

차량 파라미터 변화에 강건한 적응형 신경회로망 기반 경로추종제어기 Design of Adaptive Neural Networks Based Path Following Controller Under Vehicle Parameter Variations

신동호¹

Dong Ho Shin¹

Received: 10 Feb. 2020, Accepted: 25 Feb. 2020

Key Words : Neural Networks, Backstepping, Lyapunov, Path Following, Parameter Variation, Lane Keeping

Abstract: Adaptive neural networks based lateral controller is presented to guarantee path following performance for vehicle lane keeping in the presence of parameter time-varying characteristics of the vehicle lateral dynamics due to the road surface condition, load distribution, tire pressure and so on. The proposed adaptive controller could compensate vehicle lateral dynamics deviated from nominal dynamics resulting from parameter variations by incorporating it with neural networks that have the ability to approximate any given nonlinear function by adjusting weighting matrices. The controller is derived by using Lyapunov-based approach, which provides adaptive update rules for weighting matrices of neural networks. To show the superiority of the presented adaptive neural networks controller, the simulation results are given while comparing with backstepping controller chosen as the baseline controller. According to the simulation results, it is shown that the proposed controller can effectively keep the vehicle tracking the pre-given trajectory in high velocity and curvature with much accuracy under parameter variations.

기호 설명

β : 사이드슬립각(side-slip angle), *rad*
 γ : 요레이트(yaw rate), *rad/s*
 ψ : 관성기준계 기준 차량 횡각, *rad*
 ψ_t : 경로접선과 관성좌표계간의 상대각, *rad*
 $\Delta\psi = \psi - \psi_t$: 상대경로각, *rad*
 d_s : 기준 경로점과 차량위치센서 사이 거리, *m*
 δ_f : 전륜 타이어 조향각, *m*
 ρ_{ref} : 기준 경로 곡률, *1/m*
 m : 차량질량, *kg*
 L_f : 차량 무게중심에서 전축 간의 거리, *m*

L_r : 차량 무게중심에서 후축 간의 거리, *m*
 C_f : 전륜 타이어 코너링 강성치, *N/rad*
 C_r : 후륜 타이어 코너링 강성치, *N/rad*
 L_s : 전방 주시거리, *m*
 V : 차량 속도
 (X_f, Y_f) : 관성좌표계
 (X_B, Y_B) : 동체고정좌표계

1. 서 론

최근에 ADAS(Advanced Driving Assist System) 시스템을 장착한 차량에 대한 연구와 관심이 증대되고 있는 상황으로서 각 자동차 OEM 및 학계에서는 이미 적응형 차간거리 제어 시스템 (Adaptive Cruise Control System) 또는 차선유지지원시스템 (Lane Keeping Assistance System)과 같은 운전자 편의장치에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이미 다양한 자동차OEM에서 양산 출시하고 있는 실정이다. 특히 차선유지지원시스템은 적응형 차간거리제어시

* Corresponding author: donghoup@koreatech.ac.kr
 1 School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 31253, Korea
 Copyright © 2020, KSFC
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시스템과 더불어 ADAS 시스템 중 필수적인 시스템으로 자리잡고 있으며 차선유지시스템의 핵심 기능 중 하나인 경로추종제어기는 자율주행자동차의 핵심 서브 함수로 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 향후 자율주행자동차가 양산되어 시장에 출시될 경우 다양한 불확실성 및 외란에 강건한 횡방향 경로추종제어기에 대한 연구가 매우 필요할 것으로 사료된다.

경로추종제어기에 대한 연구로는 기존 고전선형 제어방식인 비례(P: Proportional)제어기¹⁾, 비례적분(PI: Proportional and Integral)제어기²⁾, 그리고 NPID(Nested PID)³⁾를 차량 경로추종제어기에 적용하였으며 현대 제어의 주요한 결과물인 제어기⁴⁾, 적응형제어기⁵⁾, 슬라이딩모드 제어기^{6),19)}, LMI(Linear Matrix Inequality)⁷⁾ 그리고 LQ예측제어기(Linear Quadratic optimal Predictive Control)⁸⁻⁹⁾를 차량 경로추종시스템에 적용하여 그 유효성을 보였다. 특히 Chaib, Netto, 그리고 Mammari¹⁰⁾는 비례 제어기, 적응 제어기, 제어기, 퍼지 제어기를 다양한 경로, 도로 마찰계수 변화, 횡풍 외란 하에서 각 제어기를 비교하였으며 적응제어방식이 가장 불확실성 및 외란에 강건한 것으로 발표하였다. 최근 각광받고 있는 MPC(Model Predictive Control)^{11-13),20)} 제어방식은 상태변수 및 입력에 대한 다양한 구속조건을 고려할 수 있으며 시스템 파라미터 변화에 강건한 특성을 보였다. MPC는 일반적으로 비선형 최적화 로직을 수행하여야 하는데 일반적으로 계산량이 많아 차량이 고속으로 주행하는 경우 실시간성을 보장할 수 없는 단점을 가지고 있다.

상기 기술한 다양한 제어방식을 차량 경로추종시스템에 적용하여 그 유효성을 보였지만 다양한 가정 하에서 제어기를 설계하여 이에 따른 각 제어기 별 한계를 갖고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 차량의 횡방향 운동방정식을 구성하는 주요한 차량 파라미터인 관성모멘트, 차량 질량, 무게중심의 위치 변화, 타이어 강성치 변화에 강건한 경로추종제어기를 제안한다. 기본적인 구조는 차량의 횡방향 운동방정식과 차대도로간 운동학(Kinematics)을 기반으로 하여 최근에 각광받고 있는 백스테핑(Backstepping) 제어 법칙을 적용하였다. 일반적으로 백스테핑 제어기¹⁴⁾는 cascade형태의 시스템 모델에 대해 체계적인 제어기 설계가 가능하며 파라미터 불확실성에 강건한 특성을 갖고 있다고 알려져 있다. 본 연구에서 기본 제어기 설계 방식은 백스테핑 제어기 구조를 갖고 있으며 차량 파라미터 불확실성에 대한 제어기 성능 저하를 방지하기 위해 불확실성에 의한 차량 모델

오차를 보상하기 위해, 임의의 함수를 근사화 할 수 있는 신경회로망을 적용하였다. 또한 르야프노프(Lyapunov) 안정화 이론을 통해 신경회로망을 구성하고 있는 가중치 갱신 법칙을 유도하여 off-line 학습이 아닌 on-line상에서 임의의 비선형 함수(불확실성에 의한 모델 오차)를 근사화하여 불확실성에 의한 제어기 성능 저하를 보상할 수 있도록 하였다. 주요한 특징으로는 불확실성에 대한 한정 조건 없이 제어기를 유도하였으며 정확하지 않은 횡방향 운동 방정식 수학적 모델이라도 제어기 설계에 제약조건으로 작용하지 않는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다루고자 하는 경로추종시스템 운동방정식을 소개하고 이어서 기본 제어기인 백스테핑 제어 방법을 적용한 경로추종제어기를 유도한다. 3장에서는 2장에서 유도한 백스테핑 경로추종제어기를 기반으로 신경회로망을 적용한 적응형 신경회로망 경로추종제어기를 제안한다. 4장에서는 제안한 제어기의 유효성을 보이기 위해 다양한 차량 파라미터 변화에 따른 제안한 제어기의 성능을 기본 제어기인 백스테핑 제어기와 비교하였다. 최종적으로 5장에서는 본 연구결과를 요약 정리 및 향후 과제를 제시하는 결론으로 마무리 짓는다.

2. 시스템 운동방정식 및 Baseline 제어기

2.1 경로추종시스템 운동방정식

제안한 경로추종시스템과 주어진 경로 간의 기하학적 상관관계를 도식하면 그림 1과 같다. 일반적으로 단일트랙모델(Single Track Model)의 운동특성은 횡방향 가속도 0.4g 이하에서는 비선형 운동모델과 유사한 특성을 갖고 있다. 따라서, 경로추종 횡방향 제어기를 설계하기 위해서 전륜 2개의 바퀴, 그리고

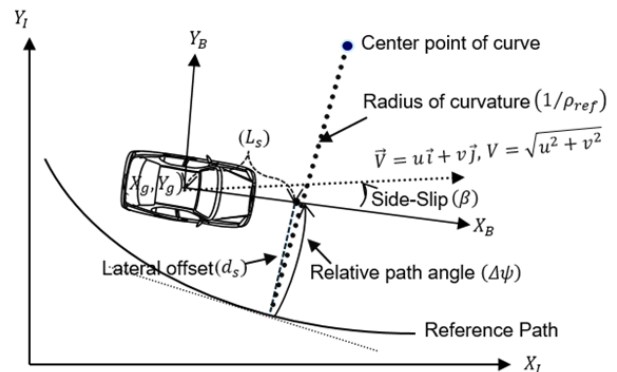


Fig. 1 Geometry of path following system

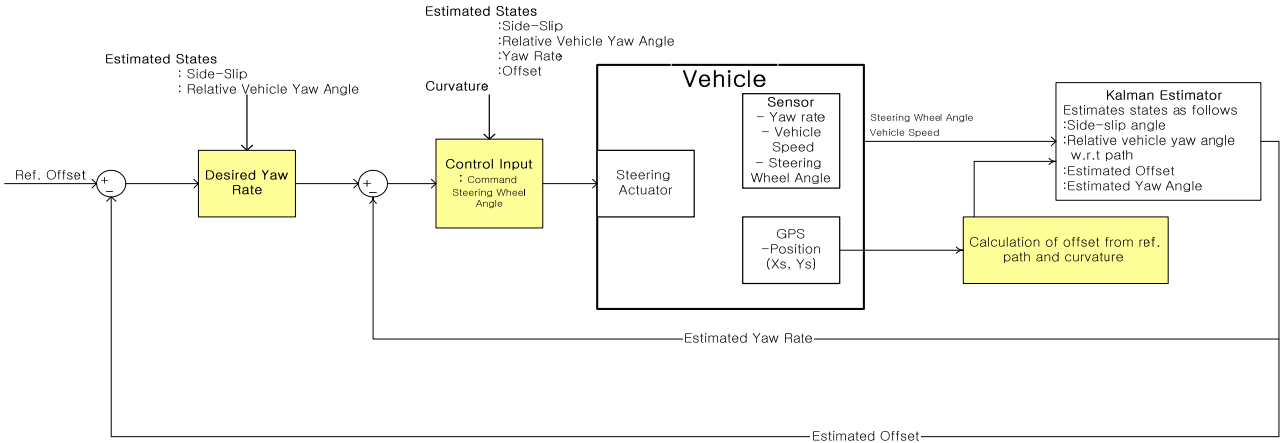


Fig. 2 Control architecture of the path following system using backstepping control

후륜 2개의 바퀴를 각각 하나의 전륜, 후륜 바퀴로 모델링 하고롤(Roll), 피치(Pitch), 히브(Heave) 운동을 고려하지 않은 단일트랙 자전거 모델을 선정하였다¹⁵⁾.

고려하고 있는 시스템 운동방정식은 차량 횡방향 운동역학방정식, 운동학, 그리고 차대도로간 운동학으로 구성되어 있으며 식 1과 같이 정리할 수 있다¹⁶⁾.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \Delta\dot{\psi} \\ \dot{d}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ V & L_s & V & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \Delta\psi \\ d_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & 0 \\ 0 & -V \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \rho_{ref} \end{bmatrix}$$

$$\equiv AX + BU \tag{1a}$$

$$\psi = \gamma \tag{1b}$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_g &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{Y}_g &= u \sin \psi + v \cos \psi \end{aligned} \tag{1c}$$

여기서 $a_{11} = -\frac{c_f+c_r}{mV}$, $a_{12} = -1 + \frac{c_r L_r - c_f L_f}{mV^2}$,

$$a_{21} = \frac{c_r L_r - c_f L_f}{I_{zz}}, a_{22} = -\frac{c_r L_r^2 + c_f L_f^2}{I_{zz} V}.$$

$$b_{11} = \frac{c_f}{mV} \quad b_{21} = \frac{c_f L_f}{I_{zz}}$$

2.2 Baseline 경로추종 제어기

백스테핑 경로추종제어기¹⁷⁾

이번 섹션에서는 백스테핑 제어기법을 적용한 경로추종제어기를 설계한다. 백스테핑 제어기는 되먹임 선형화 가능 시스템 또는 cascade 형태를 갖는 시스템에 대해 체계적으로 설계가 가능한 회귀적 제어기

설계 기법으로 기존 되먹임 선형화 기법과 비교하여 탄력적인 설계가 가능하다.

백스테핑 제어법칙을 적용하기 위해 우선 상태변수 d_s 에 관한 부시스템을 고려하자. 요레이트 γ 를 가상의 제어입력으로 생각하여 d_s -서브시스템을 안정화 시킬 수 있는 제어기를 설계하면 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_d = -\frac{V(\beta + \Delta\psi) + K_d d_s}{L_s} \tag{2}$$

오차변수 $e_\gamma = \gamma - \gamma_d$ 와 같이 정의하고 식(2)를 이용하면 d_s -서브시스템의 운동방정식은 다음과같이 정리될 수 있다.

$$\dot{d}_s = -K_d d_s + L_s e_\gamma \quad \text{여기서 } K_d > 0 \tag{3}$$

오차변수 $e_\gamma = \gamma - \gamma_d$ 의 γ_d 에 관한 식(2)를 대입하고 시간에 대해 1차 미분한 후 식(1a)로 표현된 상태공간 방정식을 결과식에 대입하면 γ -서브시스템에 대한 오차 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{e}_\gamma = f(\beta, \gamma, \Delta\psi, \rho_{ref}, V) + b_\delta \delta_f \tag{4}$$

$$\text{여기서 } b_\delta = b_{21} + \frac{V b_{11}}{L_s},$$

$$\begin{aligned} f(\beta, \gamma, \Delta\psi, \rho_{ref}, V) &\equiv f(\bullet) \\ &= C_\beta \beta + C_\gamma \gamma + C_\psi \Delta\psi - C_\rho \rho_{ref}, \end{aligned}$$

$$C_\beta = \frac{V a_{11} + V K_d + L_s a_{21}}{L_s}, \quad C_\rho = \frac{V^2}{L_s}$$

$$C_\gamma = \frac{V a_{12} + V + K_d L_s + L_s a_{22}}{L_s}, \quad C_\psi = \frac{K_d V}{L_s}$$

조향입력을 식(5)와 같이 선택하여 식(4)에 대입하면 γ -서브시스템에 대한 오차 운동방정식은 식(6)과 같이 된다.

$$\delta_f = \frac{1}{b_s} \left[-f(\bullet) - \frac{W_d L_s}{W_\gamma} d_s - K_\gamma e_\gamma \right] \quad (5)$$

여기서 $W_d, W_\gamma, K_\gamma > 0$

$$\dot{e}_\gamma = -K_\gamma e_\gamma - \frac{W_d L_s}{W_\gamma} d_s \quad (6)$$

식(5)에서 $\frac{W_d L_s}{W_\gamma} d_s$ 은 d_s 와 e_γ 간의 연성효과를 제거하기 위해 추가 되었으며 이는 백스테핑 제어기 설계 시 일반적인 접근 방식이다.

궤방향 제어기 안정성 해석

이번 섹션에서는 르야프노프 안정화 이론을 이용하여 식(5)로 주어지는 조향제어기가 페루프시스템을 안정화하는 것을 보여준다. 먼저, 르야프노프 후보 함수를 다음과 같이 정의하자.

$$L = \frac{1}{2} W_d d_s^2 + \frac{1}{2} W_\gamma e_\gamma^2 \quad (7)$$

식(7)을 시간에 대해 미분을 하고 식(3)과(6)을 결과식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{L} = -W_d K_d d_s^2 - W_\gamma K_\gamma e_\gamma^2 \quad (8)$$

간단한 부등식 성질을 이용하면 $\dot{L} \leq -2\min(K_d, K_\gamma)L$ 이 되며 이를 통해 d_s 와 e_γ 에 관한 페루프시스템이 전역적 및 지수적으로 안정하다는 결론을 얻을 수 있다.

3. 적응형 신경회로망 기반 경로추종제어기

3.1 신경회로망 구조

본 연구에서는 총 3개의 층, 즉 입력층, 은닉층 (Hidden layer), 그리고 출력층으로 구성된 신경회로망 구조를 이용하여 임의의 연속함수를 근사화 하였다. $h(x): R^{N_1+1} \rightarrow R$ 인 부드러운 함수인 경우 다음과 같이 3층 신경회로망을 이용하여 표현될 수 있다.

$$h(x) = W^T \vec{\sigma}(V^T x) \quad (9)$$

여기서 $W = [w_1, w_2, \dots, w_{N_1}]^T \in R^{N_1}$: 은닉층과 출력층 사이의 가중치 벡터, $V = [v_1, v_2, \dots, v_{N_1}]^T \in R^{(N_1+1) \times N_2}$: 입력층과 은닉층 사이의 가중치 행렬, $x = [1, x_1, x_2, \dots, x_3]^T \in R^{N_1+1}$ 그리고

$$\vec{\sigma}(z) = [1, \sigma(z_1), \sigma(z_2), \dots, \sigma(z_{N_2})]^T, \sigma(z) = \tanh(z).$$

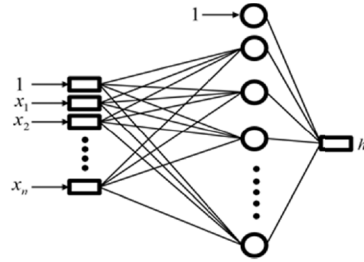


Fig. 3 Neural networks structure

신경회로망은 임의의 연속함수를 임의의 원하는 정확도를 가지고 컴팩트 set상에 근사화 할 수 있다는 사실은 잘 알려진 이론이다. 이를 수학적으로 표현하면 $h(x) = W^{*T} \vec{\sigma}(V^{*T} x) + \mu_h$ 그리고 $|\mu_h| \leq \mu_{0h}$ (상수 $\mu_{0h} > 0$)을 만족하는 W^* 와 V^* 가 존재한다.

보조정리¹⁸⁾ 식(9)로 표현된 신경회로망 근사화식에 대해 신경회로망 추정오차는 다음과 같이 표현된다.

$$W^{*T} \vec{\sigma}(V^{*T} x) - \hat{W}^T \vec{\sigma}(\hat{V}^T x) = \tilde{W}^T (\hat{\sigma} - \hat{\sigma}' \hat{V}^T x) + \hat{W}^T \hat{\sigma}' \hat{V}^T x + d_h \quad (10)$$

여기서 \hat{W} 와 \hat{V} 는 각각 W^* 와 V^* 의 추정값이다. $\tilde{W} = W^* - \hat{W}$, $\hat{\sigma} = \vec{\sigma}(\hat{V}^T x)$, $\tilde{V} = V^* - \hat{V}$, $d_h = W^{*T} \vec{\sigma}(V^{*T} x) - W^{*T} (\hat{\sigma} - \hat{\sigma}' \hat{V}^T x) - \hat{W}^T \hat{\sigma}' \hat{V}^T x$, 그리고 $\hat{\sigma}' = d\vec{\sigma}(z)/dz|_{z=\hat{V}^T x}$.

여분항 $d_h + \mu_h$ 은 다음 식으로 한정된다.

$$\begin{aligned} & |d_h| + |\mu_h| \\ & \leq [\|W^*\|_1 + \mu_{0h}, \|W^*\|, \|V^*\|_F] \left[\left\| \hat{\sigma} - \hat{\sigma}' \hat{V}^T x \right\| \right] \\ & \equiv K_h^{*T} \varphi_h \end{aligned} \quad (11)$$

3.2 적응형 신경회로망 설계

3.1절에서 기술한 백스테핑 제어기 설계 절차를 따라 한 후 오차 상태방정식 식(4)의 제어입력을 다음과 같이 제안한다.

$$\delta_f = \hat{b}_\delta^{-1} \{-\hat{f} - L_s d_s - \rho \text{sgn}(e) - K_e e\} \quad (12)$$

여기서 \hat{f} 는 신경회로망에 의해 근사화 된 연속함수이며 \hat{b}_δ 는 b_δ 의 추정값이다. 또한 $\text{sgn}()$ 는 사인 함수, ρ 는 switching 게인, W_d , W_e , 그리고 W_r 는 양의 상수 게인들이다.

식(12)를 식(4)에 대입하면 다음과 같은 페루프 오차 미분방정식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_\gamma &= f + b_\delta \hat{b}_\delta^{-1} \{-\hat{f} - L_s d_s - \rho \text{sgn}(e_\gamma) - K_e e_\gamma\} \\ &= f + \{b_\delta + \hat{b}_\delta - \hat{b}_\delta\} \hat{b}_\delta^{-1} \{-\hat{f} - L_s d_s - \rho \text{sgn}(e_\gamma) - K_e e_\gamma\} \\ &= (f - \hat{f}) + (b_\delta - \hat{b}_\delta) \delta_f - L_s d_s - \rho \text{sgn}(e_\gamma) - K_e e_\gamma \\ &= (f - f^*) + (f^* - \hat{f}) + (b_\delta - \hat{b}_\delta) \delta_f - L_s d_s \\ &\quad - \rho \text{sgn}(e_\gamma) - K_e e_\gamma \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$f = f^* + \mu_f = W_f^{*T} \vec{\sigma}(V_f^{*T} x_f) + \mu_f \quad (14)$$

$$\hat{f} = \hat{W}_f^T \vec{\sigma}(\hat{V}_f^T x_f) \quad (15)$$

그리고 μ_f 는 f 의 근사화 오차, $x_f = [1, \beta, \gamma, \Delta\Psi, \rho_{ref}, 1/V]^T$.

신경회로망 가중치 행렬 \hat{W}_f 그리고 \hat{V}_f 는 다음 식으로 주어진 적응 법칙에 의해 갱신된다.

$$\dot{\hat{W}}_f = \Gamma_{wf} (\hat{\sigma}_f - \hat{\sigma}'^T \hat{V}_f^T x_f) e_\gamma^T \quad (16a)$$

$$\dot{\hat{V}}_f = \Gamma_{vf} x_f e_\gamma^T \hat{W}_f^T \hat{\sigma}' \quad (16b)$$

여기서 Γ_{wf} and Γ_{vf} 는 적당한 차수를 갖는 양의 한정 가중치 행렬이다.

b_δ 의 추정치 \hat{b}_δ 는 다음 식으로 주어진 적응법칙에 의해 갱신된다.

$$\dot{\hat{b}}_\delta = e_\gamma \delta_f \quad (17)$$

슬라이딩 모드 제어기법에 의하면, 연속함수 f 의 신경회로망 근사화 오차를 보상하기 위해 switching gain ρ 를 적당한 값으로 설정하는 것이 필요하다. 그러나 일반적으로 이러한 근사화 오차값의 한정값은 알 수 없다. 따라서 한정값을 추정하여야 한다. 보조 정리의 식(11)을 이용하면 switching gain ρ 를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\rho = \hat{K}_f^T \varphi_f \quad (18)$$

여기서 \hat{K}_f 는 다음 식으로 표현된 적응 법칙에 의해 갱신된다.

$$\dot{\hat{K}}_f = \Gamma_{fk} \varphi_f |e_\gamma| \quad (19)$$

적용 신경회로망을 이용한 제어기의 주 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

정리 1 식(3)과 식(4)로 표현된 오차 미분방정식을 고려하자. 식(16)으로 주어진 신경회로망 가중치 행렬 적응법칙, 그리고 식(18)(19)로 주어진 스위칭 게인에 의해 조정되는 식(12)로 주어진 제어입력은 점근적으로 거리오차 d_s , 요각속도 추정오차 e_γ 를 0으로 수렴하게 만든다. 또한, 폐회로 시스템의 모든 신호들은 한정된다.

증명) Lyapunov 안정성 해석을 위해 Lyapunov function candidate 함수를 다음과 같이 선정하였다.

$$V = \frac{1}{2} d_s^2 + \frac{1}{2} e_\gamma^2 + \frac{1}{2} \hat{b}_\delta^2 + \frac{1}{2} \{ \hat{W}_f^T \Gamma_{fw}^{-1} \hat{W}_f + \text{tr}(\hat{V}_f^T \Gamma_{fv}^{-1} \hat{V}_f) \} + \frac{1}{2} \{ \tilde{K}_f^T \Gamma_{fk}^{-1} \tilde{K}_f \} \quad (20)$$

Lyapunov function V 를 시간에 대해 미분한 식에 식(3)(13)를 대입하여 얻은 결과식에 식(10)과 식(16-19)으로 주어진 신경회로망 추정오차식, 적응법칙, 그리고 스위칭 게인을 대입하고 $\text{tr}[yx^T] = x^T y$ 성질을 이용하면 르야프노프 함수 V 의 시간에 대한 미분식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{V} = e_\gamma (\mu_f + d_f) + \tilde{K}_f^T \Gamma_{fk}^{-1} \dot{\tilde{K}}_f - \rho \text{sgn}(e) - K_e e_\gamma^2 - K_d d_s^2$$

따라서,

$$\dot{V} \leq |e_\gamma| (|\mu_f| + |d_f|) + \tilde{K}_f^T \Gamma_{fk}^{-1} \dot{\tilde{K}}_f - \rho \text{sgn}(e) - K_e e_\gamma^2 - K_d d_s^2$$

식(11),(18) 그리고 (19)를 고려하면, V 의 시간에 대한 미분값의 상한은 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} \leq -K_e e_\gamma^2 - K_d d_s^2 \quad (21)$$

따라서 식(20)과 식(21)이 유효하고 신경회로망 가중치 행렬의 초기값, 추정오차, 그리고 게인 파라미

터값이 한정되어 있으면 $\hat{W}_f, \hat{V}_f, \hat{W}_g, \hat{V}_g, \hat{K}_f, \hat{K}_g, \hat{b}_s$ 그리고 $e \in L^\infty, \int_0^\infty (e_\gamma^2 + d_s^2) dt < \infty$ 그리고 $0 \leq V(t) \leq V(0), \forall t > 0$ 성립하므로 $e_\gamma, d_s \in L^2$. 식 (3),(13)으로부터 식(12)로 주어진 제어입력은 한정되고 $\dot{d}_s, \dot{e}_\gamma \in L^\infty$. 상기 결과에 의해 $\dot{d}_s, \dot{e}_\gamma \in L^\infty$ 이고 $e_\gamma, d_s \in L^2 \cap L^\infty$ 가 성립되므로, Barbalat 보조정리에 의해 시간이 지남에 따라 $e_\gamma, d_s \rightarrow 0$ 된다. 이것은 추정 오차가 점근적으로 0에 수렴함을 의미한다.

4. 시뮬레이션

백스테핑 제어기법을 이용한 기존 제어기와 적응형신경회로망을 이용한 강건 경로추종제어기의 성능을 비교 평가하기 위해 차량이 그림 4와 같이 주어진 경로를 시속 100km로 자동 주행한다고 가정하였다. 경로는 직선로와 곡률반경 260m인 곡선로의 조합으로 구성하였다.

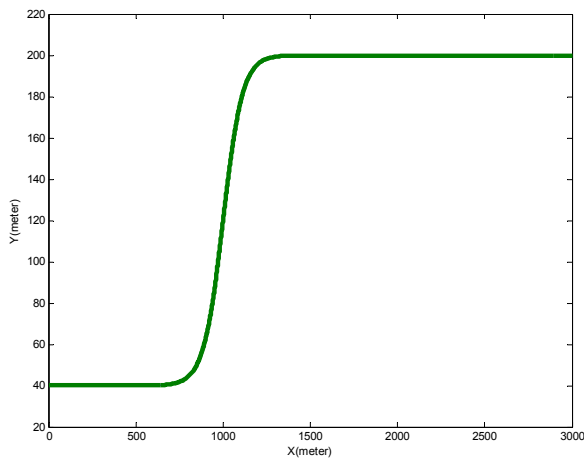


Fig. 4 Reference Trajectory

공칭 차량파라미터는 표 1과 같이 주어지며 제한한 제어기의 강건성을 보이기 위해 차량 파라미터 변화값을 표1의 세번째 열에 제시하였다.

Table 1 Vehicle parameter variations

Symbol	Nominal value	Perturbed value
c_f	113,280 [N/rad]	113,280*0.5 [N/rad]
c_r	140,000 [N/rad]	140,000 *0.5[N/rad]
I_z	2,400 [kg m ²]	2,700 [kg m ²]
m	2,200 [kg]	3,000 [kg]
L_f	1.087 [m]	1.287 [m]
L_r	1.753 [m]	1.553 [m]

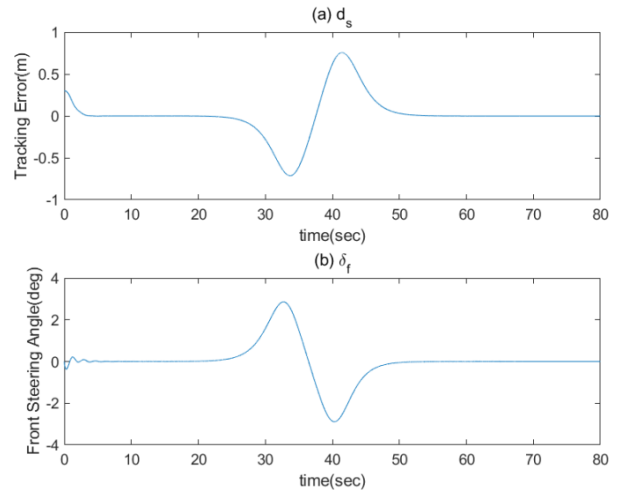


Fig. 5 Time history of (a)tracking error and (b)control input in case of backstepping control

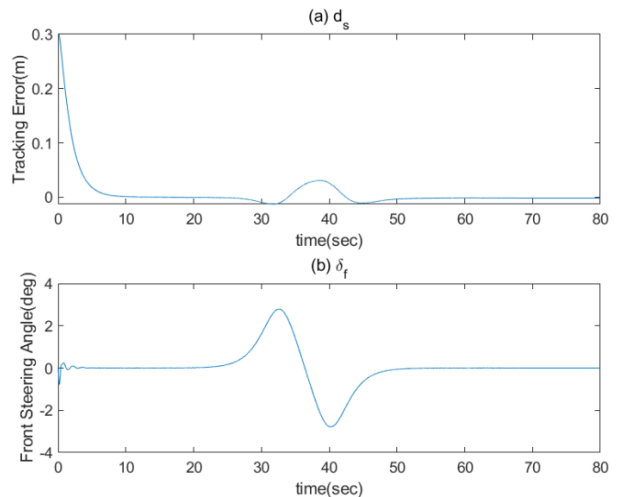


Fig. 6 Time history of (a)tracking error and(b)control input in case of adaptive neural networks control

시뮬레이션을 위해 차량 코너링 강성치 변화는 매우 가혹한 조건인 50% 감소를 하였으며 질량은 약 40% 증가, 요모멘트는 약 15% 증가, 그리고 무게중심 위치는 약 20% 변화를 주었으며 주행 조건도 회전반경 260m에 대해 시속 100 KPH로 주행(일반적으로는 안전 주행 속도는 80 KPH)한 상태의 매우 가혹한 조건에서의 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 5의 (a)는 백스테핑 제어기를 이용한 경로추종 제어기의 경로추종오차에 대한 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 차량 제원 기준값을 바탕으로 설계된 제어기로서 차량 횡방향 운동방정식 파라미터값이 변화함에 따라 베이스라인 제어기인 백스테핑 제어기의 기본적인 강건성에 의해 직선구간에서는 경로추

중오차가 작지만 곡선구간에서의 경로 추종 오차가 약 75cm까지 커짐을 확인 할 수 있다. 이는 차량 파라미터 중 코너링강성치값이 기준값 대비 50% 감소함에 따라 타이어의 코너링 횡력이 작게 나타남에 따라 곡선로 코너링 시 오차가 커지게 되는 결과를 낳는다. 이에 반해 본 연구에서 제안한 적응형 신경회로망을 이용한 제어기의 경우 그림6(a)에서 보여지는 바와 같이 곡선로 통과 시에도 경로추종오차가 약 6cm이내로 유지됨을 알 수 있다. 이는 적응형 신경회로망이 차량파라미터 변화에 의한 운동방정식을 구성하는 함수를 실시간으로 근사화함으로써 조향제어기 값을 적절히 변화시켜 곡선구간에서도 경로추종오차가 작게 유지 되도록 성능을 발휘함을 말한다. 그림 6(b)는 조향핸들 입력값의 시간궤적을 보여준다. 조향핸들의 적절한 운용범위에 자동조향 제어값이 존재함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 신경회로망을 이용한 강건 경로추종제어기를 제안하였다. 경로추종제어시스템이 cascade 형태 운동방정식으로 표현될 수 있음을 이용하여 이러한 형태에 대해 체계적으로 설계 가능한 백스테핑 제어기법을 적용하였다. 그리고 차량 파라미터 불확실성에 대해 강건성을 확보하기 위하여 운동방정식을 구성하는 함수를 실시간 적응형 신경회로망을 이용하여 추정하여 차량 파라미터 변화에 의한 공칭모델과 달라진 운동방정식을 추정하여 차량 파라미터 불확실성에 대한 강건성을 확보하였다. 제안된 제어기의 유효성을 보이기 위해 기존 베이스라인 제어기인 백스테핑 제어기와 비교하여 제안한 적응형 신경회로망 경로추종제어기가 곡률반경 260m 인 곡선로를 고속인 시속 100km로 주행 시에도 경로추정 오차가 6cm 이내임을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2016년도 한국기술교육대학교 교수연구제 파견연구비 지원과 2018년 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 지원에 의하여 연구되었음

References

1) A. Broggi et al., "The ARGO Autonomous Vehicle's

Vision and Control Systems", International Journal of Intelligent Control and Systems, Vol.3, No.4, pp. 409-441, 1999.

2) P. Zhao et al., "Dynamic motion planning for autonomous vehicle in unknown environments," Proceedings of 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011.

3) R. Marino, S. Scalzi and M. Netto, "Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles," Control Engineering Practice, Vol.19, No.12, pp.1459-1467, 2011.

4) S. Hima et al., "Trajectory Tracking for Highly Automated Passenger Vehicles," IFAC Proceedings Volumes, Vol.44, No.1, pp.12958-12963, 2011.

5) M. S. Netto, S. Chaib and S. Mammar, "Lateral adaptive control for vehicle lane keeping", Proceedings of the 2004 American Control Conference, pp.2693-2698, 2004.

6) H. Fang et al., "Robust anti-sliding control of Autonomous Vehicles in presence of lateral disturbances", Control Engineering Practice, Vol. 19, No.5, pp.468-478, 2011.

7) H. Zhang, X. Zhang and J. Wang, "Robust gain-scheduling energy-to-peak control of vehicle lateral dynamics stabilisation", Vehicle System Dynamics, Vol.52, No.3, pp.309-340, 2014.

8) D. Kim, J. Kang and K. Yi, "Control strategy for high-speed autonomous driving in structured road", Proceedings of 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011.

9) J. Kang et al., "Design and Testing of a Controller for Autonomous Vehicle Path Tracking Using GPS/INS Sensors", IFAC Proceedings Volumes, Vol.41, No.2, pp.2093-2098, 2008.

10) S. Chaib, M. S. Netto, and S. Mammar, "H [infinity], adaptive, PID and fuzzy control : a comparison of controllers for vehicle lane keeping", Proceedings of 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.139-144, 2004.

11) J. Levinson et al., "Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms", Proceedings of in 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011.

- 12) T. Keviczky et al., "Predictive control approach to autonomous vehicle steering", Proceedings of 2006 American Control Conference, 2006.
- 13) R. Lenain et al., "High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks", Autonomous Robots, Vol.21, pp.79-97, 2006.
- 14) H. K. Khalil, Nonlinear Systems, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, pp.588-601, 1996.
- 15) R. Rajamani, Vehicle Dynamics and Control, Springer, New York, 2006.
- 16) J. Ackermann et al., "Linear and nonlinear controller design for robust automatic steering", Proceedings of IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.3, No.1, pp.132-143, 1995.
- 17) D. H. Shin and B. Y. Joo, "Design of a Vision-Based Autonomous Path-Tracking Control System and Experimental Validation", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.224, No.7, pp.849-864, 2010.
- 18) S. S. Ge, C. C. Hang, and T. Zhang, "A direct approach to adaptive controller design and its application to inverted pendulum tracking", Proceedings of the 1998 American Control Conference, pp.1043-1047, 1998.
- 19) K. S. Oh, J. H. Seo and G. H. Lee, "Phase Portrait Analysis-Based Safety Control for Excavator Using Adaptive Sliding Mode Control Algorithm", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.3, pp.8-13, 2018.
- 20) T. J. Song, H. W. Lee, and K. S. Oh, "A Model Predictive Tracking Control Algorithm of Autonomous Truck Based on Object State Estimation Using Extended Kalman Filter", Journal of Drive and Control, Vol.16, No.2, pp.22-29, 2019.