지능형교통시스템(ITS)을 위한 첨단차량제어시스템(AVCS)

이 구 도, 김 상 우
포항공과대학교 전자 · 컴퓨터공학부

1. 서론

지능형교통시스템(Intelligent Transport Systems : ITS)은 당면한 각종 교통문제를 해결하고 날로 증가하는 교통수요를 충족시키기 위하여 도로 · 신호등 · 차량 등 기존 교통체계의 구성요소에 제어 · 전자 · 통신 등 첨단기술을 접목시켜 구성요소들이 상호 유기적으로 작동하도록 하는 차세대 교통체계이다. 이는 기존 교통체계로 인한 각종 문제를 해결하고 안전성 증대, 교통체증의 감소, 교통흐름의 원활화, 환경오염 감소, 에너지 절감, 그리고 경제 생산성 향상 등의 다양한 목적을 달성하고자 미국, 일본, 유럽 등 주요 선진국들을 중심으로 80년대 중반 이후 활발히 연구되고 있다.

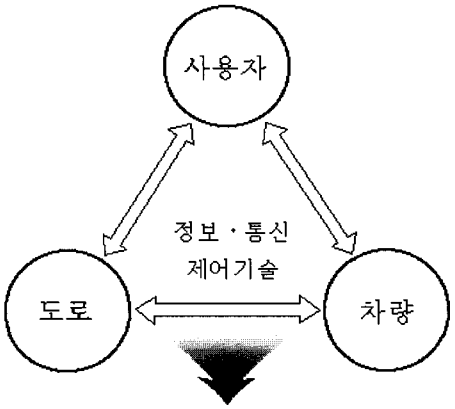

그림 2. ITS의 개념

미국은 정부 부처와 관련기구, 대학 연구소 및 민간기업이 참가하는 NAHSC와 PATH (Partners of Advanced Transit and Highways)가 중심이 되어 각종 연구를 수행하고 있으며 1997년 샌디에고, 1998년 네덜란드에서 차량군집주행시스템의 공개 시연을 통하여 구체적인 가능성을 제시하였다. 일본은 운수성을 중심으로 하는 ASV (Advanced Safety Vehicle) 프로젝트를 통하여 능동안전시스템을 중심으로 첨단차량제어시스템 개발을 진행하고 있으며 아울러 건설성 주관의 AHSRA를 구성하여 개발된 시스템의 완성도를 높이고자 노력하고 있다. 유럽의 경우는 PROMETHEUS(Program for a European Traffic with Efficiency and Unprecedented Safety)와 DRIVE(Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe)의 2개 대형 프로젝트를 중심으로 연구가 추진하고 있다. 국내에는 90년대 초기에 처음으로 ITS의 개념이 도입되었고 이후 그 필요성을 인식한 정부에 의해 기술개발이 활발히 추진되고 있다. 1997년 9월에 정보화추진위원회에서 ITS의 단계별 기본계획이 심의 · 확정되어 2010년까지 첨단시스템 구축을 추진 중이다. 대표적인 성과로는 1998년 10월 ITS 세계대회에서 포항공대-현대자동차-대우자동차 등이 시연한 군집주행시스템을 꼽을 수 있다. 이 시스템은 차량의 종 · 횡방향 제어, 도로-차량간 통신 기술을 이용하여 4대의 지능형 차량이 80km/h의 속도로 찻간거리 10m를 유지하면서 군집주행하는 시스템이다.

이러한 ITS는 정보처리, 통신, 제어, 그리고 전자공학 등의 다양한 기술을 필요로 하며 이는 곧 ITS의 높은 잠재성을 대변하고 있다. ITS의 다양한 연구분야 중 대표적인 분야는 다음의 5가지로 크게 구분할 수 있다.

- 첨단교통관리시스템(ATMS : Advanced Traffic Management Systems
- 첨단여행자정보시스템(ATIS : Advanced Traveller Information Systems)
- 첨단차량제어시스템(AVCS : Advanced Vehicle Control Systems)
- 상용차량시스템(CVO : Commercial Vehicle Operations)
- 첨단대중교통시스템(APTS : Advanced Public Transportation Systems)

이와 같이 ITS는 시스템의 특성상 관련된 분야가 광범위하기 때문에 체계적인 개발을 위해서는 각 세부 분야간의 유기적 관계를 포함하여 모든 시스템의 총괄적 검토가 필요하다.

이러한 5개의 연구분야 중 첨단차량제어시스템(AVCS)은 ITS 분야 중 주로 차량의 지능화 및 자동화에 관한 분야이다. 이는 지난 수십 년간 비약적으로 발달한 첨단제어기법을 차량에 응용하여 차량운행에 있어서 운전자 역할의 일부 또는 전체를 자동화하고자 하는 연구이다. 이와 같이 첨단차량제어시스템은 차량운행의 자동화를 통하여 ITS의 기본 목적인 차량 운행의 안전성 증대, 교통 흐름의 원활화, 교통사고로 인한 인적 물적 손실을 최소화, 그리고 각종 물류비용의 감소를 이루고자하는 시스템이다. 이러한 AVCS의 개념은 지난 수십 년간 논의되어 왔으나, 최근에 와서야 통신 및 센싱 기술의 발달 및 가격인하와 더불어 현실적으로 실현 가능한 시스템의 개념이 정립되었다. 또한 이러한 기술적인 진보와 더불어 운전자의 안전관련 시스템에 대한 관심의 증대는 AVCS의 필요성을 한층 가중 시키고 있으며 현재 많은 중요한 AVCS 시스템이 상품화를 위해 연구되고 있고 일부 시스템은 신차개발에 이미 채택되고 있다.

첨단차량제어시스템은 기본적으로 차량의 주행상태 및 주변의 주행환경을 인식하는 센서시스템, 쓰로틀밸브, 브레이크, 핸들 등을 구동하는 각종 구동기와 제어기, 그리고 차량제어알고리듬을 수행하는 부분으로 구성되어 있다.

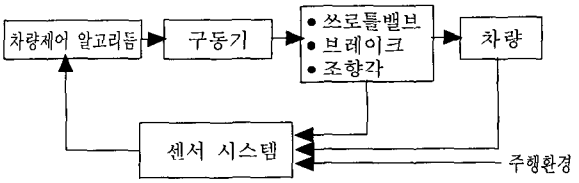

그림 2. 첨단제어차량의 구성도

이러한 첨단차량제어시스템은 그 연구분야가 매우 광범위하며 주요 연구분야는 다음과 같다.

- ABS(Anti-Skid Brake System) and Traction Control Systems
- Four Wheel Steering Systems
- Active Suspension Systems
- Vehicle Stability Systems
- Intelligent Crouse Control (ICC) System
- Vehicle Collision Warning Systems
- Roadway-Based Warning Systems
- Near-Obstacle Detection Systems
- Vision Enhancement
- Lane Keeping and Change
- Driver Monitoring
- Platoon

본고에서는 첨단차량제어시스템의 연구분야 중 가장 기본이라 할 수 있는 종축제어시스템으로서의 지능순항제어(ICC)시스템과 횡축제어시스템으로서의 차선추종 및 변경(Lane Keeping and Change)시스템, 그리고 도로의 수용능력을 획기적으로 향상시킬 수 있으며 현재 많은 연구가 진행되고 있는 차량의 군집주행시스템에 대하여 알아본다.

2. 본론

2.1 지능순항제어시스템(Intelligent Cruise Control System)

지능순항제어시스템[1-3]은 기존의 정속주행 능력을 갖춘 순항제어시스템(CCS)을 한단계 발전시킨 개념으로 차량의 속도뿐만 아니라 전방차량과의 거리를 자동으로 제어함으로써 차량주행의 안전성과 운전자의 편의성, 그리고 도로의 이용 효율을 높이고자 하는 시스템이다. 이러한 지능순항제어시스템은 자율조향시스템과 더불어 기본적인 자율주행차량을 구성하는 요소일 뿐 아니라 군집주행시스템과 같은 첨단 차량제어 시스템의 기초를 이루는 중요한 시스템이다. 더불어 주변의 시설물, 혹은 주위 차량과의 통신 교환이 없이 차량자체만을 자동화·지능화만으로 개발이 가능하므로 가까운 미래에 상용화가 가능한 시스템으로 각광받고 있으며 이미 일부 선진국에서 기본적인 지능순항제어 기능을 갖춘 차량을 선보이고 있다.

지능순항제어기의 개발을 위해서는 먼저 차량엔진, 자동변속기, 동력전달장치 및 브레이크 시스템의 모델[4,5]을 구하고 얻어진 모델을 바탕으로 각종 제어 알고리듬을 적용하여야 한다. 지금까지 개발된 지능순항제어 알고리듬은 주로 차량시스템의 선형모델을 이용하여 PID제어, 최적제어 등을 적용하거나 차량의 비선형 모델을 이용한 슬라이딩모드 제어기법을 적용한 지능순항제어기가 있다. 특히 최근에는 시스템의 정확한 모델을 필요로 하지 않으면서도 차량시스템과 같은 비선형 제어에 우수한 성능을 보이는 퍼지제어[6-9] 등의 지능제어 알고리듬을 이용한 지능순항제어기개발에도 많은 관심이 집중되고 있는 실정이다.

지능순항제어기의 구조는 크게 전방정보 및 차량정보로부터 직접 쓰로틀밸브와 브레이크를 제어하는 구조와 전방정보로부터 이상적인 차량속도를 생성하여 순항제어기에서 생성된 속도를 추종하는 두 가지의 구조가 있으며 그림 3과 그림 4에서 이를 보이고 있다.

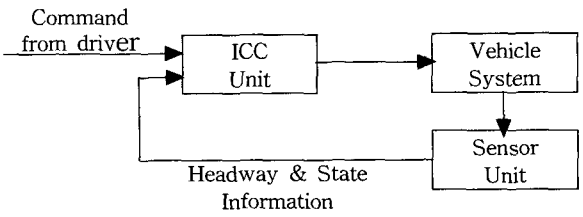

그림 3. 지능순항제어기 모델 I

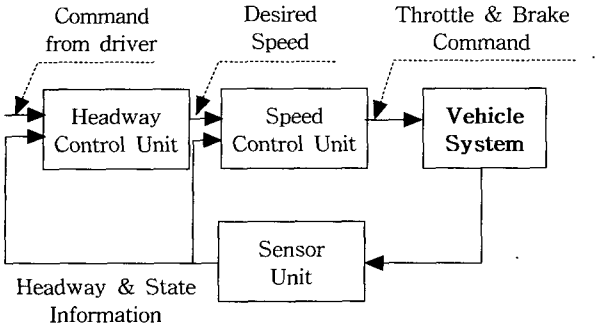

그림 4. 지능순항제어기 모델II

본고에서는 주로 두 번째 모델에 대하여 알아본다. 그림 4에서 보이듯이 지능순항제어시스템은 크게 전방차량과의 거리 및 상대속도와 제어차량의 속도를 인식하는 센서시스템, 센서시스템으로부터 주어지는 정보를 바탕으로 최적의 속도명령을 생성하는 전방제어기(Headway Controller), 그리고 전방제어기에서 생성된 속도명령을 제어차량이 추종하도록 쓰로틀밸브 및 브레이크를 제어하는 속도제어기로 구성된다. 이러한 구조의 지능순항제어시스템의 성능은 주로 센서시스템의 신뢰도와 속도제어기의 속도추종성능에 크게 좌우된다. 전방차량과의 거리와 상대속도를 측정하는 센서로는 레이저 및 레이저 스케너, 혹은 MMW(Mili-Meter Wave) 레이다 등이 사용된다. 레이저센서의 경우는 직진성이 너무 강해서 곡률이 있는 도로에서 전방차량을 감지하지 못하거나 혹은 도로주변의 시설물을 전방차량으로 잘못 인식하는 등의 문제가 발생하므로 현재는 주로 레이저 스케너나 MMW 레이다를 사용하는 추세이다. 지능순항제어 알고리듬은 크게 전방제어기(Headway Control) 알고리듬과 속도제어(Speed Control)으로 구성된다.

2.1.1 전방제어기(Headway Controller)

전방제어기(Headway Controller)[3]란 주행차량의 주행정보 및 속도제어기의 속도추종능력, 그리고 전방차량과의 상대거리, 상대속도 등을 기반으로 최적의 속도명령을 생성하여 속도제어기에 전달하는 역할을 한다. 이러한 전방제어 알고리듬에는 여러 가지가 있으나 크게 "Constant Headway Policy"와 "Constant Time Headway Policy"로 구분할 수 있다. 전자는 전방의 차량과 항상 일정한 거리를 유지하는 것을 의미하고, 후자는 전방차량까지의 도달 시간을 일정하게 유지하는 것이다. 현재는 전체 시스템의 안정성을 보장하면서 다수의 차량이 주행할 때 발생하는 slinky-effect 현상을 효과적으로 극복하기 위하여 "Constant-Time Headway Policy"를 주로 채택하고 있다. 본고에서는 간단한 1차전방제어 알고리듬을 이용한 Constant-Time Headway Policy에 대하여 알아본다.

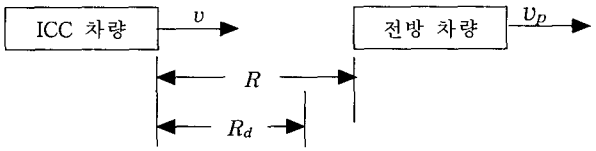

그림 5. 전방차량과의 관계

전방제어기는 전방차량과의 상대거리 및 상대속도를 바탕으로 전체시스템의 동작영역을 3영역으로 구분하여 작동한다. 이러한 동작영역은 그림 6과 같은 상태평면상의 직선 및 포물선으로 구분되어진다.

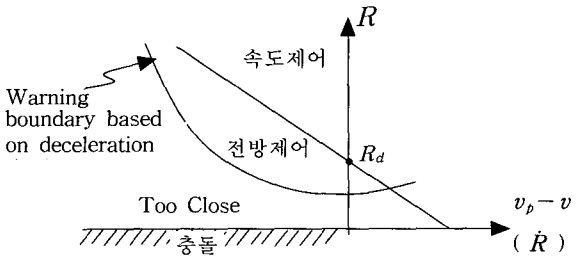

그림 6. 지능순항제어시스템의 동작영역

위의 그림에서 직선은 전방제어 영역과 운전자의 원하는 속도로 정속주행영역을 구분하는 것으로 아래의 일차방정식으로 표현된다.

$$T \cdot \dot{R} + R = R_d \tag{1}$$

여기서 T는 차량의 감속 능력을 고려한 파라미터이며, R은 전방차량과의 거리, 그리고 R_d는 현재 전방차량의 속도와 전방제어시간 T_h에 의하여 다음 식 (2)에 의해 주어지는 원하는 전방거리이다.

$$R_d = T_h \cdot v_p \tag{2}$$

그림에서 포물선은 전방제어 영역과 충돌경보영역을 구분하는 경계이며 현재 주어진 원하는 거리에서의 최소 허용 거리 및 차량의 최대감속능력을 이용하여 설계된다. 전방제어 영역에서의 속도 명령은 다음의 식 (3)으로 주어진다.

$$v_c = v_p + (R - R_d)/T \tag{3}$$

2.1.2 속도제어기(Speed Controller)

속도제어기[2, 8-10]는 전방제어기에서 생성된 속도명령을 받아서 실제로 차량의 쓰로틀밸브와 브레이크를 제어하는 역할을 한다. 이러한 속도제어기의 성능은 전체 지능순항제어기의 성능을 결정하는 중요한 요소로서 지금까지 다양한 제어 알고리듬이 소개되었다. 차량시스템의 선형화 모델을 기반으로한 "PID 제어", "최적제어", 그리고 차량의 비선형 모델을 사용한 "슬라이딩

모드 제어" 등의 알고리듬이 대표적인 예이다. 이러한 Model-based 제어기법에서는 차량모델의 정확도나 신뢰성이 제어기의 성능에 크게 영향을 미치게 된다. 현재 주로 사용되는 차량모델로는 D. Choi와 Hedrick이 개발한 모델이나 이를 기반으로 한 간략화된 모델이 사용되고 있다. 본고에서는 선형화된 모델을 이용한 Fixed gain PID제어, PID with gain scheduling, 적응제어, 그리고 퍼지-슬라이딩모드 제어에 대하여 알아본다.

가) PID with fixed gain and gain scheduling

PID제어는 전방차량과의 거리오차 및 상대속도를 기반으로 쓰로틀밸브를 PID제어에 의해서 제어하는 기법으로 아래의 식과같은 제어규칙을 사용한다.

$$\theta = \theta_0 + k_1 v_r + k_2 \delta + \int_0^t (k_3 v_r + k_4 \delta)\, d\tau \qquad (4)$$

위에서 θ는 쓰로틀밸브의 각도이며, $\theta_0 = f^{-1}(v_p)$로 선형화된 모델의 look-up table에서 주어지는 값이다. 그리고 v_r과 δ는 각각 전방차량과의 상대속도 및 거리오차를 나타내며 k_i, $i=1,\cdots,4$는 PID 이득을 나타낸다. PID with gain scheduling의 경우는 식 (4)에 나타나는 PID 이득을 식 (5)와 같이 모델 파라미터에 따라 변화시키는 기법이다.

$$\begin{aligned} k_1 &= (\lambda_0 + 2\zeta\omega_n - bk_2 T_h - a)/b \\ k_2 &= 0.2/b \\ k_3 &= (2\zeta\omega_n\lambda_0 + \omega_n^2 - bk_{2-T_h}\lambda_0\omega_n^2)/b \\ k_4 &= \lambda_0\omega_n^2/b \end{aligned} \qquad (5)$$

위에서 λ_0, ζ, ω_n은 전체 시스템의 pole의 위치를 결정하는 design 파라미터이며 a, b는 전방차량의 속도 v_p에 의해 변화하는 모델 파라미터이다.

나) 적응제어

위에서 설명한 PID with gain scheduling은 기본적으로 실험에 의하여 결정된 look-up table을 이용하는 방법이다. 적응제어의 경우는 실시간 파라미터 및 시스템 식별과 적응제어규칙에 의하여 제어하는 기법이다.

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_0 + k_1 v_r + k_2 \delta + k_3 \\ \dot{k}_i &= \begin{cases} 0 & \text{if } k_i \geq k_{u_i} \text{ and } g_i > 0 \\ 0 & \text{if } k_i \leq k_{l_i} \text{ and } g_i < 0 \\ g_i(\varepsilon, v, \delta) & \text{otherwise} \end{cases} \\ \varepsilon &= e_1 - \frac{1}{s+a_m}\lambda\varepsilon m^2 \\ e_1 &= v - \frac{a_m}{s+a_m}[v_p + k\delta] \\ m^2 &= \delta^2 + v_r^2 \end{aligned} \qquad (6)$$

위의 식에서 g_i는 다음과 같이 나타나며

$$\begin{aligned} g_1 &= -\sigma_1(k_1 - k_{10}) - \gamma_1 v_r \varepsilon \\ g_2 &= -\sigma_2(k_2 - k_{20}) - \gamma_2 \delta\varepsilon \\ g_3 &= -\gamma_3 \varepsilon \end{aligned}$$

a_m, k, k_{10}, k_{20}, γ, γ_1, γ_2, γ_3는 design 파라미터이며 k_{u_i}, k_{l_i}는 각각 k_i의 상한치 및 하한치를 나타낸다.

다) 퍼지-슬라이딩모드(Fuzzy-Sliding Mode) 제어

위에서 설명한 제어기법 외에도 비선형 모델에 기반을 둔 여러 가지 제어기법이 소개되었다. 그러나 이러한 알고리듬은 차량 시스템의 비선형성과 시변성을 차량모델이 충분히 반영하지 못함으로써 제어기 성능의 한계가 드러나게 되었다. 따라서 현재는 정확한 시스템 모델을 필요로 하지 않고 인간의 경험이나 지식의 제어기로의 이식이 쉬운 지능제어 알고리듬을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 제어기의 구성이 쉬우며 비선형 제어에 적합한 퍼지제어 알고리듬이 많은 관심을 끌고 있다. 아울러 이러한 퍼지제어 기법은 차량의 동적 모델을 기반으로 하지 않기 때문에 모델링 오차 등으로 인한 제어 손실을 보상할 수 있는 장점을 갖고 있다. 본절에서는 이러한 퍼지제어의 장점과 비선형 시스템의 모델링 오차 및 외란에 강인한 성질을 갖고 있으며 수학적으로 시스템의 안정성이 보장된 슬라이딩모드 알고리듬을 결합한 퍼지-슬라이딩모드 속도제어 알고리듬을 소개한다.

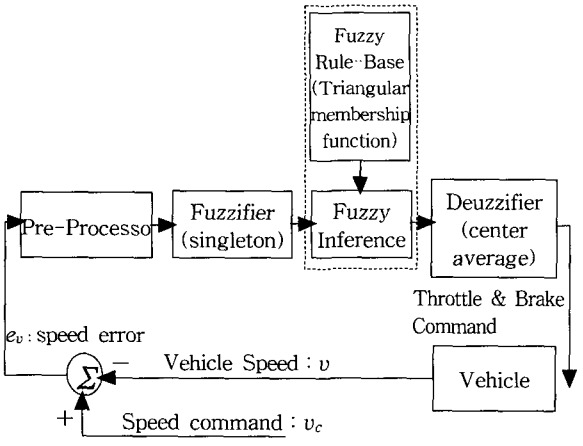

그림 7. 퍼지-슬라이딩모드 속도제어기의 구성

퍼지-슬라이딩모드 제어기는 제어차량의 속도를 센서로부터 입력받아 전방제어기에서 생성된 속도명령과의 오차를 계산한다. 전처리기(Pre-Processor)에서는 일반적인 퍼지 PID제어기와 달리 퍼지-슬라이딩모드 제어기의 입력을 생성하기 위하여 속도오차와 미분치 및 적분치를 이용하여 슬라이딩모드 제어에 사용되는 S, $\dot{S}$를 계산하여 퍼지화 블록으로 전달한다. 이는 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} S &= k_1 \cdot \int_{t_0}^{t} e_v(\tau)\, d\tau + e_v(t) \\ \dot{S} &= k_1 e_{v(t)} + \dot{e}_v(t) \end{aligned} \qquad (7)$$

위의 두가지 입력요소는 지식베이스에 저장된 제어규칙을 거쳐서 최종적으로 쓰로틀밸브 및 브레이크 제어값을 출력신호로 계산한다. 퍼지-슬라이딩모드 제어에서 제어규칙은 슬라이딩모드 제어규칙을 응용하여 $S\dot{S}$를 음의 값으로 줄이기 위한 규칙으로 구성되며 다음과 같은 형식을 취한다.

If S is negative big and $\dot{S}$ is negative big, then Δu is negative big
⋮
If S is zero and $\dot{S}$ is zero, then Δu is zero
⋮
If S is positive big and $\dot{S}$ is positive big, then Δu is positive big

2.2 차선유지 및 변경(Lane Keeping and Change) 시스템

차선유지 및 변경제어 시스템은 첨단차량제어시스템(AVCS)에서 횡축제어[9, 11]를 담당하는 중요한 요소 중의 하나이다. 차선유지제어는 주행 중인 차선을 추종하도록 하는 시스템이며, 차선변경제어 시스템은 주행 중인 차선에서 이웃차선으로 차량을 이동하기 위한 시스템이다. 이러한 차선유지 및 변경을 포함하는 횡축제어에 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나는 차선을 인식하는 센서시스템이다. 현재까지 차선인식에 널리 이용되고 있는 방법으로는 시각센서를 이용하는 방법과 도로에 매설된 자석이나 유도선로 등을 이용하는 방법이 있다. 또한 횡축제어를 성공적으로 수행하기 위해서는 이러한 차선인식 센서와 더불어 주행차량의 동적인 움직임을 감지하는 자이로(gyro)나 편요각(yaw rate) 센서 등이 필수적이다. 일반적으로 자석이나 유도선로가 매설된 도로의 경우 차선을 직접 인식할 수 없으므로 차선위치를 추정하기 위한 부가적인 센서가 요구되는데 반하여 시각센서의 경우는 연속적인 차선인식이 가능하므로 부가적인 센서없이 제어기를 설계할 수 있는 장점이 있다. 그러나 시각센서의 경우 대부분 영상 데이터의 처리속도가 시스템의 성능 결정에 중요한 요소로 작용한다. 횡축제어 알고리듬의 경우 차량의 횡축모델을 이용한 슬라이딩모드 제어, Preview 제어 등과 차량의 횡축모델없이 퍼지제어 혹은 신경망제어 등의 지능제어 등이 주로 이용되고 있다.

2.2.1 차량의 횡축모델

차량의 횡축모델은 비선형 two-track 모델이 개발되어 있지만 제어기 설계를 위해서는 선형화된 single-track 모델을 일반적으로 사용하고 있으며 비상시가 아닌 일반적인 상황에서는 그 효율성이 입증되어있다. 다음의 그림은 선형화된 차량의 횡축모델을 나타내고 있다.

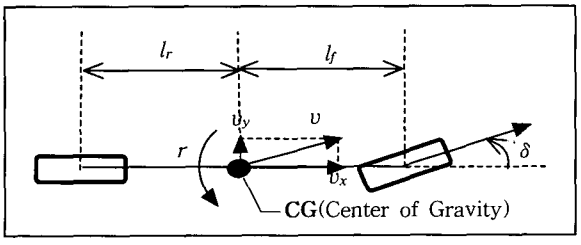

그림 8. 차량 횡축모델

만일 차량이 일정한 속도로 주행하고 있다면 그 모델은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta \tag{8}$$

여기에서

$$a_{11} = -\frac{(C_f + C_r)}{m v_x}, \quad a_{12} = -v_x + \frac{(C_r l_r - C_f l_f)}{m v_x},$$

$$a_{21} = \frac{(C_r l_r - C_f l_f)}{I_z v_x}, \quad a_{22} = -\frac{(C_r l_r^2 + C_f l_f^2)}{I_z v_x},$$

$$b_1 = \frac{C_f}{m}, \quad b_2 = \frac{C_f l_f}{I_z},$$

C_f와 C_r은 전 · 후 타이어에서의 cornering stiffness, r은 yaw rate, m은 차량의 질량, I_z는 차량의 관성 모멘트, v_y는 횡축방향의 차량속도, v_x는 종축방향의 차량속도, l_f와 l_r은 무게중심으로부터 차량의 앞 타이어와 뒤 타이어까지의 거리, δ는 차량의 조향각(steering angle)을 의미한다. 차량의 횡축제어를 위한 차량 모델은 그림 9에 나타난 바와 같이 편요각(yaw angle, ψ)과 전방오차(y_a)를 포함하는 모델로 확장되어야 한다. 그림 9에서 v는 차량의 진행속도이며, D는 차량의 무게중심으로부터 l_a거리에 위치한 전방을 의미하며, y_a는 차선의 중심으로부터 D까지의 거리를 의미하는 전방오차이다.

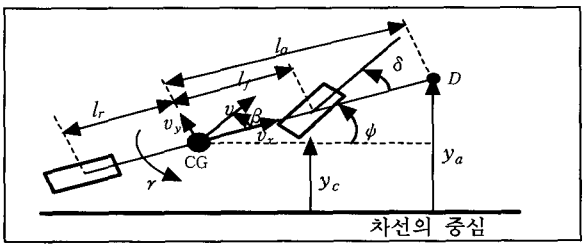

그림 9. 차량모델 및 차선과의 위치관계

만일 $\psi \ll 1$이라면, $\dot{y}_c$와 y_a는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$\dot{y}_c \approx v_y + v_x \psi \tag{9}$$

$$y_a \approx y_c + l_a \psi \tag{10}$$

식(9), (10)과 $\dot{\psi} = r$이라는 사실로부터 $\dot{y}_a$는 아래와 같이 결정된다.

$$\dot{y}_a = \dot{y}_c + l_a \dot{\psi} = v_y + v_x \psi + l_a r \tag{11}$$

따라서 식(8), 식(9)와 (11)을 통하여 얻어진 차량모델은

다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\delta(t) \tag{12}$$

여기에서 $x(t) = \begin{bmatrix} y_a(t) \\ \dot{y}_a(t) \\ \psi(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & -v_x A_{22} & A_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_{42} & -v_x A_{42} & A_{44} \end{bmatrix}$,

$B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 + l_a b_2 \\ 0 \\ b_2 \end{bmatrix}$,

$A_{22} = a_{11} + l_a a_{21}$, $A_{24} = a_{12} + v_x + l_a a_{22} - l_a A_{22}$,

$A_{42} = a_{21}$, $A_{44} = a_{22} - l_a a_{21}$

이다.

2.2.2 도로영상처리기법

본 절에서는 시각센서를 이용한 도로 차선인식에 대하여 알아본다. 영상처리는 영상으로부터 차선을 인식하기 위한 과정과 인식된 차선을 역원근변환을 이용하여 도로상의 차량위치로 변환하는 과정으로 이루어진다.

가) 역원근변환(Inverse Perspective Mapping)

편요각과 전방오차 등과 같은 차선에 대한 차량의 위치 정보를 알기 위해서는 영상좌표를 실제 도로에서의 좌표로 전환하는 과정이 필요하다. 이러한 전환과정을 역원근변환이라고 하며, 역원근변환은 도로가 평탄하다는 가정하에서 이루어진다. 그림 10은 실세계 좌표계와 영상좌표계 사이의 관계를 표현하고 있다. 여기서 실제의 3차원 공간과 영상으로 투영된 2차원 공간은 다음과 같이 정의된다.

- $W = \{(x, y, z)\} \in E^3$; 3차원 실세계 좌표계
- $I = \{(u, v)\} \in E^2$; 2차원 영상 좌표계

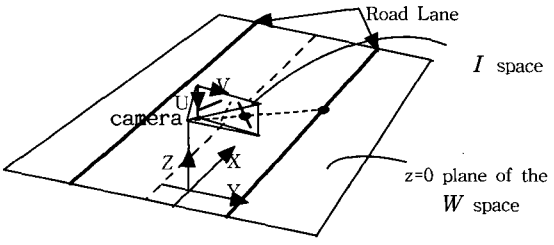

그림 10. 실세계 좌표와 영상 좌표 사이의 관계

그림에서 알 수 있듯이 실세계 좌표계는 카메라의 위치에 따라 좌표축이 변화하게 되는데, 카메라의 위치에 따른 실세계 좌표계에서의 XY 평면과 $Z\eta$ 평면은 그림 11에 나타나 있다. 그림 11에서 d는 차선의 중심으로부터 카메라까지의 거리, $\vec{\eta}$는 광축($\vec{o}$)이 $z=0$ 평면으로 투영된 벡터, $\bar{\gamma}$는 $\vec{\eta}$와 X축이 이루는 각, $\bar{\theta}$는 광축과 XY 평면이 이루는 각, $2a_u$와 $2a_v$는 카메라의 시야각(angular aperture), h는 XY 평면에서부터 카메라까지의 높이이다.

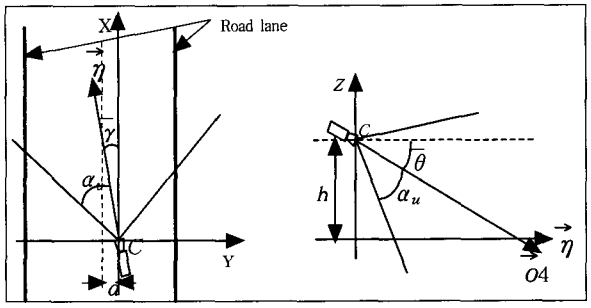

그림 11. 실세계 좌표와 영상 좌표 사이의 관계

그림에서 보여지는 바와 같이 실세계좌표로부터 영상좌표로의 전환은 다음의 관계식에 의해 이루어진다.

$$u(x, y, 0) = \frac{\tan^{-1}\left[\dfrac{h \cdot \sin\left\{\tan^{-1}\left(\dfrac{y}{x}\right)\right\}}{y}\right] - (\bar{\theta} - a_u)}{\dfrac{2a_u}{n-1}}$$

$$v(x, y, 0) = \frac{\tan^{-1}\left(\dfrac{y}{x}\right) - (\bar{\gamma} - a_v)}{\dfrac{2a_v}{m-1}} \tag{13}$$

여기에서 (u, v)는 영상좌표, (x, y)는 실세계좌표, m과 n은 카메라의 해상도($m \times n$)를 표현하는 파라미터이다. 식(13)으로 표현되는 관계식은 다음의 관계식에 의해 역으로 영상좌표에서 실세계 좌표로의 전환(IPM)이 가능하다.

$$x(u, v) = \frac{h}{\tan\left\{\bar{\theta} + \left(\dfrac{2u}{n-1} - 1\right)a_2\right\}} \cdot \cos\left\{\bar{\gamma} + \left(\dfrac{2v}{m-1} - 1\right)a_1\right\}$$

$$y(u, v) = \frac{h}{\tan\left\{\bar{\theta} + \left(\dfrac{2u}{n-1} - 1\right)a_2\right\}} \cdot \sin\left\{\bar{\gamma} + \left(\dfrac{2v}{m-1} - 1\right)a_1\right\} \tag{14}$$

나) 차선인식 알고리듬

차선인식을 위해 화상정보를 처리하는 경우 정보량이 증가하여 영상처리시간이 길어지게 된다. 따라서 실시간 차량제어를 위해서는 차선을 포함하는 일부영역의 영상만 처리하여 영상처리 시간을 최소화해야하며 차량모델을 이용하여 도로 상의 차량위치를 예측하고, 예측된 정보를 차선위치 정보로 전환하여 영상처리영역을 줄이는 기법을 많이 사용하고 있다. 차선의 위치예측 과정은 도로에 대한 다음의 가정을 바탕으로 이루어진다.

- 가정 1: 차선변경은 직선도로에서 이루어진다.
- 가정 2: 차선변경이 이루어지는 두 차선 사이의 간격은 일정하다.

두 차선 사이의 간격을 L이라 가정하면, 그림 11에서 볼 수 있듯이 두 차선은 실세계 좌표계에서 다음과

같은 식으로 표현된다.

$$y=-\frac{L}{2}-d,\ z=0 \tag{15}$$

$$y=\frac{L}{2}-d,\ z=0 \tag{16}$$

여기에서 식(15), (16)은 각각 왼쪽과 오른쪽 차선을 의미한다. a_u, a_v, h, $\bar{\theta}$와 카메라의 해상도($m\times n$)등은 카메라 보정을 통해 얻을 수 있으며, d와 $\bar{\gamma}$는 V장에 설명되어 있는 관측기로부터 예측이 가능하므로 식(13), (15), (16)으로부터 다음 영상에서의 차선위치를 예측하게 된다. 그림 12는 예측된 차선위치에서의 영상처리영역의 예를 보여주고 있다.

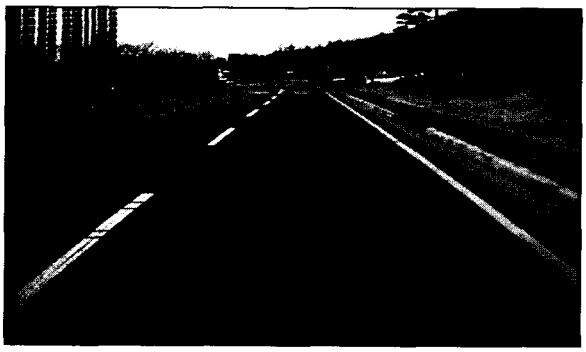

그림 12. 예측된 차선 위치에서의 영상 처리영역

차선은 그 주변의 도로면과 구별이 가능한 명암 차이를 가지고 있으므로 이를 이용한 차선인식이 이루어진다. 차선인식을 위한 영상처리는 그림 13의 과정을 통해 진행된다.

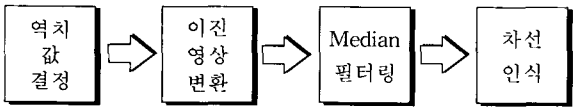

그림 13. 영상처리 과정

역치값(Threshold) 결정은 처리영역 내에서 차선과 도로면 사이의 명암을 구별하기 위한 경계를 설정하기 위한 과정으로 도로영상은 태양광의 조도변화 및 도로의 상태(예, 차선의 흐린 정도)에 따라 차선과 도로의 명암 정도가 변화하게 됨으로 매 영상마다 역치값을 재 설정하여야 한다. 따라서 명암 차가 뚜렷한 영상에서 쉽게 이용이 가능한 반복적인 역치선택 방법(Iterative Threshold Selection) 등을 이용하여 역치값을 계속적으로 갱신한다. 역치값이 결정되면 256 명암을 갖는 영상은 차선과 도로면으로 구분되는 이진 영상으로 전환된다. 이 과정에서 도로면에 태양광의 반사가 나타나거나 차선이 희미한 경우 차선과 도로면의 명암 차가 낮아지게 되어 잡음이 발생할 수 있으므로 미디언(Median)필터링 과정을 거치게 된다. 그림 14는 위에서 설명한 처리 과정의 결과 영상들을 보여주고 있다.

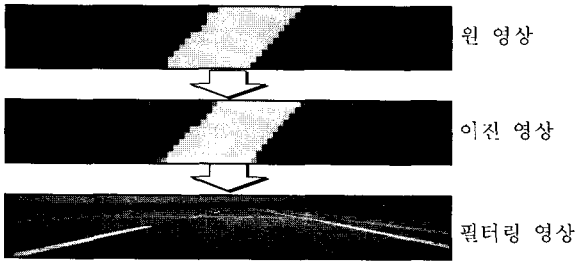

그림 14. 영상처리 결과 영상

필터링된 영상에서 차선을 구성하는 픽셀(pixel)들은 도로면을 이루는 픽셀들과 뚜렷이 구분되어 나타나게 된다. 차선을 이루는 픽셀들이 결정되면, 이 픽셀들은 식 (14)로 표현되는 역원근변환에 의해 실세계좌표로 전환된다. 전환되는 과정에서는 $\bar{\gamma}$의 값을 알 수가 없으므로 $\bar{\gamma}=0$로 가정한다. 즉, 실세계좌표계의 X축을 카메라의 방향으로 설정한다. 그림 15는 도로영상이 역원근변환을 통하여 실세계좌표계로 변환되는 과정을 보여주고 있다.

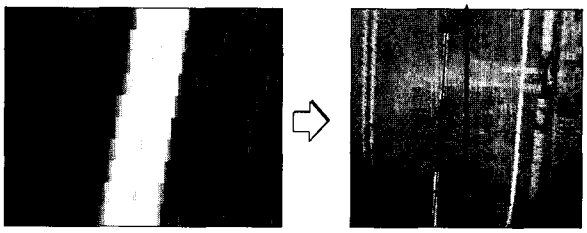

그림 15. 영상의 실세계 좌표계로의 변환

역원근변환을 통해 전환된 좌표들은 직선차선을 구성하는 점들이므로, 이 점들이 이루는 직선을 결정할 수 있다. 차선을 나타내는 직선은 다음과 같이 표현된다.

$$x\cos\theta-y\sin\theta+\rho=0 \tag{17}$$

여기에서 θ와 ρ값은 다음 식으로 표현되는 χ^2을 최소하도록 결정하였다.

$$\chi^2=\sum_i(x_i\cos\theta-y_i\sin\theta+\rho)^2 \tag{18}$$

여기에서 (x_i, y_i)는 차선을 구성하는 픽셀들이 실세계좌표계로 전환된 좌표들을 의미한다. 카메라와 차량이 정확하게 정렬되어 있다면, 그림 15에서 볼 수 있듯이, 전방오차(y_a)와 편요각(ψ)은 다음의 관계식에 의해 결정된다.

$$y_a=|(l_a-l_c)\cos\theta+\rho|-\frac{L}{2} \tag{19}$$

$$\psi=-\bar{\gamma}=\theta-\frac{\pi}{2} \tag{20}$$

여기에서 l_c는 차량의 무게중심으로부터 카메라까지의 거리이다.

다) 슬라이딩모드 횡축제어 알고리듬

본 절에서는 식(12)로 표현되는 차량모델에 불확실한 파라미터들이 존재하므로 이러한 불확실성에 대하여 안정성을 보장할 수 있는 슬라이딩 모드 제어를 이용한 횡축제어에 대하여 설명한다. 슬라이딩 모드 제어의 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 슬라이딩 평면을 설정하는 것이며 다음과 같이 나타난다.

$$S = \dot{e}(t) + 2e(t) = 0 \tag{21}$$

여기에서 $e(t)$는 측정된 차량의 전방오차와 주행경로에서 얻어진 원하는 위치 사이의 추적 오차로 다음과 같이 정의된다.

$$e(t) = y_a(t) - y_{ad}(t) \tag{22}$$

식(12)로부터 $\ddot{y}_a$은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{y}_a = f(\dot{y}_a, \phi, r) + B_1\delta \tag{23}$$

여기에서 $f(\dot{y}_a, \phi, r) = A_{22}\dot{y}_a - v_x A_{22}\phi + A_{24}r$, $B_1 = b_1 + l_a b_2$ 이다.

$|f(\dot{y}_a, \phi, r)| - f^0(\dot{y}_a, \phi, r)| \le F(\dot{y}_a, \phi, r)$을 만족하는 $F(\dot{y}_a, \phi, r)$는 아래와 같이 결정된다.

$$F = \alpha \cdot |f^0(\dot{y}_a, \phi, r)| \tag{24}$$

여기에서 $f^0(\cdot)$은 $f(\cdot)$의 노미널 값을 의미한다. 마찬가지로 B_1의 변화범위도 다음과 같이 결정된다.

$$|B_1 - B_1^0| \le \alpha \cdot |B_1^0| \tag{25}$$

여기에서 B_1^0은 B_1의 노미널 값이다.

그리고 식(19), (20)에서 $\dot{S}$은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\dot{S} = f(\dot{y}_a, \phi, r) + B_1\delta - \ddot{y}_{ad}(t) + 2\dot{e}(t) \tag{26}$$

식 (19)에서 도달 조건 (Reaching condition)($S\dot{S} < -\eta|S|$, $\eta > 0$)을 만족하는 슬라이딩 모드 제어 입력은 아래와 같다.

$$\delta = B_1^{0-1}\{-f^0(\dot{y}_a, \phi, r) + \ddot{y}_{ad} - 2\dot{e} - K\,sgn(S)\} \tag{27}$$

여기에서 $sgn(S) = \begin{cases} 1 & \text{for } S > 0 \\ -1 & \text{for } S < 0 \end{cases}$ 이며 K는 시스템의 불확실한 항을 보상하는 부분으로 식(28)과 같이 주어진다.

$$K \ge \eta + \frac{2}{1+\alpha}F(\dot{y}_a, \phi, r) + \frac{\alpha}{1+\alpha}|\ddot{y}_{ad} - 2\cdot\dot{e}|, \quad \eta > 0 \tag{28}$$

식(27)로 표현되는 제어입력은 슬라이딩 평면근처에서 $sgn(S)$의 불연속성에 의하여 채터링 현상이 나타날 수 있다. 따라서 식(27)로 표현되는 제어입력을 슬라이딩 평면 근처의 경계 영역 내에서 연속함수인 $sat(S)$를 이용하여 채터링 현상을 줄일 수 있도록 설계한다. 이 때의 제어입력은 다음과 같다.

$$\delta = B_1^{0-1}\{-\hat{f}(\dot{y}_a, \phi, r) + \ddot{y}_{ad} - 2\dot{e} - Ksat(S)\} \tag{29}$$

여기에서 $sat(S) = \begin{cases} \frac{S}{\Phi} & \text{for } |S| < \Phi \\ sgn(S) & \text{for } |S| \ge \Phi \end{cases}$, $\Phi > 0$ 이다.

2.3 군집주행시스템(Platoon System)

군집주행시스템[2, 8-10, 12-16]은 적정 수준의 차량군을 근거리의 간격을 유지하면서 동시에 제어하는 시스템이다. 이러한 군집주행시스템은 날로 급증하는 교통수요를 충족시키고 차량 운행의 안전성을 향상시킬 수 있는 효과적이고 안전한 시스템으로 인식되고 있으며 현재 미국, 유럽 등의 선진국을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 군집제어 시스템의 대표적인 연구는 미국의 California PATH (Partners for Advanced Transit and Highways)를 들 수 있으며, 이미 San Diego에서 실시된 Demo '97에서 차량군집제어장치의 성능을 직접 보여준 바 있다. 여기서 PATH는 차량간 통신과 radar를 이용한 전방거리 탐지방식을 통하여 약 6.5 미터의 고정된 차량간격을 유지하고 8대의 차량이 최고 시속 100km/h로 주행하는 것을 보여주었다. 국내에는 아직 차량군집제어장치에 대한 가시적인 연구성과가 거의 없는 상태에서 1998년에 건설교통부가 유치한 ITS World Congress에서 포항공대-현대자동차-대우자동차 등이 차량군집주행 Demo를 보인 것이 국내에서는 최초의 성과라 할 수 있다. 비선형성과 파라미터의 시변성이 강한 다수의 차량을 제어하는 군집주행시스템은 개별 차량의 안정성과 동시에 전체 차량군의 안정성을 보장해야 하는 어려움을 갖고 있다. 따라서 개별 차량의 안정성과 함께 전체 차량군의 안정성을 보장하는 알고리듬이 필요하다. 일반적으로 지능순항제어시스템과 달리 이러한 차량군의 안정성은 차량간의 많은 주행정보의 교환에 의해 이루어지며 이는 결과적으로 차량간 혹은 노차간 통신시스템의 필요성을 의미한다. 즉, 지능순항제어시스템의 경우는 선행차량의 속도 및 가속도 정보를 이용할 수 없는 데 비해 군집주행시스템은 선행차량의 주행정보를 통신에 의해서 이용할 수 있다.

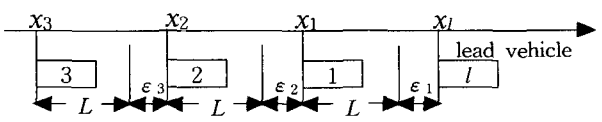

그림 16. 4대의 차량을 이용한 군집주행

그림 16은 4대의 차량을 이용한 군집주행의 예를 보이고 있다. 그림에서 x_i는 i-번째 차량의 위치이며, L은 원하는 차간 간격, 그리고 ε_i는 i-번째 차량과 $(i-1)$-번째 차량 사이의 거리오차이다. 군집주행시스템의 경

우 다수의 차량이 동시에 근간격을 유지하면서 주행하므로 차량간격제어에 있어서 string stability[2, 8, 9, 12-16]가 매우 중요한 요소이다. String stability란 전방차량의 거리오차가 후방으로 전파되면서 감소하여야한다는 것을 의미한다. 본고에서는 state feedback linearization에의한 간략화된 차량 모델과 constant spacing strategy를 이용한 군집주행 제어에서 string stability를 살펴본다. 다음의 식은 간략화된 모델을 나타내고 있다.

$$\dot{x}_i = \frac{u_{i,eff} - c_i \dot{x}_i^2 - f_i}{M_i} \tag{30}$$

여기서 $u_{i,eff}$는 유효제어토크 입력이며, c_i는 aerodynamic drag coefficient, f_i는 구름저항(rolling resistance), 그리고 M_i는 차량의 유효질량을 나타낸다. 이때 토크입력 u_i를 다음과 같이 설정하면 차량의 동역학은 식 (32)와 같다.

$$u_{i,eff} = c_i \dot{x}_i^2 + f_i + M_i u_i \tag{31}$$

$$\dot{x}_i = u_i \tag{32}$$

2.3.1 Autonomous Control Strategy

다음의 식으로 주어진 제어를 생각해보자.

$$u_i = -k_v \dot{\varepsilon}_i - k_p \varepsilon_i + k_1 \dot{x}_i \tag{33}$$

위의 식에서 제어이득 k_v, k_p, k_1은 string stability와 시스템 성능을 고려하여 설정되어야 한다. 위와 같은 제어를 사용할 경우 차간거리의 전달함수는 다음과 같이 나타난다.

$$g(s) = \frac{\varepsilon_1}{v_l}(s) = \frac{-s - k_1}{s^2 + (k_v + k_1)s + k_p} \tag{34}$$

$$h(s) = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i-1}}(s) = \frac{k_v s + k_p}{s^2 + (k_v + k_1)s + k_p} \tag{35}$$

이때 개별차량의 안정성을 위해서는 $k_v + k_1 > 0$, $k_p > 0$을 만족해야한다. 주목할 점은 정상상태의 오차를 없애기 위해서는 $k_1 = 0$이 되어야하며 strign stability를 만족하기 위해서는 $k_1 \neq 0$이라는 조건이 필요하다. 그러므로 식 (33)으로 주어진 제어법칙은 정상상태 오차를 없애면서 동시에 string stability를 만족할 수 없다. 만약 원하는 차간거리를 제어차량의 속도에 선형으로 변화시킨다면 string stability를 만족할 수 있으며 이는 전술한 지능순항제어시스템에서 거리제어의 기본이론을 제공하고 있다.

2.3.2 Semi-Autonomous Control Strategy

Semi-autonomous 제어규칙은 다음과 같이 나타난다.

$$u_i = k_a \dot{x}_{i-1} - k_v \dot{\varepsilon}_i - k_p \varepsilon_i + k_1 v_i \tag{36}$$

위의 식에서 보듯이 Semi-autonomous 제어의 경우는 전방차량의 가속도 정보를 알고있어야 한다. 이때 거리오차의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$g(s) = \frac{(k_a - 1)s - k_1}{s^2 + (k_v + k_1)s + k_p} \tag{37}$$

$$h(s) = \frac{k_a s^2 + k_v s + k_p}{s^2 + (k_v + k_1)s + k_p} \tag{38}$$

식 (37), (38)에서 정상상태 오차를 없애려면 $k_1 = 0$이어야 하며, 각 차량의 안정성을 보장하려면 $k_v + k_1 > 0$, $k_p > 0$을 만족해야한다. 또한 strign stability를 위해서는 $k_a = 1$이라는 조건을 만족해야 한다. 그러나 이 알고리듬은 신호처리 및 계산상의 시간지연으로 인하여 string stability의 강인성을 보장하지 못한다는 단점을 지니고 있다.

2.3.3 Semi-Autonomous Control with knowledge of vehicle ID

다음으로 전방차량의 가속도와 함께 각 차량이 자신의 ID(차량군에서의 자신의 위치)를 알고있는 경우 다음과 같은 제어를 생각해보자.

$$u_i = k_a \dot{x}_{i-1} - k_{v_i} \dot{\varepsilon}_i - k_{p_i} \varepsilon_i \tag{39}$$

$$h(s) = \frac{k_a s^2 + k_{v_{i-1}} s + k_{p_{i-1}}}{s^2 + k_{v_i} s + k_{p_i}} \tag{40}$$

이때 각 차량의 안정성은 k_{v_i}, $k_{p_i} > 0$이라는 조건에 의해 보장할 수 있으나 string stability를 만족하기 위해서는 차량군의 후방으로 갈수록 제어이득이 증가한다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 위의 제어규칙을 사용할 경우 전체 차량군 크기에 제한이 따르며 따라서 도로의 수용능력에 제한이 생기는 단점을 가진다.

2.3.4 Control with lead vehicle information

마지막으로 각 제어차량이 전방차량과 함께 선두차량의 주행정보를 알고 있는 경우 다음과 같은 제어를 생각해보자.

$$u_i = k_a \dot{x}_{i-1} - k_v \dot{\varepsilon}_i - k_p \varepsilon_i + k_l a_l - c_v(\dot{x}_i - v_l) - c_p(x_i - x_l + \Sigma_{j=0}^{i} L_j) \tag{41}$$

이때 거리오차의 전달함수는 다음과 같다.

$$h(s) = \frac{k_a s^2 + k_v s + k_p}{s^2 + (k_v + c_v)s + k_p + c_p} \tag{42}$$

식 (42)로부터 각 제어이득의 적절히 선택하면 string stability를 만족함을 알 수 있다. 아울러 (41)에서 나타난 제어규칙은 신호처리 및 계산에 의한 작은 시간지연에 대하여 강인한 성능을 가지고 있다.

3. 결론

지금까지 지능형교통시스템의 일환으로서의 첨단차량제어시스템의 개발현황과 기본적인 제어알고리듬에 대하여 살펴보았다. 첨단차량제어시스템은 지능형교통시스템에서 주로 차량의 자동화·자동화를 통하여 당면한 각종 교통문제를 해결하고 차량주행의 안전성과 도로의 수용능력을 향상시키는 시스템이다. 첨단차량제어에서 가장 기본적인 시스템으로 종축 및 횡축제어시스템을 들 수 있으며 본고에서는 종축제어시스템으로서의 지능순항제어시스템과 횡축제어시스템으로 차선유지 및 변경시스템을 살펴보았다. 아울러 도로의 수용용량을 획기적으로 개선시키며 안전성과 여러 면에서 현재·많은 관심을 끌고 있는 군집주행시스템을 알아보았다. 첨단차량제어시스템의 국내 개발현황은 아직 초보적인 단계라고 할 수 있으나 다수의 대학 연구소와 자동차 회사를 중심으로 그 중요성을 인식하고 활발한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구가 성과를 거두고 국가적으로 21세기 선진교통기술을 확보하기 위해서는 정부의 적극적인 지원과 산·학·연 연계에 의한 체계적이고 통합적인 연구가 요구된다.

참고문헌

[1] Petros A. Ioannou and C. C. Chien, "Autonomous Intelligent Cruise Control," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42(4), pp. 657-672, 1993.

[2] P. Ioannou and Z. Xu, "Throttle and Brake Control Systems for Automatic Vehicle Following," IVHS Journal, Vol. 1(4), pp. 345-377, 1994.

[3] Z. Bareket and P. Fancher, "Controlling Headway Between Successive Vehicles," AUVS '94, 1994.

[4] D. Cho and J. K. Hedrick, "Automotive Powertrain Modeling for Control," ASME Transactions on Dynamic Systems, Measurements, and Control, Vol. 111(4), pp. 568-576, 1989.

[5] J. K. Hedrick, D. H. McMahon, D. Swaroop, "Vehicle Modeling and Control for Automated Highway Systems," California Path Report, UCB-ITS-PRR-93-24, 1993.

[6] Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I, II," IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics Vol. 20(2), pp. 404-435, 1990.

[7] Guang-Chyan Hwang and Shih-Chang, "A stability approach to fuzzy control design for nonlinear systems," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 48, pp. 279-287, 1992.

[8] G. D. Lee and S. W. Kim, "Longitudinal Control System for a Platoon of Vehicles using a Fuzzy-Sliding Mode Algorithm," Preprint, 2000.

[9] G. D. Lee, S. W. Kim, Y. U. Yim, J. H. Jung, S. Y. Oh, and B. S. Kim, "Longitudinal and Lateral Control System Development for a Platoon of Vehicles," IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 605-610, Tokyo Japan, 1999.

[10] H. Raza and P. Ioannou, "Vehicle Following Control Design for Automated Highway Systems," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 16(6), pp. 43-60, 1996.

[11] Seung Ho Jang, Gu-Do Lee, and Sang Woo Kim, "Vision-Based Lane Change Maneuver Using Sliding Mode Control for a Vehicle," Preprint, 2000.

[12] Shahab Sheikholeslam, Charles A. Desoer, "Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles; III: Nonlinear Model," California Path Report, UCB-ITS-PRR-90-1, 1990.

[13] S. E. Shladover, "Longitudinal Control of Automotive Vehicles in Closed-Formation Platoons," Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 631-672, 1991.

[14] Shahab Sheikholeslam, Charles A. Desoer, "A System Level Study of the Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles," Transactions of ASME, Vol. 114, pp. 286-292, 1992.

[15] J. K. Hedrick, D. H. McMahon, D. Swaroop, V. Garg, J. C. Gerdes, D. B. Maciuca, T. T. Blackman, P. P. Yip, "Longitudinal Control Development for IVHS Fully Automated and Semi-Automated Systems: Phase I," MOU-101, PATH Final Report, 1994.

[16] J. K. Hedrick, V. Garg, J. C. Gerdes, D. B. Maciuca, D. Swaroop, "Longitudinal Control Development for IVHS Fully Automated and Semi-Automated Systems: Phase II," California Path Report, UCB-ITS-PRR-96-1, 1996.

이구도

1996년, 1998년 포항공대 전자전기공학과에서 학사, 석사학위를 받음. 1998~현재 동대학원 박사과정 재학중. 주요 관심분야는 첨단차량제어, 지능제어, Hybrid Control 등임.

김상우

1983년, 1985년, 1990년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과에서 학사, 석사, 박사학위를 받음. 1991년 제어계측 신기술 연구센터 연구원. 1993년 호주 국립대학교 방문교수. 1992~현재 포항공과대학교 전자·컴퓨터공학부 조교수. 주요 관심분야는 강인제어, 축차모델링, 공정자동화, 무인화 운행기법 등임.