

최적예견 제어 기법을 이용한 운전자 조향 모델의 개발 및 검증

강주용[†] · 이경수^{*} · 노기한^{**}

Development and Validation of A Finite Optimal Preview Control-based Human Driver Steering Model

Juyong Kang[†], Kyongsu Yi^{*}, Kihan Noh^{**}

Key Words : Finite Optimal Preview Control(최적예견 제어), Human Driver Steering Model(운전자 조향 모델), Neuromuscular System(신경근육계), Preview Distance(주시거리)

Abstract

This paper describes a human driver model developed based on finite preview optimal control method. The human driver steering model is constructed to minimize a performance index which is a quadratic form of lateral position error, yaw angle error and steering input. Simulation studies are conducted using a vehicle simulation software, Carsim. The Carsim vehicle model is validated using vehicle test data. In order to validate the human driving steering model, the human driver steering model is compared to the driving data on a virtual test track(VTT) and the actual vehicle test data. It is shown that human driver steering behaviors can be well represented by the human driver steering model presented in this paper

1. 서론

최근 첨단안전차량 조종안정장치의 개발이 활발히 진행되면서, 시뮬레이션을 통한 차량 안전성 제어기 성능검증을 위한 운전자 조향 모델의 연구가 진행되고 있다. 뿐만 아니라 운전자 조향 모델은 자율주행 차량의 제어부로도 활용 가능하므로, 실제 운전자와 비슷한 조향거동 특성을 가지는 운전자 조향 모델의 개발이 필요하다.¹⁾

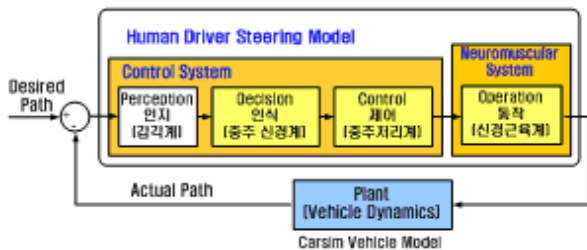


Fig. 1 Human Driver Lateral Control Model outline

[†] 강주용, 서울대학교 정밀기계공동연구소

E-mail : kky400@hanmail.net

TEL : (02)888-7194 FAX : (02)882-0561

^{*} 서울대학교 기계항공 공학부

^{**} 자동차 부품 연구원

Fig.1 은 운전자 특성을 반영하기 위한 운전자 조향 모델의 개략도이다. 본 연구에서 운전자 조향 모델을 제어입력을 결정하는 중추처리계와 여기서 결정된 조향 입력을 차량에 반영하는 신경근육계로 구성하여 설계하였다.

본 논문에서 개발된 운전자 조향모델이 실제 운전자와 비슷한 조향 거동 특성을 가짐을 가상 주행실험 장치 및 실차 실험을 통해서 얻은 실험 데이터를 이용하여 검증하였다.

2. 제어시스템 설계

2.1 제어 목표

Fig.2 는 곡선 도로를 주행하는 운전자-차량 시스템을 나타낸다.

Fig.2 에 표현된 횡방향 위치 오차(y)는 차량 진행방향의 수직선과 도로의 교점인 R 점과 차량 질량중심인 C 점 간의 거리로 정의된다. 그리고, yaw angle 오차($\epsilon - \epsilon_d$)는 절대좌표상의 차량 진행각도와 R 점에서의 접선의 기울기 각도 간의 차로 정의된다. 위에서 정의한 두 오차를 이용하여 피드백 제어 입력을 결정한다.

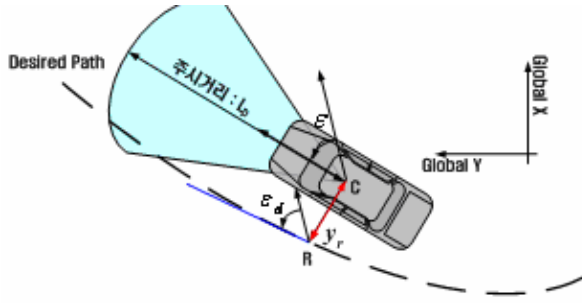


Fig. 2 Driver-Vehicle System

횡방향 위치 오차(\$y_r\$)와 도로의 접선의 기울기(\$\epsilon_d\$)의 미분치는 식 (1)과 식(2)와 같이 근사화시킬 수 있다.³⁾

$$\Delta y_y \approx v_y \cdot \Delta t + v_x \cdot \Delta t \cdot (\epsilon - \epsilon_d) \quad (1)$$

$$\dot{y}_r = v_y + v_x \cdot (\epsilon - \epsilon_d)$$

$$\Delta \epsilon_d \approx \frac{v_x \cdot \Delta t}{\rho}, \quad \dot{\epsilon}_d = \frac{v_x}{\rho} \quad (2)$$

조향 입력을 결정하기 위해서, 예견제어 (preview control) 이론을 적용하여 주시거리 이내의 도로정보를 가지고, 피드포워드 제어 입력을 결정하였다. 주시거리를 예견제어에 적용하기 위해 식 (3)을 이용하여 preview time(\$T_p\$)으로 변환하였다.

$$T_p = \frac{L_p}{v_x} \quad (3)$$

주시거리는 차량의 종방향 속도 및 도로의 곡률반경에 따라 달리 설정하였다.

2.2 제어기 설계를 위한 상태 방정식

제어기 설계를 위해 종방향 속도가 일정하다고 가정한 2 자유도 Bicycle model 을 이용하였다. (Fig.3)

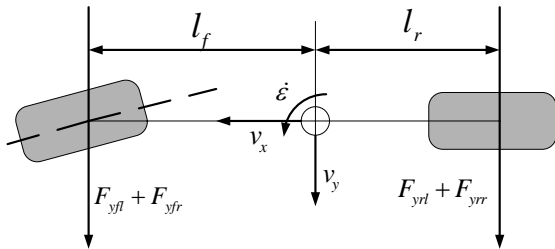


Fig.3 2DOF Bicycle model

$$m \cdot v_y + m \cdot v_x \cdot \dot{\epsilon} = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} \quad (4)$$

$$I_z \cdot \ddot{\epsilon} = l_f \cdot (F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r \cdot (F_{yrl} + F_{yrr})$$

타이어 슬립각이 작다고 가정하고, 식 (1)과 (2)를 이용하면, 타이어 횡력은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{yfl} = F_{yfr} &= C_f \cdot \left(\delta_f - \frac{v_y + l_f \cdot \dot{\epsilon}}{v_x} \right) \\ &= C_f \cdot \left\{ \delta_f - \frac{\dot{y}_r + l_f \cdot (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_d)}{v_x} + (\epsilon - \epsilon_d) - \frac{l_f}{v_x} \cdot \dot{\epsilon}_d \right\} \\ F_{yrl} = F_{yrr} &= C_r \cdot \left(-\frac{v_y - l_r \cdot \dot{\epsilon}}{v_x} \right) \\ &= C_r \cdot \left\{ -\frac{\dot{y}_r - l_r \cdot (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_d)}{v_x} + (\epsilon - \epsilon_d) + \frac{l_r}{v_x} \cdot \dot{\epsilon}_d \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하면, 식 (6)과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.³⁾

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A \cdot x + B \cdot \delta_f + F_d \cdot w_d \\ x &= [y_r, \dot{y}_r, \epsilon - \epsilon_d, \dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_d]^T \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_1}{v_x} & -A_1 & \frac{A_2}{v_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{A_3}{v_x} & -A_3 & \frac{A_4}{v_x} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \\ 0 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad F_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad w_d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{-2 \cdot (C_f + C_r)}{m} & B_1 &= \frac{2 \cdot C_f}{m} \\ A_2 &= \frac{2 \cdot (-l_f \cdot C_f + l_r \cdot C_r)}{m} & B_2 &= \frac{2 \cdot C_f \cdot l_f}{I_z} \\ A_3 &= \frac{2 \cdot (-l_f \cdot C_f + l_r \cdot C_r)}{I_z} & d_1 &= -\frac{v_x^2}{\rho} + \frac{A_2}{v_x} \cdot \dot{\epsilon}_d \\ A_4 &= \frac{-2 \cdot (l_f^2 \cdot C_f + l_r^2 \cdot C_r)}{I_z} & d_2 &= \frac{A_4}{v_x} \cdot \dot{\epsilon}_d - \ddot{\epsilon}_d \end{aligned}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (6)에서 외란(\$w_d\$)은 도로정보(\$\dot{\epsilon}_d\$ & \$\ddot{\epsilon}_d\$)로 정의되어 있음을 확인할 수 있다.

2.3 최적 예견제어 이론을 이용한 제어기 설계

주시거리 이내의 모든 도로 곡률 정보를 종합하여 결정되는 조향각은 식 (7)과 같은 성능평가 지수(performance index)가 최소화 되도록 결정된다.

$$J = \lim_{t_f \rightarrow \infty} \frac{1}{t_f} E \left[\int_0^{t_f} \frac{1}{2} (y^T \cdot Q_y \cdot y + \delta_f^T \cdot R \cdot \delta_f) dt \right] \quad (7)$$

Fig.4 는 최적 예견제어 이론을 이용한 제어기의 블록 다이어그램을 나타낸다

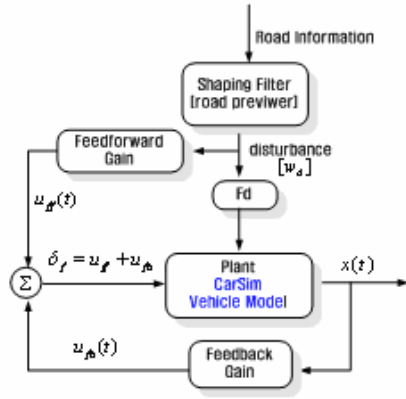


Fig.4 Block Diagram of The Controller

조향각은 아래의 식 (8)과 같이 피드백 제어 입력($-G \cdot x(t)$)과 피드포워드 제어 입력($M(t)$)으로 구성된다.³⁾

$$\delta_f(t) = u_{ff} + u_{fb} = M(t) + \{-G \cdot x(t)\} \quad (8)$$

피드백 게인(G)는 식 (9)와 같은 Riccati equation으로부터 구할 수 있다.⁴⁾

$$\begin{aligned} G &= R^{-1} \cdot B^T \cdot P_{ss} \\ P_{ss} \cdot A + A^T \cdot P_{ss} + Q - P_{ss} \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P_{ss} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

예견제어 이론을 이용한 피드포워드 제어 입력은 식 (10)으로부터 구할 수 있다.⁵⁾

$$\begin{aligned} M(t) &= -R^{-1} \cdot B^T \cdot \int_0^{T_p} F_1(\xi) \cdot w(t+\xi) \cdot d\xi \\ F_1(t) &= e^{A^T \cdot t} \cdot P_{ss} \cdot F \\ A_c &= A - B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P_{ss} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 예견제어 이론에 의해 결정되는 조향각은 주시거리 내(t 부터 $t+T_p$ 까지)에 있는 도로 정보에 의해 결정됨을 알 수 있다.

2.4 신경근육계의 모델링

제어기에서 결정된 조향 입력은 시간지연 요소를 갖는 시불변 시스템의 신경근육계를 통과하여 CarSim 차량 모델에 적용된다. 신경근육계는 Fig.5에 나타난 인체반응 특성 실험을 통해서 얻은 실험 데이터를 이용하여, 인지·인식 모델과 근육시스템으로 나누어 모델링 하였다.⁶⁾

인지·인식 모델은 식 (11)과 같이 시간지연의 전달

함수를 이용하여 모델링 하였고, 근육시스템은 2차 시스템의 형태로 모델링 하였다.

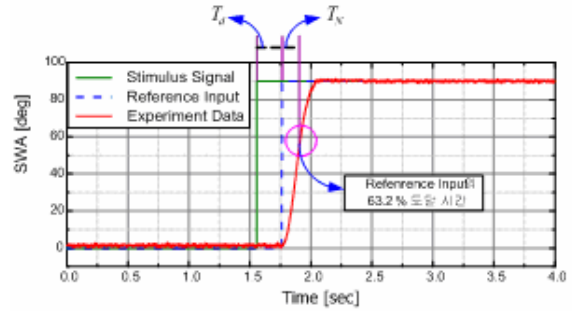


Fig. 5 the test data of human response

$$G(s) = \frac{-T_d \cdot s + 2}{T_d \cdot s + 2} \cdot \frac{w_n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot w_n s + w_n^2} \quad (15)$$

여기서, $\zeta = \sqrt{1/2}$, $w_d = 1/T_N = w_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2}$

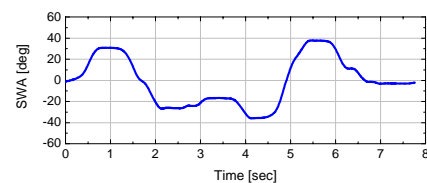
3. 실차 실험을 통한 차량모델 검증

3차원 CarSim 차량 모델의 검증은 실차실험 결과와 CarSim 차량 모델의 시뮬레이션 결과를 상호 비교·검증하였다. 실차실험을 통해서 얻은 운동 변수는 차량의 전체적인 안정성 판별에 큰 영향을 미칠 수 있는 종방향 속도, yaw rate, Roll angle 그리고 횡방향 가속도이다. 이들 변수 측정에 사용된 센서는 광학 속도계, 자이로 스코프 (yaw rate sensor), 가속도 센서 및 조향각 센서이다.²⁾

동일한 조건에서의 상호 비교를 위해, 3차원 차량 모델의 종방향 속도는 실험차량에서 얻은 종방향 속도를 그대로 추종하도록 하였으며, 조향 입력은 실험차량의 조향각 센서에서 얻은 값을 사용하였다. 3차원 CarSim 차량 모델의 노면 마찰계수는 실차 실험이 실시된 정상노면 조건($\mu=0.8$)에 해당하는 값을 사용하였다.

3.1 차선변경 실험

차선 변경 실험은 종방향 속도를 약 60kph 로 유지한 상황에서 실시하였다.



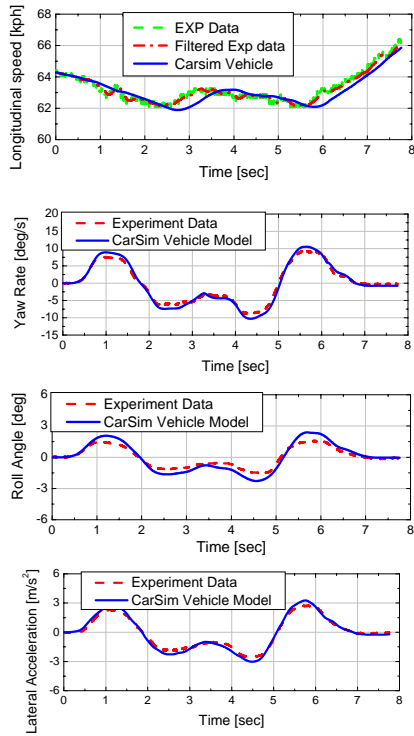


Fig. 6 Double Lane Change Test

3.2 슬라롬 실험

슬라롬 실험은 종방향 속도를 약 80kph 로 유지한 상황에서 실시하였다.

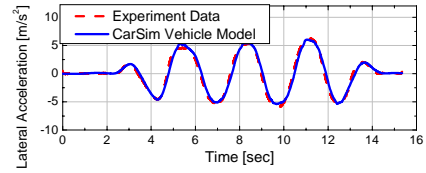
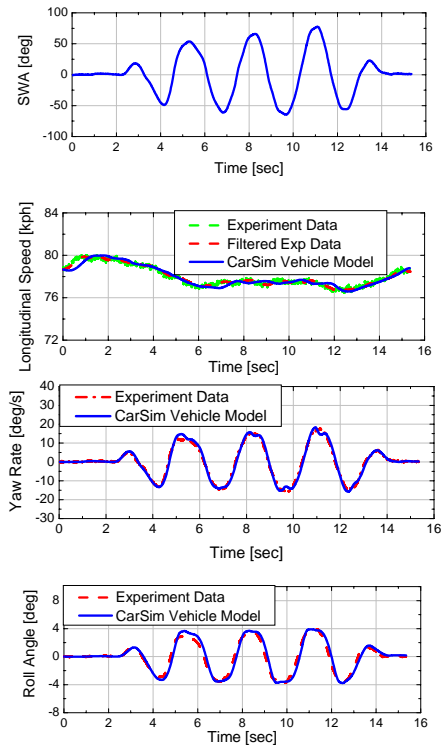


Fig. 7 Slalom Test

Fig.6 과 Fig.7 과 같이 실차실험과 동일한 조향각과 속도 조건을 주었을 때, 비슷한 차량 거동을 얻음으로써, 차량모델을 검증하였다.

4. 운전자 조향모델의 검증

운전자 조향 모델의 검증을 위하여, 조향 입력의 특성을 결정짓는 주시거리와 T_N 의 변화에 대한 조향 입력의 변화를 연구하였다. 차량의 종방향 속도를 약 60kph 로 유지하고, 차선 변경 상황을 시뮬레이션 하였다. 그리고, 가상 주행실험 장치 및 실차실험을 통해 얻은 실험데이터와 운전자 조향모델을 비교하였다.

4.1 주시거리에 따른 조향각의 특성변화

Fig.8 은 차선 변경 상황에서 주시거리(L_p)의 변화에 따른 운전자 조향 모델에서 결정되는 조향입력의 거동 변화 특성을 나타낸다.

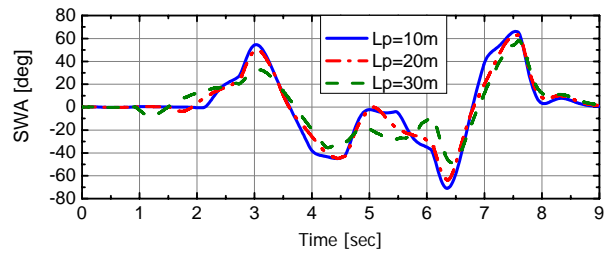


Fig. 8 주시거리에 따른 조향각의 특성 변화

Table 1 주시거리에 따른 조향각 특성 분석

주시거리 [m]	10	20	30
Input start time [s]	2.165	1.575	0.96
Input Max [deg]	66.14	63.03	58.16

Table 1 에 나타난 주시거리 변화에 대한 조향입력의 비교결과를 보면, 주시거리가 증가하면, 조향입력이 빨리 작용하고, 조향각의 최대 크기가 작아짐을 알 수 있다.

4.2 근육시스템의 시정수변화에 따른 조향각의 특성 변화

Fig.9 은 차선 변경 상황에서 신경근육계의 시정수(T_N)의 변화에 따른 조향입력의 거동 변화 특성을 나타낸다.

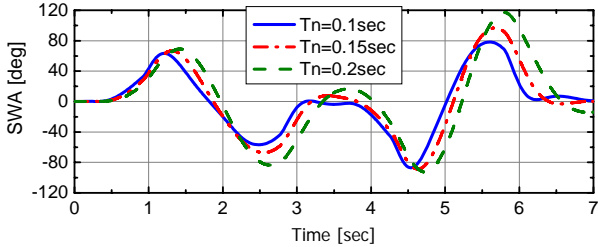


Fig. 9 T_N 에 따른 조향각의 특성 변화

Table 2 T_N 에 따른 조향각 특성 분석

T_N [sec]	0.1	0.15	0.2
Input start time [s]	0.46	0.51	0.54
Input Max [deg]	78.27	96.74	111.02

Table 2 에 나타낸 T_N 에 대한 조향 입력의 비교 결과를 보면, T_N 이 증가하면, 조향입력이 늦게 작용하고, 조향각의 최대 크기가 증가함을 알 수 있다.

4.3 가상 주행실험 장치를 이용한 운전자 조향 모델의 검증

Fig.10 은 본 연구에 사용된 가상 주행실험 장치를 나타낸다.



Fig. 10 Virtual Test Track

본 연구에서 사용한 가상 주행실험 장치는 실제 차량과 동일한 환경을 구현하고, 실험을 통하여 가상 주행실험 결과와 실차 실험 데이터를 비교함으로써 가상 주행실험 장치의 타당성을 검증하였다.

가상 주행 실험 장치를 이용하여, 좀더 다양한 도로조건에서 운전자 조향모델을 검증할 수 있었

다.

아래의 Fig. 11 은 차량속도를 60kph 로 유지하면서 반지름이 135m 인 정상원 도로를 주행 하였을 때, 가상 주행실험의 실제 운전자 조향 거동과 운전자 조향모델의 거동을 비교하였다.

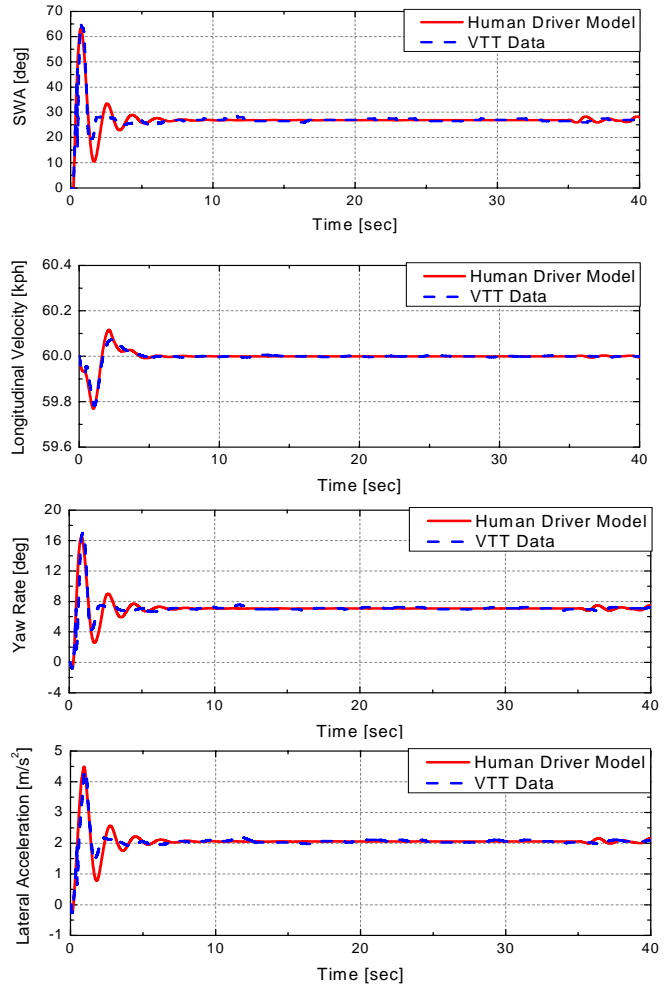


Fig. 11 Comparison Virtual Test Track with Human Driver Steering Model

Fig.11 로부터, 운전자 조향 모델의 조향 거동을 결정짓는 주시거리(L_p), 신경근육계의 시정수(T_N) 그리고 weight matrix(Q, R)을 적절히 선정함으로써 실제 운전자와 비슷한 조향거동을 결정함을 알 수 있다.

4.4 차선변경상황의 실차 실험 데이터를 이용한 운전자 조향모델의 검증

Fig.12 은 차선 변경 상황에서 주행 실험 데이터와 운전자 조향 모델의 조향각과 궤적을 비교하였다.

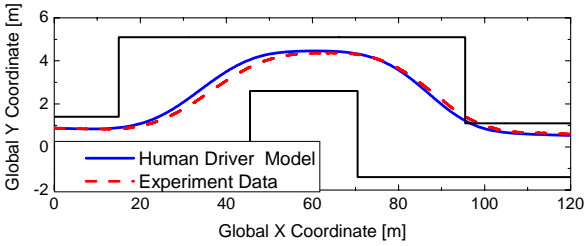
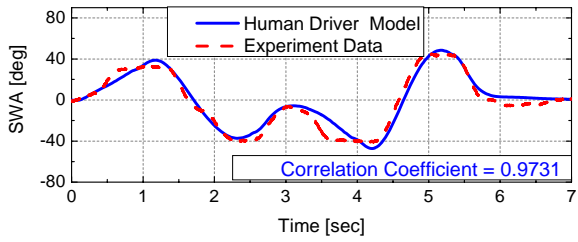


Fig. 12 Comparison Test Data with Human Driver Steering Model

Fig.13 는 Fig.12 의 조향 입력을 가했을 때의 차량 운동변수와 실차 실험치의 비교결과를 나타낸다.

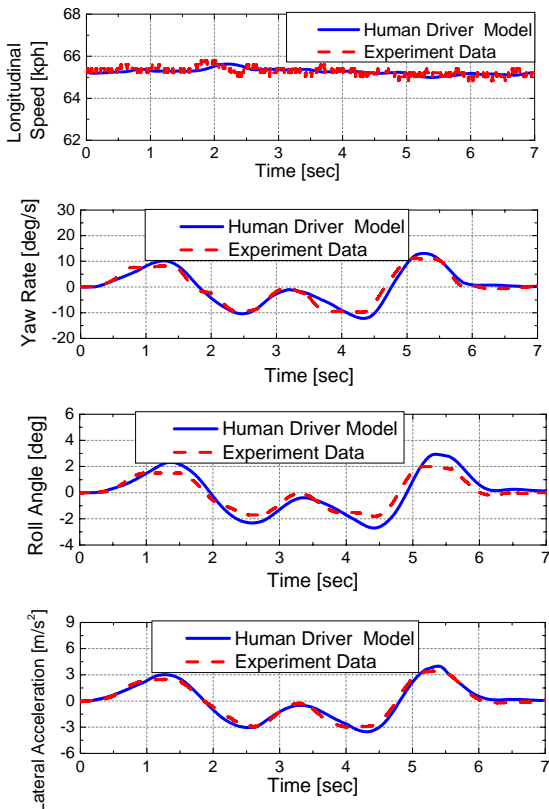


Fig. 13 차량 운동변수 비교

운전자 조향 모델을 실제 운전자 조향각에 근사화 시키기 위해서는 차량의 주행 속도와 도로곡률 환경에 따라서 적절한 주시거리(L_p), 신경근육계의 시정수(T_N) 그리고 최적제어의 weighting matrix

(Q_y, R) 선정이 필요하다

5. 결론

본 연구에서는 최적 예견제어 이론을 이용하여, 운전자 조향모델을 개발하였다. 개발한 운전자 조향 모델의 검증을 위해서 가상 주행실험 결과와 차선 변경 상황의 주행실험 결과를 사용하였으며, 이를 통해 운전자 조향 모델이 주시거리, 신경근육계의 모델 파라미터 그리고 Weight matrix 를 적절히 선정함에 따라 실제 운전자의 조향 특성을 잘 표현할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후기

이 연구결과는 산업자원부 지원 하에 수행하는 자동차 기반 기술 개발 산업의 핵심과제인 Human Factor 응용 첨단안전 차량 조종 성능 평가 기반 기술 산업임을 밝힙니다.

참고문헌

- 1) W.S.Sung, " A study on driver model for steering simulation of vehicle ", KSAE, Vol.10, No.3, pp.245~253, 2002.
- 2) Jungsoo Ha, " Validation of 3D Vehicle Model and Driver Steering Model with Vehicle Test ", KSAE, 2003.5
- 3) Hwei Peng " Vehicle Lateral Control for Highway Automation ". University of California at Berkeley, 1992.4
- 4) Jeffrey B.Burl, Linear Optimal Control, pp.179~226, 1998
- 5) Long Chain Chen " An active suspension system with preview control for passenger automobiles ", Massachusetts Institute of Technology, 1988. 3
- 6) Åström·Wittenmark, Adaptive Control (second edition), pp.41~81, 1995
- 7) Torsten Butz, " Optimal Control Based Modeling of Vehicle Driver Properties ", SAE, 2005. 1
- 8) R.A.Hess, A. Modjtahedzadeh, " A control theoretic model of driver steering behavior ", IEEE control systems magazine, August, pp.3~8, 1990.