

4륜 조향 차량의 주행성능 개선을 위한 제어기 설계에 관한 연구

손주한, 최성욱*, 이영진*, 이진우*, 이권순**
 동아대학교 전기공학과*, 전기·전자·컴퓨터 공학부**

A Study on Controller Design to Improve the Driving Performance of the Four Wheel Steering Vehicle

* Ju Han Sohn*, Sung Uk Choi*, Young Jin Lee*, Jin Woo Lee*, Kwon Soon Lee**
 *Dept. of Electrical Eng., **Dept. of Electrical, Electronic & Computer Eng. Dong-A University
 E-mail : kslee@daunet.donga.ac.kr

Abstract - In the vehicle steering system, we can consider two methods to steer the vehicle. One is a front wheel steering(FWS), the other is a four wheel steering(4WS). The four wheel steering method has been recently introduced to improve the steering performance. In this paper, we present a design of the four wheel steering controller. First, we constructed the neural network two degree of freedom PID controller to control the 4WS system. Then we compared the performance of conventional PID controller with our proposed controller in terms of yaw rate and side slip velocity. The computer simulation results show that 4WS system controlled by the proposed controller has well driving performances than the other.

1. 서 론

최근 4륜 조향(Four wheel steering : 4WS) 시스템은 차량기술에서 관심이 집중되고 있는 분야이다. 4륜 조향 차량의 출현은 차량 설계자에게 고속에서 차량의 조향성능을 증대시킬 수 있는 계기를 마련하고 있을 뿐만 아니라 저속에서도 회전성능을 증대시키고 있다. 또한, 주행성능의 개선과 차량의 안정성을 향상시키고 있다. 4륜 조향은 종래의 FWS(Front wheel steering : FWS)에 후륜 조향을 추가함으로써 차체의 측면미끄러짐각(Side slip angle)을 줄여 요속도(Yaw rate)와 횡각속도의 응답사이에 위상지연이 없게 한다. 즉, 측면미끄러짐각을 줄인다는 것은 과도상태의 조향특성을 좋게 하는 4륜 조향의 제어목표가 된다.

이러한 4륜 조향 방식에는 저속에서 전륜과 후륜의 조향 방향을 반대로 하여 차량의 회전반경을 줄여주는 역상조향(Reverse phase)과 고속에서 같은 방향으로 조향하여 측면미끄러짐각을 줄일 수 있는 동상조향(Same phase)이 있다. 후자는 일반적으로 크랩(Crab) 조향이라고도 하는데, 차선 변경시 이 방식으로 조향하게 되면 측면 변위를 빠른 시간 내에 줄일 수 있다. 이러한 이점을 가지는 4륜 조향에는 전륜과 후륜을 조향하기 위한 제어전략이 필요하다[1-2].

본 논문에서는 전륜 조향각에 대해 후륜 조향각을 비례적으로 조향하는 비례식 4륜 조향 로직을 이용하였다. 그리고 전·후륜 조향각을 제어하기 위한 제어기로 '신경 회로망 2자유도 PID(Neural network two degree of freedom PID : NNTDOFPID) 제어기를 이용하여 실시간 제어를 구현하였다. 또한, 4륜 조향의 성능을 분석하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 측면변위(Lateral displacement), 측면미끄러짐속도 그리고 요속도 등의 주행성능을 분석하였다.

2. 차량의 수학적 모델링

일반적으로 4륜 조향 차량은 rigid body에서 6자유도를 갖는 모델로 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그러나, 본 논문에서는 조향제어의 성능평가를 위하여 차량의 측면동작에 관련된 상태량인 측면미끄러짐속도와 요속도를 고려한 2자유도 모델로 2륜 차량 모델(Bicycle model)을 사용하였다[3].

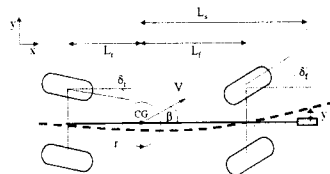


Fig. 1 A model of 4WS vehicle

즉, 그림 1에서 차량의 CG(Center of gravity)가 도로상에 있고, CG에 작용하는 힘이 롤링(Rolling)과 피칭(Pitching)을 일으키지 않는다고 가정하면 그림 2와 같은 2륜 모델로 나타낼 수 있다.

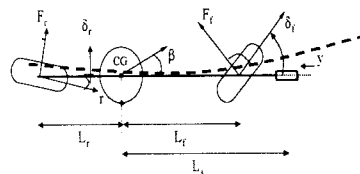


Fig. 2 A bicycle model

여기서, 타이어는 선형 모델을 사용하였으며, 전륜 조향각 \$\delta_f\$ 및 후륜 조향각 \$\delta_r\$은 각각 제어입력 \$u_f\$와 \$u_r\$에 의해 제어된다. 그림 2에 대한 4륜 조향 시스템의 선형화된 상태방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \Delta\phi \\ \dot{y} \\ \dot{\delta}_f \\ \dot{\delta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_{21} & b_{22} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V & L_s & V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \Delta\phi \\ y \\ \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & d_{21} \\ 0 & 0 & -V & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_r \\ \rho_{ref} \\ F_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a_{11} = \frac{-2(C_f + C_r)}{MV}, \quad a_{12} = -V - \frac{2(C_r L_r - C_f L_f)}{MV}$$

$$a_{21} = -\frac{2(C_f L_f - C_r L_r)}{J V}, \quad a_{22} = -\frac{2(C_f L_f^2 + C_r L_r^2)}{J V}$$

$$b_{11} = \frac{2C_f}{M}, \quad b_{12} = \frac{2C_r}{M}, \quad b_{21} = \frac{2C_f L_f}{J}$$

$$b_{22} = -\frac{2C_r L_r}{J}, \quad d_{11} = \frac{1}{M V}, \quad d_{21} = \frac{L_w}{J}$$

식 (1)에 대한 각 파라미터는 표 1과 같다.

Table 1 Parameters for 4WS vehicle system

Parameter	Descriptions
δ_f	전륜 조향각
δ_r	후륜 조향각
$L_f(L_r)$	전륜(후륜) axle과 CG까지 거리(m)
L	전륜(후륜) axle에서 후륜 axle까지 거리(m)
β	차량 중심선과 속도 벡터간의 미끄러짐각
$F_f(F_r)$	전륜(후륜) 타이어에 의한 측면 힘(N/m)
y	측면 변위(m)
F_w	측면 외란(바람)
L_w	CG와 F_w 간의 거리(m)
L_s	변위를 측정하는 센서로부터 CG까지 거리(m)
$\Delta\psi$	가이드라인의 접선으로부터 차량의 중심선까지 거리(m)
r	요속도, $\Delta\psi = r$
$C_f(C_r)$	전·후륜축의 코너링 강성(N/rad)
ρ_{ref}	참조 조향각
M	차량의 무게(kg)
\bar{M}	차량의 실제 무게(kg)
J	관성 모멘트

μ 는 도로의 마찰계수로 건조한 날은 일반적으로 1이고 비오는 날은 0.5이며, 본 논문에서는 건조한 날인 $\mu = 1$ 로 하였다. 코너링 강성은 도로의 마찰계수를 고려하면 μC_f , μC_r 가 된다. 또한, M 과 J 도 μ 에 의해 일반화된다($\bar{M} = M/\mu$, $\bar{J} = J/\mu$). 그리고 전·후방 조향각 제어입력은 조향각의 변화율로서 다음 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\delta}_f = u_f \quad (2)$$

$$\dot{\delta}_r = u_r \quad (3)$$

여기서, 4륜 조향 차량의 조향각을 제어하기 위해서는 전륜과 후륜 사이의 조향로직이 필요한데, 본 논문에서는 전륜 조향각에 대해 후륜 조향각을 비례적으로 조향하는 비례식 4륜 조향로직을 이용하였다.

$$k = \frac{-L_f + \frac{ML_f}{C_f L_f} v^2}{L_f + \frac{ML_f}{C_f L_f} v^2} \quad (4)$$

여기서, k 는 전·후륜 조향각의 비로 정의되는데 k 값이 양이면 동상조향이 되고, 음이면 역상조향이 된다. 일반적으로 k 는 차량의 속도에 대한 함수가 된다(4). 따라서, 전·후륜의 조향각 관계는 $\delta_r = k \cdot \delta_f$ 가 된다.

3. 4륜 조향 제어기 설계

3.1 신경회로망 2자유도 PID 제어기

본 논문에서는 4륜 조향 시스템을 제어하기 위한 제어기로 기존의 PID제어기와 같이 단순하고 외란 제거와 설정치 추종 성능이 뛰어난 특징을 가지고 있는 TDOF PID 제어기로 하였다. 제어기의 파라미터 동조는 신경회로망 자기 동조기를 구성하여 동조하였다. 그림 3은 신경회로망 2자유도 PID 제어기에 의하여 구동되는 조향 제어시스템의 블록다이어그램을 나타내고 있다.

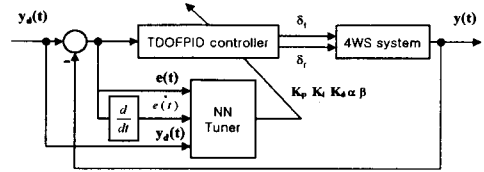


Fig. 3 Block diagram of 4WS control

제안한 신경회로망 2자유도 PID 제어기는 신경회로망 자기동조기와 2자유도 PID 제어기로 나눌 수 있다. 그림 4는 신경회로망 자기동조기의 구조를 나타내고 있다. 여기서, 신경회로망 학습을 위하여 모델 오차 역전과 학습 알고리즘을 이용하였으며, 입력층 벡터는 오차, 오차의 변화분 및 목표치로 하였다. 그리고, 출력은 2자유도 PID의 파라미터인 k_p , k_i , k_d , α , β 로 하였다 [5].

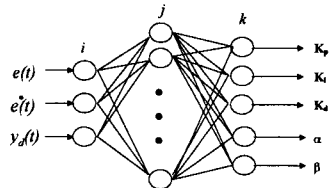


Fig. 4 Neural network self-tuner

2자유도 PID 제어기의 제어입력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = \{(1 - \alpha)K_p(e(t) - e(t-1)) + K_i e(t) + (1 - \beta)K_d(e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)) - \{\alpha K_p(y(t) - y(t-1)) + \beta K_d(y(t) - 2y(t-1) + y(t-2))\}\} \quad (5)$$

여기서, 평가함수는 식 (6)과 같다.

$$E = \frac{1}{2} [y_d(t) - y(t)]^2 \quad (6)$$

최급경사법에 의해 출력층과 은닉층의 가중치는 식 (7), (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta W_{jk}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{jk}} + \epsilon \Delta W_{jk}(t-1) \quad (7)$$

$$\Delta W_{ij}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} + \epsilon \Delta W_{ij}(t-1) \quad (8)$$

여기서, η 는 학습률이고 ϵ 는 모델링 상수이다.

출력층의 오차신호는 식(9)와 같다.

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} \quad (9)$$

여기서, $\text{net}_k = \sum_j W_{jk} O_j + \theta_k$ 이다.

출력층에 대한 k_p , k_i , k_d , α , β 는 다음과 같다.

$$k_p = f(\text{netk}_1)$$

$$k_i = f(\text{netk}_2)$$

$$k_d = f(\text{net}k_3) \quad (10)$$

$$\alpha = f(\text{net}k_4)$$

$$\beta = f(\text{net}k_5)$$

여기서, $f(\cdot)$ 는 활성화 함수이다.

연쇄법칙(chain rule)을 사용하여 은닉층과 출력층의 가중치를 변경한다.

$$\Delta W_{jk}(t+1) = \eta \delta_k O_j + \epsilon \Delta W_{jk}(t) \quad (11)$$

출력층 각 노드의 오차 신호는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \delta k_p &= (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}k_p) \frac{\partial u(t)}{\partial k_p} \\ \delta k_i &= (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}k_i) \frac{\partial u(t)}{\partial k_i} \\ \delta k_d &= (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}k_d) \frac{\partial u(t)}{\partial k_d} \\ \delta \alpha &= (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}\alpha) \frac{\partial u(t)}{\partial \alpha} \\ \delta \beta &= (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}\beta) \frac{\partial u(t)}{\partial \beta} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $\frac{\partial y(t)}{\partial u(t)}$ 는 시스템의 자코비안이고, $f'(\cdot)$ 는 신경회로망의 각각의 노드에 대한 출력의 미분식을 나타낸다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서는 제안한 신경회로망 2자유도 PID 제어기의 성능을 평가하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용한 4륜 조향 차량시스템에 대한 사양을 나타내며, 차량의 속도는 20[m/s]로 일정하게 하였고, 중량은 1095[kg]로 하였다. 또한, 주행방향에서 1[m]의 측면 변위를 주어 차선 변경을 실시하였다. 또한, 본 논문에서 이용한 비례식 4륜 조향에서 차량 시스템의 속도가 7.4[m/s]이상이면 동상 조향이 되고 이하이면 역상 조향이 된다.

Table 2. Parameter values of vehicle

Parameters	Values
V	20[m/s]
L_f	1.12 [m]
L_r	1.43[m]
L_s	1.42[m]
L_w	0.569[m]
C_f	17000[N/rad]
C_r	18400[N/rad]
M	1095[kg]
μ	1
J	$i^2 \times M$
i^2	10.85[m ²] (i=inertia radius)

신경회로망 2자유도 PID 제어기를 구성하는데 있어 사용된 신경회로망은 3층 구조로 하였으며, 입력층, 은닉층 그리고 출력층에 대한 각 층의 노드수는 각각 3, 12, 5로 하였다. 그리고, 신경회로망 모델링 학습에 대한 학습율과 모멘트 계수는 각각 0.5, 0.8로 설정하였다. 각 층에 대한 연결강도의 초기값은 모두 0.1로 하였고, 은닉층과 출력층에 대한 활성화 함수는 양극성 시그모이드 함수와 항등 함수를 각각 적용하였다.

그림 5는 차량의 측면변위출력을 나타낸다. 신경회로망 2자유도 PID 제어기의 경우 정정 시간은 약 1초(20[m])정도가 되었고, PID 제어기의 경우에서 약 2초(40[m])가 되었다. 4륜 조향의 정정 시간이 단축된

이유는 차량속도가 20[m/s]이므로 동상조향이 되었기 때문이다.

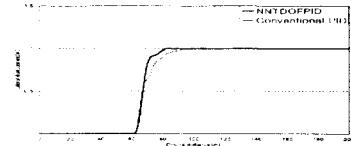


Fig. 5 Lateral displacement

그림 6과 7은 차량의 전·후륜 조향각 제어입력을 나타낸다. 신경회로망 2자유도 PID 제어기의 경우 PID 제어기에 비해 초기에 많은 제어입력이 들어갔기 때문에 빠른 응답특성을 보여주고 있다.

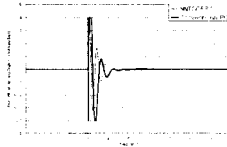


Fig. 6 FWS angle

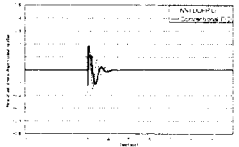


Fig. 7 RWS angle

그림 8과 9는 측면 미끄러짐 속도와 요속도에 대한 응답 특성을 나타낸다. 신경회로망 2자유도 PID 제어기의 경우 PID 제어기에 비해 약 30[%]정도 측면 미끄러짐 속도가 개선되었으며, 요속도의 경우 50[%]정도 개선되었다.

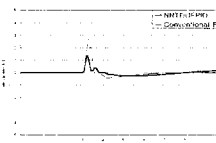


Fig. 8 Side slip velocity

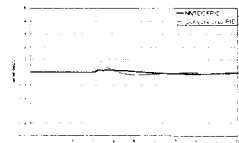


Fig. 9 Yaw rate

5. 결 론

본 논문에서는 4륜 조향 차량시스템을 제어하기 위하여 2자유도 PID 제어기를 구성하였으며, 제어기의 파라미터는 신경회로망 자기 동조기를 이용하여 자기 동조하였다. 조향성능을 비교분석하기 차선변경을 실시하여 PID제어기와 측면변위, 측면미끄러짐속도, 조향각 제어 입력 그리고 요속도의 응답 특성을 비교 분석하였다. 그 결과 4륜 조향일 경우 측면 미끄러짐 속도와 요속도를 각각30[%]이상 줄임으로써 차량의 주행성능을 개선할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] 이회각, "Handling Characteristics for Four Wheel Steering Vehicles," 한국자동차공학회 추계학술대회, pp.187-193, 1994.
- [2] 심정수, 허승진, 유영면, "4륜 조향시스템이 차량의 주행 역학적 특성에 미치는 영향," 자동차공학회지, Vol. 12, No. 3, pp. 21-29, 1990.
- [3] 송준규, 승용차의 조향성능의 향상을 위한 제어에 관한 연구, 박사학위 논문, 한국과학기술원, 1997.
- [4] S. Sano, Y. Furakawa and S. Sugawara, "Four-Wheel Steering System with Rear Wheel Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle," SAE Paper 860624, 1986.
- [5] S. Omatu, M. Khalid and R. Yusof, *Neuro-Control and its Applications*, Springer, 1996.