

관측자를 이용한 직진 주행 차량의 적응 제어

김 응석*, 김 동헌**, 이 형찬***, 양 해원**
 한라대학교 전기공학부*, 한양대학교 전기공학과**, 대진대학교 전기공학과***

Observer based Adaptive Control of Longitudinal Motion of Vehicles

Eung-Seok Kim*, Dong-Hun Kim**, Hyoung-Chan Lee***, Hai-Won Yang**
 Department of Electrical Engineering, Halla Institute of Technology
 Department of Electrical Engineering, HanYang University**
 Department of Electrical Engineering, DaeJin University***

Abstract - In this paper, an observer-based adaptive controller is proposed to control the longitudinal motion of vehicles. The standard gradient method will be used to estimate the vehicle parameters, mass, time constant, etc. The nonlinear model between the driving force and the vehicle acceleration will be chosen to design the state observer for the vehicle velocity and acceleration. It will be shown that the proposed observer is exponentially stable, and that the adaptive controller proposed in this paper is stable. It will be proved that the errors of the relative distance, velocity and acceleration converge to zero asymptotically fast, and that the overall system is also asymptotically stable. The simulation results are presented to investigate the effectiveness of the proposed method.

1. 서 론

차량의 Longitudinal(이하 직선주행) 제어는 첨단차량제어시스템 구현문제에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 이에 대한 기본적인 제어기술이 적응순항제어(Adaptive Cruise Control), 충돌방지제어(Collision Avoidance Control), 교통제어(Traffic Control) 등에도 적용될 수 있기 때문이다. 차량의 직선주행 제어시스템의 구현시 중요한 요소기술로 센서융용기술, 시스템 제어기술을 들 수 있다. 이 가운데 해당차량과 선행차량 간의 상대거리, 상대속도 및 상대가속도를 원하는 값으로 정확히 제어하는 것은 차량의 가감속 운동특성(동력계 및 제동계 동특성)을 감안할 때 응답성이 비교적 느린 시스템의 제어문제로 간주할 수 있다. 즉, 스로틀(throttle)입력이 엔진출력에 반영된 후 차량의 추력으로 변환되기까지 소요되는 시간이 비교적 느리다고 할 수 있다. 또한 제동장치로 부터의 제동력이 차량 추력에 영향을 미치는 시간 또한 빠르다고 할 수 없다. 이와 같이 제어입력에 대한 출력 특성이 느린 시스템을 효과적으로 빠르게 제어하기 위해서는 시스템의 속응성을 향상시킬 수 있는 정밀하면서도 안정적인 제어알고리즘이 필요하다. [1]에서는 분산화된 비선형 시스템에 대한 적응 제어알고리즘을 제시함으로써 차량주행제어에도 효과적임을 보였다.

본 논문에서는 차량의 탑승객 및 적재물의 하중이 매 운행시 수시로 변할 수 있는 문제(차량의 질량변화)와 차량 동특성의 비선형 특성에 대한 선형화 문제에 대한 궤환선형화 적응제어기 설계 문제를 다루기로 한다. 차량 질량 및 동력 전달계의 시간지연상수는 파라미터 적용식으로 해결하고, 궤환선형화 제어기 설계시 필요한 상태들(속도, 가속도 등)은 스윕칭 형태의 관측자를 설계함으로써 비선형 동특성을 완전히 소거하고자 한다. 전체 시스템의 안정도가 보장되고 선행 차량에 대한 추종특성이 보장될 수 있음을 수학적으로 입증한다. 그리

고 차간 거리, 속도 및 가속도가 원하는 값을 유지할 수 있음도 보일 것이다.

2. 제어모델 및 문제의 정식화

본 논문에서는 [1],[2]에서 시스템적인 측면에서 유용성을 입증한 단순모델에 대해 논하기로 한다. 따라서 본 논문에서도 [1],[2] 등에서와 같이 주위온도, 엔진 온도, 스파크 플러그 상태, 트랜스미션 동특성 등을 포함하는 복잡한 동력전달계 모델을 다루지는 않기로 한다. 즉, 스로틀 개도(throttle opening)/제동력(braking force)을 입력으로 하고 차량 추진력을 출력으로 간주한 시간지연 모델과 차량 추진력을 입력으로 간주하고 차량속도를 출력으로 놓은 비선형 모델을 합성한 단순모델을 제어대상으로 한다. 간단히 하기 위해 주행조건은 다음과 같다고 가정한다.

가정 1: 도로는 수평이고, 돌풍의 영향은 무시할 수 있으며, 모든 차량은 동일한 방향으로만 주행한다.

위의 가정 1은 직선주행 제어문제를 단순화하기 위하여 [2] 등에서 설정한 것이다. 다음의 그림 1은 추종주행시의 차량열을 나타내고 있다.

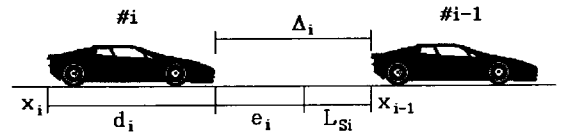


그림 1 추종 주행시의 차량열.

그림으로 부터 선행차량(#i-1)과 추종차량(#i) 간의 상대적인 오차는 다음관계를 갖는다.

$$\Delta_i = e_i + L_{si}, \quad \dot{\Delta}_i = \dot{e}_i, \quad \ddot{\Delta}_i = \ddot{e}_i \quad (1)$$

$$e_i = x_{i-1} - (x_i + d_i) - L_{si} \quad (2)$$

여기서 x_{i-1} 은 선행차량(lead car)의 위치이고, x_i 는 추종차량(following car)의 위치이다. d_i, L_{si} 는 각각 추종차량의 차체길이와 안전거리이다. 실제 구현시에는 식(1)의 관계를 이용해서 추종차량이 유지해야할 안전거리 L_{si} 를 포함한 차간거리 측정치 Δ_i 로부터 차간거리의 오차 e_i 를 얻을 수 있다. 차간속도 오차 및 차간가속도 오차는 측정장치로부터 직접 얻거나, 식(1)의 관계를 이용하여 얻을 수 있다. 그림 2는 추종 차량의 단순화한 모델을 나타내고 있다.

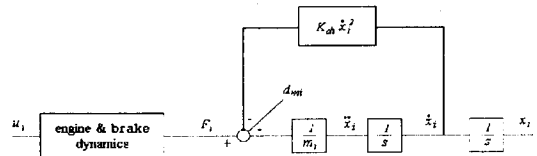


그림 2 단순화한 i번째 차량 모델[2].

그럼 2 에서 $K_{di}\ddot{x}_i^2$ 은 차량 # i 의 공기저항에 기인하는 힘으로 K_{di} 는 공기저항계수에 관한 상수이고, d_{mi} 는 기계저항(mechanical drag)에 관한 상수이다. m_i 는 차량 # i 의 질량이고, u_i 는 양수(>0)일 경우에는 스로틀 개도(throttle opening)이고 음수(<0)일 경우에는 제동력이다. F_i 는 동력계통 및 제동장치에서 발휘되는 힘으로 차량 # i 의 주행 동특성과는 다음의 관계를 만족한다[2].

$$m_i\ddot{x}_i = F_i - K_{di}\dot{x}_i^2 - d_{mi} \quad (3)$$

동력계통의 동특성은 다음과 같은 비선형 미분방정식으로 표현된다[2].

$$\dot{F}_i = -\frac{F_i}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} + \frac{u_i}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} \quad (4)$$

여기서 $\mu_{1i}(\dot{x}_i)$ 는 차량 # i 가 속도 \dot{x}_i 로 주행중일 때의 제어입력(스로틀 개도/제동력)에서 차량 추진력까지의 시간지연 상수이다. 식(3)을 F_i 에 관해 정리하면 아래와 같이 된다.

$$F_i = m_i\ddot{x}_i + K_{di}\dot{x}_i^2 + d_{mi} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입해서 정리하면,

$$\dot{F}_i = -\frac{1}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} \left[m_i\ddot{x}_i + K_{di}\dot{x}_i^2 + d_{mi} \right] + \frac{u_i}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} \quad (6)$$

이 된다. 식(3)을 한번 미분하고 식(6)을 대입하면,

$$\frac{d^3x_i}{dt^3} = -2\frac{K_{di}}{m_i}\dot{x}_i\ddot{x}_i - \frac{1}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} \left[\ddot{x}_i + \frac{K_{di}}{m_i}\dot{x}_i^2 + \frac{d_{mi}}{m_i} \right] + \frac{u_i}{m_i\mu_{1i}(\dot{x}_i)} \quad (7)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식(7)의 제어모델을 이용할 경우 차량의 선속도 \dot{x}_i 및 선가속도 \ddot{x}_i 를 정확히 알아야할 필요가 있다. 또한 질량 m_i 는 탑승자 수 및 적재물의 변동에 따라 그 값이 주행시마다 달라질 수 있다. 그리고 엔진시정수라 할 수 있는 $\mu_i(\dot{x}_i)$ 는 주행 속도에 비례해 변화하는 값이다.

따라서 본 논문에서는 선속도 및 선가속도 \dot{x}_i, \ddot{x}_i 를 상태관측자를 이용하여 추정하고, 질량 m_i 및 엔진 시정수 $\mu_i(\dot{x}_i)$ 에 종속적인 시스템 파라미터는 적응책을 이용하여 추정하기로 한다. 제어기 설계시 필요한 정보는 추정된 상태 및 파라미터들을 이용함으로써 얻을 수 있다. 폐환선형화 방식의 제어기를 설계하여 전체 시스템의 안정도가 보장되고, 차량간의 상대거리, 상대속도 및 상대가속도 오차가 빠른 시간내에 '0'으로 수렴하도록 하는 것이 본 논문의 목적이다.

3. 상태 관측자 및 적응 제어기 설계

3.1 상태 관측자: 상태 관측자를 설계하여 선속도 및 선가속도 \dot{x}_i, \ddot{x}_i 를 추정하기로 한다. 선속도 \dot{x}_i 는 차량의 속도계로부터 직접 알 수 있으므로 추정할 필요는 없다. 하지만 제어기 설계시 실측값 보다 추정값을 사용하는 것이 잡음등에 유리하다. 따라서 본 논문에서는 관측자 설계에는 선속도 \dot{x}_i 를 이용하고, 제어기 설계시에는 추정치를 이용하기로 한다. 구조를 단순화하기 위해 식(3)의 모델을 상태관측자 설계에 이용하기로 한다. 식(3)을 파라미터화 기법으로 정리하면 식(8)과 같이 된다.

$$\ddot{x}_i = \frac{1}{m_i} F_i - \frac{K_{di}}{m_i} \dot{x}_i^2 - \frac{d_{mi}}{m_i} = p_{1i}^T Y_{1i} \quad (8)$$

여기서 $p_{1i}^T = \left[\frac{1}{m_i} \quad -\frac{K_{di}}{m_i} \quad -\frac{d_{mi}}{m_i} \right]$ 로 파라미터 벡터이고, $Y_{1i}^T = [F_{1i} \quad \dot{x}_i^2 \quad 1]$ 로 측정치 벡터이다. 식(8)의 관측자 모델에 대하여 아래의 관측자를 설계한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i &= -k_{ol}(\hat{x}_i - x_i) + \overline{p_{1i}}^T Y_{1i} - \xi_{1i} S(\hat{x}_i), \\ S(\hat{x}_i) &= \begin{cases} 1, \hat{x}_i > 0 \\ -1, \hat{x}_i < 0 \end{cases}, \xi_{1i} \geq \|\overline{p_{1i}}^T - p_{1i}^T\|_{\infty} \|Y_{1i}\|_{\infty} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $k_{ol}(>0)$ 은 양의 상수로서 관측자 이득이고, $\overline{p_{1i}}^T$ 는 파라미터 벡터 p_{1i}^T 의 사전 설정치이다. 그리고 $\|\cdot\|_{\infty}$ 는 L_{∞} norm이며, $\hat{x}_i = \hat{x}_i - x_i$ 는 상태오차이다. p_{1i}^T 의 정확한 값은 알 수 없지만 $\overline{p_{1i}}^T$ 와의 차이에 대한 상한값은 미리 알 수 있는 값이다. 그리고 측정치 벡터 Y_{1i} 의 요소중 \dot{x}_i^2 의 최대값은 제어기 설계자가 미리 알 수 있는 값이며, F_i 에 대한 상대적인 유계성을 보장하기 위해 다음의 보조신호를 설계한다.

$$\dot{F}_{1i} = -\frac{F_{1i}}{\mu_{1i}} + \frac{\|u_i\|_{\infty}}{\mu_{1i}} \quad (10)$$

여기서 μ_{1i} 는 설계파라미터로서 $0 < \mu_{1i} < \mu_{1i}$ 를 만족하도록 설정한다. 그러면, 다음의 보조정리가 성립한다.

보조정리 1 : 초기시간 $t = t_0$ 에서 $F_{1i}(t_0) > |F_i(t_0)|$ 이 성립하고, 모든 시간 $t \geq t_0$ 에 대해서 $0 < \mu_{1i} < \mu_{1i}$ 이 만족하도록 F_{1i} 와 μ_{1i} 를 설정한다면, $F_{1i} > |F_i|, \forall t \geq t_0$ 가 성립한다.

증명: 식(4)로 주어진 미분방정식의 해는 다음의 부등 관계를 만족한다.

$$|F_i| \leq |F_i(t_0)| e^{-(t-t_0)/\mu_{1i}} + \int_{t_0}^t e^{-(t-\tau)/\mu_{1i}} \|u_i\|_{\infty} d\tau \quad (11)$$

그리고 식(10)의 미분방정식의 해는

$$F_{1i} = F_{1i}(t_0) e^{-(t-t_0)/\mu_{1i}} + \frac{1}{\mu_{1i}} \int_{t_0}^t e^{-(t-\tau)/\mu_{1i}} \|u_i\|_{\infty} d\tau \quad (12)$$

이 된다. 식(12)에서 $F_{1i}(t_0) > |F_i(t_0)|$ 및 $e^{-(t-t_0)/\mu_{1i}} > e^{-(t-t_0)/\mu_{1i}}, \forall t \geq t_0$ 이 성립하므로 $F_{1i} > |F_i|, \forall t \geq t_0$ 가 만족됨을 알 수 있다. 따라서 식(9)의 $\|Y_{1i}\|_{\infty}$ 를 구현할 수 있으며,

$\xi_{1i} \geq \|\overline{p_{1i}}^T - p_{1i}^T\|_{\infty} \|Y_{1i}\|_{\infty}$ 또한 구현할 수 있음을 알 수 있다. 이제 식(9)와 같이 설계한 상태관측자의 오차 수렴성을 알아 보기로 한다. 식(8)의 관측자 모델에 대해서 관측오차를 $\hat{x}_i (= \hat{x}_i - x_i)$ 라고 정의하면 식(9)의 상태관측자는 다음의 정리를 만족한다.

보조정리 2 : $k_{ol} > 0$ 을 만족하는 식(9)의 상태관측자의 이득상수 k_{ol} 에 대해 상태관측오차는 지수함수적으로 '0'으로 수렴한다. 즉, $\hat{x}_i \rightarrow 0, \ddot{x}_i \rightarrow 0, \forall t \geq t_0$ 이 만족된다.

증명생략

3.2 적응 제어기: 이제 상태 관측자를 이용해 추정한 선가속도 \ddot{x}_i 및 선속도 \dot{x}_i 를 이용한 폐환 선형화 방식의 적응 제어기의 설계 문제를 다루기로 한다. 식(7)의 차량 제어모델을 파라미터화 기법으로 다시 표현하면

$$\frac{d}{dt} \ddot{x}_i = -2\frac{K_{di}}{m_i} \dot{x}_i \ddot{x}_i - \frac{1}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} \left[\ddot{x}_i + \frac{K_{di}}{m_i} \dot{x}_i^2 \right]$$

$$+ \frac{d_{mi}}{m_i} \Big] + \frac{u_i}{m_i \mu_{1i}(\dot{x}_i)}$$

$$= \Theta_{li}^T \Psi_{li} + \theta_{5i} u_i \quad (16)$$

여기서

$$\Theta_{li}^T = \left[-2 \frac{K_{di}}{m_i} - \frac{1}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} - \frac{K_{di}}{m_i \mu_{1i}(\dot{x}_i)} - \frac{d_{mi}}{m_i \mu_{1i}(\dot{x}_i)} \right]$$

$$\theta_{5i} = \frac{1}{m_i \mu_{1i}(\dot{x}_i)} \text{ 이고, } \Psi_{li}^T = [\dot{x}_i \ddot{x}_i \ddot{x}_i \dot{x}_i^2 1] \text{ 이다.}$$

정리 : 외부 입력 이득 $\lambda_i (> 0)$, 보조 기준 신호 \ddot{x}_{ri} , 파라미터 추정치 $\hat{\theta}_{5i}$, 추정치 벡터 $\hat{\Theta}_{li}$ 및 관측치 벡터 $\hat{\Psi}_{li}$ 에 대해서, 다음의

$$\text{제어기: } u_i = \frac{1}{\hat{\theta}_{5i}} \{ \nu_i - \hat{\Theta}_{li}^T \hat{\Psi}_{li} \} \quad (17)$$

$$\text{외부입력: } \nu_i = \frac{d}{dt} \ddot{x}_{ri} + \lambda_i (\ddot{x}_{ri} - \dot{\hat{x}}_i) \quad (18)$$

기준입력:

$$\frac{d}{dt} \ddot{x}_{ri} = \ddot{d}_i + a_{1i} \dot{d}_i + a_{2i} d_i + \ddot{x}_i + a_{2i} L_{si} \quad (19)$$

$$= \ddot{e}_i + a_{1i} \dot{e}_i + a_{2i} e_i + \ddot{x}_i$$

적용칙:

$$\hat{\Theta}_{2i} = \Gamma \hat{\Psi}_{2i} (\ddot{x}_{ri} - \dot{\hat{x}}_i), \quad \Gamma = \Gamma^T > 0 \quad (20)$$

은 식(16)으로 주어진 차량 제어모델의 선행차량과의 상대거리 Δ_i , 상대속도 $\dot{\Delta}_i$ 및 상대가속도 $\ddot{\Delta}_i$ 에

대해서 점근적으로 $\Delta_i \rightarrow L_{si}$, $\dot{\Delta}_i \rightarrow 0$,

$\ddot{\Delta}_i \rightarrow 0, \forall t \geq t_0$ 이 되도록 한다.

증명생략

4. 모의 실험

이제까지의 수학적인 결과에 대한 타당성을 시뮬레이션을 통해 보완하기로 한다. 시뮬레이션에서는 3대의 차량이 군집 주행을 하는 것으로 설정하였다. 차량별 파라미터는 [2]에서 시뮬레이션 수행시 사용한 값들로서 아래의 표 1.에 나타내었다.

차량종류	공차중량 (curb mass)	차량길이 (d)	drag coefficient	엔진 시정수(μ_1)
Daihatsu Charade CLS	916 Kg	1.9 m	$K_d=0.44$ Kg/m	0.2 sec
Buick Regal Custom	1464 Kg	2.2 m	$K_d=0.49$ Kg/m	0.25 sec
BAW 750iL	1925 Kg	2.25 m	$K_d=0.51$ Kg/m	0.2 sec

표 1. 차량별 파라미터

3대의 차량이 동일한 방향으로 직선주행을 하는 것으로 간주하고 시뮬레이션을 수행하였다. 선두 차량은 Daihatsu Charade CLS 이고, 그 뒤를 Buick Regal Custom 이 추종하며, 맨뒤에서 BMW 750iL 이 추종하는 것으로 하였다. 각 차량의 승차인원 및 무게는 Daihatsu Charade CLS 에 91[Kg] 3명, Buick Regal Custom 에 64[Kg] 2명, BMW 750iL 에 각각 45, 45, 91, 59 [Kg] 4명이다. 선두차량의 속도계적은 다음의 그림3과 같이 설정했다. 그림 4의 결과로부터 상대거리오차는 최대 2.3[cm]를 초과하지 않고 있으며 안전거리보다 가까워지지는 않는다는 것을 알 수 있다. 그림 5에서는 상대속도오차가 유계임을 보이고 있다.

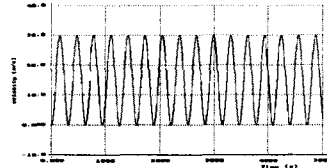


그림 3 선두차량의 속도계적.

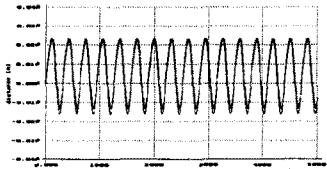


그림 4 상대거리 오차.

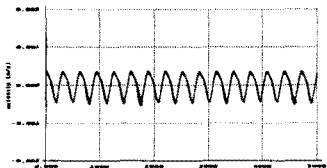


그림 5 상대속도 오차.

5. 결 론

본 논문에서는 차량의 탑승객 및 적재물의 하중이 매 운행시 수시로 변할 수 있는 문제(차량의 질량변화)와 차량 동특성의 비선형 특성에 대한 선형화 문제에 대한 변환선형화 방식의 적용제어를 설계하였다. 동력 전달 계통의 시간지연상수 및 차량의 질량에 관한 파라미터는 표준형 적용칙만을 이용하여 해결하였다. 변환 선형화 제어기 설계시 필요한 상태들(속도, 가속도 등)은 스윙칭 특성을 갖는 비선형 관측자를 설계하여 추정하였다. 추정된 상태값들이 원래의 상태값들에 지수함적인 빠르기로 수렴함을 보였으며, 상태추정값을 이용하여 설계한 변환 선형화 적용제어기가 비선형 동특성을 효과적으로 소거할 수 있음을 보였다. 전체 시스템의 안정도가 보장되고 선행 차량에 대한 추종특성이 보장될 수 있음을 수학적으로 입증하였으며, 차간 거리, 속도 및 가속도가 원하는 값을 유지할 수 있음도 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. T. Spooner, and K. M. Passino, "Adaptive Control of a Class of Decentralized Nonlinear Systems," IEEE Trans. on Automat. Contr., Vol.41, No.2, pp.280-284, 1996.
- [2] S. Sheikholeslam, and C. A. Desoer, "A System Level Study of the Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.114, pp.286-292, 1992.
- [3] T. Fujioka, and K. Suzuki, "Control of Longitudinal and Lateral Platoon Using Sliding Control," Vehicle System Dynamics, Vol.23, pp.647-664, 1994.
- [4] M. Tomizuka, and J. K. Hedrick, "Automated Vehicle Control for IVHS Systems," IFAC 12th Triennial World Congress, Sydney, Australia, pp.109-112, 1993.
- [5] D.H.McMahon, et.al., "Longitudinal Vehicle Controllers for IVHS: Theory and Experiment," Proceedings of the American Contr. Conf., pp.1753-1757, 1992.