

인간의 조향과정을 고려한 운전자 모델에 대한 연구

문철우*·최세범

한국과학기술원 자동차기술대학원

A Study on a Driver Model considering Human Steering Process

Chulwoo Moon* · Seibum B. Choi

Graduate School of Automobile Technology, KAIST, Science town, Deajeon 305-701, Korea

Abstract : There have been several studies to develop a realistic driver model in accordance with the increased interests in vehicle safety issues and computer simulation for a vehicle design. This study is especially considering the human drivers' steering process; path planning, feed-forward steering, and preview feedback steering. Important human factors—view angle and neuromuscular system—are also regarded. In overview, target path is obtained in analogous to the planar motion of a rigid rod under holonomic constraints. Feed-forward steering model is based on the vehicle-road geometric conditions. A PID type preview control scheme is considered for feedback steering. The suggested driver model is simulated with CarSim vehicle model in Simulink environment. The simulation results are compared to the actual vehicle test data and also to the driving simulator test data with regards to 4 levels of human drivers. The driver model suggested in this study represents the human steering behavior and also matches well with the real vehicle test data.

Key words : Driver model(운전자 모델), Target path planning (목표경로 계획), Human driving behavior(인간운전성향), Vehicle lateral dynamics(횡 방향 차량동역학)

Nomenclature

δ	: steering wheel angle input, deg
δ_{ff}	: feed-forward steering input, deg
δ_{fb}	: feedback steering input, deg
P_T	: preview time, sec
k	: curvature, 1/m
V	: vehicle speed, km/h
ψ	: vehicle yaw angle, deg
ω_n	: natural frequency, 1/sec
ζ	:damping coefficient,-

* Corresponding author, E-mail: cw98_m@kaist.ac.kr

1. 서론

주행시험은 자동차의 동적 특성을 이해하여 주행 성능을 향상시키기 위해 필수적이다. 하지만, 실차 주행시험은 시간과 비용이 많이 소요되므로 도로-차량-운전자를 수학적으로 모델링한 후 컴퓨터를 사용하여 시뮬레이션하는 가상 주행시험이 이를 대신할 수 있는 방법으로서 활발히 응용되고 있다. 최근 자동차의 안전성에 대한 관심이 높아지면서 차량과 운전자의 상호작용에 대한 연구의 필요성이 제기되고, 이와 유기적으로 실제 사람의 운전성향을 나타낼 수 있는 운전자 모델에 대한 관심이 함께 높아지고 있다.

본 연구에서는 실제 사람의 운전성향을 모사하기 위하여 인간의 조향입력을 3단계(목표 경로 계획, 피드포워드 조향, 그리고 피드백 조향)로 정의하였고, 인간요소로서 운전 중 시야각과 신경전달 근육계가 고려되었다. 각 조향단계의 조합으로 이루어진 운전자 모델은 Simulink-CarSim을 통하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과는 ISO 차선변경시험 기준에 대한 실차 주행시험, 주행시뮬레이터 시험 결과와 비교하여 제안된 운전자 모델이 인간 운전자의 운전성향을 잘 표현하고 있음을 검증하였다.

2. 조향 모델

2.1 운전자 구분

대부분의 운전자 모델이 single preview point를 이용하여 경로오차를 제어한다. 따라서 preview time의 크기를 조절하여 운전자의 등급을 구분한다. 하지만, 실제 인간은 운전 숙련도에 상관없이 같은 거리의 시각적 정보를 얻을 수 있으므로 현실적이지 못하다. 실제 인간은 Figure 1에서 보는 바와 같이 운전 중 같은 거리를 볼 수 있지만, 숙련도에 따라서 먼 곳부터 가까운 곳까지 집중하는 정도가 틀리다.

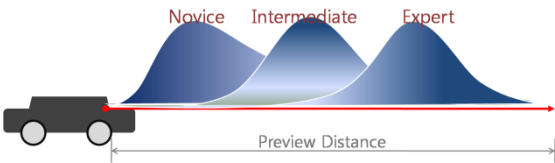


Figure 1. Driver preview weighting tendencies

따라서, 본 연구에서는 multi-preview point를 이용하여, 각 preview point에 집중도를 부여함으로써 운전자의 등급을 구분하는 방법은 제시한다. 또한 운전자는 각 preview point에서 곡률을 인식하여, 직진도로와 곡선도로에서의 그 중요도를 변화시키면서 운전을 한다. 직진에서의 가중치는 K_i , 곡선도로에서의 가중치는 \bar{K}_i 로 정의되며, 그 합은 항상 1이다.

$$\sum_{i=1}^n K_i = 1 \quad \text{and} \quad \sum_{i=1}^n \bar{K}_i = 1 \quad (1)$$

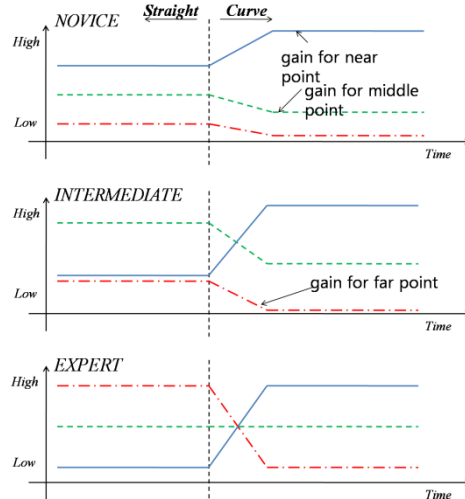


Figure 2. Weighting strategies for a curve

사람은 곡선도로 진입시에 곡률의 변화에 대하여 빠르게 대응하고, 곡선로 주행을 끝내고 다시 직선도로에 진입할때에는 곡률의 변화에 천천히 반응하는 특성이 있는데, rate limiter의 rising slew rate와 falling slew rate을 통하여 이러한 인간의 특성을 반영할 수 있다. Figure 2는 곡선도로에서의 각 등급별 운전자 모델의 multi-preview point에 대한 가중치 변화를 예시하고 있다.

2.2 목표경로 계획(Target path planning)

운전자는 곡선도로를 인식하자마자 자신들만의 새로운 경로를 계획하고, 그것이 새로운 기준도로가 된다. Krammes은 운전자는 0.2-0.4g's 내의 횡가속도를 유지하기 위해 속도 및 조향 제어를 한다고 설명하였다¹⁾. 목표경로는 개인에 따라 틀리지만, 몇 가지 공통된 목적 달성을 위한 단계로서 설명될 수 있다. 첫째로, 곡선도로를 최대한 부드럽게 주행한다. 둘째, 낮은 횡가속도 아래에서 주행한다. 셋째, 주어진 경계조건 안에서 최대한 짧은 주행경로를 계획한다. 따라서 목표경로 계획 과정은 또한 일종의 road smoothing procedure이다.

본 연구에서는 인간의 목표경로를 나타낼 수 있는 새로운 road smoothing 개념을 제안한다. Figure 3에서 보는 바와 같이 운전자는 B로 정의된 preview point의 조건으로부터 목표경로를 정의한다. 운전자(A)로부터 preview point(B)까지의 거리는 L이며, 이는 차량의 속도의 함수로서 정의되는 값이다. L과 차량의 속도 조건과 함께 B는 주어진 도로를 정확히 따라간다는 가정을 함으로써, A는 새로운 경로

를 정의한다. A 는 그의 순간속도벡터가 A 와 B 를 연결하고 있는 선과 평행하다는 holonomic 구속조건으로부터 최단거리 주행경로를 만들어낸다. 결과적으로 A 는 주어진 경계조건으로부터 짧고 부드러운 주행경로를 만들어낸다.

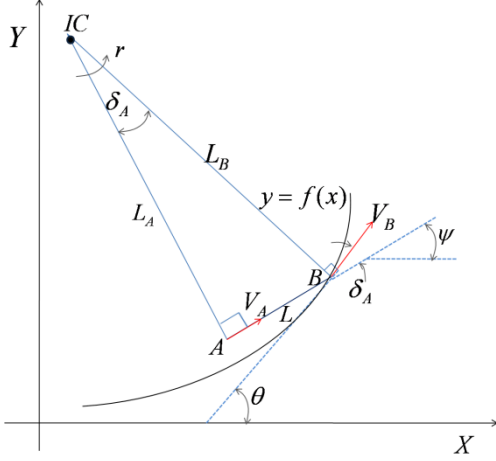


Figure 3. Target path planning

A 와 B 에서의 속도벡터를 V_A 와 V_B , A 와 B 로부터의 순간 회전 중심까지의 거리를 L_A 와 L_B 로 정의하면, 각속도 r 은 다음과 같다.

$$r = \frac{V_B}{L_B} \quad \text{and} \quad r = \frac{V_A}{L_A} \quad (2)$$

기하학적 조건으로부터,

$$L_B = \sqrt{L_A^2 + L^2} \quad (3)$$

여기서,

$$L_A = \frac{L}{\tan \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{dy_A}{dx_A} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right) \right\}} \quad (4)$$

따라서, A 의 경로는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_A = \int V_A \cdot \cos(\psi) dt \quad (5)$$

$$y_A = \int V_A \cdot \sin(\psi) dt \quad (6)$$

A 에 의한 목표경로는 B 의 속도, preview 거리 L , 그리고 $y_B=f(x_B)$ 로서 주어진 도로 정보에 의해 정의된다. L 이 길어질수록 더욱 부드러운 목표경로를 만들어낼 것이며, 이는 운전자의 숙련도를 구분하기 위한 변수로서 사용될 수 있다. 또한 L 은 속도와 시간의 함수로서 주어지며, 2.1절에서 논의한 weighting strategy를 고려함으로써 최

종적으로 다음과 같은 목표경로를 산출하게 된다.

$$(x_A, y_A) = \sum_{i=1}^n \{ K_i \cdot (x_A, y_A)_i \} \quad (7)$$

2.3 피드포워드 조향 (Feed-forward steering)

인간은 주로 시각적 정보와 경험에 기초하여 개루프형태의 조향제어를 한다. Figure 4는 개루프 조향을 위한 차량-운전자 시스템을 나타내고 있다. 속도의 함수로 정의된 운전자의 시야각이 다음과 같다면,

$$\Delta\theta_{view} = 156.17 - 1.194V_x \quad (8)$$

i 번째 주시지점에 대한 x 좌표는 다음과 같다.

$$x_i = \frac{i}{n} \cdot L \cos \left(\frac{\Delta\theta_{view}}{2} + \psi \right) + x_0 \quad (9)$$

여기서 n 은 주시지점의 총 개수이며, x_0 로부터 y_i 의 좌표를 찾을 수 있다. θ_i 가 (12)와 같이 정의 되며, 각 주시지점에 대한 개루프 조향각은 기하학적 조건으로부터 (13)와 같이 정의될 수 있다.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) \quad (10)$$

$$(\delta_{ff}^*)_i = \theta_i - \psi \quad (11)$$

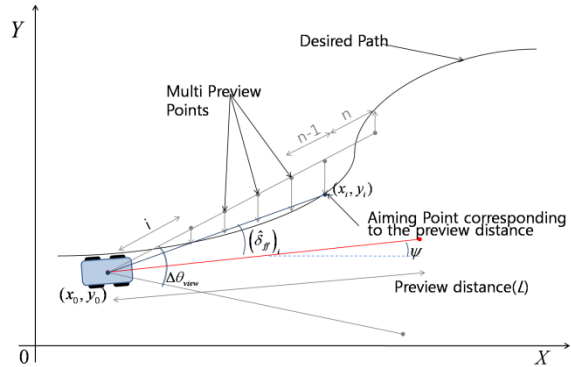


Figure 4. Vehicle-road geometry for feed-forward steering

(13)에 대하여 가중치를 부여하면 (14)와 같이 총 개루프 조향각이 구해지며, 이를 다시 차량의 특정 조향비를 곱함으로써 (15)의 최종 개루프 조향각이 정의된다.

$$\delta_{ff}^* = \sum_{i=1}^n \{ K_i \cdot (\delta_{ff}^*)_i \} \quad (12)$$

$$\delta_{ff} = \delta_{ff}^* \cdot r_s \quad (13)$$

2.4 피드백 조향(Feedback steering)

예측된 조향입력은 반드시 경로오차를 수반하게 되며, 운전자는 경로오차를 인지한 후 이를 제거하기 위한 페루프 행동이 이루어진다. Choi는 자율주행 차량의 조향제어를 위하여 (14)와 같은 PD 타입의 제어기를 설계하였다.

$$\delta_f(s) = \frac{1}{V} (2\xi\omega_n \dot{d} + \omega_n^2 d) \quad (14)$$

본 연구에서는 인간의 주행성향을 반영하기 위하여, 적분항을 추가함으로써 다음과 같은 PID 타입의 제어기를 정의하였다.

$$\delta_{fb}^* = \frac{1}{V} \left(k_p + k_d s + \frac{k_i}{s} \right) d_i \quad (15)$$

i 번째 주시지점에서의 경로오차 d_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$d_i = e_1 + \frac{i}{n} \cdot L \cdot \tan(e_2) \cong e_1 + \frac{i}{n} \cdot L \cdot e_2 \quad (16)$$

$$e_1 = \int \{ \dot{y} + V(\psi_{des} - \psi) \} dt \quad (17)$$

$$e_2 = \psi_{des} - \psi \quad (18)$$

각 d_i 에 대하여 weighting strategy를 고려하면, 최종 경로오차는 다음과 같다.

$$d = \sum_{i=1}^n \{ K_i \cdot d_i \} \quad (19)$$

2.5 신경 전달계(Neuromuscular system)

인간의 시간지연과 phase lag, under-damped 시스템 특성을 고려하여 다음과 같이 운전자의 신경전달계를 전달함수로 표현하였다.

$$TF_{neuro} = \frac{K e^{-T_d s}}{(1 + T_h s)(T_w^2 s^2 + 2\zeta T_w s + 1)} \quad (20)$$

여기서, T_d 는 순수 시간지연, T_h 는 시상수, T_w 는 시스템 고유진동수의 역수, ζ 는 댐핑상수이다. 각각의 상수는 주행시뮬레이터를 통한 운전자의 step-steering test 데이터를 기반으로 recursive parameter estimation method를 통하여 예측하였다. Figure 5는 step-steering test data와 예측된 전달함수의 step response이다.

본 연구에서는 신경전달계의 반응은 피드포워드 조향에서는 이미 고려되었음을 가정하고, 피드백 조향에만 적용된다. 따라서 2.4절에서 논의된 최종 피드백 조향각은 다음과 같다.

$$\delta_{fb} = TF_{neuro} \cdot \delta_{fb}^* \quad (21)$$

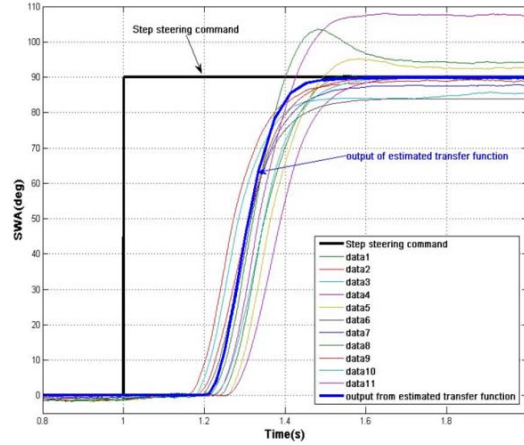


Figure 5 Step response of drivers and the the equivalent estimated transfer function

2.6 운전자 변수(Driver parameters)

각 조향단계 모델에서 나온 운전자 변수들 중 개별 운전자를 대표하기 위해 조정 가능한 운전자 변수들이 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. List of driver parameters

Parameter	Unit	Description
P_T	sec	Preview time for target path planning
K_i	-	Weightings on multi preview points for feed-forward steering in normal situation
\bar{K}_i	-	Weightings on multi preview points for feed-forward steering in abnormal situation
K_{limit}	1/m	Curvature limit for feed-forward weighting strategy and defining normal/abnormal situation
T_d	sec	Pure time delay for neuromuscular system
T_h	sec	Time constant for neuromuscular system
ω_n	1/sec	Natural frequency for neuromuscular system
ζ	-	Damping coefficient for neuromuscular system
K_{ff}	-	Weight on feed-forward steering for final steering command

3. 실험을 통한 모델 검증

3.1 주행시뮬레이터 구성

일반 운전자의 주행특성을 관찰하기 위하여

CarSim-RT, RT-Lab, NI-6071E, CTP position sensor, NEC beam projector를 이용하여 Man-In-the Loop 주행시물레이터를 구성하였다.

3.2 운전자 반응 실험

주행시물레이터의 속도계 표현을 위한 15.4인치 LCD 모니터의 좌/우측에 LED를 설치하여 운전자 일반 조건에서 주행 중 언제, 어느 LED가 작동할지 모르는 상황에서 테스트를 진행하였다. Figure 6는 테스트 진행장면이다.

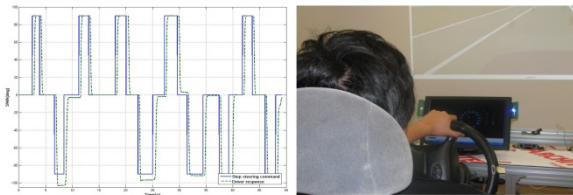


Figure 6. Driver response test for neuromuscular system

3.3 차량 모델 및 도로 조건

제안된 운전자 모델은 검증된 상용 소프트웨어인 Simulink/CarSim을 통하여 시뮬레이션 하였으며, 차량 모델은 CarSim database에 내장된 일반적인 중형 세단을 이용하였다. 도로조건은 Figure 7에서는 보논바와 같이 ISO Lane change maneuver 기준과 동일하다.

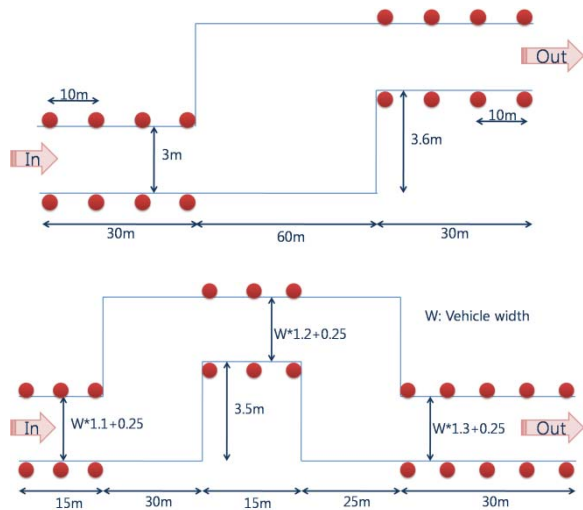


Figure 7 ISO single and double lane change maneuver

3.4 실험데이터와 비교 및 검증

Figure 8은 주시거리 L 을 변화시키면서 목표경로를 관찰한 것이다. L 이 길어질수록 더욱 부드럽고, 짧은 주행경로를 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다.

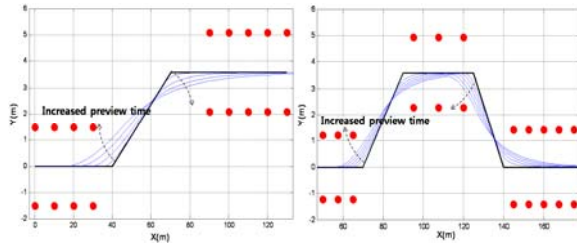


Figure 8. Different target paths obtained by varying preview time for ISO lane change maneuvers

Figure 9는 피드포워드 조향만을 사용한 운전자 모델의 조향각을 보여주고 있다. Weighting strategy에 따른 조향각입력의 범위가 다르고, 인간의 조향입력 각 형상과 유사하지만, 경사진 도로에서 경로오차를 수반하는 것으로부터 피드백 조향이 필요하다는 것을 알 수 있다.

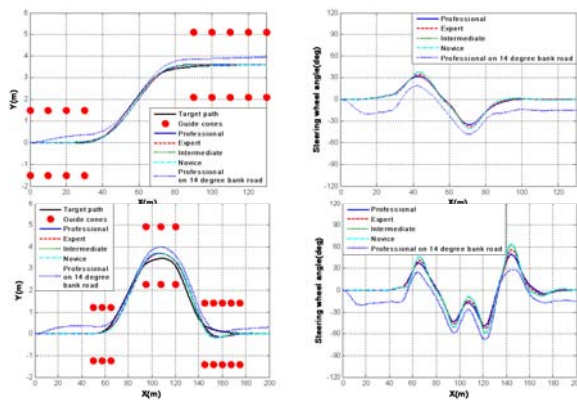


Figure 9. Steering wheel angle input of single lane change maneuver using only feed-forward steering

Figure 10은 피드백 조향만을 사용한 운전자 모델의 조향각이다. 경로오차 제어측면에서는 우수한 성능을 보이고 있지만, 실제 인간의 조향입력과는 거리가 멀다는 것을 쉽게 알 수 있다.

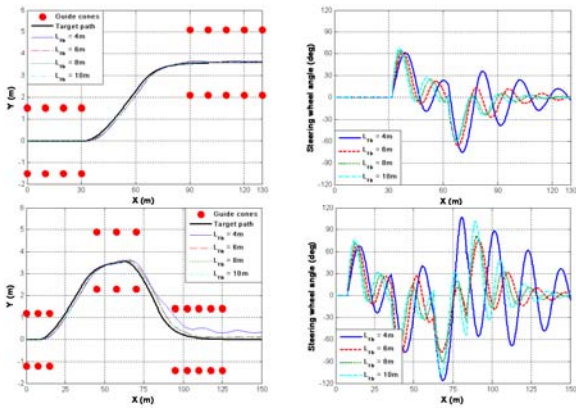


Figure 10. Steering wheel angle input of ISO lane change maneuvers using only feedback steering

운전자는 전문가, 숙련자, 중급자, 그리고 초보자 등 4등급으로 구분되었으며, 주시거리를 위한 시간은 모두 1sec, 5개의 주시점이 사용되었으며, 그 이외의 각 등급별 사용된 운전자 변수는 Table 2에 나타나 있다. 또한 SLC(Single Lane Change)에서 보이는 운전성향을 기준으로 튜닝된 운전자 모델은 DLC(Double Lane Change)에 대하여 별도의 운전자 변수 조절을 하지 않는다.

Table 2. Driver parameters used for each level

Professionals($K_{ff}=0.9$)			EXPERT($K_{ff}=0.85$)		
i	K_i	\bar{K}_i	i	K_i	\bar{K}_i
1	0.05	0.20	1	0.05	0.30
2	0.15	0.30	2	0.15	0.25
3	0.20	0.25	3	0.2	0.20
4	0.25	0.15	4	0.25	0.15
5	0.35	0.10	5	0.35	0.10
Intermediate($K_{ff}=0.8$)			NOVICE($K_{ff}=0.75$)		
i	K_i	\bar{K}_i	i	K_i	\bar{K}_i
1	0.1	0.35	1	0.15	0.40
2	0.15	0.30	2	0.2	0.30
3	0.2	0.20	3	0.2	0.20
4	0.25	0.10	4	0.2	0.10
5	0.3	0.05	5	0.25	0.00

Figure 11과 12는 관련업체의 도움으로 전문운전자의 주행시험결과와 본 연구에서 개발된 운전자 모델을 비교한 결과이다. SLC에서는 $-30 \sim +30(\text{deg})$, DLC에서는 첫 차선변경에서 $-40 \sim +40(\text{deg})$ 와 두 번째 차선변경에서 $-50 \sim +50(\text{deg})$ 의 조향입력 성향을 보이고 있다. 운전자 모델은 전문운전자의 운전성향을 잘 나타내고 있으며, 주목할 점은 SLC를 기준으로 튜닝된 운전자 모델이 DLC에 그대로 사용되었음이다.

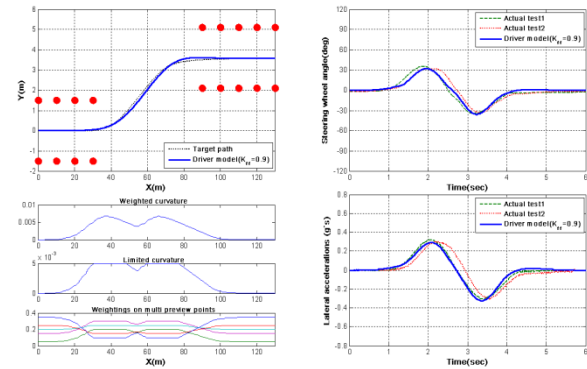


Figure 11. Comparison the driver model performance to actual tests on a single lane change

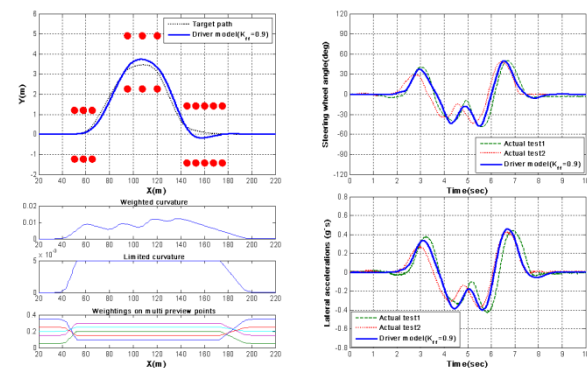


Figure 12. Comparison the driver model performance to actual tests on a double lane change

Figure 13~18는 주행시뮬레이터를 통한 일반운전자들의 운전성향과 개발된 운전자 모델의 성능을 비교한 결과이다. 총 21명(각 등급별 7명: 초보자, 중급자, 숙련자)의 운전자가 참여하였으며, 초보자는 운전면허는 소지하였지만 1개월 미만의 운전경

력, 중급자는 자가운전자가 아니며 2년 미만의 운전경력, 그리고 숙련자는 자가운전자이면서 1년 이상의 운전경력을 가진 차로 구분하였다.

Figure 13~15는 각 등급별 주행시물레이터 데이터와 제안된 운전자 모델의 SLC 테스트에 대한 결과를 보여주고 있다. 결과에서 보듯이 초보자일수록 더욱 큰 범위의 조향입력 성향을 보이며, 공격적인 차선변경과 그에 따른 차서 변경후의 주행 안정성이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 각 등급별 조향입력 범위는, 초보자는 $-90\sim+90(\text{deg})$, 중급자는 $-60\sim+60(\text{deg})$, 숙련자는 $-50\sim+40(\text{deg})$ 이다.

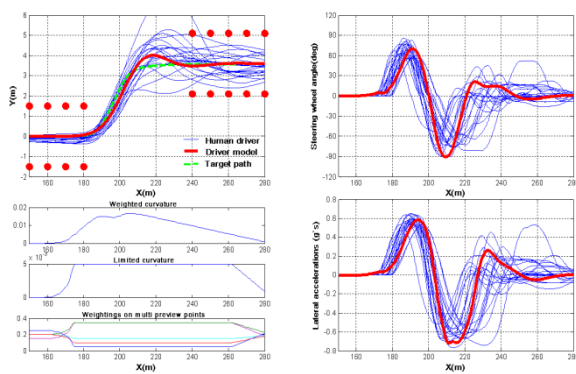


Figure 13. Comparison the driver model performance to driving simulator tests on a single lane change maneuver for novice level

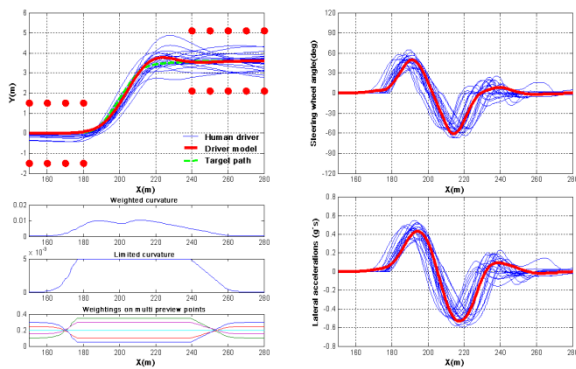


Figure 14. Comparison the driver model performance to driving simulator tests on a single lane change maneuver for intermediate level

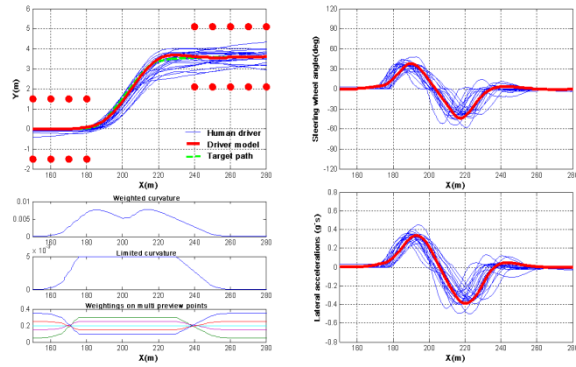


Figure 15. Comparison the driver model performance to driving simulator tests on a single lane change maneuver for expert level

Figure 16~18는 각 등급별 주행시물레이터 데이터와 제안된 운전자 모델의 DLC 테스트에 대한 결과를 보여주고 있다. DLC 시험 결과에서도 역시 초보자일수록 더욱 큰 범위의 조향입력 성향을 보이고 있다. 초보자는 $-90\sim+90(\text{deg})$, 중급자는 $-80\sim+80(\text{deg})$, 숙련자는 $-70\sim+70(\text{deg})$ 의 조향범위를 보이고 있다. 특히 첫번째 차선변경후 조향입력이 $0(\text{deg})$ 을 초과하며, 중급자는 $0(\text{deg})$ 근처, 숙련자는 $0(\text{deg})$ 미만으로 조작되는 성향을 보이고 있다. 이는 역시 초보자일수록 공격적인 차선변경과 그에 따른 차선변경 후 주행 불안정성에 기인한다고 볼 수 있다.

Figure 11~18에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서 제안된 운전자모델은 SLC와 DLC 시험에서 4등급으로 구분된 전문 운전자 및 일반 운전자들이 보이는 운전성향을 잘 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

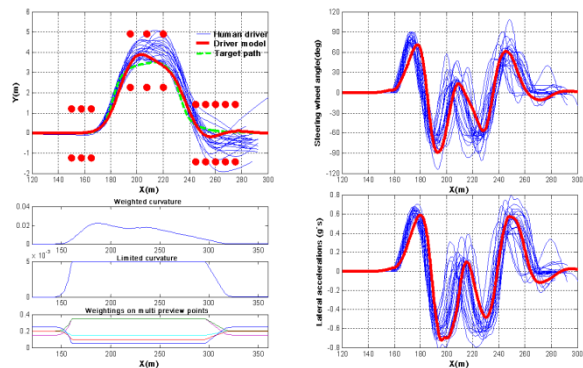


Figure 16. Comparison the driver model performance to driving simulator tests on a double lane change maneuver for novice level

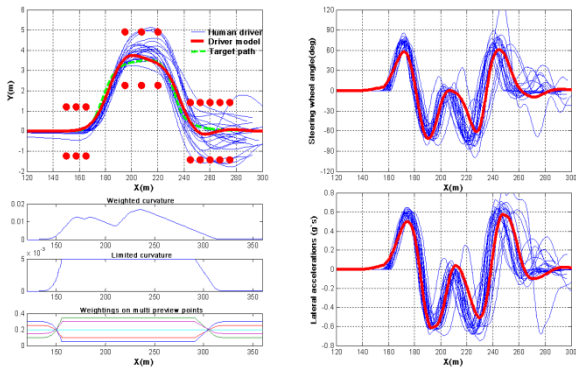


Figure 17. Comparison the driver model performance to driving simulator tests on a double lane change maneuver for intermediate level

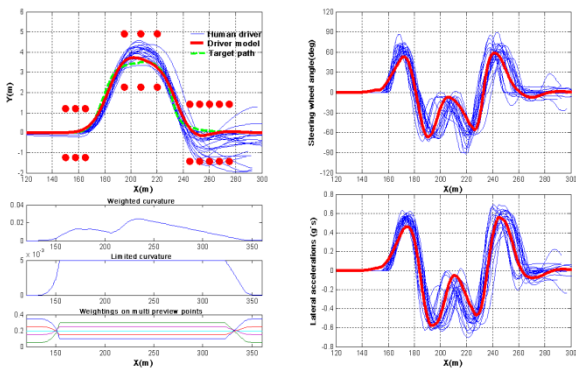


Figure 18. Comparison the driver model performance to driving simulator tests on a double lane change maneuver for expert level

4. 결론

본 연구에서는 인간운전자의 조향입력과정을 모사하는 운전자 모델을 개발하였다. 각 조향 모델 및 인간요소등에서 여러가지의 운전자 변수들이 존재하지만, 대부분의 변수들은 고정되며 K_i 와 K_{ff} 등의 변수만이 개별운전자의 운전성향을 표현하기 위해 필요하다. 기존 운전자 모델 연구와 다른 점은

- 1) 인간 운전자의 조향입력 과정 모사: 목표경로 계획, 피드포워드 조향, 피드백 조향
- 2) Multi-preview points를 이용한 weighting strategy 개념 적용으로 새로운 운전자 등급 구분 방법 제시
- 3) 운전자 변수들이 개념적으로 튜닝가능 등이다. 본 연구에서 제안된 운전자 모델을 Single

lane change와 double lane change에 대하여 실차 실험 및 주행시뮬레이터 실험을 통하여 검증하였고, 각 등급별 운전자들의 운전 성향을 잘 표현함을 확인할 수 있었다.

References

- 1) Krammes, R.A., et al., Horizontal alignment design consistency for rural two-lane highways, Federal Highway Administration, FHWA-RD-94-034, Washington D.C., 1995
- 2) S.B. Choi, The design of a Look-Down Feedback Adaptive controller for the lateral Control of Front-Wheel-Steering Autonomous Highway Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.49, No.6, pp. 2257-2269, 2000
- 3) ISO 3888-1, Passenger cars -- Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: double lane-change