

가변구조 제어 기법을 이용한 차량 순항 제어기 설계

임정택, 최원철, 김영중, 임모택  
고려대학교 전기공학과

A Design of Cruise Control System for Automated Vehicle using Variable Structure Control Method

Jung-Taek Lim, Won-Chul Choi, Young-Joong Kim, Myo-Taeg Lim  
Department of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - This paper presents a cruise control system design using variable structure control method. Automated vehicle control system (AVCS) is an important part of the intelligent vehicle and highway systems (IVHS). A vehicle desired acceleration profile has been designed based on the vehicle speed and distance control algorithm. Cruise control system has been designed using VSC theory for which we propose a moving switching surface(MSS). It has been shown that the proposed control system can provide satisfactory performance. Simulation results are given to show the effectiveness of this controller.

1. 서 론

운전자를 보조하고 안전을 위한 주제에 대한 연구 및 기술개발은 지난 1990년대부터 운전자의 안락함과 안전을 증대시키는 방향으로 진행되어 오고 있다. 세계적으로도 몇몇의 자동차 생산회사들은 운전자를 보조 할수 있는 장치를 상품화 하였으며 최근에는 Automated Vehicle Control System(AVCS) 과 Intelligent Vehicle and Highway Systems(IVHS)에 대한 연구가 계속 진행중에 있다. 안전하게 도로의 차량 수용능력을 높이기 위한 프로그램들이 진행중이다. 미국에서는 IVHS보다 발전시킨 PATH(Partners for Advanced Transit and Highways)를 통하여 미래의 자동차와 교통시스템을 발전 시킬수 있는 새로운 기술을 개발하고 있다. 유럽에서는 PROMETHEUS (Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented safety)를 진행하였다.[1]

기존에 시판되어진 순항장치는 단순히 차량의 속도를 유지 지켜주는 기능만을 갖고 있었다. 운전자가 원하는 속도를 유지 시켜주는 기능을 위하여 차량의 속도를 측정하여 엔진의 흡기구의 쓰로틀 각도만을 제어 하여 정해진 속도를 유지토록 설계되어 졌다. 그러나 IVHS 환경에서의 차량 순항 장치는 기존의 속도 제어만이 아닌 차간거리를 유지 하는 기능을 포함하고 있다. 도로의 사용 효율을 높이기 위하여 많은 차량들을 일정한 간격을 유지 시켜가며 주행 할 수 있도록 해야 하기 때문이다. 이와 같은 IVHS를 실현하기 위해서는 더욱 정밀한 제어능력이 요구된다. 차량의 가속과 감속을 담당하는 엔진과 브레이크를 적절히 제어하기 위하여 가변구조 제어 시스템을 이용하여 IVHS환경에서 활용가능한 제어기를 설계하고자한다. 본 연구에서는 보다 정밀한 제어성능을 제공할 수 있도록 가변구조제어기를 제안하였다.

본 논문의 구성은 「2.1절 차량 순항 장치의 구성」에서는 차량 순항 장치의 구성과 제어신호의 흐름에 대하여 설명하며, 차량계통에 대한 수학적 모델과 차간거리 오차에 대한 모델링을 하였다. 「2.2절 가변구조 제어기 설계」에서는 제안하고자하는 가변구조 제어기에 대

한 설명과 차량에서의 제어를 위한 제어기를 설계 하였다. 「3.모의실험 결과 및 고찰」에서는 설계한 제어기에 대하여 모의 실험한 결과를 보여주고 그에 대한 고찰을 하였다. 「4.결론」에서는 본 연구를 수행한 결론을 기술하였다

2. 본 론

2.1 차량순항 장치의 구성

지능형 순항 제어시스템은 기본적으로 설정되어 있는 차간 거리를 유지하기 위한 시스템이다. 시스템의 구성은 앞 차량과의 거리를 측정하는 센서부와 측정된 거리를 이용하여 앞차와의 상대속도 및 상대가속도를 산출하는 계산부, 그리고 현재 상황에서 차량의 가/감속을 조절하여 설정되어있는 차간거리를 유지시키는 제어부와 제어부의 제어신호를 받아 엔진과 브레이크를 작동시키는 액추에이터로 구성되어있다. 차량을 가/감속 하는 역할은 가속시에는 엔진이 감속시에는 브레이크가 그 역할을 하며, 구성도 에서 보는 바와 같이 차량을 제어하기 위하여 두개의 장치를 이용한다.

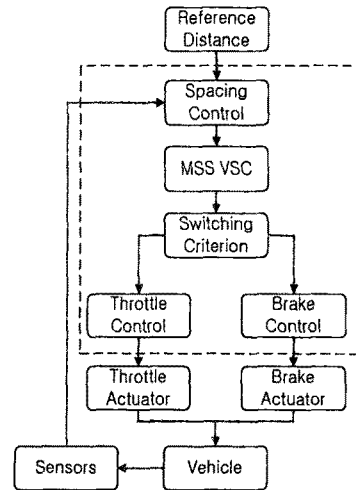


그림 1: 차량 순항 시스템 구성도

2.1.1 차량 계통에 대한 수학적 모델

이번 절에서는 차량계통에 대해 소개하고, 실제 구현하고자 하는 차량계통에 대한 수학적 모델을 제시 한다. 차량은 엔진[4]과 브레이크[5]를 포함한 방정식으로 표현 할 수 있다. 상태방정식은 차량의 가속도와 제어 입력의 관계로 표현 한다. 여기서 제어 입력은 엔진과 브레이크의 토크로 나타낼 수 있다. 차량의 엔진속도  $w_e$ 와

차량 속도  $v$ 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[1]

$$v = R_g h \omega_e \quad (1)$$

두개의 입력으로 나타낸 차량의 가속도 방정식은 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$T_e - R_g(T_b + M_{rr} + hF_a + mgh \sin(\theta)) = \beta a \quad (2)$$

여기서

$$\beta = \frac{J_e + R_g^2(J_{wr} + J_{wf} + mh^2)}{R_g h}$$

$$F_a = C_a v^2$$

또한,  $\beta$  : lumped inertia,  $F_a$  : 공기저항력,  $v$ ,  $a$  : 속도와 가속도,  $T_e$ ,  $T_b$  : 엔진토크와 브레이크 토크,  $R_g$  : 기어비,  $M_{rr}$  : 회전저항력,  $h$  : 바퀴저름,  $m$  : 차량총질량,  $J_e$ ,  $J_{wr}$ ,  $J_{wf}$  : 엔진, 뒤축, 앞축의 inertia,  $C_a$  : 공기저항 계수 이다. 식(2)는 요구되는 가속도를 위하여 필요로 하는 엔진 또는 브레이크의 토크를 산출하고 전환 조건을 구하는데 사용 되어지는 방정식이다.

### 2.1.2 차간거리 오차에 대한 모델링

이번 절에서는 본 논문에서의 제어 목표인 두 차량간의 차간 거리를 일정하게 유지하기 위한 차간거리 오차와 요구 가속도와와의 관계식을 보인다. 그를 위해서 앞 차량의 속도 변화에 의해서 발생하는 차간거리의 오차를 구하여 오차의 변화율을 보상할 수 있는 뒤 차량의 요구 가속도를 구하는 방정식을 기술 하였다.[2]

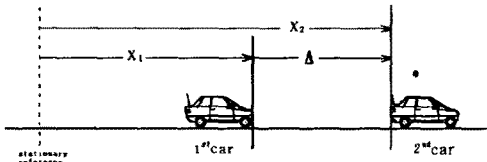


그림 2. 차간거리 오차 모델

실제 차량에서는  $\Delta$ 를 측정에 의하여 구할 수 있지만 본 논문에서는 해석을 위하여 기준 점으로부터의 이동거리간의 차이로  $\Delta$ 를 구하였다. 그래서 차간거리의 오차는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$e = \Delta - (x_2 - x_1) \quad (3)$$

여기서  $e$ 는 차간거리 오차,  $\Delta$ 는 기준 차간거리,  $x_2$ 는 앞차의 이동거리,  $x_1$ 는 뒤차의 이동거리이다.

## 2.2 가변구조제어기 설계

가변구조 제어기는 제어입력의 상태가 항상 초평면에 존재하여, 초평면을 따라 목표점으로 수렴하도록 하는 제어방식이다. 본 논문에서는 차량순항시스템에서 차간거리 유지를 위하여 필요한 제어입력을 초평면에 존재하도록 설계하였다.

### 2.2.1 가변 구조 제어 기법

가변 구조 제어(variable structure control : VSC)는 슬라이딩 모드라는 특별한 형태를 이용함으로써 계통 파라미터나 외란에 대하여 제어계를 강인하게 하는 제어 기법들 중 하나이다. 또한 VSC는 선형 및 비선형 계통에 대하여 제어 입력을 쉽게 구성하도록 설계 방법을 제시한다. 가변 구조 제어기는 고속의 스위칭 제어 입력을 발생시키는 제어기이다. 이러한 가변 구조 제어 규칙은 특히, 비선형 계통을 제어하는데 있어 효과적이고 강인한 특성을 제공한다.

### 2.2.2 차간거리 오차와 필요 가속도

제어 입력  $u_{total}$ 은 기존 제어 입력  $u$ 와 오차에 대한 제어입력  $u_{error}$ 의 합이라 할 수 있다.

$$u_{total} = u + u_{error} \quad (4)$$

뒤차에 작용하는 제어입력  $u$ 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$u = m\ddot{x}_1 + b\dot{x}_1 \quad (5)$$

여기서  $m$ 은 뒤차의 무게,  $b$ 는 마찰계수 이다. 차량의 무게와 가속도의 관계로 제어입력  $u$ 를 나타내었다.

$$u_{error} = m\ddot{e} + b\dot{e} \quad (6)$$

오차에 대한 제어입력  $u_{error}$ 는 위의 식과 같이 뒤차의 무게와 오차의 변화율의 관계로 나타내었다. 식 (4)에 식 (5)와 (6)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$u_{total} = m(\ddot{x}_1 + \ddot{e}) + b(\dot{x}_1 + \dot{e}) \quad (7)$$

식 (3)에서 차량간의 가속도 차를 구하면 다음과 같다.

$$\ddot{e} = -\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1 \quad (8)$$

지금까지 구한 차량간의 이동거리를 이용한 속도 및 가속도에 관한 식을 정리하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$2\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2 + \frac{b}{m}(2\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = \frac{u_{total}}{m} \quad (9)$$

위의 식을 이동거리와 이동속도에 관한 이차상태 방정식으로 표현하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 \\ -\frac{b}{m}y_2 - \ddot{e} - \frac{b}{m}\dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u_{total} \quad (10)$$

여기서  $y_2$  : 앞차의 움직인 거리

$y_1$  : 뒤차의 속도

### 2.2.3 제어기 설계

본 논문에서는 차량의 차간거리 제어를 위하여 가변구조제어를 사용하였으며, 제어기의 성능향상을 위하여 MSS[3]를 사용할 것을 제안 하였으며, 초평면의 기울기인  $\lambda$ 를 MSS방법을 이용하여 조절 함으로써 도달시간을 줄여 초평면에 빨리 도달 하도록 하여 제어기의 성능을 향상 시킬 수 있다.

#### ▶ 초평면 설계

제어 목표가 차간거리 오차를 0으로 보내는 것이다. 위의 식(3)에서 오차에 대하여 정의 하였다. 초평면은 오차( $e$ )와 오차의 변화율( $\dot{e}$ )의 상태로 나타낼 수 있다. 오차와 변화율이 0으로 수렴 하도록 초평면과 제어 입력을 설계하였다.

오차는 다음과 같고  $e = \Delta - (x_2 - x_1)$ 오차 변화율은  $\dot{e} = -\dot{x}_2 + \dot{x}_1$  초평면은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = e + \lambda \dot{e} \quad (11)$$

위 식과 같이 초평면을 설정하면 차간거리의 오차에 의하여 제어입력을 전환할 수 있다. 또한 식(11)의  $\lambda$ 를 조정하여 초평면의 기울기를 변화시킴으로써 MSS를 구현 하였다.

#### ▶ 슬라이딩 모드 제어기

본 논문에서 설계 하고자 하는 차량 순항 제어기는 엔진과 브레이크라는 서로 다른 액추에이터를 작동하여 차량에 제어입력을 작용하게 한다.

$$\begin{aligned} \text{if } s \leq 0 & : u_s = T_{edes} \\ \text{if } s > 0 & : u_s = T_{bdes} \end{aligned} \quad (12)$$

제어 입력으로는 가속시에는 엔진( $T_{edes}$ )을 필요로 하는 가속도를 이용하여 구하여 제어입력으로 사용하며, 감속시에는 브레이크( $T_{bdes}$ )를 필요로 하는 가속도를 이용하여 구한 값을 제어입력으로 사용한다.

▶가변 초평면 설계

위에 식 (11)에서 설정한 초평면에서

$$S = e + \lambda \dot{e} \quad (13)$$

본 논문에서 제안하고자하는 MSS는 위의 식에서  $\lambda$ 를 적절히 변화시켜 제어입력이 초평면에 이르는 시간을 줄이는 방법이다.  $\lambda$ 의 경우 일반적으로 그 시스템의 특성 및 원하는 제어방법에 따라 다르게 설정이 된다.  $\lambda$ 를 크게 할 경우 초평면 위에서의 0점으로의 수렴속도가 빨라진다는 장점이 있을 수 있으나 초평면까지의 도달시간이 길어진다는 단점이 있을 수 있으며,  $\lambda$ 를 작게 할 경우는 초평면에서 0점으로의 수렴속도는 느려진다는 단점이 있을 수 있으나 초평면까지의 도달 시간이 짧아진다는 장점이 있을 수 있다. 그래서  $\lambda$ 를 변화시켜 초평면에 이르는 시간을 줄일 수 있다.

3. 모의실험 결과 및 고찰

본 논문에서 실험을 위하여 차량 모델에 대하여 4장에서 설계한 제어를 적용하여 보았다. 차량에 대한 모델링 파라미터가 다음과 같이 적용하였으며 선두 차량의 속도 변화는 그림 4와 같은 변화를 주었다.

차량의 무게	$m = 2148 \text{ kg}$
Lumped inertia	$\beta = 234 \text{ kgm}$
회전저항력	$M_{rr} = 72.6 \text{ Nm}$
공기저항 계수	$C_a = 0.5334 \text{ kg/m}$
바퀴지름	$h = 0.33 \text{ m}$
기어비	$R_g = 0.326$

선두차량의 속도가 일정하지 않고 항상 변화가 있게 줌으로써 결과에서도 항상 약간의 속도 변화를 보이고 있다.

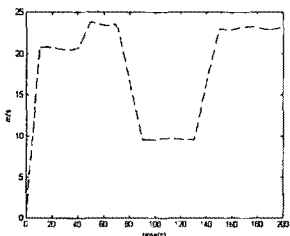


그림 3. Reference Leader Car Speed

▶ MSS를 적용한 경우와  $\lambda$ 를 고정시킨 경우의 차량의 속도 변화를 나타내었다.

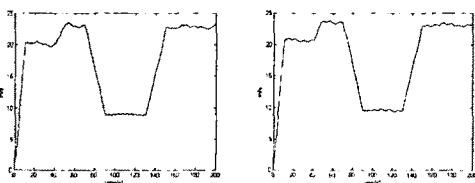


그림 4. MSS를 적용한 경우[왼쪽]  
 $\lambda$ 를 고정시킨 경우[오른쪽]

▶MSS를 적용한 경우와  $\lambda$ 를 고정된경우의 차간거리 오차를 나타내었다.

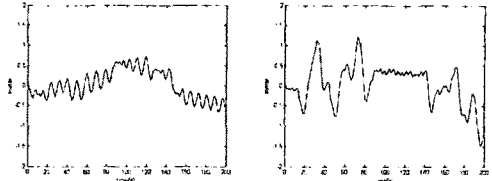


그림 5. MSS를 적용한 경우 : 차간거리 오차 [왼쪽]  
 $\lambda$ 를 고정시킨 경우 : 차간거리 오차 [오른쪽]

▶ 실험 결과

시뮬레이션 결과 앞 차량의 속도 변화에 위안이 있을 경우  $\lambda$ 를 고정된 경우가 MSS를 적용한 경우가 앞차의 속도 변화에 더욱 잘 추종하였으며 차간거리 유지에도 더욱 좋은 성능을 보임을 알 수 있었다. 차간 거리오차에 대한 Infinity norm을 비교해 본 결과 MSS가 좋은 성능을 보임을 알 수 있었다.

```
>> norm(MSS, inf)
ans =
    0.7225

>> norm(lambda, inf)
ans =
    1.4802
```

4. 결 론

본 논문에서는 차량 순항 제어기의 성능을 향상시킬 수 있는 방법으로 MSS를 사용한 가변구조 제어기를 설계하였다. 실제 차량에서는 앞 차량과의 거리를 측정하고 그에 따르는 가속도를 산출하여 엔진과 브레이크를 조정하였다. 제안한 가변구조제어기는 기존의 제어기보다 초평면에 도달하는 시간을 줄여 줌으로써 좋은 성능을 나타냈으며, 제안한 제어기를 이용한 순항시스템은 차간거리 유지를 위한 적절한 제어가 이루어 졌다. 설계한 제어기에 대한 성능을 검증하기위하여 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1]J.K.Hedrick "Nonlinear Controller Design for Automated Vehicle Applications" , IEE, No.455, pp3 32, 1998.
- [2]K. Yi, I. Moon, Y.D.Kwon "A Vehicle-to Vehicle Distance Control Algorithm for Stop and Go Cruise Control", IEEE, pp.478 482, 2001.
- [3]S.B. Choi, C.C. Cheong, D.W. Park "Moving Switching surfaces for robust control of second order variable structure systems", INT.J.C, vol. 58, No. 1, pp.229-245, 1993.
- [4]D. Cho, J.K.Hedrick "Automotive powertrain modeling for control", ASME, 111, pp.568 576, 1989
- [5]J.C.Gerdes, A.S.Brown, J.K.Hedrick "Brake system modeling for vehicle control", ASME IMECE, pp105 112, 1995