

자율주행 경로 추종 성능 개선을 위한 차량 조향 시스템 특성 분석

김창희* · 이동필* · 이경수**,†

Vehicle Steering System Analysis for Enhanced Path Tracking of Autonomous Vehicles

Changhee Kim*, Dongpil Lee*, Kyongsu Yi**,†

Key Words : Autonomous driving(자율 주행), Steering control(조향 제어), Stability(안정성), Path tracking(경로 추종)

ABSTRACT

This paper presents steering system requirements to ensure the stabilized lateral control of autonomous driving vehicles. The two main objectives of a lateral controller in autonomous vehicles are maintenance of vehicle stability and tracking of the desired path. Even if the desired steering angle is immediately determined by the upper level controller, the overall controller performance is greatly influenced by the specification of steering system actuators. Since one of the major inescapable traits that affects controller performance is the time delay of the steering actuator, our work is mainly focused on finding adequate parameters of high level control algorithm to compensate these response characteristics and guarantee vehicle stability. Actual vehicle steering angle response was obtained with Electric Power Steering (EPS) actuator test subject to various longitudinal velocity. Steering input and output response analysis was performed via MATLAB system identification toolbox. The use of system identification is advantageous since the transfer function of the system is conveniently obtained compared with methods that require actual mathematical modeling of the system. Simulation results of full vehicle model suggest that the obtained tuning parameter yields reduced oscillation and lateral error compared with other cases, thus enhancing path tracking performance.

1. 서론

운송 시스템 자율화에 관한 연구는 국내외에서 지속적으로 진행되어 왔으며 그 대표적인 분야는 자율주행 기술이라고 할 수 있다.⁽¹⁾ 연구자마다 분류 방법에 다소 차이가 있지만 자율주행 알고리즘은 크게 인지, 측위, 판단, 제어의 네 단계로 구성된다.⁽²⁾ 인지와 측위 알고리즘은

차량에 부착된 레이더와 라이다 센서를 이용해 주변 환경에 대한 정보를 수집하며 GPS 정보를 이용해 차량의 현재 위치를 파악한다. 이렇게 얻은 정보를 이용해 판단 단계에서는 차량의 목표 경로와 속도를 결정한다. 마지막으로, 결정된 거동을 실제 차량이 추종할 수 있도록 입력을 가하는 단계가 제어에 해당한다. 차량의 횡 방향 거동은 조향 핸들을 통해 제어할 수 있으며, 횡 방향 제어 알고리즘은 상위 제어와 하위 제어로 나뉜다.

상위 제어기는 차량 속도와 위치 및 이동하고자 하는 미래 경로에 기반하여 목표 조향 각도를 결정한다. 탑승한 운전자의 조향 핸들 조작 없이 알고리즘에 의해 자체

* 서울대학교 기계항공공학부, 학생

** 서울대학교 기계항공공학부, 교수

†교신저자 : kyi@snu.ac.kr

E-mail : andykim0531@snu.ac.kr

적으로 주행해야 하는 자율주행 차량의 경우 조향 시스템의 제어는 별도의 작동 장치에 의해 이루어지는데, 이 단계는 하위 제어로 구분할 수 있다.

사용하는 제어 알고리즘의 기법을 정하면 이에 따라 튜닝해야 하는 변수들이 존재한다. 가장 대표적인 예인 PID 제어의 경우 각 오차에 곱해지는 gain을 지정해 주어야 하며 비선형 제어 기법인 sliding mode control에서는 feedforward 및 feedback 항의 계수들을 결정해야 한다. 2장에서 소개할 pure pursuit 조향 제어 방법에서는 튜닝 변수로 preview distance를 이용하는데⁽³⁾, 이러한 세부 변수들의 값은 시스템 모델링만을 이용하여 도출해 내기 어려운 부분이 많기 때문에 반복되는 실험을 거쳐 얻어지는 경우가 많다. 따라서 적용 가능한 대략적인 변수 범위를 이론적으로 구할 수 있다면 세부 튜닝 작업에 필요한 시간과 노력을 줄일 수 있다.

목표 조향 각도를 계산하고 이를 안정적으로 추종할 수 있도록 하는 제어기 설계에 관한 연구는 꾸준히 진행되어 왔지만 아직까지 유일무이한 정답이라고 여겨지는 최적의 방법은 존재하지 않는다. 본 연구에서는 pure pursuit를 이용한 횡 방향 상위 제어기의 튜닝 변수를 결정하는데 있어서 차량과 조향 시스템의 특성을 이용하는 방법을 제시하였고 그 적합성을 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 이용해 검증해 보았다.

2. 횡 방향 제어 시스템

자율주행 차량이 목표 경로를 입력 받아 실제 조향 제어가 이루어져 차량의 거동이 발생하기까지의 과정은 Fig. 1의 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

2.1. High Level Controller

목표 경로를 추종하기 위한 Steering Wheel Angle (SWA)을 계산하는 path tracking algorithm은 블록 다이어그램의 상위 제어에 해당한다.

상위 제어에는 pure pursuit 방법을 사용하였으며 그

원리는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 경로에 대한 횡 방향 오차 및 방위각 오차를 이용하는 error feedback 제어와 다르게 pure pursuit 방법은 차량의 현재 위치에서 목표하고자 하는 경로 상 지점을 순간마다 정의하여 추종해야 하는 전륜 조향 각도를 계산한다. Tire slip angle이 충분히 작다고 가정하면 일정한 조향 각도를 인가했을 때 차량은 원호를 그리며 운동하고 그 회전 반경은 다음과 같다.⁽³⁾

$$R = \frac{1}{2} \frac{L_p \cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{L_p}{2 \tan \alpha} \quad (1)$$

식 (1)에서 R 은 차량의 순간 회전 반경, L_p 는 경로 상 목표 지점을 결정하기 위한 preview distance를 나타내며 α 는 원호 경로 중심각의 절반에 해당하는 각도이다. 조향 각을 그대로 유지하며 목표 지점에 차량의 후륜 중심이 위치할 수 있도록 하는 경로는 유일하게 정해지며 이 때의 전륜 조향 각은 아래와 같다.

$$\delta = \frac{L_w}{R} = \frac{2L_w \tan \alpha}{L_p} \quad (2)$$

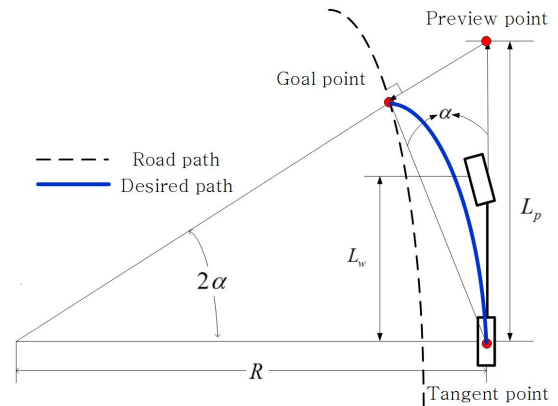


Fig. 2 Pure Pursuit path tracking method

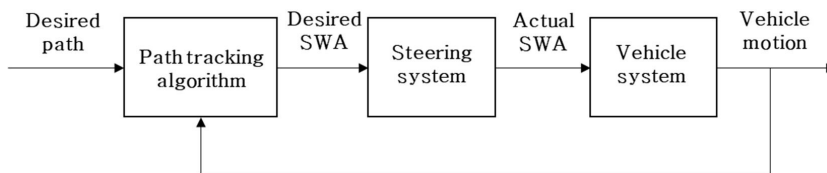


Fig. 1 Block diagram of lateral control structure including vehicle system

식 (2)에서 L_w 는 차량의 wheelbase를 나타낸다. a 값의 경우 preview point와 차량의 경로 상 위치에 따라 변하는 값이므로 실질적으로는 L_w 와 L_p 두 변수에 의해 조향 각도가 결정된다. L_w 의 경우 차량 자체 특성에 의해 하나로 정해지는 값이므로 상위 제어기 설계에 있어서 튜닝이 필요한 변수는 L_p 가 유일하다고 볼 수 있다.

2.2. Low Level Controller

계산된 목표 조향 각도를 조향 시스템에 인가하면 하위 제어를 통해 차량의 실제 조향 각 반응을 얻는다. 하위 제어기는 조향 시스템에 부착된 모터 등의 액추에이터를 제어하여 목표 조향 각도를 추종하는 역할을 한다. 대표적으로는 Electric Power Steering(EPS) 시스템의 rack 또는 column에 부착된 모터를 이용하는 경우가 있는데, 입력 모터 토크에 대한 조향 각도의 동역학적 관계는 다음과 같이 기술할 수 있다.⁽⁴⁾

$$J_{eq} \ddot{\theta}_{sw}(t) + B_{eq} \dot{\theta}_{sw}(t) + K_{eq} \theta_{sw}(t) = T_{mot}(t) - T_{fric} \text{sign}(\dot{\theta}_{sw}) \quad (3)$$

식 (3)에서 J_{eq} , B_{eq} , K_{eq} 는 각각 조향 시스템의 equivalent inertia, equivalent damping, equivalent stiffness를 나타내며 θ_{sw} 는 실제 조향 각도를 의미한다. T_{mot} 와 T_{fric} 은 모터에 의해 인가된 토크와 조향 시스템의 마찰에 의한 토크 손실을 나타내는데, 마찰력은 운동 방향과 반대이고 크기가 일정하므로 각속도 부호와 마찰력 크기의 곱으로 표현된다.

조향 시스템의 세부적인 특성들을 알고 있는 상태에서 목표 조향 각을 추종한다면 식 (3)을 통해 필요한 입력 토크를 계산해 낼 수 있고 결과적으로 desired SWA에 대한 actual SWA 반응을 알 수 있을 것이다. 하지만 모든 차량의 정확한 시스템 제원과 마찰에 대한 정보를 얻는 것은 어려운 일이며, 가능하다 하더라도 많은 시간과 노력이 필요하기 때문에 상당히 비효율적인 작업이다. 따라서 본 연구에서는 시스템 파라미터를 직접 구하는 대신 액추에이터 실험을 통해 목표 조향 각도와 실제 조향 각도 사이의 전달함수를 추정하는 System Identification 방법을 이용하였다.

3. System Identification

MATLAB System Identification Toolbox는 시간 축

Table 1 Steering actuator test scenario

Input	Step steering		
Vehicle speed	20 km/h	40 km/h	60 km/h
SWA magnitude	90 deg	45 deg	25 deg

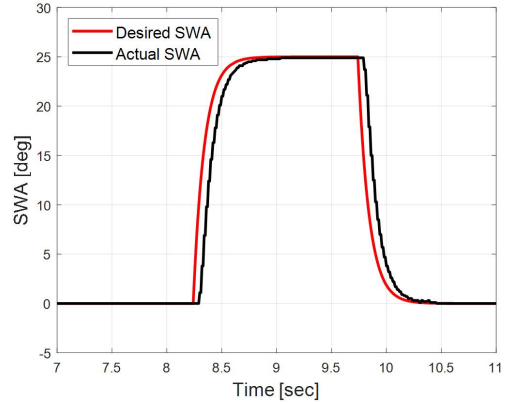


Fig. 3 Result of 25-degree step steer test at 60 km/h vehicle speed

에서의 입력과 출력 데이터가 주어지면 해당 시스템의 전달함수를 계산하는 기능을 제공한다. 분석할 데이터 취득을 위해 실제 현대자동차 Solati 차량과 이 차량의 EPS 조향 장치를 이용해 실험을 진행하였다. Table 1에 도시한 바와 같이 정속 주행 상황에서 step steering 입력을 인가하여 실험을 진행하였고, 취득한 데이터 중 하나를 시간 축에 나타낸 결과는 Fig. 3과 같다.

각 실험 데이터에 대하여 time shift delay가 존재하는 1차 전달 함수를 얻고 계수들의 평균 값을 취한 조향 시스템의 전달 함수는 다음과 같다.

$$\frac{\theta_{actual}(s)}{\theta_{desired}(s)} = \frac{55.224}{s + 55.416} e^{-0.05s} \quad (4)$$

4. Preview distance 선정

앞서 2.1 절의 식 (2)를 살펴 보면 preview distance L_p 가 상수 형태인 것처럼 보이지만 실제로는 속도에 따라 변화하는 값으로 두는 것이 적절하다. Preview point를 잡는다는 것은 현재 위치보다 앞에 존재하는 경로 정보를 받아오는 의미를 갖는데, 실제 운전자의 주행 습관을 생각해 보면 속도가 빨라질 경우 더 먼 곳을 목표점으로 하

여 수행한다. 즉, preview distance를 주행 속도에 비례 하도록 설정하면 이 값은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$L_p = k \cdot v_x \quad (5)$$

v_x 는 차량의 종 방향 속도이며, preview gain k 는 시간 의 차원을 갖는다. k 가 작을 경우 횡 방향 운동의 반응 속 도는 빨라질 수 있겠지만 외란에 의한 진동 및 발산의 위 험이 있다. 반대로 k 가 커지면 안정성 확보에는 장점이 있지만 수렴 속도가 느려 제어기 성능 면에서는 단점으로 작용한다. 따라서 적절한 preview gain을 선정하는 것이 필요한데, 모든 차량에 대하여 직접 실험을 통해 이 값을 찾는 것은 효과적인 방법이 될 수 없으며 이론적 의미 또 한 찾기 어렵다. 하지만 횡 방향 거동에 영향을 미치는 시 간 지연 효과 및 조향 시스템 특성을 이용하면 안정성을 만족시키는 k 의 조건을 찾을 수 있다.⁽⁵⁾

식 (4)에서 구한 조향 시스템의 입 출력 전달 함수를 다음 식 (6)과 같이 변형하면 0.018 s의 시간 상수 T 와 0.05 s의 시간 지연 τ 을 갖는 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{actual}(s)}{\theta_{desired}(s)} &= \frac{0.9965}{0.018s + 1} e^{-0.05s} \\ &\cong \frac{1}{Ts + 1} e^{-\tau s} \end{aligned} \quad (6)$$

또한, 자율주행 상황에서 인지, 측위, 판단을 포함한 전 체 모듈이 한 loop 동안 동작하는 데에는 약 150 ms의 연산 시간이 필요하므로 총 시간 지연 τ_{tot} 은 약 0.20 s로 설정할 수 있다.⁽⁶⁾

차량 주행 속도 및 시간 상수를 이용해 preview distance 와 지연 시간을 무차원화하면 식 (7)과 같은 두 무차원 변수 L^* 와 τ^* 를 얻을 수 있는데, 지연 시간에 따른 횡 방향 안정성을 만족하는 최소 preview distance의 관계는 Fig. 4와 같다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} L^* &= \frac{L_p}{v_x T} = \frac{k}{0.018} \\ \tau^* &= \frac{\tau_{tot}}{T} = \frac{0.20}{0.018} \cong 11.1 \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 4에 도시한 L^* 와 τ^* 의 관계에 선형 보외법(linear extrapolation)을 적용하여 $\tau^* = 11.1$ 일 때의 k 값을 구

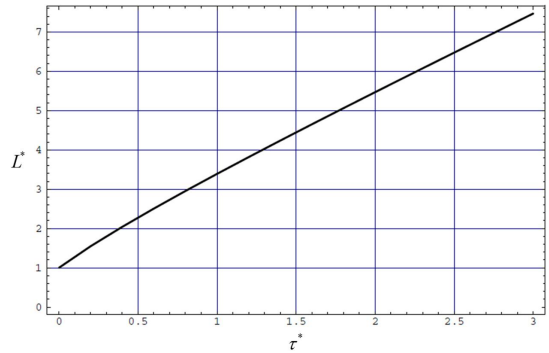


Fig. 4 Non-dimensional minimum stable preview distance

하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} L^*(\tau^*) &= L^*(0) + \frac{\Delta L^*}{\Delta \tau^*} \tau^* \\ &\cong 1 + 2.247 \tau^* \\ \text{from (7), } \frac{k}{0.018} &= 1 + 2.247 \cdot 11.1 \\ \therefore k &= 0.467 \text{ s} \end{aligned} \quad (8)$$

즉, m/s의 단위로 표현된 v_x 에 대하여 pure pursuit 제어 방법이 안정적으로 목표 경로를 추종하려면 최소 0.467 s 이상의 preview gain 이 필요하다는 조건을 얻는다.

5. 시뮬레이션 결과

안정성 조건을 만족하는 preview gain을 적용했을 때 의 차량 거동을 다른 값을 사용한 경우와 비교하기 위해 path tracking 시뮬레이션을 진행하였다. 경로 추종 및 조 향 제어 알고리즘은 MATLAB Simulink로 구현하였고 차 량 모델은 CarSim을 사용하였다. 시간 지연 효과와 조향 시 스템 반응 효과 구현을 위해 CarSim에 입력되는 steering wheel angle 신호의 전 단계에 0.15 s zero-order hold 와 식 (4)의 전달함수 블록을 추가하였다. 목표 경로는 Fig. 5에 도시한 것과 같이 직선 주로와 회전 반경 50m의 90도 좌회전 구간을 연결해 제작하였다. 주행 시나리오 는 초기 횡 방향 오차가 없는 상태에서 30km/h 의 일정 한 종 방향 속력을 유지하도록 설정하였다. Preview gain 을 각각 0.3, 0.4, 0.6으로 설정하여 시뮬레이션을 진행했 을 때의 시간에 대한 조향 각도, 횡 방향 오차, 방위각 오

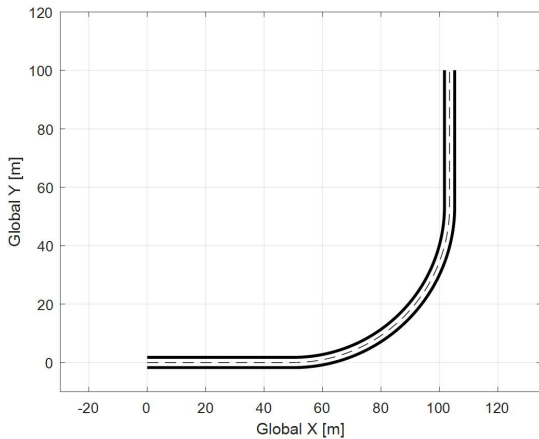
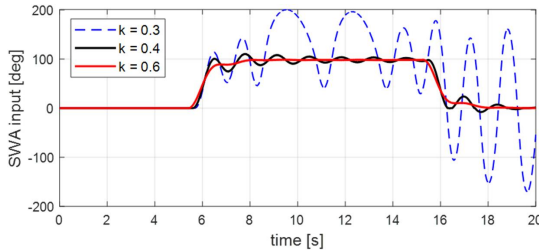
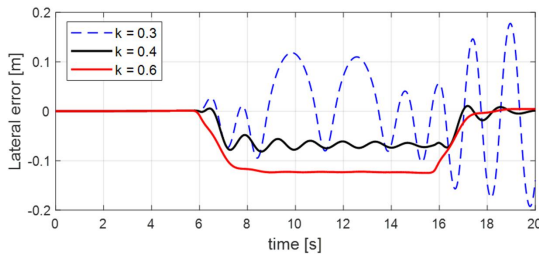


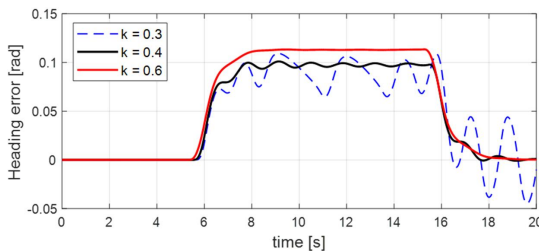
Fig. 5 Reference path for pure pursuit simulation



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Path tracking simulation result (a) steering angle input (b) lateral error (c) heading error for three different preview gain values

차는 Fig. 6에 도시하였다.

Preview gain이 0.3인 경우 횡 방향 오차가 발산하며 경로 추종을 정상적으로 하지 못하는 현상이 나타났고, k 값이 커짐에 따라 조향 각도와 오차의 진동이 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. k 값이 0.4 일 때와 0.6 일 때를 비교해 보면 전자의 경우 회전 구간에서의 steady state error 크기가 후자에 비해 작지만 진동이 남아 있다. 따라서 횡 방향 오차가 작기 때문에 path tracking 성능은 이때가 최적인 것으로 생각할 수 있겠지만 제어기 안정성과 강건성 측면에서는 부족한 점이 있는 값으로 판단할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 차량의 조향 시스템 특성을 비교적 간단하고 효과적으로 구할 수 있는 system identification에 대해 소개하였고 이를 통해 구한 시스템의 시간 지연과 시간 상수를 pure pursuit method에서의 preview gain 값 결정에 사용하는 방법을 제시하였다. 또한 계산된 preview gain 값이 타당한지 판단하기 위해 서로 다른 preview gain을 설정해 시뮬레이션을 진행하였으며 이 값이 일정 값 보다 작은 경우 경로 추종이 불가능한 수준의 오차와 진동이 발생함을 확인하였다.

식 (8)의 preview gain 값이 pure pursuit 방법을 사용하는 제어기가 안정하도록 하는 정확한 참 값을 제공하지는 않는다. 하지만 이 값 근방을 전후로 path tracking 시뮬레이션 결과가 서로 다른 양상을 보이기 때문에 차량과 조향 시스템의 특성을 분석하면 제어기에 사용 가능한 preview gain 값의 범주를 알 수 있다는 점에서 의의를 갖는다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 2018년 교통물류연구사업(18TLRP-B146733-01, 자율주행기반 대중교통시스템 실증 연구)의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Jung, C. H., Kim, H. K., Son, Y. S., Lee, K. W., and Yi, K. S., 2014, "Parameter Adaptive Steering

- Control for Autonomous Driving”, 2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 1462~1467.
- (2) 조아라, 정용환, 임형호, 이경수, 2019, “자율주행 버스의 종방향 제어를 위한 질량 및 중 경사 추정기 개발”, 2019 한국자동차안전학회 춘계학술대회.
- (3) Snider, J. M., 2009, “Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking”, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.
- (4) Lee, D. P. and Yi, K. S., 2017, “Disturbance Adaptive Steering Wheel Torque Control for Enhanced Path Tracking of Autonomous Vehicles”, 2017 American Control Conference (ACC), pp. 2321~2326.
- (5) Heredia, G. and Ollero, A., 2007, “Stability of Autonomous Vehicle Path Tracking with Pure Delays in the Control Loop”, *Advanced Robotics*, Vol. 21, No. 1~2, pp. 23~50.
- (6) Chae, H. S., Lee, M. S. and Yi, K. S., 2017, “Probabilistic prediction based automated driving motion planning algorithm for lane change”, 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), pp. 1640~1645.