

전동식 조향 장치의 성능 평가를 위한 신경 근육계 기반 운전자 모델 개발

이성현* · 이동필* · 이재풍* · 채흥석* · 이명수** · 이경수*

Development of Human Driver Model based on Neuromuscular System
for Evaluation of Electric Power Steering System

Sunghyun Lee*, Dongpil Lee*, Jaepoong Lee*, Heungseok Chae*,
Myungsu Lee**, Kyongsu Yi*

Key Words : Adaptive steering control(적응식 조향제어), Driver model(운전자 모델), Neuromuscular system(신경 근육계), Torque output model(토크 출력 모델)

ABSTRACT

This paper presents a lateral driver model with neuromuscular system to evaluate the performance of electric power steering (EPS). Output of most previously developed driver models is steering angle. However, in order to evaluate EPS system, driver model which results in steering torque output is needed. The proposed lateral driver model mainly consists of 2 parts: desired steering angle calculation and conversion of steering angle into steering torque. Desired steering angle calculation part results in steering angle to track desired yaw rate for path tracking. Conversion of steering angle into torque is consideration with neuromuscular system. The proposed driver model is investigated via actual driving data. Compared to other algorithms, the proposed algorithm shows similar pattern of steering angle with human driver. The proposed driver can be utilized to efficiently evaluate EPS system in simulation level.

1. 서론

횡 방향 운전자 모델은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 모델링이 이루어진다는 점에서 실차 실험보다 비용적 측면에서 유리하다. 따라서 최근 몇 년간, 실제 운전자의 운전 패턴을 모사하기 위한 다양한 횡 운전자 모델이 개발되어 왔다.^{(1),(2)}

일반적인 횡 방향 인간 운전자 모델은 시각과 청각 등의 감각을 활용해 주변 환경의 정보 습득, 습득한 정보를 기반으로 한 의도 조향각 결정 및 팔 근육을 통한

실제 조향각의 입력으로 이루어져 있다.⁽³⁾ 대부분의 인간 운전자 모델에서는 실제 운전자의 조향 휠에 가해지는 토크가 고려되지 않는다.

본 논문에서는 출력이 토크인 운전자 모델을 개발하여 다양한 변수의 전동 조향 장치의 성능평가에 시뮬레이션 단계로 사용될 수 있게 하는 것이 목적이다. 토크 출력 기반 운전자 모델을 상위제어기와 하위제어기로 나누었으며, 시뮬레이션 결과는 실제 차량의 조향각, 조향 토크 값과 비교했다.

2. 인간 운전자 모델

본 논문의 인간 운전자 모델은 Fig. 1과 같이 상위제

* 서울대학교 기계항공공학부

** 한국교통안전공단

E-mail : shleetop123@snu.ac.kr

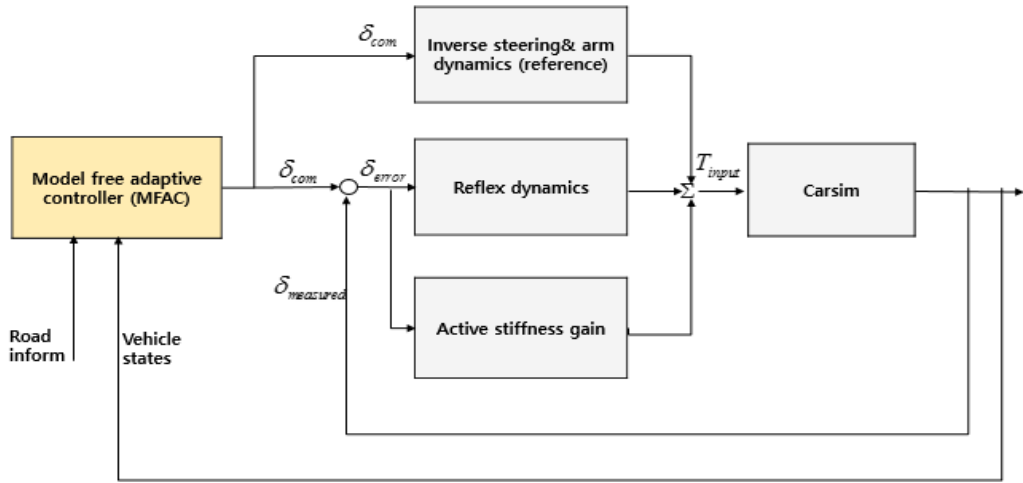


Fig. 1 Lateral driver model block diagram

어기인 목표 요 속도를 기반으로 한 목표 조향각 결정단계와 하위제어기인 각-토크 변환 근육모델로 이루어져 있다. 근육 모델의 경우 시간 지연과 같은 근육의 운동 과정을 수학적으로 모델링 하여 각도를 토크로 전환하게 되어있다.

2.1. 상위 제어기

상위 제어기의 경우 목표 요 속도를 추종하기 위한 의도 조향각 결정 방법을 차용했다.⁽⁴⁾ 전체적인 구조는 Fig. 2 와 같이 목표 요(Yaw) 속도 결정과 목표 요 속도 추종을 위한 조향각 결정 두 단계로 나뉘어 진다.

목표 궤적은 다음과 같이 실제 도로궤적과의 횡 방향 오차의 제곱의 합에 해당하는 목표 지수 J를 최소화 하는 이차곡선의 형태로 설정했다

$$J = \min \int_0^L (L_p(t) - x) e_y(x)^2 dx \quad (1)$$

목표 궤적을 추종하기 위한 차량의 운동이 정상 상태라는 가정 하에서 요 속도를 곡률과 차량의 종 속도를 활용하여 다음과 같이 계산 한다.

$$\gamma_{des} = \frac{v_x(t)}{R_{des}(t)} = v_x(t) \kappa_{des}(t) = v_x(t) \frac{f_{des}''(x)}{\{1 + f_{des}'(x)^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

목표 조향각의 결정은 실제 차량의 요 속도가 위와 같이 계산된 목표 요 속도를 추종할 수 있게끔 요 속도 이득(Yaw rate gain)을 기반으로 한 적응 조향 제어(Adaptive steering control) 기법을 활용했다. 요 속도 이득은 차량 모델의 불확실한 변수들의 합이며, 요 속도 오차에 비례한 변화율을 보이도록 설정하였다.

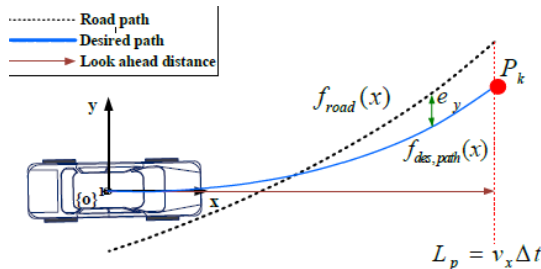


Fig. 2 Desired path decision

$$\delta_{sw}(t) = \frac{1}{\hat{\lambda}_{y.g}(t)} (\gamma_{des}(t) + \tau \dot{\gamma}_{des}(t)) \quad (3)$$

$$\frac{d\hat{\lambda}_{y.g}(t)}{dt} = -k_1 \delta_f(t) (\gamma_{des}(t) - \gamma(t)) \quad (4)$$

상위 제어기의 전체적인 블록 다이어그램은 Fig. 3

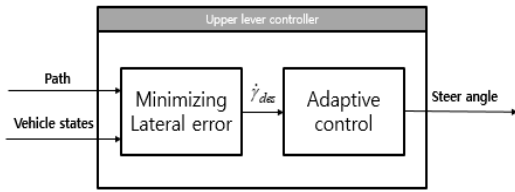


Fig. 3 Upper level controller diagram

과 같다. 차량의 상태 변수들과 목표 궤적을 기반으로 최적의 요 속도를 결정한 뒤, 목표 요 속도를 추종하기 위한 조향각을 계산한다. 이 조향각은 Fig. 1 과 같이 하위 제어기인 신경 근육계 모델에 입력으로 들어간다.

2.2. 하위 제어기

하위 제어기는 상위 제어기에서 결정된 목표 조향각을 추종할 수 있도록 그에 맞는 입력 조향 토크를 계산한다. 실제 운전자가 목표 궤적을 추종하는 과정에서 팔 근육을 통해 조향 휠에 토크를 가하며, 그 과정을 수학적으로 모델링한 신경 근육계를 하위 제어기로 채택하였다.⁽⁵⁾

신경 근육계는 Fig. 1 과 같이 팔 및 조향 휠의 역동역학, 근육 이완 작용, 근섬유 탄성에 의한 조향 토크 결정으로 나뉘어 있다.

팔 및 조향 휠의 역동역학을 기반으로 한 토크 결정은 운전자가 사전에 조향계의 동적 특성을 인지한 체 특정 각도에 해당하는 토크를 주는 운전자의 성향을 드러낸다. 팔 및 조향 휠의 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$(J_{dr} + J_{st})\ddot{\theta}_{sw} + (B_{dr} + B_{st})\dot{\theta}_{sw} + (K_{dr} + K_{st})\theta_{sw} = T_m - \frac{M_T}{n_{sw}} \quad (5)$$

J = Moment of inertia, st = Steering wheel

B = Damping coefficient, dr = Driver's arm

κ = Stiffness

T_m = Driver's steering torque input

M_T = Aligning moment of tire

n_{sw} = Gear ratio

위 식에서 오른쪽 항의 첫 번째 값이 운전자에 의해 가해지는 휠 토크이다.

근육 이완 동역학은 근섬유와 척추 내의 알파 모터

뉴런의 상호작용에 의한 토크생성을 하는 부분이다. 척추 근섬유의 길이와 속도의 변화를 감지하고 감지된 오차 신호를 피드백 형식으로 알파 모터 뉴런에 송신한다. 이에 따라 감마 모터 뉴런이 활성화 되어 근섬유의 길이를 조절함으로써 결과적으로 근육에 의해 토크가 형성된다. 이러한 과정을 수식적으로 정리하면 다음과 같다.

$$H_r(s) = \frac{\omega_c(sB_r + K_r)e^{-s\tau_r}}{s + \omega_c} \quad (6)$$

ω_c = Cut-off frequency of muscle fiber

B_r = Reflex damping

K_r = Stiffness

τ_r = Time delay

위 함수가 근육의 이완 작용에 해당하는 주파수 영역 전달 함수이다.

Active stiffness gain은 근육의 수축이완과 별개로 근섬유의 길이 변화에 따른 근육의 토크 생성에 해당하는 부분이다.

$$T = K_{active}\delta_{error}, K_{active} : \text{active stiffness gain} \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 개발한 신경 근육계 기반 운전자 모델을 Carsim/Simulink 환경에서 목표 궤적을 수행하는 시뮬레이션을 수행하였다. 목표 궤적은 실제 고속도로의 센터 라인으로 삼았으며, 시뮬레이션 결과들은 실차 실험을 통해 얻은 결과 값들과 비교되었다. 실차 실험은 K7 차종을 사용하였으며, Fig. 4 의 붉은색 선이 실제 차량의 주행 궤적이다. Carsim의 차량 모델은 기본적으로 제공되는 E-Class sedan에서 특정 변수들을 실차 수치에 맞춰 값을 변화시켰다. 시뮬레이션의 차량 궤적은 Fig. 4 의 파란색 실선이다. 시뮬레이션과 실차 실험 모두 속도는 동일하게 유지했다. 종 방향 속도는 Fig. 5 와 같다. 본 시뮬레이션의 목적은 같은 목표 궤적과 동일한 종 방향 속도를 유지한 상황에서 시간에 따른 조향 각과 조향 토크를 비교하는 것이다.

운전자 모델의 하위 제어기를 신경 근육계 이외의 다른 방법의 하위 제어기로 대체한 경우 역시 시뮬레이션을 수행해 그 값들을 서로 비교해보았다. 시뮬레이션 방

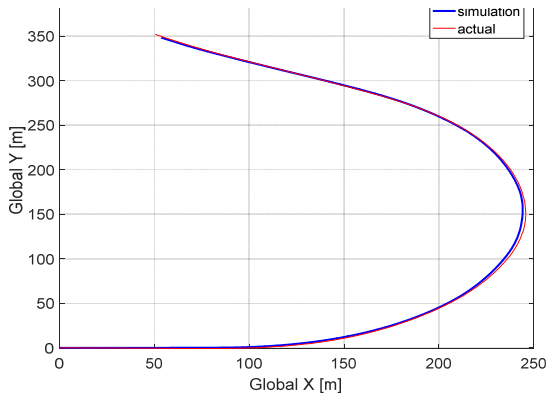


Fig. 4 Driving course

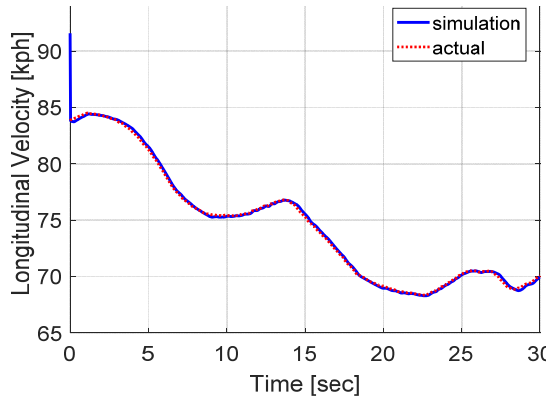


Fig. 5 Longitudinal velocity

법은 신경 근육계의 경우와 동일하며 신경 근육계를 대체한 하위 제어기는 시간 지연 제어(TDC),⁽⁶⁾ PID 기법을 택하였다.

중 방향 속도 제어의 경우 시간에 대한 가변 변수 적응 제어 기법을 차용했다.⁽⁷⁾

상위 제어기는 동일한 체, 하위 제어기가 신경 근육계, 시간 지연 제어, PID인 각 경우의 시뮬레이션 값과 실차 실험 데이터를 조향 각, 조향 토크를 기준으로 비교한 결과는 Fig. 6, 7과 같다.

Fig. 6, 7을 기준으로 시뮬레이션과 실제 운전자의 조향 패턴이 겹치는 정도를 파악하는 기준은 SWA로 삼았다. 실제로 차량의 거동이 인간 운전자의 조향 토크보다 단 조향 각도를 기반으로 더욱 강건한 동적 특성이 나타남이 연구된 바 있다.⁽⁸⁾ 이를 기반으로 데이터를 분석하면 PID와 신경 근육계가 인간 운전자의 조향 특성을 가장 잘 드러내는 것을 확인 할 수 있다.

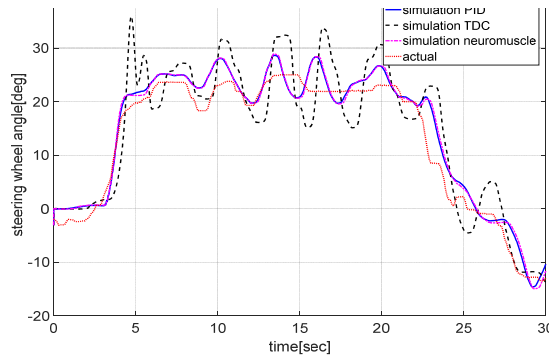


Fig. 6 SWA(steering wheel angle): simulation vs actual data

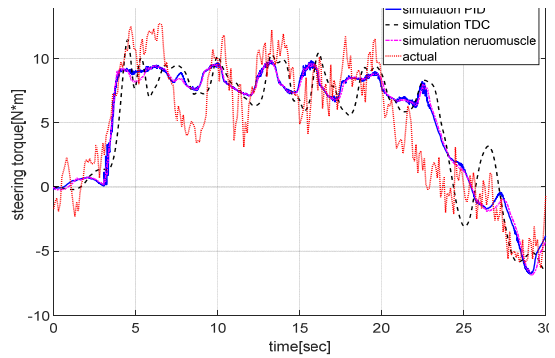


Fig. 7 SWT(steering wheel torque): simulation vs actual data

PID와 신경 근육계의 차이점은 SWT에서 드러난다. PID의 경우보다 신경 근육계가 시간에 따른 SWT의 잔류진동이 비교적 작게 나타남을 확인 할 수 있다.

실제 운전자의 경우 조향 토크의 주파수 영역이 약 30HZ 이내의 저주파수 영역이라 연구된 바 있다.⁽⁹⁾ 이를 기반으로 고주파수의 잔류진동이 없는 신경 근육계가 실제 운전자의 조향 주파수 영역에 가장 합치함을 확인 할 수 있다.

4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 적응 조향 제어를 통한 조향각 계산 알고리즘과 신경 근육계를 조합하여 아웃풋이 조향 토크인 운전자 모델을 개발했다. 본 모델은 여타 다른 모델과 비교했을 때 실차 운전자의 조향 패턴과 가장 비슷한 경향을 드러냄을 확인하였다. 추후 다양한 human factor⁽¹⁰⁾ 들을 포함시켜 실제 운전자의 조향 패턴을 더욱 잘 드러낼 수 있을 것이라 예상된다.

후기

본 연구는 2017년 미래창조과학부 재원으로 한국 연구재단(NRF-2016R1E1A1A01943543)과 BK21 플러스 사업, 그리고 서울대학교 정밀기계설계공동연구소(SNU-IAMD)의 연구비 지원으로 수행된 연구임

참고문헌

- (1) Charles. C. Macadam, 2003, "Understanding and Modeling the Human Driver," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 40, Nos. 1-3, pp. 101~134.
- (2) A.Y.UNGOREN and H. PENG., 2005, "An adaptive lateral preview driver model," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 43, No. 4, pp. 245~259.
- (3) A.J.PICK and D.J.COLE., 2006, "Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle system," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 44, No. 44:sup1, pp. 624~631.
- (4) C. Jung, H. Kim, Y. Son, K. Lee, and K. Yi, 2014, "Parameter adaptive steering control for autonomous driving," in *Proc. IEEE 17th ITSC*, Qingdao, China, pp. 1462~1467.
- (5) Andrew J. Pick and David J. Cole., 2008, "A Mathematical Model of Driver Steering Control Including Neuromuscular Dynamics," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 130, 031004-1.
- (6) 이기수, 2016, "Time delay controller(TDC) design of electric power steering(EPS) for lateral control in automated vehicles / 자율주행 차량의 횡방향 제어를 위한 전기식 파워 조향기의 시간 지연 제어기 설계," 서울: 서울대학교 대학원.
- (7) H. Kim, D. Kim, I. Suh, and K. Yi, 2016, "Time varying parameter adaptive vehicle speed control," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 65, No. 2, pp. 581~588.
- (8) Pick, A. J., and Cole, D. J., 2007, "Measurement and Analysis of Muscle Activation During a Lane Change Manoeuvre," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 45, No. 9, pp. 781~805.
- (9) David J. Cole, 2012, "A path-following driver-vehicle model with neuromuscular dynamics, including measured and simulated responses to a step in steering angle overlay," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 50, No. 4, pp. 573~596.
- (10) Johns, Tim A., and David J. Cole, 2015, "Measurement and mathematical model of a driver's intermittent compensatory steering control," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 53, No.12, 1811~1829.