

자동차 차량의 전후 동역학 제어기

A Longitudinal Controller of an Automated Vehicle

°김주환*, 양현석**

* 홍익대학교 전자공학과 (Tel : 02-334-4745; Fax : 02-320-1119; E-mail : gjuwhan@wow.hongik.ac.kr)

** 홍익대학교 전자공학과(Tel : 02-320-1653; Fax : 02-320-1119; E-mail : hsyang@wow.hongik.ac.kr)

Abstracts In this paper, we propose a new longitudinal controller of automated vehicles. The controller is designed based on a sliding control method, which is known to be robust to disturbances and modelling errors. Contrary to currently available sliding controller, a switching controller gain method is suggested. It is shown throughout simulations that the proposed controller reduces the amount of overshoot, which may derive smoother velocity tracking in a platoon.

Keywords Longitudinal Control, Sliding Control

1. 서론

근래에 들어 대도시에서의 교통 문제는 전 세계적으로 심각한 상황을 보이고 있으며 이를 해결하기 위한 여러 대안 중의 하나로서 자동화 차량(automated vehicle)에 대한 연구가 여러 국가에서 진행중이다. 인간이 차량을 운행함에 있어 발생하는 여러 가지 한계점들을 극복하기 위해 적절한 제어 시스템을 차량에 적용함으로써, 보다 원활한 차량의 흐름과 교통사고 발생률의 감소 및 운전자의 편리함을 도모할 수 있다.

본 연구의 목적은 이중 모드(dual-mode)[1]를 갖는 자동화 차량의 구현에 있어서 중요한 부분이 되는 전후 동역학 제어기(longitudinal controller) 즉, 일정한 차간 거리를 유지하면서 선행 차량의 속도를 추종(tracking)할 수 있는 제어기를 설계하는데 있다.

이에 선행되어야 할 과제로서 차량의 전후 동역학에 대한 적절한 모델링이 필요하게 되는데, 차량의 여러 부시스템(subsystem)중, 특히 엔진부가 가지는 강한 비선형성으로 인해 선형 모델로는 원하는 목적을 이루기가 어렵다. 이러한 문제성은 차량의 전후 동역학 모델로서 D. Cho와 J. K. Hedrick[2]이 제안한 단순화된 비선형 모델을 사용하여 해결할 수 있다. 이 모델을 기초로 하여 본 논문에서 구축한 단순화된 차량모델은, 엔진 및 동력 전달부로 구성되며 완전한 차량 모델의 핵심적인 특징을 갖고있으나, 많은 계산량을 요구하지는 않는다.

본 연구의 목적은 엔진의 스로틀 밸브를 제어 입력으로 하며 다음과 같은 조건을 만족할 수 있도록 하는 제어기를 설계하는데 있다.

- 차량이 주행 속도에 적절한 안전 거리를 항상 유지할 수 있어야 한다.
- 예기치 못한 도로의 불안정 요소에도 안정된 동작을 할 수 있는 강인한 특성을 가져야 한다.
- 도로와 차량간의 인터페이스와 관련된 파라미터 값이나, 기상에 의한 변화에도 강인한 특성을 가져야 한다.
- 사고발생의 우려가 있고 선행차량의 급제동 등과 같은 비상시(emergency operation)에도 자동으로 제동을 할 수 있어야

한다.

- 차량 주행중 편안한 승차감이 유지될 수 있어야 한다.

이러한 일들을 수행하는 비선형 제어기를 설계함에 있어서, 본 연구에서는 가변 구조 제어 이론의 하나인 슬라이딩 모드를 이용하고자 한다.

차량에 대한 수학적인 모델은 그 자체에 많은 비선형 요소들을 갖고 있고, 차량의 주행시 항상 외란이 생길 수 있기 때문에 제어기를 설계함에 있어 강인성이 특히 중요시 된다. 이를 위해 먼저 적절한 슬라이딩 평면을 설정하고 이에 따라 원하는 제어 입력을 산출하게 된다. 위와 같은 방법으로 구현된 제어기와 단순화된 모델을 사용하여 2대의 차량이 주행할 때의 경우를 컴퓨터 모의실험을 통하여 그 성능을 살펴보았다.

한편, J. K. Hedrick등[4]이 제안한, 슬라이딩 평면상수가 고정되어 있는 슬라이딩 제어기로는 초기 조건이 틀 때, 선행 차량과의 거리가 안전 거리에 도달할 때까지 다소 큰 오버슈트를 보이게 된다. 이러한 점을 개선하기 위해서 본 논문에서는 슬라이딩 제어기의 평면상수를 오차에 따라 스위칭하였다.

본 논문은 2장에서 단순화된 차량 모델을 설명하고, 3장에서 이 모델을 근거로 슬라이딩 모드를 이용한 전후 제어기를 설계하였다. 이러한 시스템을 기초로 하여 4장에서 기존의 제어기가 갖는 단점을 보완하기 위해 평면상수 스위칭 알고리즘을 제안하였고, 5장에서 이를 컴퓨터 모의실험을 통해 검증하였고, 6장에서 결론을 맺었다.

2. 단순화된 차량모델

원래 차량의 전후 동역학 모델은 D. Cho와 J. K. Hedrick[2]이 제안한 모델등과 같이 여러 가지 부시스템들로 구성되지만 본 연구에서는 보다 간단한 제어 시스템 설계를 위해 엔진부와 동력 전달부로만 구성된 모델을 구축하였다.

2.1 엔진 모델

차량의 전후 동역학 모델내의 엔진부로는 D. Cho와 J. K. Hedrick[2]이 제안하여 실험적으로 검증된 엔진모델을 사용하였다. 이 모델은 모두 4개의 상태 변수와 2개의 지연 성분을 갖고 있으며 주요 방정식은 다음과 같다.

2.1.1 흡입 매니폴드 및 스로틀 밸브

흡입 매니폴드내의 공기 질량에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao} \quad (1)$$

식 (1)에서, m_a 는 흡입 매니폴드내의 공기 질량, m_{ai} 는 스로틀 밸브로부터 흡입 매니폴드로 유입되는 공기 질량, m_{ao} 는 실린더 내부로 유입되는 공기 질량이다.

m_{ai} 와 m_{ao} 에 대한 실험으로부터 얻어진 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{ai} = MAX \cdot TC(\alpha) \cdot PRI(P_m/P_{atm}) \quad (2)$$

$$\dot{m}_{ao} = c \eta_{vol}(m_a, \omega_e) m_a \omega_e \quad (3)$$

식 (2)에서, MAX 는 스로틀 밸브로부터의 최대 공기 유입 질량 변화율, $TC(\alpha)$ 는 표준화된 스로틀 특성, $PRI(P_m/P_{atm})$ 는 표준화된 압력비 영향 함수이다. 그리고 식 (3)에서, c 는 물리상수, $\eta_{vol}(m_a, \omega_e)$ 는 체적효율, ω_e 는 엔진 회전속도를 나타낸다.

매니폴드내의 압력 P_m 과 m_a 의 관계식은 이상적 기체법칙이 성립한다는 가정 하에 다음과 같이 표현된다.

$$m_a = \frac{\overline{R}_m T_m}{T_m} P_m \quad (4)$$

식 (4)에서, \overline{R}_m 은 일반 기체상수, T_m 은 흡입 매니폴드내의 온도, V_m 은 흡입 매니폴드의 체적을 나타낸다.

2.1.2 연료 분사장치

연료 분사장치에 대한 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\tau_f \ddot{m}_{fi} + \dot{m}_{fi} = \dot{m}_{fc} \quad (5)$$

식 (5)에서, \dot{m}_{fi} 는 연소실로 유입되는 실제 연료 질량의 변화율, \dot{m}_{fc} 는 명령된 연료 분사량의 변화율, τ_f 는 시정수이다.

2.1.3 엔진 토크와 엔진 회전속도

엔진 토크와 엔진 회전속도와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} J_e \dot{\omega}_e &= T_i - T_f - T_L \\ &= T_{net} - T_L \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서, J_e 는 엔진의 실효 관성계수, T_i 는 엔진의 지시 토크, T_L 는 부하 토크를 나타낸다.

2.2 동력 전달부

차량의 단순화된 동력 전달부에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$V = Rh \omega_e \quad (7)$$

식 (7)에서, V 은 차량의 속도, R 은 엔진과 바퀴사이의 기어비, h 는 바퀴의 반지름을 나타낸다.

3. 슬라이딩 제어기 설계

엔진을 비롯한 차량의 전후 동역학 모델은 비선형적 요소가 많이 갖고 있다. 그리고 전후 동역학 제어기에는 외란에 대한 강인성이 필수적인 요소이다. 이와 같은 특성을 갖는 시스템을 설계할 때에 적합한 제어방법으로서, 가변구조 제어기의 하나인 슬라이딩 제어기를 사용하였다. 자동화 차량의 전후 동역학 제어기의 목적은 선행 차량의 속도를 추종하는 동시에 그 속도에 맞는 안전 거리를 유지하는 데에 있다.

그림 1.은 n대의 차량군내의 간격을 나타내고 있다. x_i 은 도로의 기준 위치 O에서부터 선행 차량의 뒷범퍼까지의 위치를,

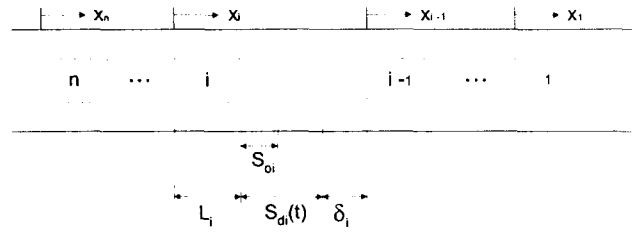


그림 1. 1번 차량이 선행차량인 n대의 차량군

Fig 1. A platoon of n vehicles

x_i 는 도로의 기준 위치 O에서부터 i번째 차량의 뒷범퍼까지의 거리를 나타낸다. L_i 은 i번째 차량의 길이, S_{di} 는 i번째 차량의 원하는 안전 거리를, S_{oi} 는 속도가 0일 때 i번째 차량의 거리를 각각 나타낸다. 그리고 δ_i 는 i번째 차량의 위치와 원하는 안전 거리간의 차이, Δ_i 는 i번째 차량의 위치와 S_{oi} 간의 차이를 각각 나타낸다. 따라서 $i=2, 3, \dots$ 에 대해서 다음의 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\delta_i(t) = x_{i-1}(t) - x_i(t) - L_i - S_{di}(t) \quad (8)$$

$$\Delta_i(t) = x_{i-1}(t) - x_i(t) - L_i - S_{oi} \quad (9)$$

이때, 안전 거리는 P. Ioannou[3]가 제안한 안전 거리 규정 (safety rule)을 근거로 하며 이에 따르면 선행 차량과의 안전 거리는 추종 차량의 속도에 비례하도록 하는 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{di}(t) = S_{oi} + \lambda v_i(t) \quad (10)$$

식(10)에서 S_{oi} 와 λ 는 보통 $7m \leq S_{oi} \leq 7.5m, 0.1s \leq \lambda \leq 0.2s$ 의 범위를 갖는다.

J. K. Hedrick과 D. Swaroop등[4]이 제안한 두개의 평면을 갖는 슬라이딩 제어기를 설정하면, 첫 번째 슬라이딩 평면은 아래와 같이 정의된다.

$$S_1 \equiv \delta_i \quad (11)$$

$$\dot{S}_1 = -\lambda_1 S_1 \quad \text{단, } \lambda_1 > 0 \quad (12)$$

식(11)과 (12)로부터 $\dot{\delta}_i = \dot{\Delta}_i - \lambda \dot{v}_i$ 이며 또한 $\dot{v}_i = Rh \dot{\omega}_e$ 이다. 따라서 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\dot{\Delta}_i - \lambda Rh \dot{\omega}_e = -\lambda_1 S_1 \quad (13)$$

식 (14)과 (6)으로부터 원하는 엔진 토크 $T_{net,d}$ 는 다음과 같다.

$$T_{net,d} = T_L + \frac{J(\dot{\Delta}_i + \lambda_1 S_1)}{\lambda Rh} \quad (14)$$

식 (14)에서 구한 $T_{net,d}$ 로부터 룩업 테이블(Look-Up Table)을 통해 매니폴드내의 원하는 공기 질량 m_{ad} 을 구할 수 있다. 이로부터 원하는 스로틀 입력 α_d 를 구하기 위해 두 번째 슬라이딩 평면을 다음과 같이 정의한다.

$$S_2 = m_a - m_{ad} \quad (15)$$

$$\dot{S}_2 = -\lambda_2 S_2 \quad \text{단, } \lambda_2 > 0 \quad (16)$$

식 (1)을 식 (16)에 대입하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao} - \dot{m}_{ad} = -\lambda_2 S_2 \quad (17)$$

그러므로, 식 (17)으로부터 원하는 스로틀 입력 α_d 는 다음의 식을 만족해야 한다.

$$TC(\alpha_d) = \frac{\dot{m}_{ao} + \dot{m}_{ad} - \lambda_2 S_2}{MAX \cdot PRI(P_m/P_{atm})} \quad (18)$$

식 (18)에서, α_d 는 룩업 테이블을 통하여 얻어진다.

4. 슬라이딩 평면상수의 스위칭

J. K. Hedrick과 D. Swaroop등[4]이 제안한 고정된 슬라이딩 평면상수를 갖는 슬라이딩 제어를 설계하고, 일정한 속도로 주행하고 있는 선행 차량을 추종하는 상황을 가정하여 모의실험을 수행하면 그림 2를 얻을 수 있다.

Case 1. 초기조건이 0에 가까울 때

$$\begin{aligned} v_f(0-) &= 40 \text{ m/s} \\ v_1(0-) &= 26.1644 \text{ m/s} \\ \delta_1(0-) &= 3.0387 \text{ m} \end{aligned}$$

Case 2. 초기조건이 클 때

$$\begin{aligned} v_f(0-) &= 40 \text{ m/s} \\ v_1(0-) &= 14.5001 \text{ m/s} \\ \delta_1(0-) &= 7.1316 \text{ m} \end{aligned}$$

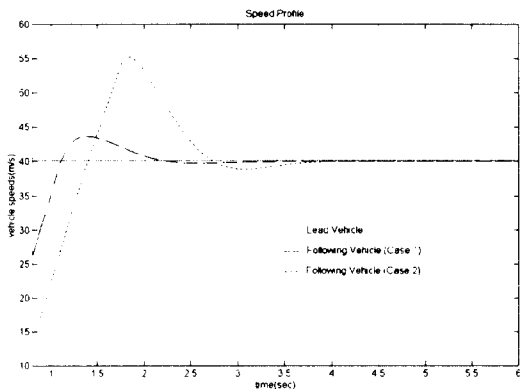


그림 2. 서로 다른 초기조건에 따른 차량의 속도 추종
Fig 2. Velocity trackings under different initial conditions

그림 2에서 알 수 있듯이, 초기조건이 0에 가까울 때에는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 초기조건이 다소 큰 값을 가질 때에는 정상상태 오차가 0에 수렴하기까지 큰 오버슈트가 발생함을 알 수 있다.

다음으로 초기조건이 클 때, 슬라이딩 제어기의 평면상수에 따른 영향을 살펴보도록 하자. 식 (12)에서 첫 번째 슬라이딩 평면상수 λ_1 의 변화에 따른 추종결과의 변화는 그림 3과 같다.

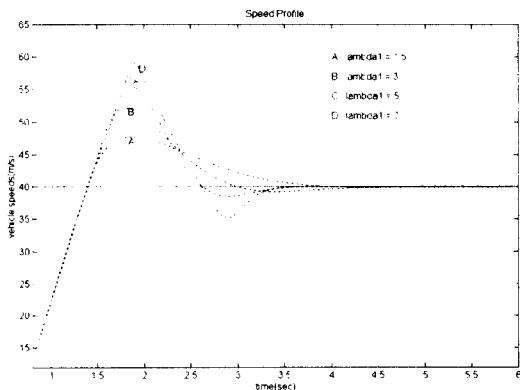


그림 3. 평면상수의 변화에 따른 추종의 변화
Fig 3. Velocity trackings with different surface constant

그림 3에서 나타나 있듯이, 슬라이딩 제어기의 평면상수가 크면 클수록 오버슈트가 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 초기조건이 다소 클 때에도 부드러운 추종결과를 얻기 위해, 오차에 따라 슬라이딩 제어기의 이득을 조정할 수 있는 다음과 같은 스위칭 알고리즘을 제안하였다.

선행 차량의 속도 v_f 와 추종 차량의 속도 v_f 의 차이를 v_d 라고 하자. v_d 가 적정범위 이상으로 커지게 되면 오버슈트를 줄일 수 있는 새로운 평면상수로 스위칭하고, 적정범위 이내에 있을 때에는 원래의 평면상수를 사용한다.

5. 모의 실험

모의 실험은 속도를 알고있는 선행차량과 추종차량 즉, 2대의 차량이 주행하고 있을 경우에 한하여 수행되었다. 차량의 모델은 본 논문에서 제시한 단순화된 모델을 사용하였으며, 모의 실험에 사용된 차량과 관련된 파라미터들은 J. K. Hedrick과 D. H. McMahon[5]의 논문에서 사용된 일반 승용차의 파라미터들을 사용하였다.

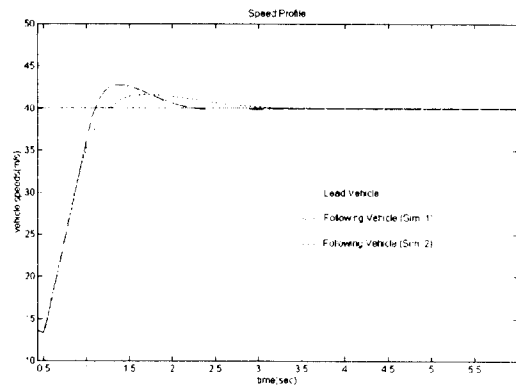


그림 4. 실험 1과 2에서의 차량속도 추종
Fig 4. Velocity tracking of leading vehicle

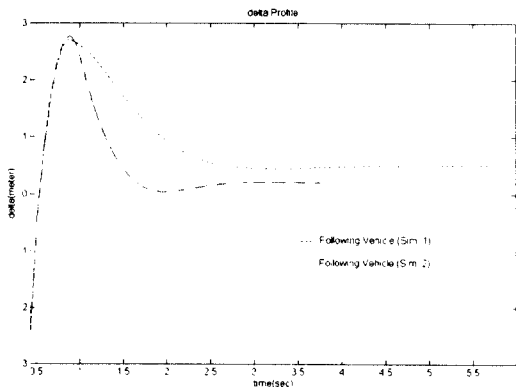


그림 5. 실험 1과 2에서의 차간거리
Fig 5. Deviation of vehicle from desired safety spacing

5.1 실험 1(평면상수가 일정한 경우)

실험 1에서는 선행차량이 일정속도로 주행하고 있고, 추종차량의 제어가 일정한 평면상수를 갖고 있을 때, 시간에 따른 추종

결과를 살펴보았다. $t = 0.43\text{sec}$ 에서 제어를 시작하였으며, 이 때의 초기조건은 $v_1(0-) = 40\text{ m/s}$, $v_2(0-) = 13.6131\text{ m/s}$, $\delta_1(0-) = -2.52476\text{ m}$, $\Delta_1(0-) = 0.197858\text{ m}$ 이다. 그림 4와 5에서 나타난 결과를 살펴보면, 추종차량은 최대위치오차 2.76 m, 정상상태오차 19.7 cm의 오차를 갖고 선행차량을 추종하고 있으나, 정상상태에 이르기까지 다소 큰 오버슈트를 보이고 있음을 알 수 있다.

5.2 실험 2(평면상수가 오차에 따라 스위칭되는 경우)

실험 2에서는 초기조건 값이 클 때, 일정한 값의 평면상수를 갖는 슬라이딩 제어가 갖는 문제점을 보완하기 위해서, 평면상수를 오차에 따라 적절한 값으로 스위칭 할 수 있는 제어를 갖고 있을 때의 추종결과를 살펴보았다. 초기조건은 실험 1과 동일하며, 그 결과는 그림 4와 5에 나타나있다. 그림 4를 살펴보면, 실험 1의 경우에 비해 보다 부드러운 속도추종결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 최대위치오차는 2.70 m, 정상상태오차 0.49 m이다.

6. 결 론

본 논문에서는 자동화 차량의 전후 동역학 제어를 설계하는데 있어서, 슬라이딩 제어를 사용하였다. 이 때, 고정된 평면상수를 갖는 제어기로는 초기조건 값이 클 때 큰 오버슈트가 생길 수 있으므로 평면상수 스위칭 알고리즘을 적용한 제어를 제시하였다. 제시된 제어기는 모의실험 결과, 기존의 제어기보다 나아진 속도추종 성능을 보임을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Special Report in Proc. 1st Inr. Conf. Dual Mode Transit, 170, Transportation Res. Board, Washington, DC, 1974.
- [2] D. Cho and J. K. Hedrick, "Automotive Powertrain Modelling for Control", *Trans. of the ASME*, vol. 111, pp. 568-576 Dec. 1989.
- [3] P. A. Ioannou and C. C. Chien, "Autonomous Intelligent Cruise Control", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 42, No. 4, Nov. 1993.
- [4] J. K. Hedrick, B. Rao, S. E. Sheikholeslam, D. Swaroop and P. Varaiya, "On 'Autonomous Intelligent Cruise Control'" *PATH Report*, 92-07.
- [5] D. H. McMahon, J. K. Hedrick and S. E. Sheikholeslam, "Vehicle Modelling and Control for Automated Highway Systems", *Proceedings of the 1990 ACC*, pp. 297-303, San Diego, CA, May 1990.