\dot{\alpha}_f = \frac{v_x}{1.2} \cdot \left(\left(\delta_f - \arctan \left(\frac{v_y + l_f \cdot \gamma}{v_x} \right) \right) - \alpha_f \right) \quad (7)$$

각 휠에 컴플라이언스를 고려하였으며, 앞바퀴와 뒷바퀴의 컴플라이언스 계인이 다르다.

$$\begin{aligned} \delta_f &= \delta_{f0} - 0.00021 \cdot F_y \\ \delta_r &= \delta_{r0} - 0.000075 \cdot F_y \end{aligned} \quad (8)$$

F_y 는 차량에 가해지는 횡방향 힘을 나타내고, δ_{f0} 는 컴플라이언스가 고려 되지 않은 조향각을 나타낸다.

3. 개방 루프 제어

개방 루프 제어 차량의 후륜 조향각은 최적화 결과를 바탕으로 제어한다. 개방 루프 제어의 피드포워드 후륜 조향각은 정상상태에서 최적화 기반 후륜 조향각과 일치하도록 피드포워드 계인을 튜닝하였다. 최적화 기반 후륜 조향각은 정상상태의 차량에서 차체 미끄러짐 각도를 최소화시킨다. 피드포워드 계인에 따른 후륜 조향각은 다음과 같다.

$$\delta_r = K \cdot \delta_f \quad (9)$$

튜닝된 피드포워드 계인K는 속도에 따라 다르게 나타나며 Fig. 2와 같다.

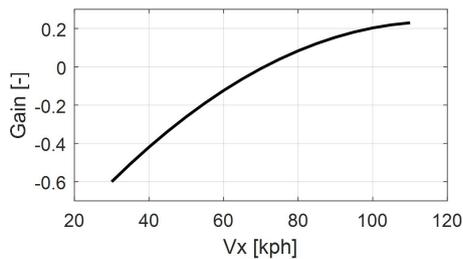


Fig. 2 피드포워드 계인

값이 음수면 역상 제어를, 양수면 동상 제어를 의미한다. 약 70 km/h를 기준으로 속도가 이보다 낮으면 역상 제어를, 높으면 동상 제어를 한다.

따라서 개방 루프 제어 차량은 정상상태에서는 최적화 기반 후륜 조향각과 거동이 일치하지만 과도 응답 상황에서는 거동에 차이가 있다.

4. 성능 지표

기동성에 대한 후륜 조향 장치의 성능 평가를 위해 단계 조향각 시험을 진행하여 각각의 시나리오에 대해 성능 지표를 선정하였다. 성능 지표는 차량의 과도 응답 특성과 정상 상태 응답 특성을 나타내도록 선정하였다. 또한 다양한 속도에서 후륜 조향 장치를 평가하기 위해 동일한 시나리오를 저속(30kph)과 고속(110kph)에 대하여 진행하였다.

4.1. 단계 조향각 입력 시험

ISO 7401기준에 따라서 시나리오를 다음과 같이 진행한다. 차량의 쓰로틀을 유지한 상태에서 $4m/s^2$ 의 횡방향 가속도를 발생시키는 조향각을 0.15초 이내에 입력한다. 동일한 횡방향 가속도를 발생시키기 위하여 속도에 따라 조향각 입력 값이 달라지게 된다. 차량의 기동성 평가를 위해 4가지 성능 지표를 선정했다. 오버슈트와 응답 시간 그리고 계인 지표는 요 레이트를 기준으로 측정한다. 응답 시간은 차량의 반응성을 평가한다. TB 인자는 식 (2)와 같으며 반응성과 정상상태에서의 차체 미끄러짐 각도의 상충 관계를 나타낸다.

$$Overshoot = \frac{\gamma_{max} - \gamma_{ss}}{\gamma_{ss}} \times 100 [\%] \quad (10)$$

$$t_{\gamma,resp} = t_{\gamma,max} - t_{\delta_{SWA},50\%} [sec] \quad (11)$$

$$TB = t_{\gamma,resp} \times \beta_{ss} [sec \cdot deg] \quad (12)$$

$$Yawrate\ gain = \frac{\gamma_{max}}{\delta_f} [1/sec] \quad (13)$$

5. 최적 솔루션

앞에서 정한 성능지표를 기준으로 성능 향상 한계를

과악하기 위해 후륜 조향각의 최적화를 진행했다. 차량의 제어 입력은 전륜 조향 각도, 후륜 조향각, 스로틀 총 3가지이다. 이 중 후륜 조향각을 제외한 전륜 조향 각도와 스로틀은 시나리오에 따라서 결정된다. 최적화 프로그램인 GPOPS-2⁽¹³⁾를 이용하여 주어진 시나리오에 대해 비용 함수를 최소화 시키는 후륜 조향각을 결정하는 최적화를 진행했다. 주어진 차량 모델에 스텝 조향각 입력 시나리오에 해당 하는 드라이버 인풋을 입력한다. 후륜 조향각에 따른 비용 함수를 계산하고 그 결과가 합당할 때까지 후륜 조향각에 따른 비용 함수와 컨트롤 인풋인 후륜 조향각 계산을 계속한다. 결과가 합당하면 그에 따른 최적 후륜 조향각 입력과 차량의 거동이 결정된다. 이 과정을 Fig. 3에 나타냈다.

5.1. 비용 함수

단계 조향각 시험의 성능 지표인 응답 시간과 Overshoot은 아래 식과 같이 정의한다.

$$i_{res} = 1 \cdot (\dot{\gamma} > 0) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{\gamma} \cdot (\dot{\gamma} > 0), \quad \dot{B} = \dot{\gamma} \\ \text{Overshoot} &= \frac{A-B}{B} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (15)$$

요 레이트의 미분값이 양수일 경우 응답 시간의 미분값이 1이 된다. 즉 요 레이트의 미분값이 양수인 시간을 의미한다. 성능지표의 응답 시간은 위의 값에서 조향각 입력이 50%에 이르는 시간을 빼면 된다. 오버슈트의 A는 요 레이트의 미분값이 양수일 때의 요레이트를 의미하고,

B는 요레이트를 의미한다. A와 B의 비율로 오버슈트를 정의했다. 요레이트의 미분값이 음수에서 다시 양수로 변할 수 있지만, 최적 제어를 통해 후륜 조향각을 결정할 경우, 위의 비율이 크지 않아 무시할 수 있다.

단계 조향각 입력 시험의 경우 비용 함수는 성능 지표의 오버슈트, 응답 시간과 횡방향 속도에 웨이팅 팩터를 곱하여 더한 값으로 아래와 같다.

$$J = \int_{t_i}^{t_f} (w_1 \cdot \text{Overshoot} + w_2 \cdot t_{res} + w_3 \cdot v_y^2) \cdot dt \quad (16)$$

세 지표를 곱할 경우 오버슈트가 0이 되는 경우가 발생하여 각 지표를 더하여 비용 함수를 결정했다.

5.2. 구속 조건

후륜 조향 시스템의 액츄에이터는 최대 4deg 조향 가능하고, 최대 조향 속도는 12deg/sec 이며, 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} |\delta_{r,max}| &= 4 \text{ deg} \\ |\dot{\delta}_{r,max}| &= 12 \text{ deg/sec} \\ \tau &= 0.06 \text{ sec} \end{aligned} \quad (17)$$

6. 시뮬레이션 결과

이 논문의 시뮬레이션은 Matlab과 GPOPS-2를 이용하여 진행되었다. 6자유도 현대자동차 체네시스 DH 차량 모델을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 성능 비교를 위해 기본 차량과 최적화 기반의 후륜 조향 차량,

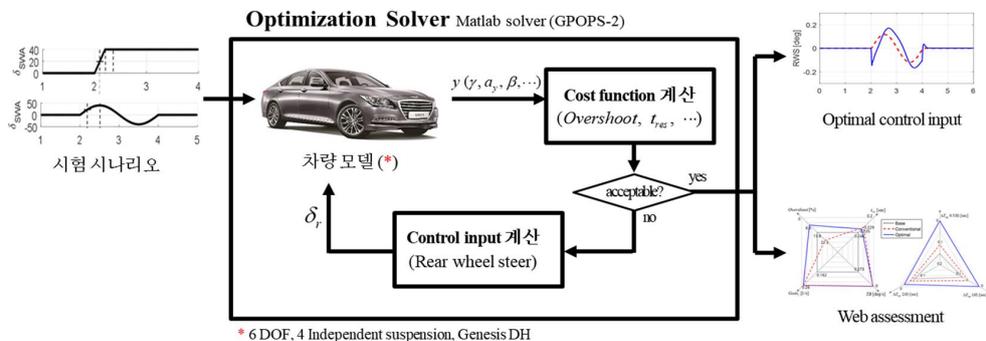


Fig. 3 후륜 조향 차량의 성능 분석을 위한 오프라인 최적화 구성

그리고 피드포워드 후륜 조향 차량을 비교했다. 기본 차량과 각각의 후륜 조향 차량의 성능을 평가표를 통해 평가하였다.

6.1. 단계 조향각 입력

후륜 조향 장치 차량의 경우 기본 차량 대비 오버슈트와 TB 인자 지표에 대해서 향상되었다. 저속의 경우 요레이트 게인 값이 증가한 대신 응답 시간 성능이 하향되었고 이는 Fig. 4와 같다. 고속에서는 반대의 양상을 나타내었고 이는 Fig. 5와 같다.

단계 조향각 시험에서 오버슈트, 응답 시간, TB 인자는 평가 웹 상에서 바깥 쪽으로 갈수록 성능이 높고 원점에 가까울수록 성능이 낮음을 의미한다. 요레이트 게인 지표의 경우 성능이 높고 낮음이 아닌 차량의 핸들링 특성을 나타낸다. Fig. 6은 평가표를 나타낸다. Base의 경우 기존의 전륜만 조향하는 차량을 나타낸다. Conventional 차량은 피드포워드 게인에 따라서 개방 루프 제어하는 차량을 나타낸다. Optimal 차량은 5장의 최적화 계산에 의한 차량의 거동을 나타낸다.

같은 횡방향 가속도를 나타내기 위해서 후륜 조향 각을 컨트롤 입력으로 이용하는 경우와 그렇지 않은 경우, 스티어링 휠 각도가 다르게 나타난다.

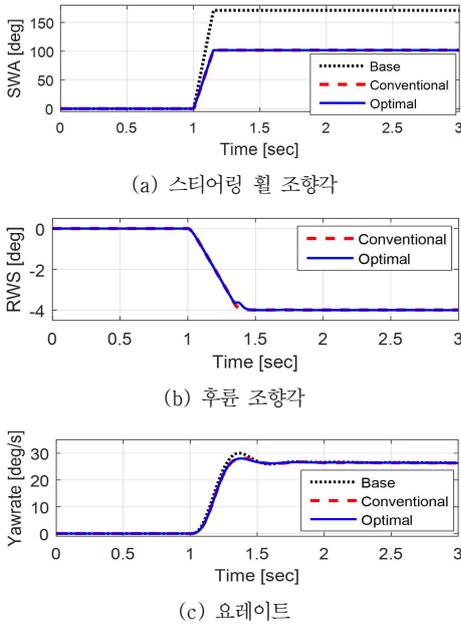


Fig. 4 단계 조향각 시험: 30kph

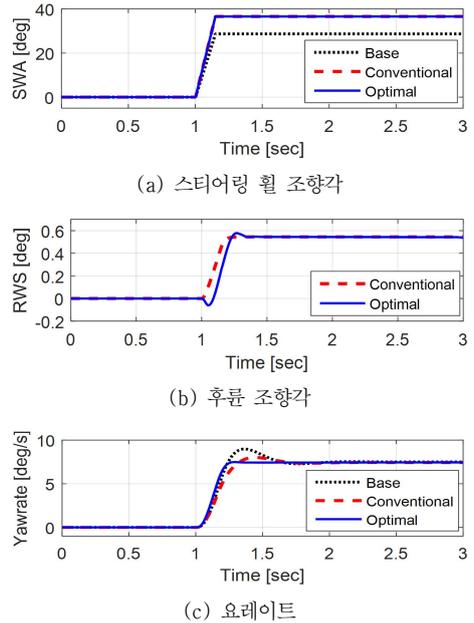


Fig. 5 단계 조향각 시험: 110kph

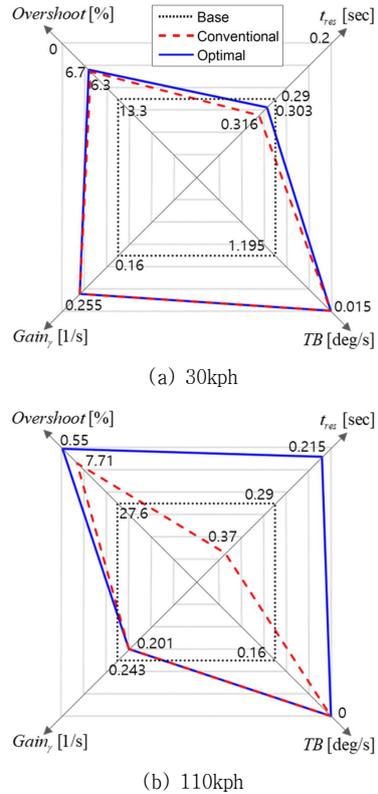


Fig. 6 평가 웹: 단계 조향각 시험

7. 결 론

본 연구에서는 기동성 향상을 위한 후륜 조향 차량의 최적 제어를 제시하였다. 최적화 계산을 통하여 후륜 조향 차량의 성능향상 한계를 파악했다. 7자유도 차량 모델을 설계하고, 최적 제어를 위해 성능 지표와 이를 최적화하는 비용 함수를 설정했다.

최적화 기반의 후륜 조향각은 오프라인 최적화 기법을 통해 비용 함수를 최소화하도록 결정되었다. 피드포워드 후륜 조향각은 정상상태에서 최적화 기반의 후륜 조향각과 일치하도록 피드포워드 게인을 튜닝하였다.

이 논문에서는 단계 조향각 입력 시험을 통해 차량의 과도 응답 특성과 정상 상태 응답 특성을 나타내는 평가 지표를 산정하였다. 후륜 조향 시스템을 제안된 평가 방법에 따라 평가하였고 최적화 기법을 이용하여 후륜 조향 시스템의 성능 향상 한계를 파악하였다. 연구를 통해 후륜 조향 차량의 기동성 성능이 기본 차량에 비해 향상됨을 알 수 있다.

후 기

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016M1B3A1A02937506).

참고문헌

- (1) Data, S. and F. Frigerio., 2002, "Objective evaluation of handling quality", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 216.4, pp. 297~305.
- (2) Wagner, S., et al., 2017, "Design and assessment of optimal feedforward control for active steering configurations in passenger vehicles", Vehicle system dynamics 55.8, pp. 1123~1142.
- (3) Schuller, J., Haque, I., and Eckel, M., 2002, An approach for optimisation of vehicle handling behaviour in simulation. Vehicle System Dynamics, 37(sup1), 24~37.
- (4) Laine, Leo, Sogol Kharrazi, and Nicolas Dela., 2008, "Proposal for using sine with dwell on low friction for the evaluation of yaw stability for heavy vehicle combinations", Vehicular Electronics and Safety, 2008. ICVES 2008. IEEE International Conference on. IEEE, 2008.
- (5) Miura, Yumiko, Hiroshi Tokutake, and Katsuhiko Fukui., 2007, "Handling qualities evaluation method based on actual driver characteristics", Vehicle System Dynamics 45.9, pp. 807~817.
- (6) Ishio, Jun, et al., 2008, "Vehicle-handling quality evaluation through model-based driver steering behaviour", Vehicle System Dynamics 46.S1, pp. 549~560.
- (7) Perantoni, G. and Limebeer, D. J., 2015, Optimal control of a formula one car on a three-dimensional track—Part 1: Track modeling and identification. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 137(5), 051018.
- (8) Limebeer, D. J. and Perantoni, G., 2015, Optimal control of a formula one car on a three-dimensional track—Part 2: Optimal control. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 137(5), 051019.
- (9) Smith, E. N., Velenis, E., Tavernini, D., and Cao, D., 2018, Effect of handling characteristics on minimum time cornering with torque vectoring. Vehicle System Dynamics, 56(2), 221~248.
- (10) de Castro, R., Tanelli, M., Araújo, R. E., and Savaresi, S. M., 2014, Minimum-time manoeuvring in electric vehicles with four wheel-individual-motors. Vehicle system dynamics, 52(6), 824~846.
- (11) Esmailzadeh, E., Goodarzi, A., and Vossoughi, G. R., 2003, Optimal yaw moment control law for improved vehicle handling. Mechatronics, 13(7), 659~675.
- (12) Wagner, S., Schilling, J. M., Braun, J. L., and Prokop, G., 2017, Design and assessment of optimal feedforward control for active steering configurations in passenger vehicles. Vehicle system dynamics, 55(8), 1123~1142.
- (13) Patterson, M. A. and Rao, A. V., 2014, GPOPS-II: A MATLAB software for solving multiple-phase optimal control problems using hp-adaptive Gaussian quadrature collocation methods and sparse nonlinear programming. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 41(1), 1.