

〈논 문〉 SAE NO. 953742

운전자-자동차모델을 이용한 4륜조향자동차의 주행특성 해석

Dynamic Characteristics Analysis of a Four-Wheel Steering Vehicle Using a Driver-Vehicle Model

이영화,* 김석일,** 서명원,*** 김대영,**** 김동룡****
Y. H. Lee, S. I. Kim, M. W. Suh, D. Y. Kim, D. R. Kim

ABSTRACT

A driver-vehicle model means the integrated dynamic model that is able to estimate the steering wheel angle from the driver's desired path based on the dynamic characteristics of the driver and vehicle. In this paper, the dynamic characteristics of several four-wheel steering systems with the simultaneously steerable front and rear wheels are investigated and compared by means of the driver-vehicle model. Especially, the presented analysis results are obtained by using the ISO test codes such as lane change, double lane change and slalom, and the effects of the driver's steering response time and vehicle speed are examined on the responsiveness and stability of vehicle.

주요기술용어 : Four-Wheel Steering System(4륜조향시스템), Driver-Vehicle Model(운전자-자동차 모델), Steering Response Time(조향반응시간), Desired Path(요구경로), Expected Path(예측경로)

1. 서 론

최근 운전자-자동차-환경에 대한 하나의 통합적인 모델을 구축하기 위해서 운전자모델(Driver Model)에 대한 연구들[1-5]이 시도되고 있다. 일반적으로 운전자모델을 구현하는 방법으로는 2가지를 생각할 수 있는데, 그 하나는 자동차

의 주행상태에 대한 운전자의 감성적인 인자들인 운전자매개변수(Driver Parameter)들과 자동차의 특성을 이용해서 하나의 전달함수 형태로 표현하는 방법[1-4]이고, 또 다른 하나는 운전자가 원하는 경로를 따라서 자동차가 주행하도록 자동차의 동력학 모델을 이용해서 계속적으로 적절한 핸들의 조향각을 추정하는 방법[5]이다. 그러나 첫번째 방법은 운전자가 자동차의 주행특성에 미치는 영향을 해석학적으로 고찰할 수 있다는 점에서는 유리하지만, 운전자의 조향특성이 모두 다르기 때문에 주행실험결과로부터 추정되

* 정회원, 한국항공대학교 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 기계설계학과

*** 정회원, 성균관대학교 기계설계

**** 정회원, 기아기술센터 차량연구실

는 운전자매개변수들은 실험대상의 운전자와 자동차에 대해서만 적용할 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 운전자의 조향특성을 충분히 반영하지는 못하지만, 실제의 경우와 같이 운전자가 원하는 경로를 자동차가 주행할 때의 특성을 해석하기 위해서는 두번째 방법이 적합하다.

본 연구에서는 경로변경에 대한 운전자의 조향 반응시간, 그리고 운전자의 요구경로(Desired Path)와 예측경로(Expected Path) 사이의 횡방향 경로오차를 매개변수들로 하는 운전자모형을 구성하고, 그 운전자모형을 토대로 운전자의 요구경로를 자동차가 주행할 때의 4륜조향방법, 운전자의 조향반응시간 및 자동차의 주행속도가 자동차의 응답성과 안정성에 미치는 영향을 해석하였다. 특히 해석은 차선변경(Lane Change), 이중차선변경(Double Lane Change), 그리고 슬래럼(Slalom)과 같은 자동차의 주행실험코드들을 이용해서 수행하였으며, 그와 관련된 자동차의 주행특성들인 주행경로, 핸들조향각, 횡가속도(Lateral Acceleration), 그리고 요우속도(Yaw Velocity)를 비교·검토하였다.

2. 4륜조향자동차의 동역학 모델

2.1 자동차모델

본 연구에서는 자동차의 주행특성을 해석하기 위한 자동차모델로서 선형모델(Bicycle Model)을 사용하였다. 자동차에 작용하는 횡력(Lateral Force)과 요우모멘트(Yaw Moment)에 대한 평형조건들로부터 유도되는 4륜조향자동차의 선형모델에 대한 운동방정식들은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다[6].

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 시스템행렬 A와 입력행렬 B의 요소들은 아래와 같이 주어진다.

$$A_{11} = \frac{-(C_f + C_r)}{Mu} \quad A_{12} = -\frac{(aC_f - bC_r)}{Mu} u$$

$$A_{21} = \frac{-(aC_f - bC_r)}{I_z u} \quad A_{22} = \frac{-(a^2 C_f + b^2 C_r)}{I_z u}$$

$$B_{11} = \frac{C_f}{M} \quad B_{12} = \frac{C_r}{M}$$

$$B_{21} = \frac{aC_f}{I_z} \quad B_{22} = -\frac{bC_r}{I_z}$$

그리고 식(1)에서 δ_f 와 δ_r 은 전륜조향각과 후륜조향각, v 와 γ 은 자동차의 무게중심에서의 횡속도와 요우속도, a 와 b 는 자동차의 무게중심에서 전륜까지의 거리와 후륜까지의 거리, u 는 자동차의 주행속도, M 과 I_z 는 자동차의 질량과 요우관성모멘트(Yaw Moment of Inertia), 그리고 C_f 와 C_r 은 전륜타이어와 후륜타이어의 코너링강성(Cornering Stiffness)들을 각각 의미한다.

2.2 4륜조향시스템

Table 1에 제시된 4륜조향시스템들은 자동차

Table 1 Typical Four-Wheel Steering Systems

System	C_1	C_2
0	0	0
1	-1	$\frac{M}{a+b} \cdot \left(\frac{b}{C_f} + \frac{a}{C_r} \right)$
2	$-\frac{C_f}{C_r}$	$\frac{Mu^2 + C_f a - C_r b}{C_r u^2}$
3	$\frac{-C_f u I_z \cdot s + C_f a M u^2 - C_f C_r b(a+b)}{C_r u I_z \cdot s + C_r b M u^2 + C_f C_r a(a+b)}$	0
4	$\frac{C_f a M u^2 - C_f C_r b(a+b)}{C_r b M u^2 + C_f C_r a(a+b)}$	0
5	0	$\frac{M}{a+b} \cdot \left(\frac{a}{C_r} - \frac{b}{C_f} \right)$

의 무게중심에서의 횡미끄럼각(Side Slip Angle)을 0으로 만들거나(시스템 1, 2, 3, 4), 뉴트럴(Neutral)조향특성을 갖도록(시스템 5) 후륜을 조향시키고 있다. 그리고 이러한 4륜조향시스템들은 기본적으로 전륜조향각과 자동차의 동적 상태(요우속도)에 따라서 후륜을 조향하는 방법을 사용하고 있기 때문에, 그 제어알고리즘들은 전륜조향각 δ_f 와 자동차의 무게중심에서의 요우속도 γ 을 이용해서 식 (2)와 같이 일반적인 형태로 표현할 수 있다[6,7].

$$\delta_r = C_1 \cdot \delta_f + C_2 \cdot u \cdot \gamma \quad (2)$$

여기서 계수 C_1 과 C_2 가 모두 0인 경우에는 후륜조향이 없는 2륜조향시스템(시스템 0)을 의미한다.

3. 운전자모델

본 연구에서의 운전자모델은 2개의 매개변수들인 경로변경에 대한 운전자의 조향반응시간 t_a , 그리고 운전자의 요구경로와 예측경로 사이의 횡방향 경로오차 ϵ 에 의해서 표현된다. 즉 Fig.1에서와 같이 시간 t_0 일 때 자동차의 무게중심이 점 $(x(t_0), y(t_0))$ 에 위치하고 있는 경우, 자동차의 무게중심이 시간 t_0+t_a 일 때의 목표점인 점 $(x(t_0+t_a), y(t_0+t_a))$ 에 도달하기 위해서는 시간 t_0 부터 시간 t_0+t_a 까지 지속적인 운전자의 핸들조향이 요구되기 때문에, 본 연구에서는 운전자가 원하는 경로를 자동차가 주행할 수 있도록 핸들의 조향각을 각각의 시간마다 계속적으로 추정하는 운전자모델을 구성하였다. Fig.2는 그 계통도를 보여주고 있다.

시간 t_0 에서 조향반응시간 t_a 동안 $i-1$ 번째 반복계산단계에서 결정된 핸들조향각 $\delta_{sw}^i(t_0)$ 로 일정하게 핸들을 조향하면, 운전자의 목표점 $(x(t_0+t_a), y(t_0+t_a))$ 와 핸들조향각 $\delta_{sw}^i(t_0)$ 에 의해서 자동차모델로부터 계산되는 i 번째 반복계산단계에서의 예측점 $(\hat{x}_i(t_0+t_a), \hat{y}_i(t_0+t_a))$ 사이에는 횡방향 경로오차 ϵ_i 가 존재한다. 따라서 횡방향 경로오차 ϵ_i 가 0이 될 때까지 식 (3)을 이

용해서 계속적으로 핸들조향각 $\delta_{sw}^i(t_0)$ 를 수정하면, 자동차는 운전자의 요구경로를 따라서 주행하게 된다.

$$\delta_{sw}^{i+1}(t_0) = \delta_{sw}^i(t_0) + \alpha \cdot \epsilon_i \quad (3)$$

여기서 첨자 i 는 반복계산회수를 나타내며, α 는 수정계수(corrective factor)이다. 수정계수 α 는 운전자의 목표점과 $i+1$ 번째 반복계산단계에서의 예측점 사이의 횡방향 오차를 최소화하는 값으로 결정하였다. 그리고 본 연구에서는 시간 t_0 에서의 초기 핸들조향각 $\delta_{sw}^0(t_0)$ 를 단위요소시간인 Δt 시간전에 결정된 핸들조향각 $\delta_{sw}^0(t_0 - \Delta t)$ 로 가정하였다.

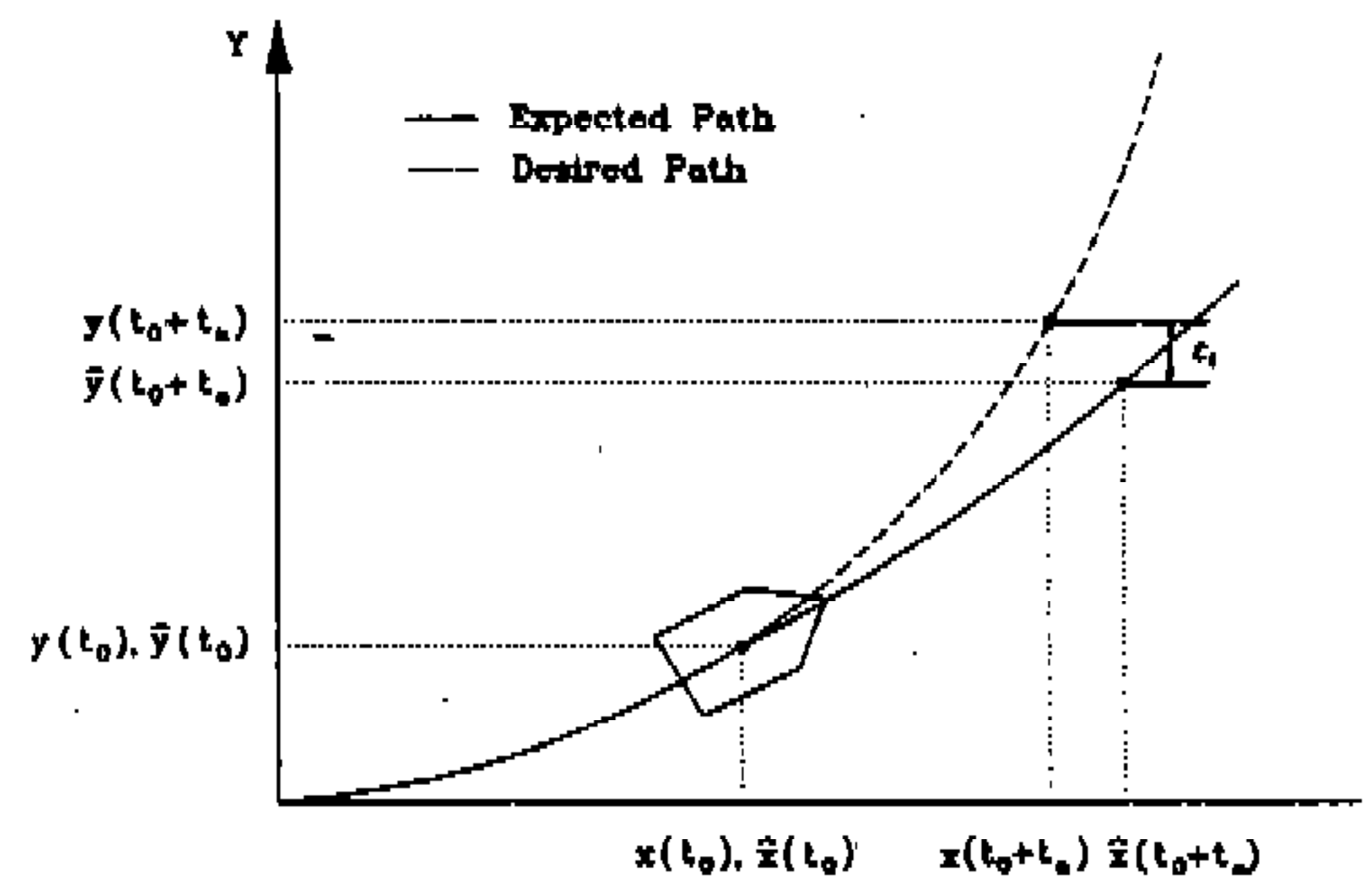


Fig.1 Strategy of Driver Model

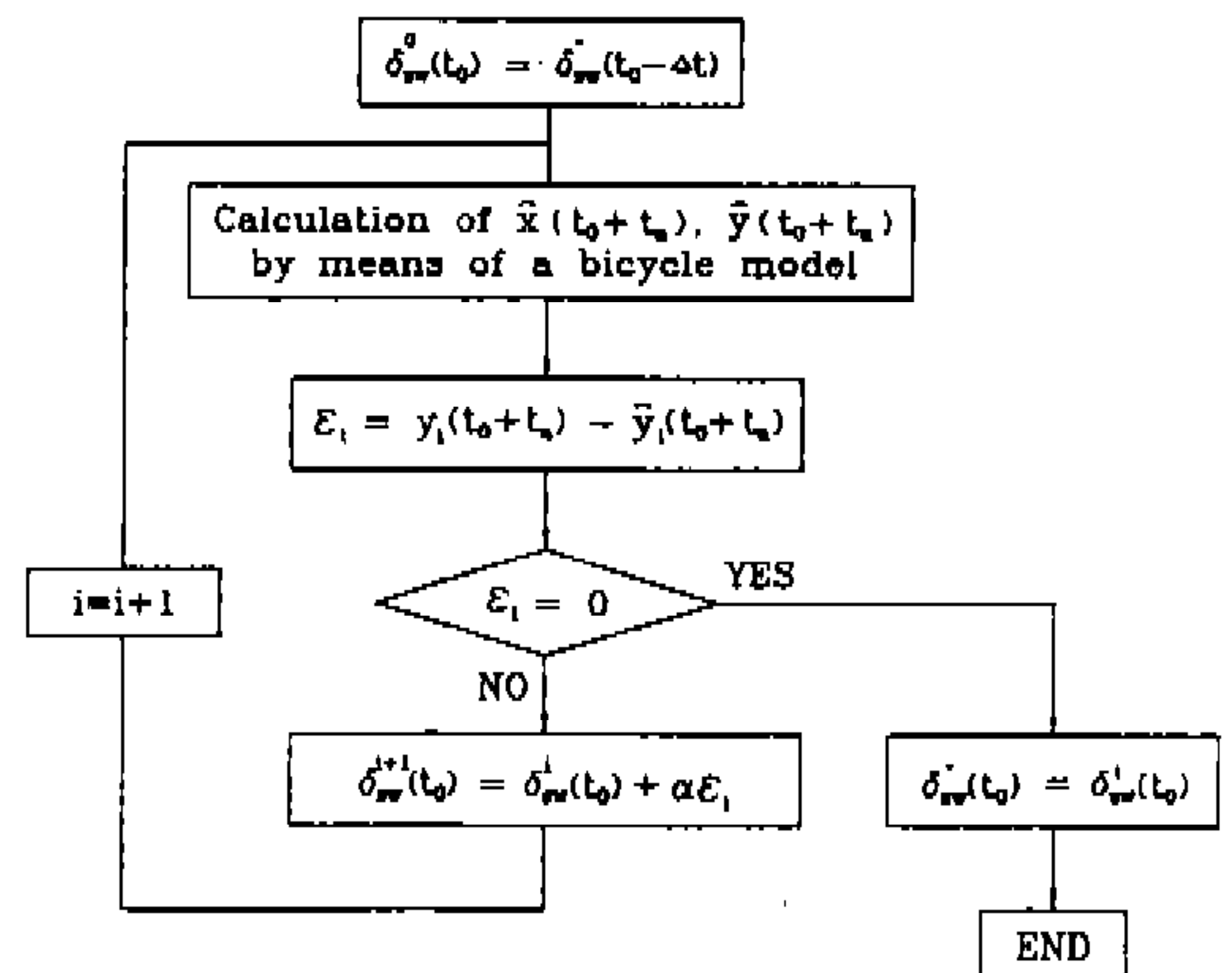


Fig.2 Determination of Steering Angle

4. 4륜조향자동차의 주행특성 해석 및 고찰

본 연구에서는 앞에서 언급한 운전자-자동차 모델과 4륜조향방법들을 이용해서 운전자의 요구경로를 자동차가 주행할 때의 4륜조향방법, 운전자의 조향반응시간 및 자동차의 주행속도가 자동차의 응답성과 안정성에 미치는 영향을 해석하였다. 특히 해석결과는 차선변경, 이중차선변경, 그리고 슬래럼과 같은 자동차의 주행실험코드들을 사용해서 자동차의 주행특성들인 주행경로, 핸들조향각, 요우속도, 그리고 횡가속도를 제시하였다. 그리고 본 연구에서 사용한 자동차의 제원은 Table 2에서 볼 수 있으며, 전륜조향각 δ_f

에 대한 핸들조향각 δ_{sw} 의 비인 기어비(Gear Ratio)는 15.5로 가정하였다.

4.1 차선변경(Lane Change)

본 연구에서는 ISO 7401에서 정의한 차선변경에 대한 주행경로를 토대로 4륜조향방법, 운전자의 조향반응시간 및 자동차의 주행속도가 자동차의 주행특성에 미치는 영향을 해석하였다.

Fig.3, 4, 5는 자동차의 주행속도 u 가 80km/h인 경우에 대해서 운전자의 조향반응시간 t_a 를 0.1, 0.5, 0.9sec로 주었을 때 얻은 차선변경시의 해석결과들을 보여주고 있다. 조향반응시간이 짧을수록 운전자가 예측할 수 있는 거리도 짧아지기 때문에, 자동차의 주행경로는 운전자의 요구경로와 매우 가까워지지만, 그를 위해서는 계속적으로 급격하면서도 큰 핸들조향이 요구되는 것으로 나타났다. 결과적으로 횡가속도와 요우속도도 조향반응시간이 짧을수록 커지고 있다. 그리고 조향반응시간이 길수록 주행경로, 횡가속도 및 요우속도는 완만해지지만, 횡방향 경로오차는

Table 2 Model Parameters of Four-Wheel Steering Vehicle

M	1,300kg	I_z	1,627kg·m ²
a	1.00m	b	1.45m
C_f	65,100N/rad	C_r	54,100N/rad

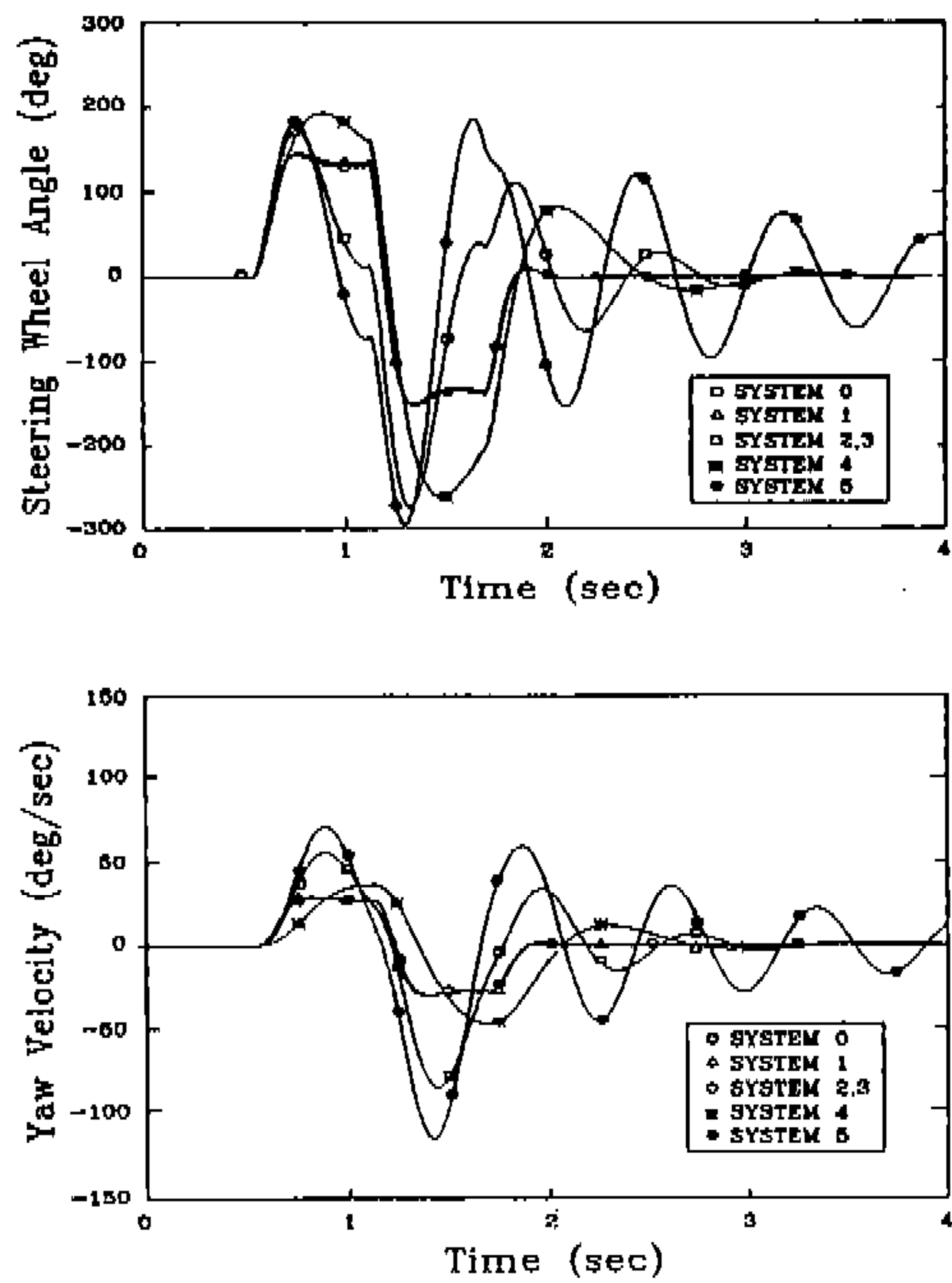
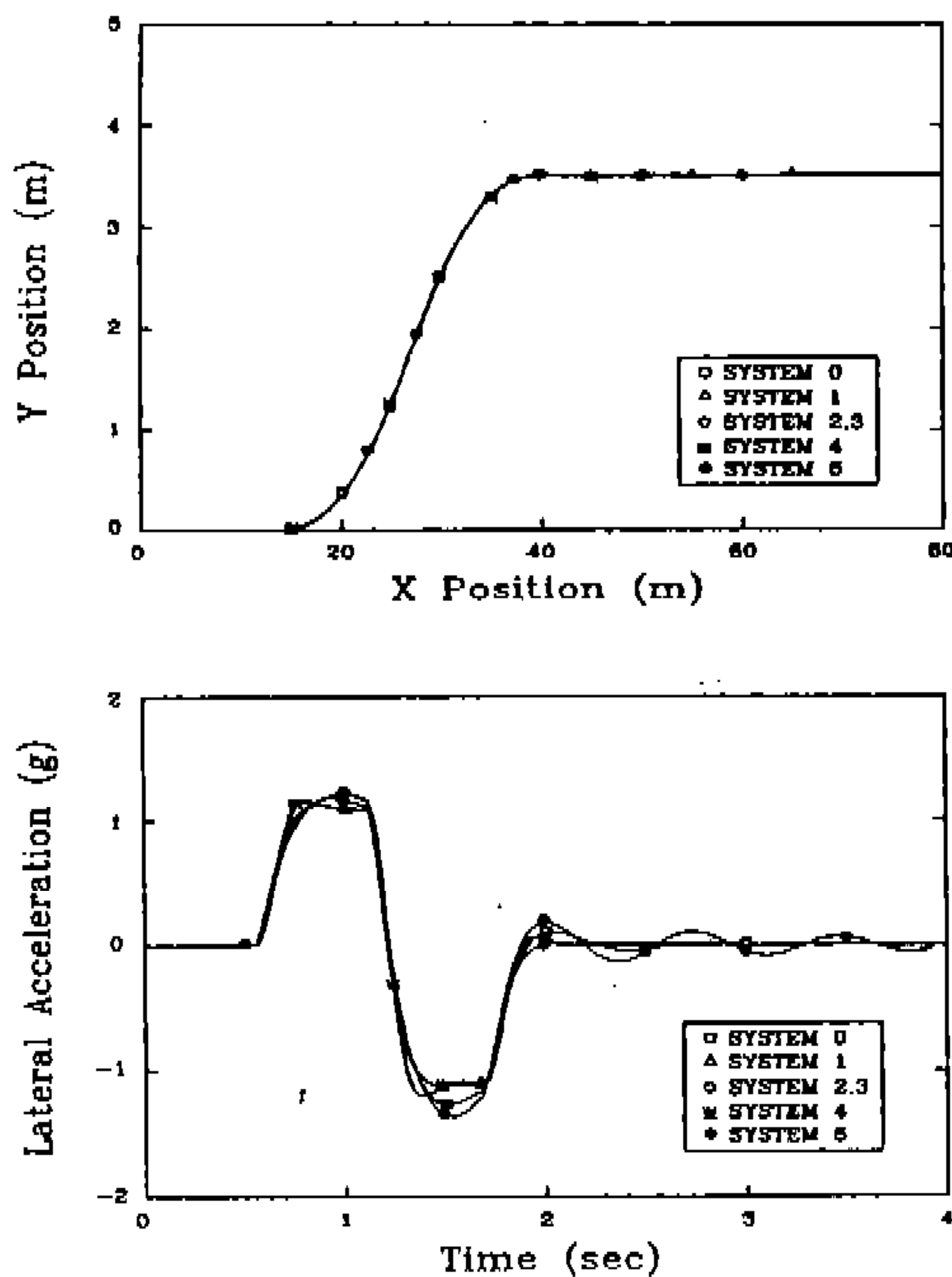


Fig.3 Behaviours in Lane Change ($u=80\text{km/h}$, $t_a=0.1\text{sec}$)

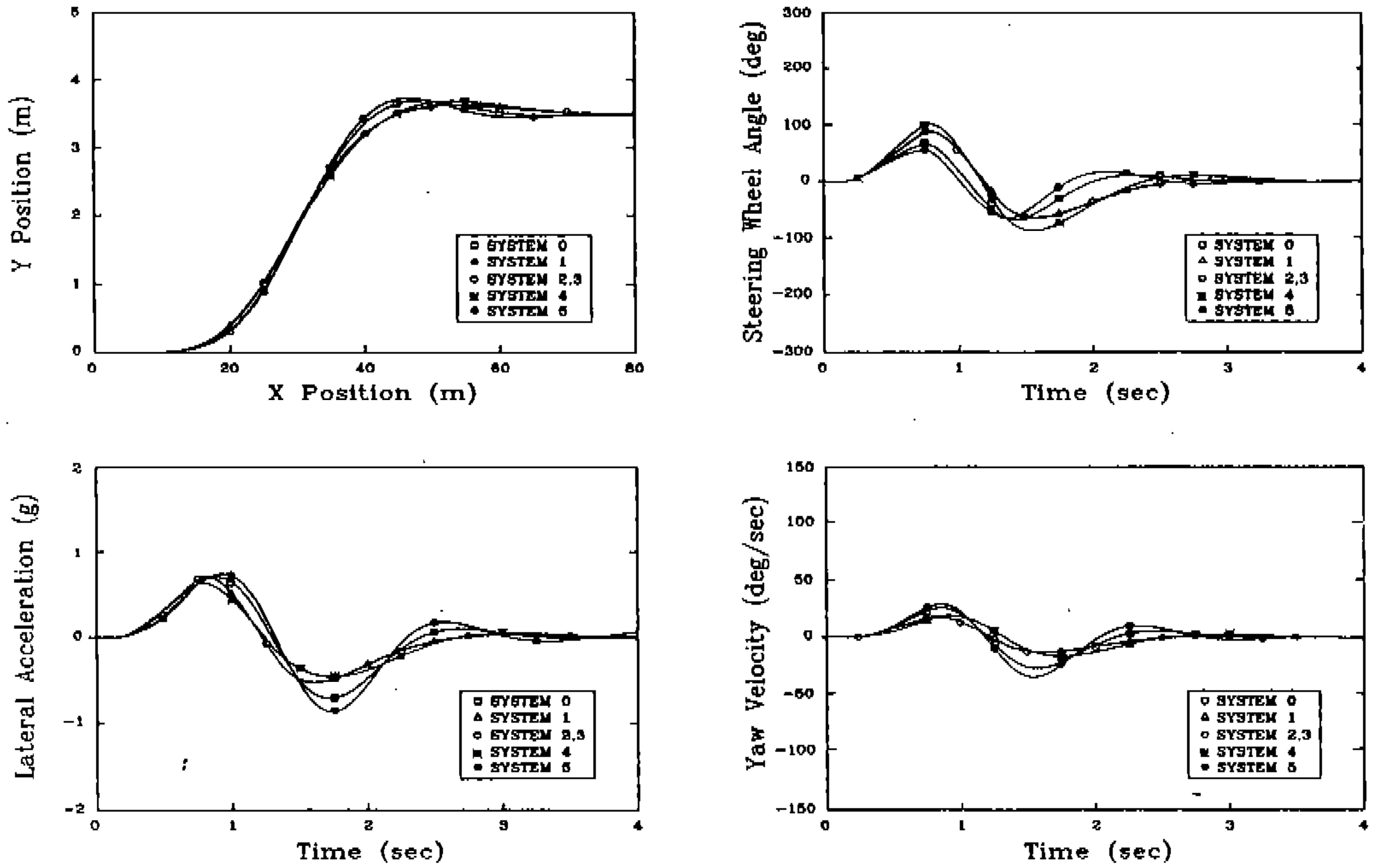


Fig.4 Behaviours in Lane Change
($u=80\text{km/h}$, $t_a=0.5\text{sec}$)

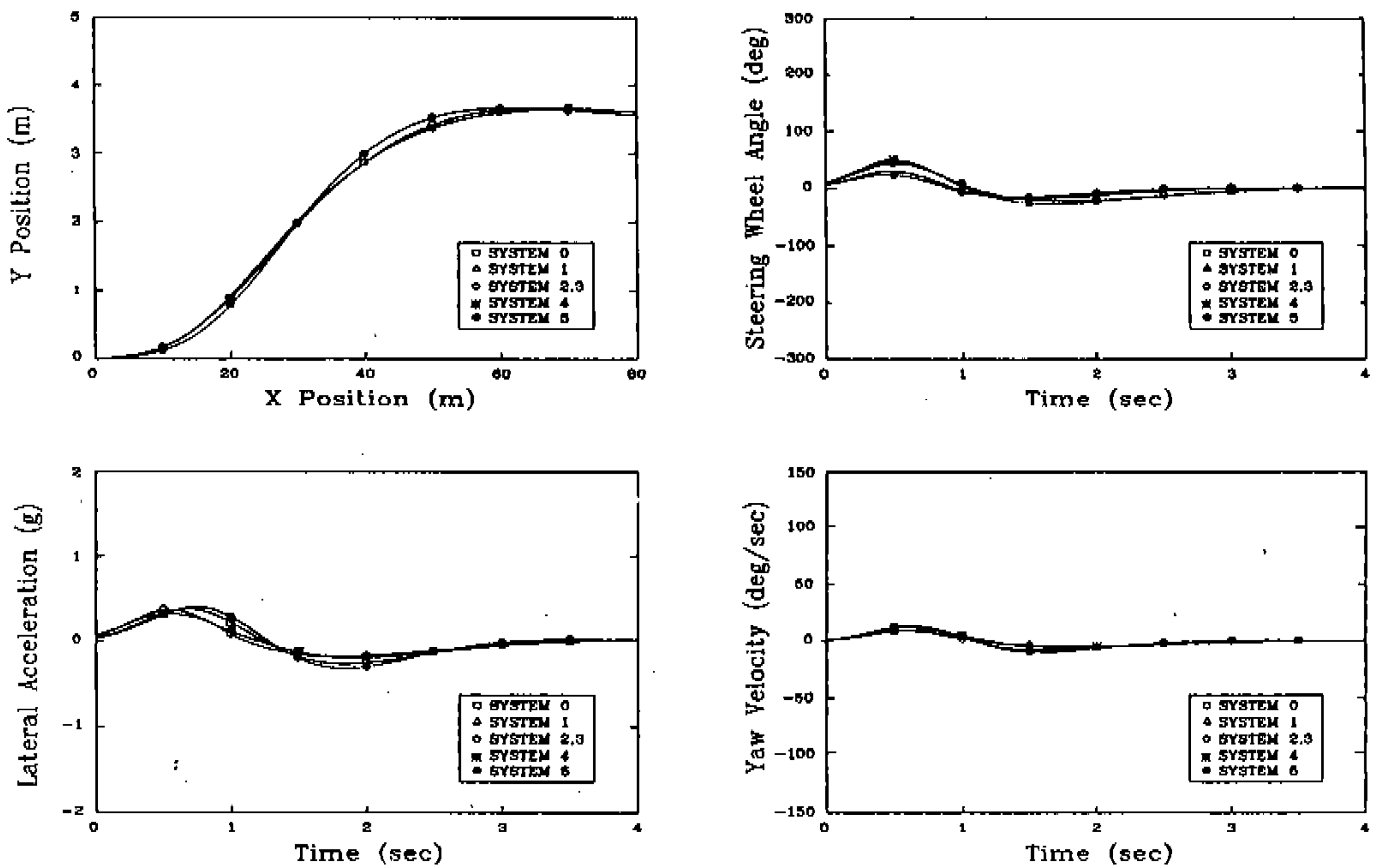


Fig.5 Behaviours in Lane Change
($u=80\text{km/h}$, $t_a=0.9\text{sec}$)

차선변경이 완료된 후에도 상당기간 존재하고 있음을 볼 수 있다.

또한 4륜조향방법이 차선변경시의 주행특성에 미치는 영향을 살펴보면, 과도상태에서도 자동차의 무게중심에서의 횡미끄럼각을 0으로 유지하는 시스템 1, 2, 3의 주행특성들은 다른 시스템들에 비해서 조향반응시간에 의한 영향을 적게 받으며, 안정성과 응답성이 매우 우수하고, 그 경향은 조향반응시간이 짧을수록 두드러짐을 알 수 있다. 특히 시스템 1, 2, 3의 경우에는 차선변경 이후의 영역에서 조향반응시간과 관계없이 거의 더 이상의 핸들조향을 필요로 하지 않는다.

횡가속도와 요우속도는 시스템 1, 2, 3, 그리고 정상상태에서만 자동차의 무게중심에서의 횡미끄럼각을 0으로 유지하는 시스템 4가 조향반응시간과 관계없이 2륜조향자동차인 시스템 0보다 항상 작은 것으로 나타났다. 특히 시스템 1, 2, 3은 조향반응시간이 짧은 급차선변경시의 횡가속도와 요우속도가 작기 때문에 매우 안정된 주행특성을 보여주고 있다. 그러나 시스템 1, 2,

3, 4는 조향반응시간이 길수록, 즉 완만하게 조향할수록 시스템 0보다 오히려 더 큰 핸들조향각을 필요로 하고 있다. 이러한 사실은 핸들조향이 완만할수록 핸들조향각의 고주파성분이 작아져서 주행특성이 정상상태에 가까워진다는 점, 그리고 자동차의 주행속도가 u 가 80km/h일 때 시스템 1, 2, 3, 4는 시스템 0보다 정상상태에서 더 큰 언더조향특성을 갖는다는 점[6]에 기인한 것이다. 그리고 시스템 2와 3은 모든 주행특성들이 해석조건과 관계없이 항상 같은 것으로 나타났다으며[6], 뉴트럴조향특성을 구현하는 시스템 5는 조향반응시간 t_r 가 0.1sec인 경우에 차선변경이 완료된 후에도 계속적으로 큰 핸들조향이 요구되기 때문에, 급차선변경시의 주행안정성에 많은 문제가 있는 것으로 판단된다.

Fig.6과 7은 조향반응시간 t_r 가 0.5sec이고, 자동차의 주행속도 u 가 각각 40, 120km/h인 경우에 얻은 차선변경시의 해석결과들을 보여주고 있다.

같은 조향반응시간이라도 운전자가 상대적으

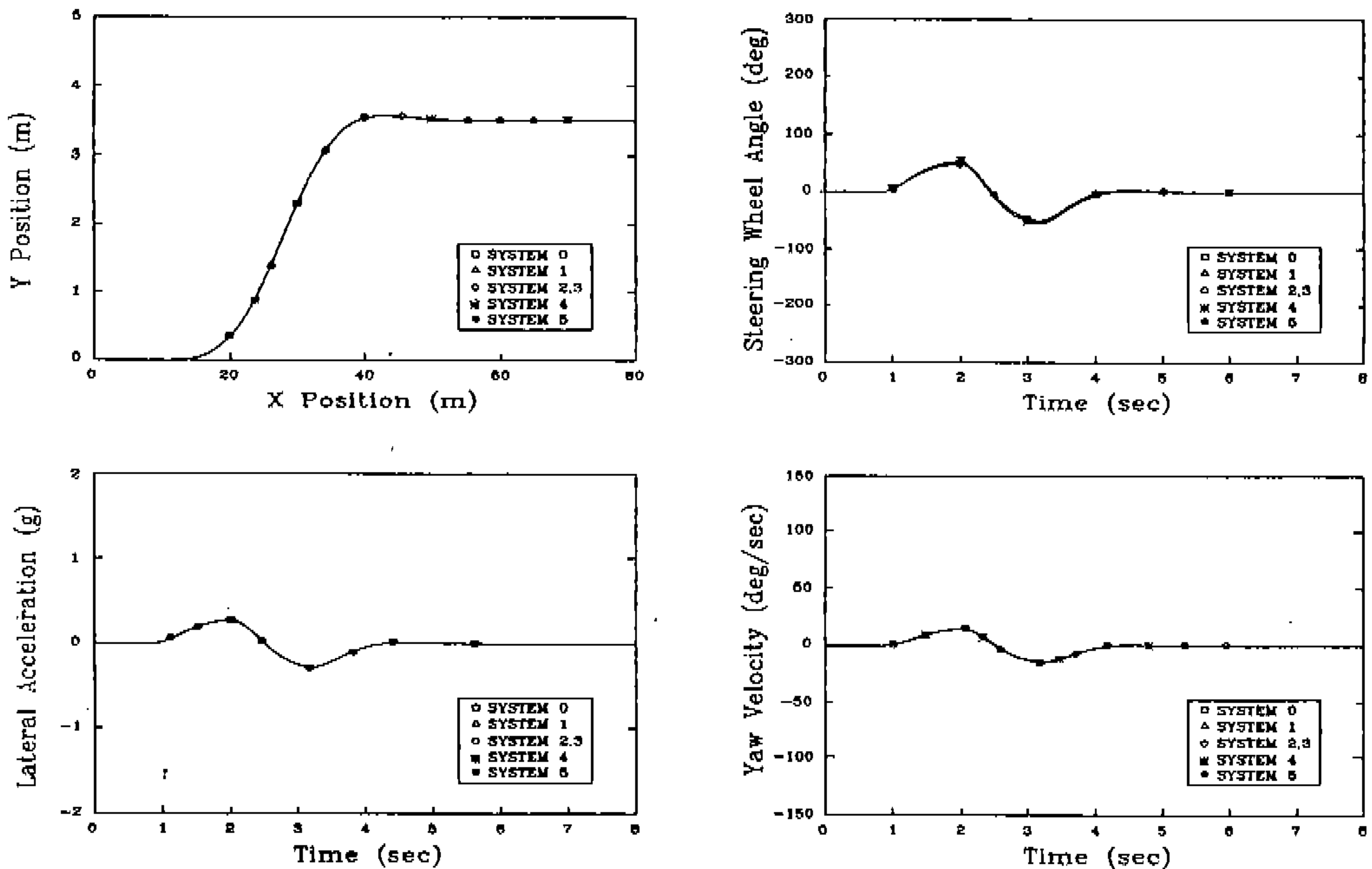


Fig.6 Behaviours in Lane Change ($u=40\text{km/h}$, $t_r=0.5\text{sec}$)

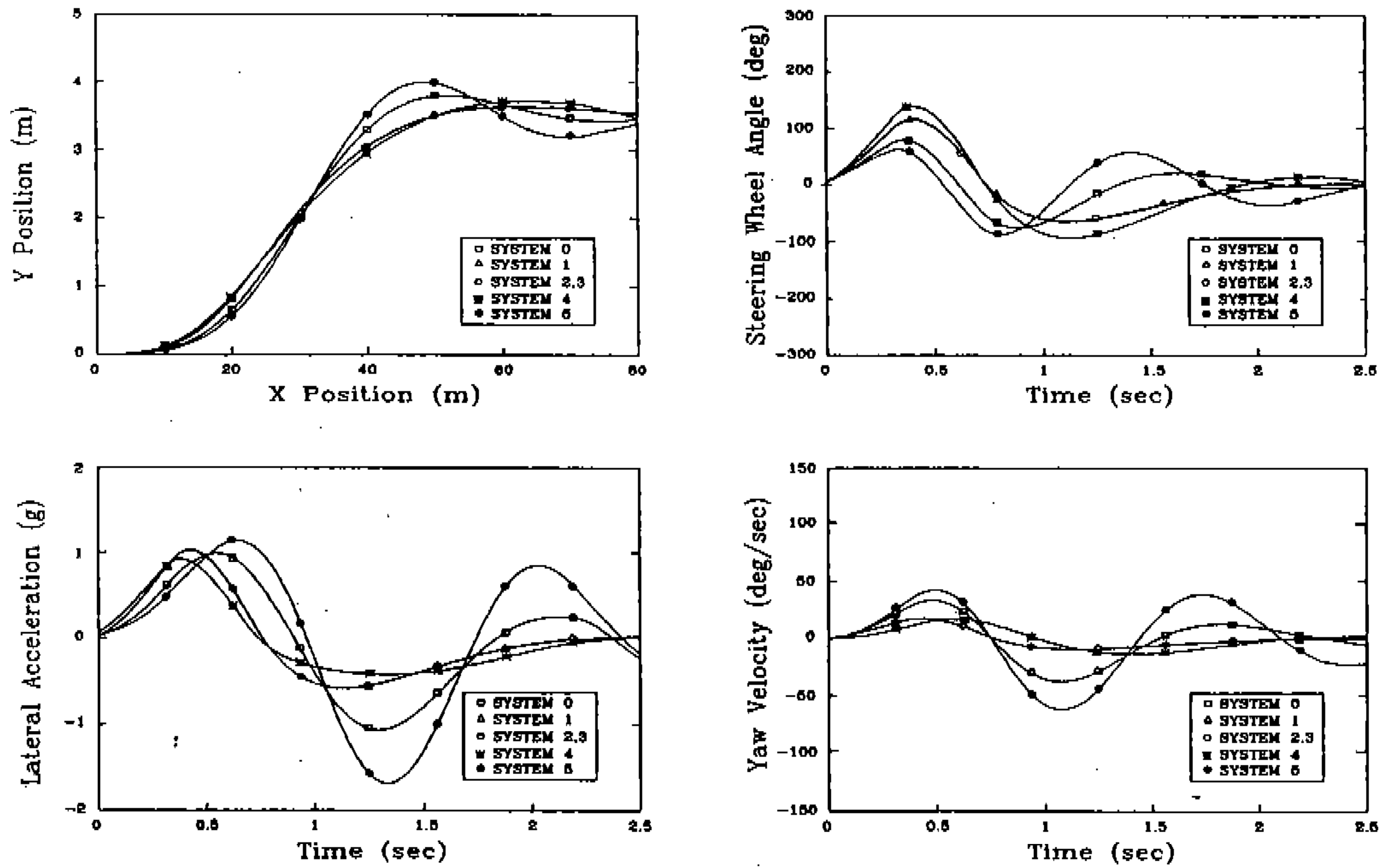


Fig.7 Behaviours in Lane Change
($u=120\text{km/h}$, $t_a=0.5\text{sec}$)

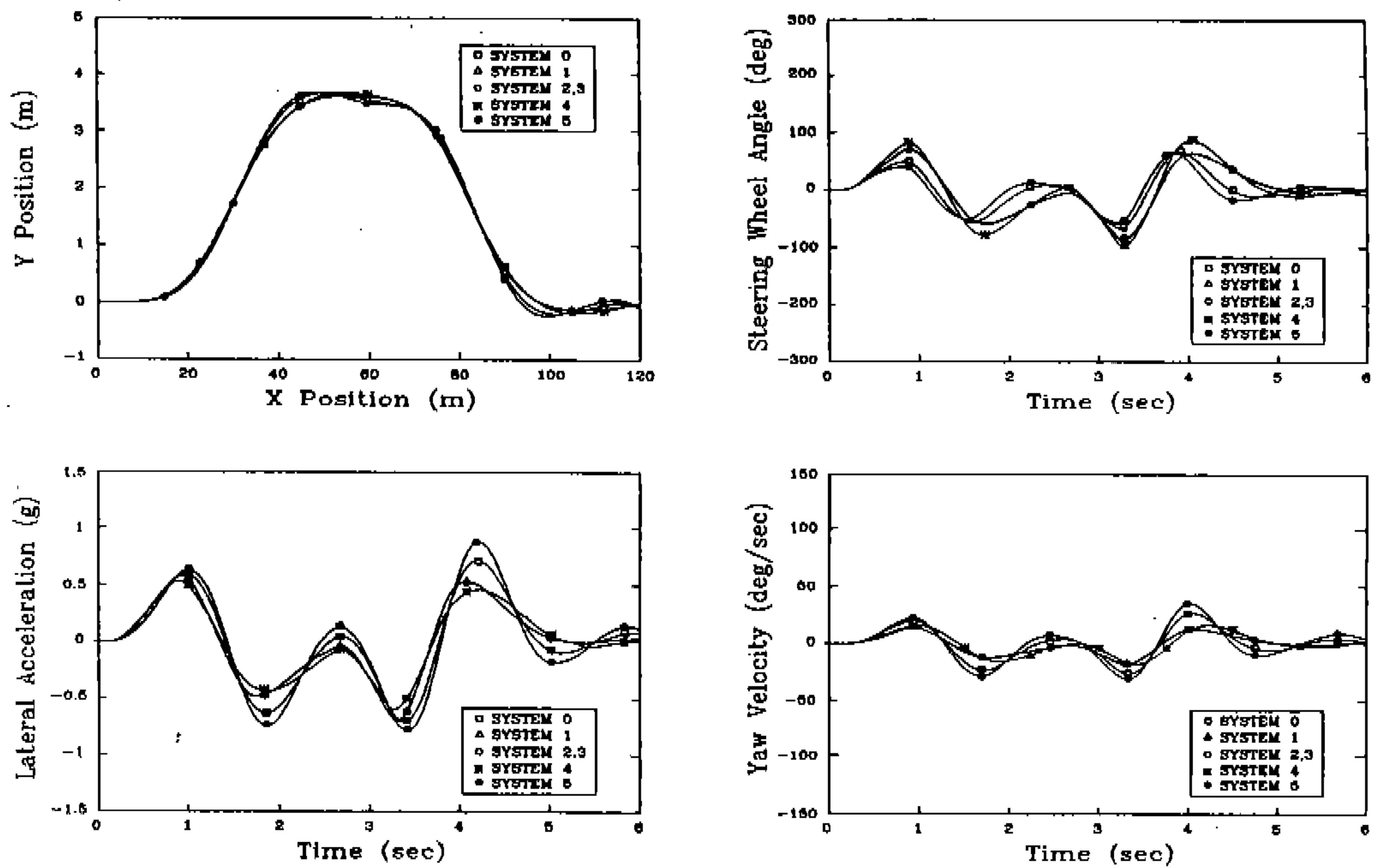


Fig.8 Behaviours in Double Lane Change
($u=80\text{km/h}$, $t_a=0.5\text{sec}$)

로 여유있게 조향할 수 있는 저속주행시(40km/h)에는 핸들조향각의 변화도 작기 때문에, 4륜조향방법과 관계없이 주행경로, 핸들조향각, 횡가속도, 그리고 요우속도는 거의 유사하게 나타나고 있다. 그러나 주행속도가 빠를수록 자동차가 요구경로를 주행하기 위해서는 더 큰 핸들조향이 요구되며, 그 경향은 고속주행시에 상대적으로 더 큰 언더조향특성을 갖는 시스템 1, 2, 3, 4에서 더욱 두드러진다.

또한 Fig.4, 6, 7의 비교를 통해서 알 수 있듯이 차선변경시의 횡방향 경로오차, 횡가속도 및 요우속도는 자동차의 주행속도와 관계없이 시스템 1, 2, 3, 4가 2륜조향자동차인 시스템 0보다 작기 때문에, 고속주행시에 시스템 0보다 더 큰 핸들조향이 요구되는 시스템 1, 2, 3, 4는 자동차의 주행속도가 빠를수록 핸들조향각의 변화가 주행특성에 미치는 영향이 상대적으로 작다. 그러나 횡가속도와 요우속도 간의 응답지연이 거의 없는 시스템 1, 2, 3과는 달리 자동차의 주행속도가 빠를수록 시스템 4에서는 횡가속도가 요우

속도보다 응답이 빠르고, 시스템 0과 5에서는 횡가속도가 요우속도보다 응답이 느리게 나타나고 있다. 특히 시스템 5는 고속주행시에 차선변경이 완료된 후에도 모든 주행특성들이 매우 불안정함을 알 수 있다.

4.2 이중차선변경(Double Lane Change)

Fig.8은 ISO/TR 3888에서 정의한 이중차선변경에 대한 주행경로를 토대로 주행속도 u 가 80km/h, 조향반응시간 t_r 가 0.5sec인 경우에 해석한 자동차의 주행특성을 보여주고 있다.

같은 조건에서 계산한 차선변경(Fig.4)의 경우와 마찬가지로 시스템 1, 2, 3은 이중차선변경 이후의 영역에서 거의 더 이상의 핸들조향을 필요로 하지 않고, 횡가속도와 요우속도는 시스템 1, 2, 3, 4가 시스템 0보다 작다. 특히 1차 차선변경시보다 2차 차선변경시에 더 큰 핸들조향각의 변화가 요구되고, 횡방향 경로오차, 횡가속도 및 요우속도의 변화도 더 크게 나타난다는 사실을 알 수 있다. 이러한 경향은 시스템 0, 4, 5에

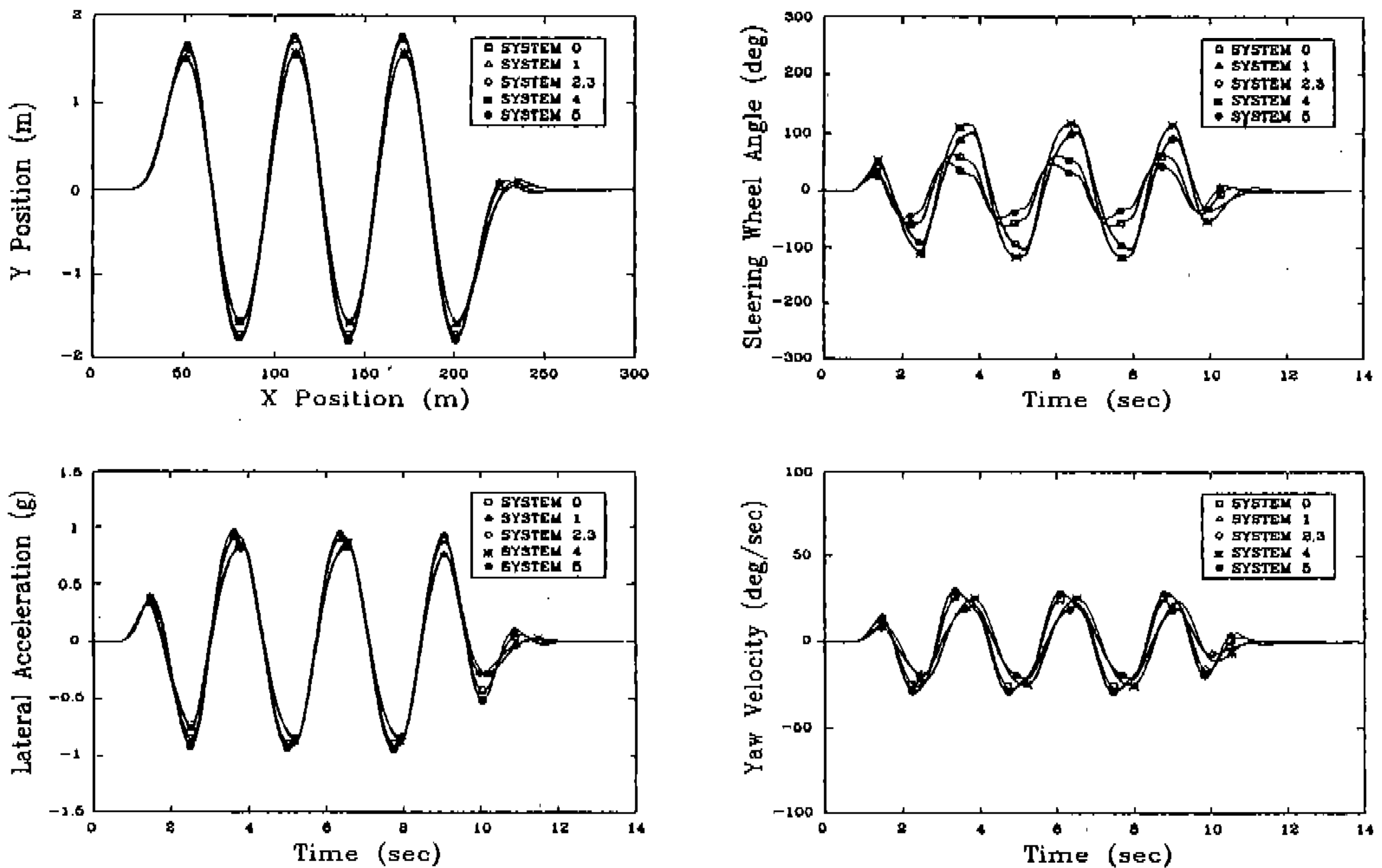


Fig.9 Behaviours in Slalom
($u=80\text{km/h}$, $t_r=0.5\text{sec}$)

서 더욱 두드러진다.

4.3 슬래럼(Slalom)

Fig.9는 ISO 7401에서 정의한 슬래럼에 대한 주행실험방법을 토대로 주행속도 u 가 80km/h, 조향반응시간 t_d 가 0.5sec인 경우에 해석한 자동차의 주행특성을 보여주고 있다.

같은 조건에서 계산한 차선변경(Fig.4) 및 이중차선변경(Fig.8)에 대한 해석결과와 마찬가지로 2륜조향자동차인 시스템 0보다 시스템 1, 2, 3, 4가 횡가속도와 요우속도는 작고, 핸들조향각은 큰 것으로 나타났다. 특히 핸들조향각은 시스템 1, 2, 3, 4가 시스템 0과 5보다 늦게 변화하고 있는데, 이것은 시스템 1, 2, 3, 4의 응답성이 상대적으로 빠른 데 기인한 것이며, 이러한 사실은 차선변경 및 이중차선변경에 대한 해석결과에서도 확인할 수 있다. 그리고 주행경로가 주기성을 가지고 있는 관계로 정상상태에서만 자동차의 무게중심에서의 횡미끄럼각을 0으로 유지하는 시스템 4의 횡가속도 및 요우속도는 과도상태에서도 자동차의 무게중심에서의 횡미끄럼각을 0으로 유지하는 시스템 1, 2, 3의 횡가속도 및 요우속도와 거의 유사함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 운전자-자동차모델을 구축하고, 그 모델을 토대로 4륜조향시스템들이 자동차의 주행특성에 미치는 영향을 해석하였다. 그리고 자동차의 주행특성에 대한 해석결과는 차선변경, 이중차선변경, 그리고 슬래럼과 관련된 실험 코드들을 이용해서 제시하였다. 그 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 경로변경에 대한 운전자의 조향반응시간, 그리고 운전자의 요구경로와 예측경로 사이의 횡방향 경로오차를 매개변수들로 하는 운전자모델을 구성하였다.
- 2) 조향반응시간이 짧을수록 자동차의 주행경로는 운전자의 요구경로와 가까워지지만, 급격하면서도 큰 핸들조향이 요구된다. 따라서 횡가속도와 요우속도도 조향반응시간

이 짧을수록 커진다.

- 3) 조향반응시간이 길수록 주행경로, 횡가속도 및 요우속도는 완만해지지만, 횡방향 경로오차는 경로변경이 완료된 후에도 상당기간 지속된다.
- 4) 시스템 1, 2, 3의 주행특성들은 조향반응시간의 영향을 적게 받으며, 안정성과 응답성이 매우 우수하고, 그 경향은 조향반응시간이 짧은 급격한 경로변경시에 더욱 두드러진다. 특히 시스템 1, 2, 3은 경로변경 이후의 영역에서 거의 더 이상의 핸들조향을 필요로 하지 않는다.
- 5) 주행속도가 빠를수록 자동차가 요구경로를 주행하기 위해서는 더 큰 핸들조향각이 요구되며, 그 경향은 고속주행시에 상대적으로 더 큰 언더조향특성을 갖는 시스템 1, 2, 3, 4에서 더욱 두드러진다.
- 6) 이중차선변경에서는 1차 차선변경시보다 2차 차선변경시에 더 큰 핸들조향각의 변화가 요구되고, 횡방향 경로오차, 횡가속도 및 요우속도의 변화도 더 크게 나타난다.

참 고 문 헌

1. M. Nagai and M. Mitschke : An Adaptive Control Model of a Car-Driver and Computer Simulation of the Closed-Loop System, Proc. 10th IAVSD-Symposium, Prague, CSSR, 1987
2. K.H. Senger and W. Schwartz : The Influence of a Four Wheel Steering System on the Stability Behaviour of a Vehicle-Driver System, Proc. 10th IAVSD-Symposium, Prague, CSSR, 1987
3. K. Fukui, K. Miki, Y. Hayashi and J. Hasegawa : Analysis of Driver and a "Four Wheel Steering Vehicle" System Using a Driving Simulator, SAE-Paper 880641
4. X. Xia and E.H. Law : Nonlinear Analysis of Closed Loop Driver/Automobile Per-

- formance with Four Wheel Steering Control, SAE-Paper 920055
5. Thierry Landreau : Simulation of Dynamic Behavior of a Four Wheel Steering Vehicle by Means of a Vehicle and Driver Model, SAE-Paper 890078
 6. 이영화, 김석일, 서명원, 손희성, 김성하 : Bicycle모델을 이용한 4륜조향차량의 동력학 해석, 자동차공학회지, Vol.16, No.5, 1994
 7. 심정수, 허승진, 유영민 : 4륜조향시스템이 차량의 주행역학적 특성에 미치는 영향, 자동차공학회지, Vol.12, No.3, 1990