

실차 실험을 통한 운전자 조향 모델의 검증

정 태 영¹⁾ · 이 건 복²⁾ · 이 경 수^{*3)}

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 송실대 기계공학과²⁾ · 한양대 기계공학부³⁾

Validation of Driver Steering Model with Vehicle Test

Taeyoung Chung¹⁾ · Gunbok Lee²⁾ · Kyongsu Yi^{*3)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 26 April 2004 / Accepted 24 November 2004)

Abstract : In this paper, validation of Driver Steering Model has been conducted. The comparison between the simulation model and vehicle test results shows that the model is very feasible for describing combined human driver and actual vehicle dynamic behaviors. The 3D vehicle model is consisted of 6-DOF sprung mass and 4-quarter car model for vehicle body dynamics. Powertrain model including differential gear and Pacejka tire model are applied. The driver steering model is also validated with vehicle test result. The driver steering model is based on angle and displacement error from the desired path, recognized by driver.

Key words : 3D vehicle model(3차원 차량 모델), Driver steering model(운전자 조향 모델), Neuro-muscular model(운전자 신경 근육 모델), Intelligent cruise control(ICC, 지능형순항 제어), Vehicle test (실차 실험)

Nomenclature

δ : driver steering input
 P_{dist} : preview distance
 e_{ang} : angle error
 e_{dist} : distance error

Subscripts

fr, fl : front right, front left
 rr, rl : rear right, rear left

1. 서론

자동차의 동역학적 특성을 해석하는데 있어 실제 거동에 흡사한 시뮬레이션 모델을 구축하는 것은 실차실험에 앞서 시뮬레이션을 통하여 제어기 성능을 검증함으로써 시간과 비용을 줄일 수 있으므로 필수적이다. 본 논문에서 제안된 3차원 차량 모델은 차체 및 현가장치 모델을 이용하여 승차감 및 차량의 안정성을 보다 정확하게 구현할 수 있도록 하였으며 차동장치에 대한 정확한 모델링을 통하여 과도한 선회주행 시 좌우 구동륜에 작용하는 구동토크를 고려했다. 실차실험에서 실측된 조향각과 차속을 시뮬레이션 모델에 적용한 결과와 센서로 측정된 실차실험의 차량 거동을 비교하여 차량 모델을 검증했다.

*To whom correspondence should be addressed.
kyongsu@hanyang.ac.kr

운전자 조향 모델은 시뮬레이션을 통한 차량 안정성 제어기의 성능 검증시 필요한 운전자 조향 결정이나 자율 주행 차량의 제어부로서 사용하기 위해 실제 운전자와 비슷한 거동을 보이는 모델의 적용이 필요하다. 본 논문에서는 모델은 원하는 경로를 추종할 수 있도록 차량 전방 일정거리에서 얻은 거리 오차와 각도 오차를 이용하여 최종 제어 입력인 운전자 조향각을 결정한다. 운전자 조향 모델을 포함하는 3차원 차량 모델의 시뮬레이션 결과를 실차 실험과 비교하여 정상원 선회시 운전자 모델의 정확성을 검증했다.

2. 차량 모델

2.1 차체 및 현가 장치

차체 및 구동계 모델의 개략도는 아래의 Fig. 1과 같다. 차체 모델은 x, y, z 방향 병진운동과 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(yaw) 방향의 회전운동의 6자유도를 고려했다. 현가장치는 휠에 장착된 각각의 1/4 차량 모델로 가정하여 차체의 회전 운동 및 노면입력에 따라 상태변수가 계산되며 전륜축의 톨바 강성을 고려했다. 조향 입력이 가해지는 전륜에는 슬립각 및 하중에 따라 맵을 이용하여 복원 토크를 산출했

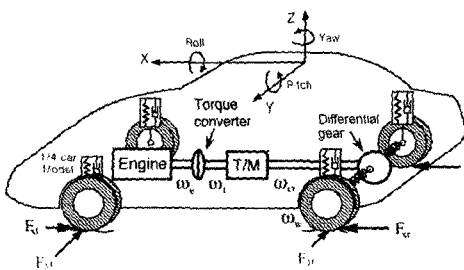


Fig. 1 3-D Vehicle dynamic model

Table 1 Vehicle parameters

Vehicle total mass	1637 kg
Unsprung mass	27.5 kg
Front roll bar stiffness	19200 Nm/rad
Distance from c.g. to front wheel	1.240 m
Distance from c.g. to rear wheel	1.460 m
Moment of inertial about x-axis	460 kgm ²
Moment of inertial about y-axis	2460 kgm ²
Moment of inertial about z-axis	2400 kgm ²

다. 조향과 관련된 기본적인 차량계수는 아래 Table 1과 같다.

2.2 구동계 모델

엔진모델 및 토크컨버터 모델은 맵을 이용하여 각각의 토크를 구하는 정적 모델을 사용했고, 변속장치는 변속 맵을 이용해 차속과 스피드케도에 따라 단수를 결정하는 자동변속 장치를 적용했다. 구동축은 선형스프링으로 가정하여 구동토크를 구했으며, 타이어 모델은 Pacejka 모델을 적용하였으며, 종방향 및 횡방향 타이어 힘은 차체모델과 현가장치 모델로부터 산출된 각 차륜의 슬립율과 슬립각을 이용해 magic formula를 이용하여 계산했다. 또한, combined tire model을 이용해 종방향과 횡방향 힘이 슬립율과 슬립각 모두에 종속되는 모델을 사용했다.¹⁾

다음의 Fig. 2는 정상선회 주행시험을 이용하여 구한 슬립각과 횡방향 타이어힘의 관계 곡선이다. Magic formula의 각각의 계수는 시험결과에 맞게 적절하게 조정했다.

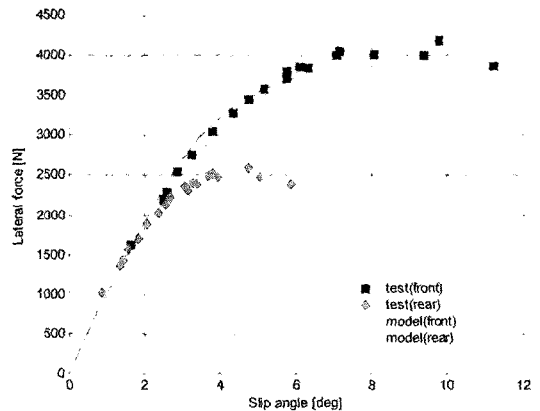


Fig. 2 Magic formula tire model (lateral)

차동기어는 좌우의 구동륜에 같은 토크를 분배하는 장치로써, 직진시나 미소한 선회시는 큰 영향을 끼치지 않으나 과도한 조향이나 임계주행상황에서는 차량거동에 큰 영향을 줄 수 있다. 그러므로 정확한 좌우 토크를 계산하기 위해 선 기어(sun gear) 및 링기어(ring gear) 각속도의 운동방정식을 고려해 모델링했다.²⁾

3. 운전자 조향 모델

3.1 경로 오차

다음의 Fig. 3은 곡선로를 주행하는 운전자-차량 시스템을 나타낸다. 경로 오차는 F점과 P점 사이의 각오차(α)와 거리오차($L \sin \alpha$)로 정의되며 이는 운전자가 인식하는 시각적인 조향 정보의 산술적 오차량이다. C점은 차량의 무게 중심점이며 F점은 차량의 진행방향과 평행하다고 가정한 운전자 주시방향 상의 점으로 무게중심과 임의로 설정한 주시거리(P_{dist})만큼의 거리를 두고 있다. P점은 F점과 원하는 경로의 수직교점으로 운전자가 지향하는 차량의 목표 진행점이다.³⁾

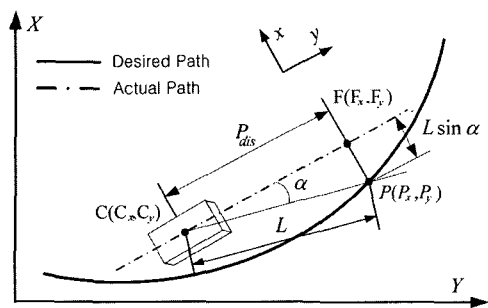


Fig. 3 Error model

3.2 경로 제어기

각도 오차와 횡방향 거리 오차의 정의가 아래 식 (1)과 같을 때, 최종 조향입력 δ 는 아래와 같은 PI 제어기를 사용하여 결정한다.

$$e_{ang} = \alpha, e_{dist} = L \sin \alpha \quad (1)$$

$$\delta_{ang} = K_{p(ang)} e_{ang} + K_{i(ang)} \int e_{ang} dt$$

$$\delta_{dist} = K_{p(dist)} e_{dist} + K_{i(dist)} \int e_{dist} dt$$

$$\delta = \delta_{ang} + \delta_{dist} \quad (2)$$

각각의 게인값(K_i, K_p) 및 주시거리(P_{dist})는 시뮬레이션을 통해 차량의 주행속도 및 곡률반경에 따라 적절한 값을 trial and error로 구했다. 위의 PI 제어기를 통해 구해진 조향 입력은 시간 지연 요소를 갖는 2차 시불변 시스템의 운전자 팔의 신경근육 모델⁴⁾을 통해 3차원 차량 모델의 조향 입력 값으로 결정

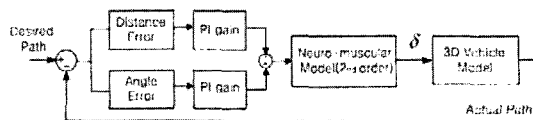


Fig. 4 Schematic diagram of driver-3D vehicle model

된다. Fig. 4는 경로제어기의 개략도를 나타낸다.

4. 실차실험을 통한 모델 검증

4.1 3차원 차량 모델의 검증

실차 실험으로부터 얻은 결과와 모델 시뮬레이션 결과를 비교하여 3차원 차량 모델을 검증했다. 차량 실험을 통해서 얻은 운동변수는 차량의 전체적인 안정성 판별에 큰 영향을 미칠 수 있는 종방향 속도, 횡방향 가속도, 요속도, 롤 각도 등이다. 횡방향 가속도와 요속도 및 조향각 센서는 실제 안정성 제어기에 상용화되고 있는 센서를 그대로 이용했고 종방향 속도는 별도의 광학속도계를 장착하여 측정했다.

본 연구의 목적은 차량의 횡방향 거동, 즉 핸들링 특성에 관한 것이므로 동일한 조건에서의 상호 비교를 위해 3차원 차량 모델의 종방향 속도는 실험차량에서 얻은 종방향 속도를 제어기를 이용해 그대로 추종하도록 하였으며 속도 추종을 위한 알고리즘은 지능형 순항 제어(Intelligent Cruise Control, ICC)의 알고리즘을 사용했다.⁵⁾ 순항 제어의 알고리즘은 차량의 횡방향 운동을 배제한 것이므로 다음과 같이 조향입력이 존재하는 경우 정확한 속도 추종을 위해선 다소의 수정이 필요하다. 그러나 대략적인 동특성 비교에서 위와 같은 제어기 설계 오차는 큰 영향을 미치지 않으므로 수정없이 기존의 순항제어 알고리즘을 그대로 사용하였다. 모델의 차량 횡방향 조향 입력은 실험 차량의 조향각 센서에서 얻은 값을 사용했다. 또한, 3차원 차량 모델의 노면 마찰계수는 실차 실험이 실시된 정상노면 조건($\mu=0.8$)에 해당하는 값을 사용했다. 다음은 주행조건에 따른 다양한 조향 입력하의 실차 실험 결과와 시뮬레이션 모델 간의 비교 결과이다.

4.1.1 정상원 주행 실험

30m의 반경을 갖는 정상원 도로를 정지상태에서 출발하여 정상원 선회가 가능한 속도까지 주행하였다. 아래의 Fig. 5와 같이 차량은 일정 곡률의 도로를

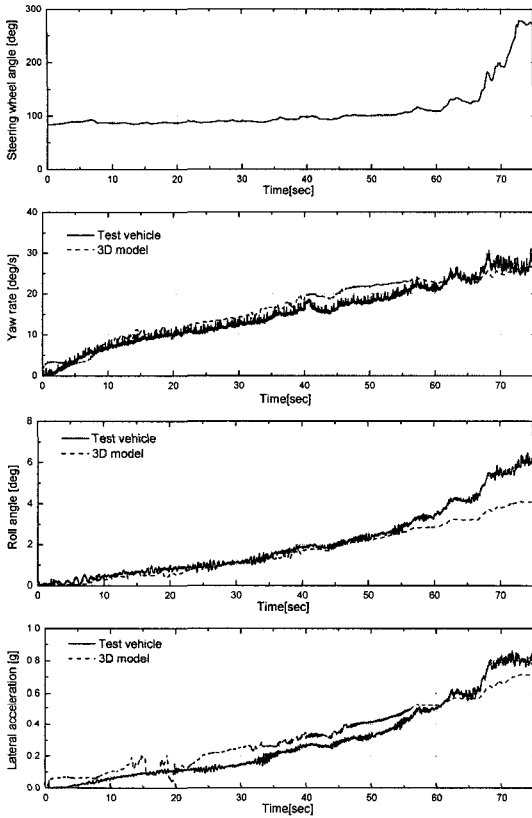


Fig. 5 Constant circle test

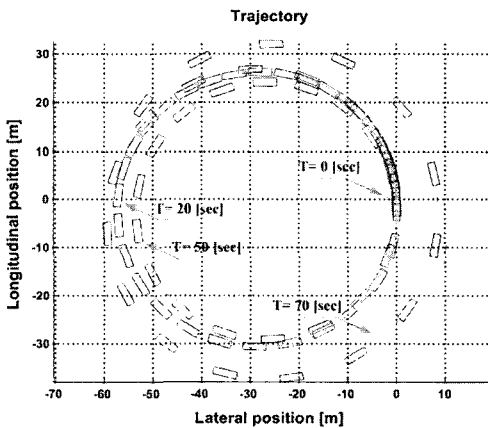


Fig. 6 Vehicle trajectory (constant circle test)

주행하므로 한계 속도에 이르기 전까지 90에서 100도 범위내의 일정 조향각이 가해졌음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과의 요속도와 횡방향 가속도가 실험 결과와 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 3차원 차량 모델로부터 얻은 주행 궤적

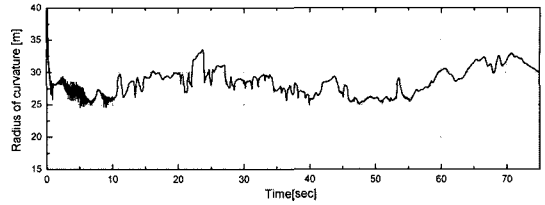


Fig. 7 Radius of curvature (constant circle test)

을 나타내며 Fig. 7은 시간에 따른 곡률반경을 나타낸다. 주행계적은 선회반경 30m와 거의 일치하며 60초 이상이 되면 속도가 증가함에 따라 선회반경이 점차 증가함을 알 수 있다.

4.1.2 차선 변경 실험

차선 변경 실험은 종방향 속도를 약 80kph로 유지한 상황에서 2초 이내에 사인과 형상의 조향입력을 급격하게 가하여 실시했다. 동일한 조향각이 가해졌을 때, 차량의 거동은 Fig. 8과 같이 시뮬레이션과 실험결과와의 요속도, 롤각, 횡방향 가속도가 거의 일

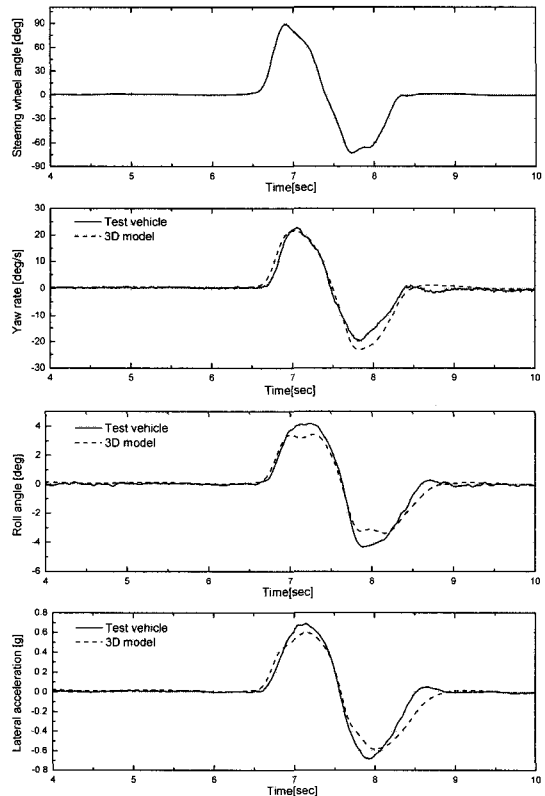


Fig. 8 Lane change test (80kph)

치하는 경향을 보인다.

90도 정도의 조향각이 급격하게 가해짐으로써 타이어에서 작용하는 횡방향 타이어 힘은 타이어 모델에서 비선형 영역에 도달하게 된다. 본 연구에 사용된 타이어 모델이 급격한 선회 주행에서도 차량의 거동을 비교적 정확하게 표현함을 알 수 있다.

4.1.3 슬라롬 실험

슬라롬 실험은 차량의 종방향 속도를 80kph로 유지하면서 실시했다. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 고속에서의 슬라롬 주행실험에서도 차량 거동의 주기 및 진폭이 유사함을 알 수 있다.

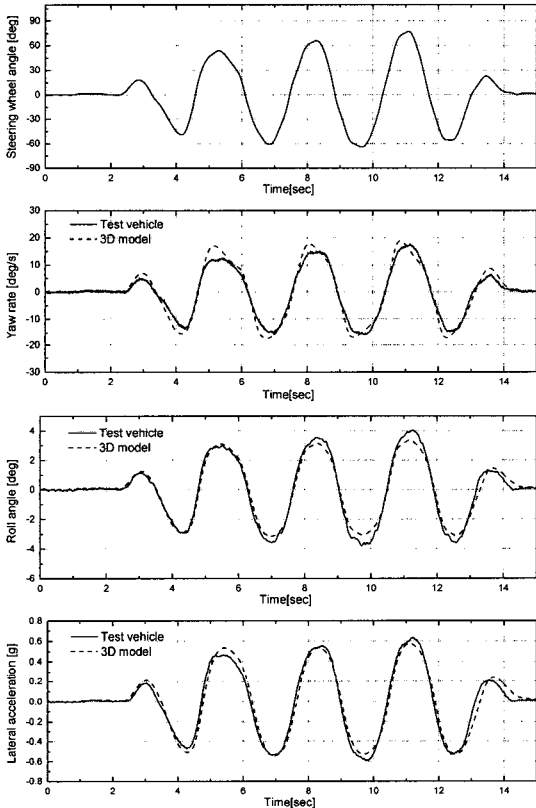


Fig. 9 Slalom test(80kph)

4.2 운전자 조향 모델의 검증

운전자 조향 모델을 포함한 3차원 차량 모델의 검증은 주행 궤적에 대한 정확한 정보를 알 수 있는 정상원 주행실험에 한해 운전자 조향 모델에 동일한 주행 경로를 입력해 실시하였다. 모델과 정상원 주

행 실험과의 비교 결과를 그림 Fig. 10에 나타냈다. 모델을 통한 시뮬레이션은 차량이 완전히 한 바퀴 선회한 상황까지 재현했다. 그림에서 볼 수 있듯이 30m의 일정 곡률을 갖는 도로를 운전자조향 모델을 적용 재현했을 때 실제 실험에서 얻은 조향각과 매우 유사하다. 따라서 제안된 운전자 조향 모델이 실제 운전자에 근사한 조향 특성을 나타낼 수 있다고 볼 수 있다.

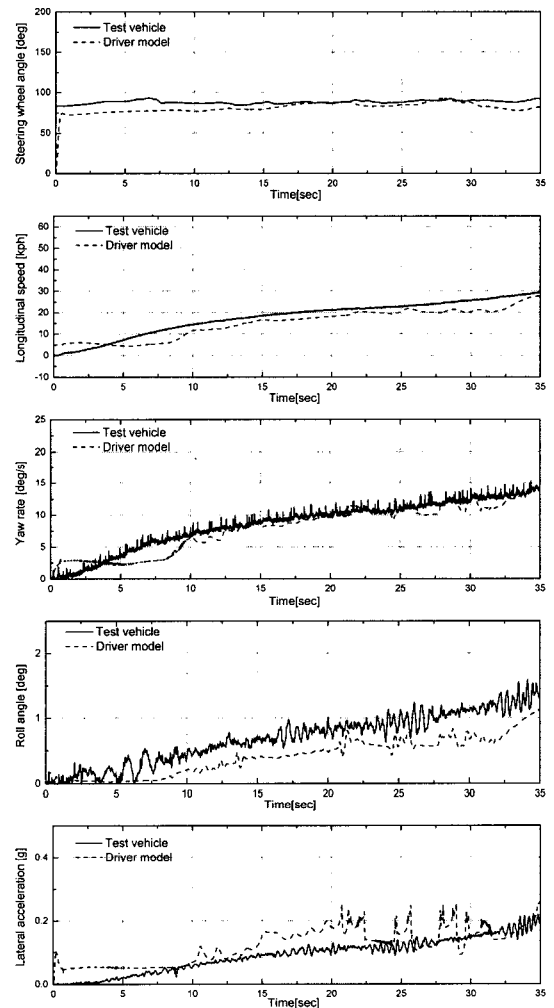


Fig. 10 Driver steering model and vehicle test result

운전자 조향 모델을 실제 운전자의 조향 입력에 근사화 시키기 위해서는 차량의 주행 속도와 회전 곡률반경에 적절한 PI 게인(K_i, K_p)과 주시거리(P_{dist})

선정이 요구되며 trial and error로 선회로와의 거리 오차를 최대한 줄일 수 있는 값으로 결정했다. 30m 정상원 선회시 각 케인값과 주시거리는 다음의 Table 2와 같다.

Table 2 Driver model PI gain and preview distance

Preview distance	12 m
Angle error P-gain	0.03
Angle error I-gain	0.003
Distance error P-gain	0.01
Distance error I-gain	0.001

Fig. 10에서 요속도와 종방향 속도가 초반에 실험 결과와 잘 일치하지 않는 것은 ICC의 속도추종 알고리즘에서 차량 초기속도를 5kph로 설정하였기 때문이다. 가속도의 경우 실험 결과에 비해 몇몇 구간에서 순간적으로 진동이 심해지는 현상을 확인할 수 있다. 이는 ICC 알고리즘의 속도 추종을 위한 스톱 제어에 의해 나타나는 현상이다.

Fig. 11 및 Fig. 12는 운전자 조향 모델로부터 얻은 궤적과 30m 선회로 간의 거리오차를 나타낸다. 그

림에서 알 수 있듯이 경로오차 1m내에서 양호한 궤적 추종성능을 보이고 있다. 차량의 속도가 증가할 수록 도로와의 거리 오차가 커지는 것은 속도 증가에 따른 차량의 언더스티어 효과가 커지기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 실차 실험 결과와 3차원 차량모델 및 운전자 조향 모델의 상호 비교를 통해 차량 시뮬레이션 모델을 검증했다. 다양한 실차 실험 결과와 비교한 결과, 모든 경우에서 실험 결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다. 운전자 조향 모델의 검증을 위해서 정상원 주행 실험 결과를 사용하였으며 이를 통해 운전자 모델의 조향특성이 실제 운전자의 조향 특성을 잘 표현함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업(MI-0302-00-0009)지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) E. Bakker, H. B. Pacejka and L. Linder, "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE Transactions, Journal of Passenger Cars, Vol.98, No.890087, 1998.
- 2) C. Lee, S. Lee and K. Yi, "Differential Gear Model and Its Influence on Vehicle Dynamics," 1999 KSAE Fall Conference Proceeding, Vol.II, pp.446-451, 1999.
- 3) R. A. Hess and A. Modjtahedzadeh, "A Control Theoretic Model of Driver Steering Behavior," IEEE Control Systems Magazine, August, pp.3-8, 1990.
- 4) R. A. Hess, "Analyzing Manipulator Characteristics in the Closed-loop Pilot/Vehicle System," Systems, Man and Cybernetics, Conference Proceedings, IEEE International Conference on International Conference on, 4-7 Nov., pp.533-535, 1990.
- 5) K. Yi, H. J. Yoon and K. Huh, "Implementation

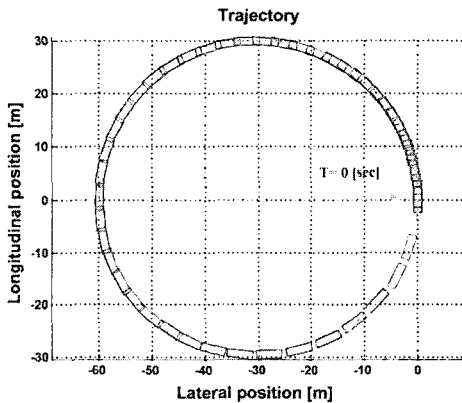


Fig. 11 Trajectory of driver steering model

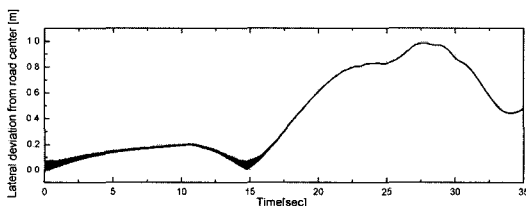


Fig. 12 Radius of curvature (driver steering model)

and Vehicle Tests of a Vehicle Stop-and-Go Cruise Control System,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of

Automobile Engineering, Vol.216, Part D, pp.537-544, 2000.