

비선형 백스테핑 방식에 의한 차량 동력학의 적응-학습제어 Adaptive-Learning Control of Vehicle Dynamics Using Nonlinear Backstepping Technique

°이현배, 국태용

성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학부

(Tel:+82-331-290-7202;Fax:+82-290-7191;Email:tykuc@yurim.skku.ac.kr)

Abstract : In this paper, a dynamic control scheme is proposed which not only compensates for the lateral dynamics and longitudinal dynamics but also deal with the yaw motion dynamics. Using the dynamic control technique, adaptive and learning algorithm together, the proposed controller is not only robust to disturbance and parameter uncertainties but also can learn the inverse dynamics model in steady state. Based on the proposed dynamic control scheme, a dynamic vehicle simulator is constructed to design and test various control techniques for 4-wheel steering vehicles.

Keywords : Vehicle Control, Nonlinear Control Theory, Adaptive Control, Learning Control

1. 서론

최근들어 산업의 발달에 따른 차량의 증가와 교통량의 증가로 인하여, 차량에 대한 안정성 및 조종성에 대한 요구가 증가하고 있다.[9] 이러한 차량의 동역학 제어를 위한 전형적인 차량의 운동역학적 모델은 일반적으로 조타가능한 전방 2륜과 후방 2륜의 차량이 강제로 이루어진 차체에 장착되어 있는 차량모델이다.

그림 2.의 차량 역학모델에서, 차륜은 중량을 가지지않고, 강체로 간주되는 차체가 차량의 중량을 대표하는 것으로 가정한다. 이 차량의 무게중심점을 원점으로 차량의 좌표축을 그림과 같이 정하고, 이 좌표를 기준으로 하면 차량의 운동 자유도를 공간내의 강제 운동으로서 6자유도로 나타낼 수 있다.

여기서 차량의 안정성과 조종성을 확보하기 위하여 자동차 공학 분야의 많은 연구자들이 관심을 가지고 있는 분야는 가속페달이나 제동장치에 의한 차량의 구동이나 제동을 포함하는 전후방향의 직선운동(Longitudinal Motion)과 조타에 의해 생기는 차량의 옆방향 운동(Lateral Motion), 조타에 의한 차량의 방향의 변화와 관련된 요잉(Yawing) 운동을 제어하는 분야들이다.

이러한 제어대상 차량의 운동은 조타와 엔진의 출력에 의해 발생하고 또한 이들에 의하여 차량의 운동이 제어된다. 여기에 주목하여 최근에는 전륜만이 아니라 후륜도 조타하여 조종성, 안정성의 관점에서 차량을 제어하는 연구들이 진행되고 있다. 이러한 제어는 크게 다음의 두 가지 관점에서 볼 수 있는데, 하나는 핸들이나 엔진 출력에 대해서 어떤 규칙에 의하여 전륜이나 후륜, 차속을 제어하여 바람직한 운동을 실현하는 피드포워드 제어(feedforward control)이며, 다른 하나는 차량의 운동상태를 피드백하여 전륜이나 후륜을 조타하여 바람직한 운동을 얻는 피드백 제어(feedback control)이다. 이러한 것들을 액티브 조타에 의한 조종성, 안정성의 제어라고 부른다[16].

이러한 연구동향에 덧붙여 지금까지 다루어져 온 차량의 동력학 제어에 관련된 최근의 연구결과들 중, Freund와 R. Mayr[1]는 비선형 경로 제어를 위하여 입-출력 선형화기법을 이용하여 비선형 decoupling 제어기 및 미끄럼각을 추정하기 위하여 비선형 관측기를 설계하였으며, N. Matsumoto와 M. Tomizuka[5]는 자율 옆방향 운동 제어를 위하여 옆방향 운동과 요잉의 독립적인 제어 방법을 제안하였다. J. Seuss와 J. Richert[14]는 옆방

향 운동과 요우 모우션을 PID 제어기법을 이용한 제어기를 설계하였으며, E. Ono등[15]은 비선형 변환과 μ -synthesis 기법을 사용하여 조타와 구동시스템을 조합한 통합제어시스템을 설계하였다.

본 논문에서는 이러한 파라미터의 불확실성에 대하여 적응하는 제어 입력을 구성하여 안정한 제적 추종이 가능한 적응제어기를 설계하고, 이에 덧붙여 강인성 및 응답속도의 증대를 위하여 학습제어기를 설계한다. 전체 제어기 구성에서는 이 두 제어기를 조합하여 파라미터 불확실성과 강인성, 응답속도특성을 개선, 보완하고자 한다. 여기서 제안된 학습제어기의 구조는 그림 1.과 같은 구조로 구성되어 있으며, 학습과 제어가 동시에 진행된다.

본 논문의 구성은 2장에서 제어대상으로 일반적으로 사용되는 차량에 대한 수학적 모델링, 3장에서는 제어대상 차량의 운동역학에 대한 동역학 구성부분과 이를 기초로 한 적응-학습 제어기의 설계, 4장에서 제안된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 특정 모델을 대상으로 하여 모의실험을 하는 순서로 구성되어 있다. 또한 이러한 제어기법을 이용한 시뮬레이터를 제작하고자 한다.

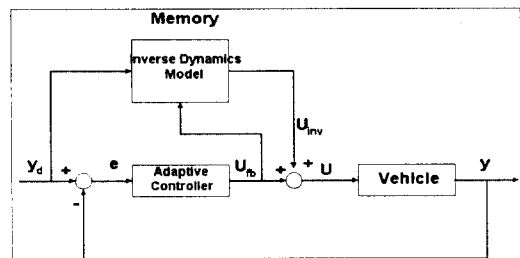


그림 1 전체 제어기 구조

2. 차량의 수학적 모델링

차량의 동력학적 성능을 포함하는 수학적 모델은 효과적인 제어시스템의 설계를 위해 매우 중요한 가정이다. 본 논문에서는 차량의 옆방향과 직선운동 동력학과 요우속도(Yaw Velocity)를 이용하여 자율주행을 위한 차량의 동력학 제어를 하고자 한다. 그림 1.에서 보이는 것과 같이 본 논문에서 다루고자 하는 제어

기의 설계를 위해서 중요한 동력학 변수들을 이용하여 제어하고자 하는 차량의 동력학식을 구해보면, 차량의 직선방향과 옆방향에서 작용하는 힘의 균형, 토크와 기구학적 조건에 기초하여 다음과 같이 구성할 수 있다[7][8].

$$\begin{aligned} \ddot{\beta} &= \frac{1}{m} [(H-T)\sin\beta + V\sin(\delta_i + \beta) + V\sin(\delta_h + \beta) \\ &\quad + S_i\cos(\delta_i + \beta) + S_h\cos(\delta_h + \beta)] + \dot{\psi} \\ \dot{\psi} &= \dot{\psi} \\ I\ddot{\psi} &= S_i l_i \cos\delta_i - S_h l_h \cos\delta_h \\ m\dot{v} &= (H-T)\cos\beta + V\cos(\delta_i + \beta) + V\cos(\delta_h + \beta) \\ &\quad - S_i\sin(\delta_i + \beta) - S_h\sin(\delta_h + \beta) \\ \dot{X} &= v \cdot \cos(\psi - \beta) \\ \dot{Y} &= v \cdot \sin(\psi - \beta) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} S_i(x) &= \Gamma_i(\beta + \delta_i - \frac{l_i}{v}\dot{\psi}) \\ S_h(x) &= \Gamma_h(\beta + \delta_h + \frac{l_h}{v}\dot{\psi}) \end{aligned} \quad (2)$$

이고, 각 파라미터들의 정리는 표 1.에 있다.

위의 동력학 식에서 δ_v , β 는 아주 작다고 가정한다. 그리고 S_i 와 S_h 는 각각 전륜횡력(Side Force)과 후륜횡력을 나타내며, δ_v 와 δ_h 에 각각 의존하며 후륜구동력 H와 함께 입력변수로 사용된다. 출력 변수로는 절대좌표계내에서 차량의 무게중심의 위치 좌표 X, Y 그리고 요우속도 $\dot{\psi}$ 이다. 이 식에서 Γ_i 와 Γ_h 는 각각 차량의 타이어의 특성을 나타내는 함수이며, 비선형적인 특성을 가진다.[1] 그러나, 본 논문에서는 일정한 노면상태와 속도를 가정하여 특정값을 가지는 상수로 가정을 하였다.

그리고 T는 공기저항을 나타내며, 아래식과 같이 표현된다.

$$T(x) = c_w \frac{\rho L}{2} A v^2 \quad (3)$$

여기서, c_w , ρ , L, A 는 각각 공기저항 계수, 대기밀도, 차량의 단면적을 나타낸다.

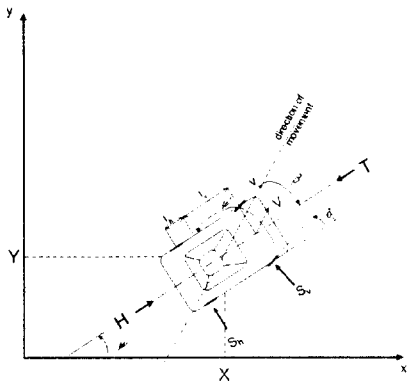


그림 2 차량의 동력학 모델

표 1 차량동력학 모델 파라미터

ψ :	요우각	V :	전방 전후력
$\dot{\psi}$:	요우속도	T :	공기저항
v :	속도	δ_v :	전륜 조타각
β :	미끌림각	δ_h :	후륜 조타각
X :	무게중심의 실제위치 (중축)	m :	차량 무게
Y :	무게중심의 실제위치 (횡축)	l_h :	무게중심과 front wheel의 거리
S_h :	후방 횡력	l :	무게중심과 rear wheel의 거리
S_v :	전방 횡력	I :	관성 모멘트
H :	후방 구동력		

3. 적응-학습 제어기 설계

3.1 제어대상 차량의 동력학

앞 절에서 구성된 차량의 모델을 가지고 제어기를 구성하기 위해서 식(1)에서 출력방정식을 2차 미분하면 입력값이 가속도에 직접적으로 영향을 주는 것을 볼 수있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= m\dot{v}\cos(\psi - \beta) - mv(\dot{\psi} - \dot{\beta})\sin(\psi - \beta) \\ &= f_x + [\cos\beta\cos(\psi - \beta) - \sin\beta\sin(\psi - \beta)]H \\ &\quad - [\sin(\delta_i + \beta)\cos(\psi - \beta) + \cos(\delta_i + \beta)\sin(\psi - \beta)]S_i \\ &\quad - [\sin(\delta_h + \beta)\cos(\psi - \beta) + \cos(\delta_h + \beta)\sin(\psi - \beta)]S_h \\ m\ddot{y} &= m\dot{v}\sin(\psi - \beta) + mv(\dot{\psi} - \dot{\beta})\cos(\psi - \beta) \\ &= f_y + [\sin\beta\cos(\psi - \beta) + \cos\beta\sin(\psi - \beta)]H \\ &\quad - [\sin(\delta_i + \beta)\sin(\psi - \beta) + \cos(\delta_i + \beta)\cos(\psi - \beta)]S_i \\ &\quad - [\sin(\delta_h + \beta)\sin(\psi - \beta) - \cos(\delta_h + \beta)\cos(\psi - \beta)]S_h \\ I\ddot{\psi} &= (l_i \cos\delta_i)S_i - (l_h \cos\delta_h)S_h \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f_x &= T[\sin\beta\sin(\psi - \beta) - \cos\beta\cos(\psi - \beta)] \\ &\quad - V[\cos(\delta_i + \beta)\cos(\psi - \beta) - \sin(\delta_i + \beta)\sin(\psi - \beta)] \\ f_y &= -T[\sin\beta\cos(\psi - \beta) - \cos\beta\sin(\psi - \beta)] \\ &\quad + V[\sin(\delta_i + \beta)\cos(\psi - \beta) + \cos(\delta_i + \beta)\sin(\psi - \beta)] \end{aligned}$$

식(3)식 간단히 하여 정리하면 ,

$$\begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ I\ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} H \\ S_i \\ S_h \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $B = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ 이며,

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\beta\cos(\psi - \beta) - \sin\beta\sin(\psi - \beta) \\ a_{12} &= -\sin(\delta_i + \beta)\cos(\psi - \beta) - \cos(\delta_i + \beta)\sin(\psi - \beta) \\ a_{13} &= -\sin(\delta_h + \beta)\cos(\psi - \beta) - \cos(\delta_h + \beta)\sin(\psi - \beta) \\ a_{21} &= \sin\beta\cos(\psi - \beta) + \cos\beta\sin(\psi - \beta) \\ a_{22} &= -\sin(\delta_i + \beta)\sin(\psi - \beta) + \cos(\delta_i + \beta)\cos(\psi - \beta) \\ a_{23} &= -\sin(\delta_h + \beta)\sin(\psi - \beta) + \cos(\delta_h + \beta)\cos(\psi - \beta) \\ a_{31} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{32} &= l_c \cos \delta_c \\ a_{33} &= l_h \cos \delta_h \end{aligned}$$

이다.

이 시스템이 입력에 의한 출력의 완전 가제어성을 위해서는 $\det(B) \neq 0$ 이어야 한다.

$$\begin{aligned} \det(B) &= a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - a_{21}(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) \\ &= \cos \delta_c a_{33} - \cos \delta_h a_{32} \\ &= -(l_h + l_c) \cos \delta_h \cos \delta_c \neq 0, \quad (-90^\circ < \delta_h, \delta_c < 90^\circ) \end{aligned} \quad (6)$$

이렇게 구성된 제어대상 차량의 동력학을 가지고 다음절에서 안정성과 조종성을 확보하기 위한 제어를 설계하였다.

3.2. 제어기 설계

앞 절에서 설계된 제어대상 차량의 운동역학에 대한 수학적 모델을 가지고, 차량의 안정성과 조종성을 보장하기 위한 조타각과 엔진출력을 제어하기 위하여 적응제어기 및 학습제어기를 설계하였다.

3.2.1 적응 제어기

적응제어기의 입력을 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} H \\ S_y \\ S_\phi \end{bmatrix} = B^{-1} \begin{bmatrix} -\widehat{f}_{x+} \widehat{m}(\ddot{x}_d + \lambda_0 e_x) + \lambda_1 z_x \\ -\widehat{f}_{y+} \widehat{m}(\ddot{y}_d + \lambda_0 e_y) + \lambda_1 z_y \\ \widehat{I}(\ddot{\psi}_d + \lambda_0 e_\psi) + \lambda_1 z_\phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(7)을 식(5)에 대입하여 정리하면 다음의 오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m\dot{z}_x \\ m\dot{z}_y \\ I\dot{z}_\phi \end{bmatrix} + \lambda_1 \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \\ z_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{xe}^T \bar{\theta} \\ W_{ye}^T \bar{\theta} \\ W_{\psi e}^T \bar{\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $\theta_x^T = \theta_y^T = [m \ T \ V]$, 이다

이 때 적응제어기의 적응규칙을 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\theta}(t) = \text{pr}[\theta(t-T)] + \Gamma_1^{-1} Wz \quad (9)$$

여기서 $\text{pr}(\cdot)$ 은 projection이고, 학습이득 Γ_1 은 대각 원소를 지닌 양의 한정행렬이며 상수행렬이다.

안정도 증명

안정도 증명

제안한 제어기의 안정성 및 오차시스템의 수렴성을 보장하기 위하여 식(8)의 오차시스템의 Lyapunov 함수를 아래와 같이 구성한다.

$$V(x) = \frac{1}{2} z^T m z + \int_{t-T}^t \bar{\theta}(\tau)^T \Gamma_1 \bar{\theta}(\tau) d\tau \quad (10)$$

이 식을 시간에 대한 1차 미분하여 정리하면 결과는 다음과 같다.

$$\dot{V} = z^T m \dot{z} + \bar{\theta}^T(t) \Gamma_1^{-1} \bar{\theta}(t) - \bar{\theta}^T(t-T) \Gamma_1^{-1} \bar{\theta}(t-T) \quad (11)$$

위식을 식(9)의 적응규칙을 적용하여 정리하여보면, 아래식과 같이 된다.

$$\dot{V} = -z^T \Lambda z - [\bar{\theta}(t)^T Wz + (Wz)^T \Gamma^{-1} (Wz)] \leq 0, \quad (12)$$

이 때 식(12)에서 Γ_1 이 양의 한정인 대각행렬이므로, 위 식은 만족하게 된다. 따라서, z, \dot{z} 는 유계이고, $z \in L_2$ 이다. 즉,

Babalat의 lemma[10]에 의하여 오차벡터 z 는 점근적으로 수렴한다.

3.2.2 적응-학습 제어기

적응-학습 제어기의 입력을 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} H \\ S_x \\ S_h \end{bmatrix} = B^{-1} \begin{bmatrix} -\widehat{f}_{x+} \widehat{m}(\ddot{x}_d + \lambda_0 e_x) + \lambda_1 z_x \\ -\widehat{f}_{y+} \widehat{m}(\ddot{y}_d + \lambda_0 e_y) + \lambda_1 z_y \\ \widehat{I}(\ddot{\psi}_d + \lambda_0 e_\psi) + \lambda_1 z_\phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \widehat{f}_{xd} - \widehat{m}\ddot{x}_d + h_x \\ \widehat{f}_{yd} - \widehat{m}\ddot{y}_d + h_y \\ -\widehat{I}\ddot{\psi}_d + h_\phi \end{bmatrix} \quad (13)$$

식(13)을 식(5)에 대입하여 정리하면 다음의 오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m\dot{z}_x \\ m\dot{z}_y \\ I\dot{z}_\phi \end{bmatrix} + \lambda_1 \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \\ z_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{xe}^T \bar{\theta} \\ W_{ye}^T \bar{\theta} \\ W_{\psi e}^T \bar{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \widehat{h}_x \\ \widehat{h}_y \\ \widehat{h}_\phi \end{bmatrix} \quad (14)$$

이 때 적응-학습제어기 h 의 학습규칙을 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\theta}(t) = \text{pr}[\theta(t-T)] + \Gamma_1^{-1} Wz \quad (15)$$

$$\dot{h}(t) = \text{pr}[h(t-T)] + \Gamma_2^{-1} z$$

여기서 $\text{pr}(\cdot)$ 은 projection이고, 학습이득 Γ_1, Γ_2 은 각각 대각 원소를 지닌 양의 한정행렬이며 상수행렬이다.

안정도 증명

제안한 제어기의 안정성 및 오차시스템의 수렴성을 보장하기 위하여 식(14)의 오차시스템의 Lyapunov 함수를 아래와 같이 구성한다.

$$V(x) = z^T m z + \int_{t-T}^t \{\bar{\theta}(\tau)^T \Gamma_1 \bar{\theta}(\tau) + \widehat{h}(\tau)^T \Gamma_2 \widehat{h}(\tau)\} d\tau \quad (16)$$

이 식을 시간에 대한 1차 미분하여 정리하면 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2z^T m \dot{z} + [\bar{\theta}(t)^T \Gamma_1 \bar{\theta}(t) - \bar{\theta}(t-T)^T \Gamma_1 \bar{\theta}(t-T) \\ &\quad + \widehat{h}(t)^T \Gamma_2 \widehat{h}(t) - \widehat{h}(t-T)^T \Gamma_2 \widehat{h}(t-T)] \end{aligned} \quad (17)$$

충분히 빠른 학습신호 갱신주기 T 에 의하여 $h(t) - h(t-T) \approx 0$ 으로 가정하고, 식(17)에 식(15)의 학습제어규칙을 적용하여 풀어보면 그 결과는 다음과 같다.

$$\dot{V} = -2z^T \Lambda z - ((Wz)^T \Gamma_1^{-1} (Wz) - z^T \Gamma_2^{-1} z) \quad (18)$$

이 때 식(17)은 Γ_1 과 Γ_2 가 각각 양의 한정행렬이므로 0보다 작거나 같게된다. 따라서 모든 학습 신호 및 오차신호 z, \dot{z} 가 유계이고 $z \in L_2$ 이다. 즉, Babalat의 lemma[10]에 의하여 오차 벡터 z 는 점근적으로 수렴한다.

여기에서, 실제로 이 시스템에 입력되는 제어신호는 엔진출력과 조타각이 되므로 식(2)에 의하여 실제 제어신호를 구하여 보면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= H = u_1 \\ \bar{u}_2 &= \delta_c = \Gamma_c^{-1}(u_1) - v + l_c \frac{\psi'}{v} \\ \bar{u}_3 &= \delta_h = \Gamma_h^{-1}(u_1) - v - l_h \frac{\psi'}{v} \end{aligned} \quad (19)$$

3.2.3 제어신호의 제한

실제로 제어신호에 있어서는 차량 자체의 구조적인 문제와 엔진 출력의 제한등에 의하여 어떤 제한이 필요하다. 이러한 제한들은 간단하게 정적 제한과 동적제한으로 분류할 수 있다, 먼저

정적 제한에 대하여 먼저 살펴보면, 차량의 회전반경은 최대 조타각에 의하여 다음과 같이 결정된다.

$$|\overline{u_2}| \leq 30^\circ = 0.5264 \text{ rad} \quad (20)$$

그리고 최대 가속과 감속은 구동 및 제동력 내에서 적절한 기계적인 한계에 의하여 제한된다.

$$-17,600 \text{ N} \leq \overline{u_2} \leq 10,000 \text{ N} \quad (21)$$

제어신호의 동적인 제한은 제어대상 차량에 영향을 미친다. 여기서 동적인 제한은 2가지 정도가 있는데, 하나는 최대 조타각과 차량속도 사이의 관계에 기초하였다.

$$|\overline{u_1}| \leq 8(l_t + l_h) \frac{\mu_s}{x_1^2} \quad (22)$$

그래서 속도가 빨라질수록 조타각은 작아진다. 이에 더하여, 조타각의 최대 각속도에 대한 동적 제한

$$|\overline{\dot{u}_1}| = 0.5 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad (23)$$

때문에 조타각은 순간적으로 크게 변할수 없다.

이러한 제한사항들이 실제 차량을 제어할 때, 반드시 고려해 주어야 하며, 차량의 안전성에 큰 영향을 미치게된다.

4. 모의실험

이렇게 설계된 제어를 가지고 제어기의 성능을 실험하기 위하여 실제 실험에 들어가기 전에 모의실험을 아래와 같이 실시하였으며, 모의실험에 사용된 파라미터들은 표 1과 같으면 각각의 파라미터들에 대한 값은 BMW 750si를 모델로 하여 사용한 값들이다[17].

표 2 모의실험에 사용된 파라미터들

파라미터	값	파라미터	값
공기저항 계수(c_d)	0.43	차량 질량(m)	1,825 [Kg]
대기 밀도(ρ_h)	1.23[Kg·m ⁻³]	요우 관성모멘트(I)	0.733[Kg·m ²]
차량 단면적(A)	2.13 [m ²]	앞바퀴 타이어 특성(Γ_v)	0.1472[deg ⁻¹]
무게중심과 전방휠 사이의 거리	1.552 [m]	뒷바퀴 타이어 특성(Γ_h)	0.1472[deg ⁻¹]
무게중심과 후방휠 사이의 거리	1.568 [m]		

그리고 파라미터 λ_0 와 λ_1 은 각각 3.5로 두었으며, 우리가 원하는 경로를 추종하도록 모의실험을 수행하였고, 결과는 페이지 제한으로 인하여 발표시 제시하고자 한다.

5. 결론

이상과 같이 본 논문에서 설계된 적응-학습 제어기 특징모델에 대하여 모의실험을 한 결과 불확실한 파라미터에 대하여 강인성을 가지며, 응답속도에 대한면에서 있어서도 상당히 빠르다는 것을 볼 수 있다.

앞으로는 이렇게 제안된 제어기를 여러 가지 모델들에 대하여 일반적으로 적용해 볼 수 있도록하는 시뮬레이터를 제작하고자 한다.

6. 참고 문헌

- [1] E. Freund and R. Mayr, "Nonlinear Path Control in Automated Vehicle Guidance", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 13, pp. 49-60, No. 1, February 1997
- [2] Karnopp, D., and Wuh, D., "Handloin Enhancement of Ground Vehicles Using Feedback Steering Control", ASME Advanced Automotive Technologies, 1989
- [3] Lee, A. Y., "A Preview Steering Autopilot Control Algorithm for Four-Wheel Steering Passenger Vehicles", ASME Advanced Automotive Technologies, 1989
- [4] H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama, and R. Suzuki, "Feedback-Error-Learning Neural Network for Trajectory Control of a Robotic Manipulator", Neural Networks, vol. 1., pp.251-265, 1988
- [5] N. Matsumoto and M. Tomizuka, "Vehicle Lateral Velocity and Yaw Rate Control With Two Independent Control", Trans. of the ASME, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, vol. 114, pp. 606-613, Dec. 1992
- [6] Peng, H., and Tomizuka, M. "Vehicle Lateral Control for Highway Automation", Proceedings of American Control Conference, 1990.
- [7] P. Riekert and T. t. Schunck, "Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs", Ing. Arch., vol. XI, pp. 210-224, 1940
- [8] R. Mayr, "Verfahren zur Bahnfolgeregulierung fur ein automatisch gefuhrtes Fahrzeug", Dissertation, University of Dortmund, Dortmund, Germany, 1991
- [9] Shladover, S. E., et al., "Advanced Vehicle Control Systems(AVCS)", Proceedings of the International Congress on TRRansportation Electronics, 1990
- [10] S. Sastry, M. Bodson, "Adaptive Control", Prentice Hall, 1989
- [11] Xia, X., and Law, E. H., "Response of Four-Wheel Steering Vehicles to Combined Steering and Braking Inputs", ASME Advanced Automotive Technologies, 1989
- [12] Zhang, W., et al., "An Intelligent Roadway Reference System for Vehicle Lateral Control", Proceedings of American Control Conference, 1990
- [13] 백승민, 이동훈, 국태용, "DC 진동기를 위한 PID 학습제어기", 96 한국자동제어 학술회의 논문집, 1권, pp.168-171, Oct. 1996
- [14] J. Seuss and J. Richert, "Control Structures for Vehicle Convoy Driving", AVEC'96, pp.1227-1292, 1996.
- [15] E. Ono, K. Takanami, N. Iwama, Y. Hayashi, Y. Hirano, and Y. Satoh, "Vehicle Integrated Control for Steering and Traction Systems by μ -synthesis", Automatica, vol. 30, No. 10, pp. 1639-1647, 1994.
- [16] 사단법인 한국 자동차공학회, "자동차 기술 핸드북", pp. 187-191, 1996.
- [17] (주) 모터매거진, "Motor Magazine", 1997, 5월호