

지능 직선주행 제어기 설계에 관한 연구

(A Study on the Design of Intelligent Cruise Controller)

이 옥
(RHEE, Wook)

요 약

본 논문에서는 차량의 추종 주행 제어기를 비선형 상태관측자를 이용하여 설계한다. i 번째 차량(추종차량)과 $i-1$ 번째 차량(선행차량) 간의 거리(상대거리)만을 측정하여 아는 것으로 간주 한다. 선행차량의 속도 및 가속도를 추정하기 위한 비선형 상태관측자를 설계하여 추종차량의 추종 주행 제어기에 이용할 수 있도록 한다. 본 논문에서 제안하는 방법이 차간 통신이 필요 없음을 수학적으로 증명한다. 또한 비선형 상태관측자를 이용하여 추정한 선행 차량간의 상대속도 및 상대가속도 오차가 '0' 으로 수렴함을 증명한다. 제안한 방법의 타당성은 수학적 증명과 더불어 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

Abstract

An nonlinear observer-based longitudinal control law for vehicles is presented in this paper. It is assumed that for vehicle i knows only the distance between vehicle i and the preceding vehicle, $i-1$. An nonlinear state observer for vehicle i is developed to estimate the velocity and acceleration of the preceding vehicle, $i-1$. The communication of the position, velocity, and acceleration information is not used in the proposed method. It will be shown by mathematical analysis that the longitudinal control of vehicle can be implemented without an communication of the informations. It will be proven that the observation errors of the nonlinear states converge to zero asymptotically. To show the effectiveness of the proposed method, the simulation results are presented for the longitudinal control of the vehicle.

1. 서 론

차량의 Longitudinal(이하 직선주행) 제어는 첨단차량 제어시스템 구현 문제에서 매우 중요하다. 이 제어 기술이 Adaptive Cruise Control, Collision Avoidance Control, Traffic Control 등에도 적용될 수 있기 때문

이다. 차량의 직선주행 제어시스템의 구현시 당차량과 선행차량 간의 상대속도, 상대가속도를 직접 측정하는 경우, 측정치의 정확성이 항상 문제가 되어왔으며 아직도 해결해야될 문제로 남아있다. 그리고 차량의 가감속 운동특성(제동특성 및 엔진동특성)을 감안할 때 직선주행 을 위한 차량의 운동특성과 같이 응답성이 비교적 느린 시스템을 효과적으로 빠르게 제어하기 위해서는 시스템의 속응성을 향상시킬 수 있는 정밀하면서도 지능화된 제어알고리즘이 필요하다. 차간거리 및 상대속도, 가속도 등을 측정하는 방법으로는 간접 측정방식과 직접측정방식이 있다. 간접 측정방식

* 이 논문은 1998년 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

* 정회원 : 대전대학교 전기공학과 교수
접수일자 : 1999년 12월 2일

[1]~[10]으로는 차량군(車陣群:Platoon) 제어시 맨앞의 선두차량에서 추종차량들에게 위치, 속도, 가속도 정보를 단방향 통신으로 전달해 주는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 미리 약속된 차량군의 제어시에나 가능한 방법이므로 실제 도로상황에서 적용하기는 해결해야 할 많은 문제들이 있다. 이와는 달리 바로 앞의 선행차량과 당차량과의 상대거리 측정치로부터 직접 수치미분하여 상대속도와 상대가속도를 얻는 방법이 있다. 이 방법은 간단한 반면에 상대거리 측정치를 두번 미분하므로 계산오차 및 잡음에 민감한 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점의 해결 방안으로 비선형 상태관측자를 설계하여 상대속도 및 상대가속도를 추정하는 방법을 제시하기로 한다. 차량의 직선주행 동특성이 비선형이면서 Lipschitz 조건을 만족하지 않더라도 상태관측오차의 점근적인 수렴성이 보장됨을 Lyapunov 안정도 해석법을 이용하여 증명해 보이도록 한다.

2. 차량모델

본 논문에서는 [1],[2]에서 시스템적인 측면에서 유용성을 입증한 단순모델에 대해 논하기로 한다. 따라서 주위온도, 엔진온도, 스파크 플러그 상태, 트랜스미션 동특성 등을 포함하는 복잡한 엔진모델을 다루지는 않기로 한다.

가정 1: 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 1로부터 선행차량(#-1)과 추종차량(#) 간의 상대적인 오차는 다음관계를 갖는다.

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

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

여기서 x_{i-1} 은 선행차량(lead car)의 위치이고, x_i 는 추종차량(following car)의 위치이다. d_i, L_i 는

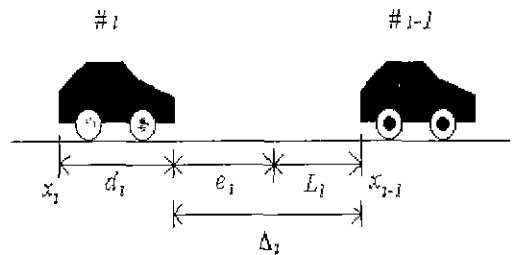


그림 1. 추종주행시의 차량열

각각 추종차량의 차체길이와 안전거리이다. 실제 구현 시에는 식(1)의 관계를 이용해서 추종차량이 유지해야 할 안전거리 L_i 를 포함한 차간거리 측정치 Δ_i 로부터 차간거리의 오차 e_i 를 얻을 수 있다. 차간 속도 및 가속도 오차는 식(1)에 주어진 Δ_i 를 직접 미분해서 얻는다. 다음의 그림 2는 추종 차량의 간략화한 모델을 나타내고 있다.

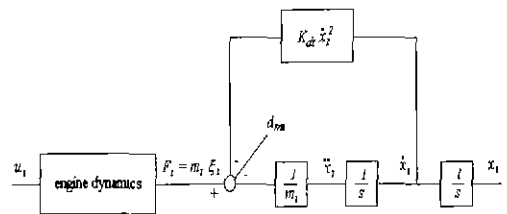


그림 2. 단순화된 차량 모델 [2]

그림2 에서 $K_{d_i} \dot{x}_i^2$ 은 차량 i의 공기저항에 기인하는 힘으로 K_{d_i} 는 공기저항계수에 관한 상수이고, d_{m_i} 는 차량 i의 기계저항(mechanical drag)에 관한 상수이다. m_i 는 차량의 질량이고, u_i 는 차량 i의 엔진에 가해지는 스로틀(throttle) 입력이다. F_i 는 차량 i의 엔진에서 발휘되는 힘으로서 차량 i의 주행 동특성과는 다음의 관계를 만족한다[2].

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

엔진 동특성은 다음과 같은 비선형 미분방정식으로 표현된다[2].

$$\dot{F}_i = -\frac{F_i}{\tau_i(x_i)} + \frac{u_i}{\tau_i(x_i)} \quad (4)$$

여기서 $\tau_i(x_i)$ 는 차량 i 가속도 \dot{x}_i 로 주행 중 일 때의 엔진 시정수이다. 식(3)을 시간에 관해 한번 미분해서 식(4)를 대입하면 식(5)와 같은 비선형 미분방정식을 얻는다. 식(4)를 상태공간방정식 형태로 표현하면 상태벡터

$X_i^T = [x_i \quad F_i]$ 에 대해 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= A_i X_i + b_i \Psi_{1i}^T \theta_{1i} + b_i \Psi_{2i}^T \theta_{2i} + \Psi_{3i} \\ y &= c_i^T X_i \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $c_i^T = [1 \quad 0]$, $\Psi_{1i}^T = [-1 \quad -\dot{x}_i^T]$,

$b_i^T = [1 \quad 0]$, $\Psi_{3i}^T = [0 \quad -1/\tau_i u_i]$ 이고

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1/\tau_i \end{bmatrix}, \theta_{1i}^T = \begin{bmatrix} \frac{d_{mi}}{m_i} & \frac{K_{di}}{m_i} \end{bmatrix},$$

$$\theta_{2i}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_i} & 0 \end{bmatrix} \text{ 이다.}$$

식(5)의 상태방정식으로 주어진 차량시스템에서 X_i, \dot{X}_i 의 추정치 $\hat{X}_i, \dot{\hat{X}}_i$ 가 모두 빠른 시간내에 X_i, \dot{X}_i 으로 수렴하도록 하는 상태관측자를 설계하는 것이 본 논문의 첫째 목적이며, 추정상태치를 이용하여 차량 i 가 선행차량 $i-1$ 과 원하는 안전거리를 유지하면서 추종하도록 하는 제어를 설계하는 것이 최종 목적이다.

3. 상태관측자 설계 및 오차 수렴성

여기서는 식(5)의 상태방정식에 근거하여 시스템 파라미터 K_{di}, d_{mi}, m_i 에 대한 정확한 정보가 없더라도 상태추정오차의 0 으로 수렴성을 보장하는 상태관측자의 설계문제를 다루기로 한다.

정리 1: 식(5) 로 주어진 비선형 시스템에 있어서,

1) $b_i^T P_i = c_i^T$ 를 만족하는 $P_i^T = P_i > 0$ 이 존재한다.

2) $\|\Psi_{2i} - \hat{\Psi}_{2i}\| \leq \gamma_1 \|X_i - \hat{X}_i\|$ 이 만족된다.

3) 파라미터 벡터는 $\|\theta_{1i}\| \leq \gamma_2, \|\theta_{2i}\| \leq \gamma_3$ 가 만족된다.

4) $(A_i - L_{oi} c_i^T)^T P_i + P_i (A_i - L_{oi} c_i^T) = -Q_i$ 를 만족하는 $Q_i = Q_i^T > 0$ 행렬과 $2\gamma_1 \gamma_3 \|c_i\| \leq \lambda_{\min}(Q_i)$ 의 부등식을 만족하는 관측이득벡터 L_{oi} 가 존재한다.

상기의 조건 1)~4)가 만족된다면, 식(6)의 상태관측자는

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}_i &= A_i \hat{X}_i + b_i \Psi_{1i}^T \theta_{1i} + b_i \hat{\Psi}_{2i}^T \theta_{2i} + \Psi_{3i} \\ &+ L_{oi} [y_i - c_i^T \hat{X}_i] \end{aligned} \quad (6)$$

안정하며, 추정치 오차는 $[X_i - \hat{X}_i] \rightarrow 0$,

$[X_i - \dot{\hat{X}}_i] \rightarrow 0, \forall t \geq 0$ 이 만족된다.

증명: 상태추정오차 벡터를 $\tilde{X}_i (= X_i - \hat{X}_i)$,

$\tilde{\dot{X}}_i (= \dot{X}_i - \dot{\hat{X}}_i)$ 로 정의하면 상태추정오차 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_i &= (A_i - L_{oi} c_i^T) \tilde{X}_i + \\ &+ [b_i \Psi_{2i}^T \theta_{2i} - b_i \hat{\Psi}_{2i}^T \theta_{2i}] \end{aligned} \quad (7)$$

이제 Lyapunov 함수를 $V_i = \tilde{X}_i^T P_i \tilde{X}_i$ 선정한다. 그러면 시간에 관한 1계 도함수는

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \tilde{X}_i^T [(A_i - L_{oi} c_i^T)^T P_i + P_i (A_i - L_{oi} c_i^T)] \tilde{X}_i \\ &+ 2\theta_{2i}^T [\Psi_{2i} - \hat{\Psi}_{2i}] b_i^T P_i \tilde{X}_i \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다. 식(5)와 정리 1의 조건 1)~3) 의 관계를 이용하면 다음 관계가 성립한다.

$$\dot{V}_i \leq -\tilde{X}_i^T Q_i \tilde{X}_i + 2\gamma_1 \gamma_3 \|c_i\| \tilde{X}_i^T \tilde{X}_i \quad (9)$$

이때 조건 4)의 $2\gamma_1 \gamma_3 \|c_i\| < \lambda_{\min}(Q_i)$ 부등관계가 만족되도록 관측자 이득벡터 L_{oi} 를 설정한다. 양의 상수 β_i 에 대해서 $2\gamma_1 \gamma_3 \|c_i\| - \lambda_{\min}(Q_i) = -\beta_i < 0$ 의 부등관계가 만족되도록 하면

$$\dot{V}_i \leq -\beta_i \hat{X}_i^T \hat{X}_i \quad (10)$$

이 된다. 따라서 $[X_i - \hat{X}_i] \rightarrow 0$, $[\dot{X}_i - \dot{\hat{X}}_i] \rightarrow 0$, $\forall t \geq 0$ 이 만족됨을 알 수 있다.

이제 추정된 상태변수들을 이용하여 추종주행제어기를 순차적으로 설계하기로 한다. 식(4)로부터 제어 입력을 다음과 같이 설계한다.

$$u_i = \tau_i \hat{F}_n + \hat{F}_i + k_w (F_n - \hat{F}_i) \quad (11)$$

$$F_n = \frac{1}{\theta_{2i}} [\nu_i - \hat{\Psi}_{1i}^T \theta_{1i}] \quad (12)$$

$$\nu_i = k_m \hat{\Delta}_i + k_p \Delta_i - k_p L_i \quad (13)$$

여기서 \hat{F}_n , F_n 는 기준입력으로서 선행차량의 주행상태에 관한 신호이며, \hat{F}_i 는 상태벡터 $X_i^T = [x_i, F_i]$ 의 추정치이고, k_w , k_m , k_p 는 설계파라미터로서 양의 상수들이다. ν_i 는 외부 루프 입력이다. 식(6)의 비선형 상태관측자와 식(11)~식(13)으로 주어진 제어기를 포함하는 전체 시스템에 대한 블록선도를 아래의 그림 3에 나타내었다.

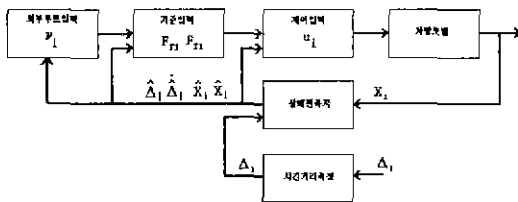


그림 3. 전체 시스템의 블록선도

4. 시뮬레이션 결과

여기서는 앞 절에서 제시한 제어기에 대한 타당성을 시뮬레이션을 통해 확인하기로 한다.

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 750iL에 각각 45, 45, 91, 59 [Kg] 4명이다.

상태관측자 및 제어기 이득벡터는 각각

$$L_{oi}^T = [10 \quad 10], \quad k_x, k_v = 10, \quad i=1,2,3$$

이다. 이 설정치들은 정리 1의 조건 1)과 조건 4)를 만족하는 범위 내에서 최대 크기가 되도록 설정함으로써 상태추정 오차의 수렴속도를 향상시킬 수 있다. 시뮬레이션에서 사용한 차량 모델은 [2]의 시뮬레이션에서 사용한 것과 동일하며, 각 차량별 파라미터는 다음과 같다.

표 1. 차량 종류별 파라미터
Table 1. Parameters of the vehicles

vehicle types	curb mass	cross-sectional area	drag coefficient	engine time constant
Daihatsu Charade	916 Kg	1.9 m ²	0.35 (K _d =0.44 Kg/m)	0.2 sec
Buick Regal Custom	1464 Kg	2.2 m ²	0.35 (K _d =0.49 Kg/m)	0.25 sec
BMW 750iL	1925 Kg	2.25 m ²	0.35 (K _d =0.51 Kg/m)	0.2 sec

선두차량의 속도계적은 다음의 그림4와 같다. 그림 5는 속도상태 추정치를 보여주고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 상태추정치가 실제 값을 잘 추정하고 있으며, 이는 앞 절에서 보인 수학적 증명의 결과를 뒷받침하는 결과이기도 하다. 그림 6과 그림 7은 각각 선두차량과의 상대거리 오차 및 상대속도 오차를 보여주고 있다. 역시 허용오차 범위 내에서 선두차량을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 따라서 통신을 이용한 상대거리, 상대속도 및 상대 가속도 데이터를 얻는 방법에 비해 실용적이라 할 수 있다.

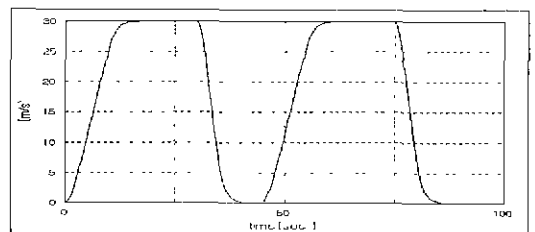


그림 4. 선두차량의 속도계적
Fig. 4. The speed trajectory of leading vehicle

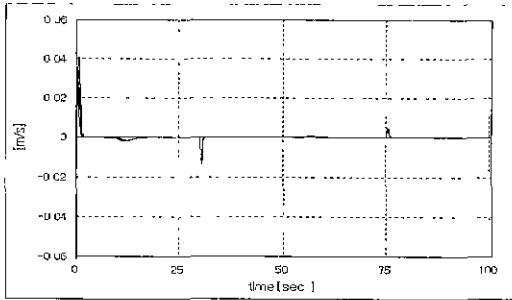


그림 5. 속도 상태관측 오차
Fig. 5. The state observation error of following vehicle speed.

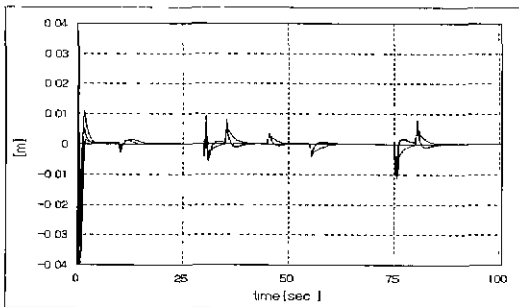


그림 6. 차량간 상대거리 오차
Fig. 6. The error of relative distance between vehicles.

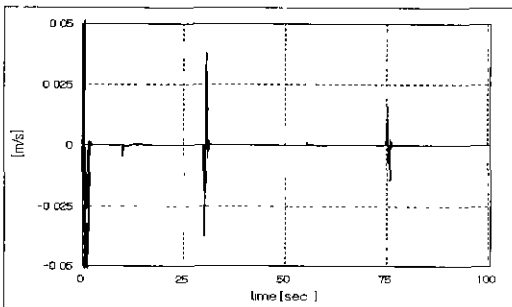


그림 7. 차량간 상대속도 오차
Fig. 7. The error of relative velocity between vehicles.

5. 결 론

본 논문에서는 비선형 시스템인 차량의 주행제어를 위하여 비선형 상태관측자에 입각한 궤환선형화방식의 주행제어시스템을 설계하였다. 비선형 상태관측자를 설계하여 상대속도 및 상대가속도를 추정치를 사용하는 방법을 제시하였다. 선행차량에 대한 정보는

단지 상대거리 측정치로부터 얻어지는 값만을 이용하였으며, 차차간 통신방법은 이용하지 않는 것으로 하였다. 차량의 직선주행 동특성이 비선형이면서 Lipschitz 조건을 만족하지 않더라도 상태관측오차의 점근적인 수렴성이 보장됨을 Lyapunov 안정도 해석법을 이용하여 증명했다.

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, June 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, 1993, pp.109-112.
- [5] St. Germann, and R. Isermann, "Modelling and Control of Longitudinal Vehicle Motion," *Proceedings of the American Contr. Conf. Baltimore, Maryland*, 1994, pp.1-5.
- [6] D.N.Godbole, and J. Lygeros, "Longitudinal Control of the Lead Car of a Platoon," *Proceedings of the American Contr. Conf. 1994*, Vol.1, pp.398-402.
- [7] D.H.McMahon, V.K.Narendran, D.Swaroop, J.K.Hedrick, K.S.Chang, and P.E.Devlin, "Longitudinal Vehicle Controllers for IVHS: Theory and Experiment," *Proceedings of the American Contr. Conf.*, 1992, pp.1753-1757.
- [8] A. Hoess, "Realisation of an Intelligent Cruise Control System Utilizing Classification of Distance, Relative Speed and Vehicle Speed Information," *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*, 1994, pp.7-12.
- [9] D.H.McMahon, J.K.Hedrick, and S.E.Shladover, "Vehicle Modelling and Control for Automated Highway Systems," *Proceedings of the American Contr. Conf.*, 1990, Vol.1, pp.297-303.
- [10] P. Ioannou, Z. Xu, S. Eckert, D. Clemons, and T. Steja, "Intelligent Cruise Control: Theory and Experiment," *Proceedings of the 32nd IEEE Conf. on Decision and Control*, 1993, Vol.2, pp.1885-1890.

◇ 저자소개 ◇

이 옥 (李旭)

1954년 3월 20일 생. 1978년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1981년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년~1992년 전주공업대학 전기과 교수. 1997년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 대전대학교 전기공학과 교수.