차량 제어 기술 및 선진 연구 동향

Vehicle Dynamics Control Applications to Automobiles: Survey and Some New Trends

이 경 수*, 이 준 영
(Kyong-Su Yi^{1,*} and Jun-Yung Lee¹)

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

Abstract: This paper describes control applications in automobiles. Many aspects of automotive applications of advanced control methods, which include suspension systems, stability control systems, engines, hybrid vehicle control systems, electric vehicle controls systems, advanced driver assistance systems and automated driving control systems, are reviewed. The control methods used in each area are briefly reviewed to help readers understand the applicability and effectiveness of these methods. In addition, some new trends in the research of automotive applications are described.

Keywords: vehicle dynamics control, intelligent vehicle, advanced vehicle control technology, advanced control applications

I. INTRODUCTION

20세기 초 근대적 자동차가 개발된 이후 점차 자동차는 우리에게 단순한 이동수단으로서의 가치를 뛰어넘어, 운전자에게 보다 편안하고 안전한 주행환경을 제공함으로써 우리 삶에 있어 필수불가결한 존재로 자리매김하고 있다. 하지만 전 세계적으로 인구가 증가하면서 이에 따른 자동차 밀도의 급진적인 증가로 여러 가지 사회문제들이 야기되고 있다. 자동차 밀도의 증가에 따른 교통 사고의 증가로부터 운전자의 안전 및 편의를 향상시키기 위해서 근래의 센서와 액츄에이터의 발전과 함께 다양한 안전 제어 시스템들이 개발되고 있다. 또한 자동차 밀도 증가로 인한 도로 정체로 인해 소모되는 에너지 자원 낭비 및 공해의 증가 등의 사회문제들을 해결하기 위하여 하이브리드 자동차 및 전기자동차에 대한 수요와 요구가 증가하였고, 이에 따라 하이브리드 차량 제어 기술 및 전기자동차 제어 기술에 대한 관심 역시 증가하는 추세이다. 그리고 운전자에게 보다 안락하고 안전한 주행환경을 제공하기 위한 지능형 운전자 지원 시스템에 대한 연구 역시 활발하게 진행되고 있으며 궁극적으로는 자율 주행 제어 시스템에 대한 연구로 확대되어가는 추세이다.

본 논문에서는 차량에 적용되고 있는 다양한 제어 기술들, 예를 들어 운전자의 승차감을 위한 서스펜션, 차량의 안정성을 위한 제어 기술과 차량 구동을 위한 엔진 제어 기술,의 현황 및 연구 동향 대해 언급하고, 도로 정체를 감소시키기 위한 군집 주행 기술, 환경 및 에너지 문제에 대비한 하이브리드 차량 제어 기술 및 전기자동차 제어 기술의 현황 및 최근 연구 동향에 대해 서술하였다. 또한 운전자의 안전 및 편

의 향상을 위한 지능형 운전자 지원 시스템의 현황 및 연구 동향에 대해 살펴보고 더 나아가 자율 주행 기술 구현을 위한 연구 동향에 대해 서술하였다.

II. VEHICLE DYNAMICS CONTROL

1. Suspension

운전자 및 승객의 승차감을 위한 능동 및 반능동 제어 서스펜션에 대한 연구는 지난 30년간 매우 활발히 진행되어 왔다[1]. 서스펜션은 유압이나 전기 시스템으로 이루어진 액츄에이터에 도로 가진에 대하여 적절한 에너지를 부여함으로써 차량의 승차감과 안정성을 부여할 수 있다[2]. 조절 가능한 댐퍼를 사용한 반 능동 서스펜션(semi-active suspension) 제어에 대한 연구 또한 활발히 이루어졌다[3]. 반 능동 서스펜션은 능동 서스펜션(active suspension)에 비해 에너지 소모가 적은 이점이 있으나, 성능 면에서는 뒤쳐지는 단점이 존재한다[4].

최근 Bose Corporation에서 전자기 능동 서스펜션에 대한 연구가 진행되었다. Bose의 능동 서스펜션은 각각 전자기 모터와 전력 증폭기로 구성되어 있다[5]. Michelin에서는 구동 모터를 이용한 전기 능동 서스펜션을 제안하였다[6]. Park은 모터를 댐퍼로 이용한 능동 서스펜션 제어를 제안하였고, 이를 쿼터 모델로 시뮬레이션 단계까지 고안하였다[7]. 기존 유압 댐퍼의 사용과는 다르게 전기 시스템을 이용한 댐퍼는 제어 응답 속도가 매우 빠르기 때문에 제어적인 측면에서의 활용도가 매우 높다. 몇몇 연구는 전기 모터 기반의 댐퍼를 사용한 서스펜션을 일반 차량에 장착하여 제어한 결과를 제안하기도 하였다[8]. 모터를 사용한 서스펜션은 유압 서스펜션에 비해 제어가 튜닝이 용이하기 때문에 차량의 승차감 및 안정성에 대해서도 제어가 가능하다.

모터 기반의 능동 서스펜션 제어는 반 차량 기반의 차량 모델을 사용하여 승차감 및 차량 안정성 제어를 모두 할 수 있도록 하였다. 그림 1은 반 차량 기반의 모델을 간단히 나타낸 것이다. 기존의 1/4 차량 기반의 모델과 다르게 반 차량 기반의 모델은 차량의 롤 각 까지도 고려할 수 있기 때문에

* Corresponding Author

Manuscript received January 24, 2014 / accepted February 3, 2014

이경수, 이준영: 서울대학교 기계항공공학부

(kyi@snu.ac.kr/wmsdud85@snu.ac.kr)

※ 본 연구는 BK21 프로그램, SNU-IAMD, 및 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (2009-0083495) 에 의하여 연구되었음.

그림 1. 반 차량 기반의 서스펜션 모델.

Fig. 1. Half car based suspension model.

서스펜션 제어 시 차량의 선회 성능 및 안정성 향상에 도움이 된다[9]. 보통 볼스크류에서 발생하는 마찰력의 크기는 20N 에서 30N 정도이다. 마찰 추정기는 볼스크류와 모터의 상대적인 움직임에 의해서 발생하는 볼 베어링 액추에이터에서의 마찰력을 추정하는 것이다. 이러한 마찰력은 결코 작지 않은 값을 갖는 것으로 나타났다. 그래서 능동형 서스펜션을 정밀하게 제어하기 위해서는 이러한 마찰력을 고려해야 하는 것이 필수적이다[10].

근래에는 차량주행 모드 별 전동식 액추에이터 능동댐퍼 제어 알고리즘에 관한 연구도 활발히 진행 중이다. 작동 알고리즘은 운전자의 입력에 따라서 차량의 주행모드가 결정되는 식이다. 일반도로에서의 순항 상황의 경우 수동댐퍼 모드로 작동이 되고, 상하운동 및 선회시 롤 혹은 피치가 많이 발생되거나 상하운동시 발생하는 도로의 충격이 차체에 크게 전달될 때 능동댐퍼 모드로 전환이 되는 알고리즘을 사용한다. 능동형 댐퍼 모드는 세부적으로 차체의 롤각도가 기준 값보다 클 때 이 각도를 제어하는 롤 제어모드와, 피치각도가 기준 값보다 클 때 피치를 제어하는 모드; 그리고 차체 가속도가 기준 값보다 클 때 차체를 제어 하는 승차감 제어 모드로 구성된다. 따라서 순항중인 상태에서는 댐퍼가 수동 모드로 작동이 되고 차체를 제어할 필요가 있을 경우에만 능동적으로 적절한 모드를 선택하여 작동되어 승차감은 물론 차량의 안정성과 에너지 효율을 향상 시키는 효과가 있다.

더 나아가 preview control 을 능동형 댐퍼에 대한 연구도 진행되고 있다. 이 제어 기법은 차량 전방의 노면 정보를 기반으로 하여 필요한 제어의 양의 결정 하는 방법이다. 그리

고 동시에 액추에이터 delay 를 보상시키는 방향으로 제어를 하여 시스템으로부터 준비를 하게한다[11]. 그림 2는 preview suspension을 탑재한 차량의 개략도이다[12].

2. Stability Control

2.1 Rollover Prevention

차량 전복사고는 전체 교통사고 발생비율과 비교하여 그 빈도는 높지 않지만, 사고가 발생하였을 경우 탑승자의 중상이나 사망의 비율이 매우 높다. 미국 고속도로 안전 관리국(NHTSA)의 보고서에 따르면 2002년 한 해 미국 내 교통사고에서 전복사고가 차지하는 비율은 2.7%에 불과했지만, 이로 인한 사망자의 비율은 전체 사망자의 33%에 이르는 것으로 조사됐다[13]. 이와 같은 이유로 차량 전복 사고를 줄이기 위하여 차량 전복 사고에 관련된 체계적인 자료 분석 및 전복 방지를 위한 능동 안전 시스템 개발에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 차량 전복 방지 시스템은 크게 두 단계로 분류된다. 첫 단계는 차량 전복 위험 판단이고, 두 번째 단계는 차량 전복 방지 제어 분야이다.

초기 연구에서는 차량 전복 위험 판단에 static rollover threshold 개념이 사용되었다. Time To Rollover는 현재 조향 입력이 일정하다고 가정할 때 차량의 롤 각(roll angle)이 임계 값에 도달할 때까지 걸리는 시간이다[14]. 이 당시에는 전복 방지 제어 알고리즘으로 Time To Rollover를 기반으로 한 direct yaw moment control 방식이 제안되었다[15]. 이러한 방식들은 정상상태에서만 유용하다는 단점을 지닌다.

Time To Rollover의 단점을 보완하는 차량 전복 위험 판단 방법으로, vehicle roll model 기반의 roll estimator를 이용한 RI (Rollover Index)가 제안되었다[16]. 횡방향 가속도를 측정하여 롤 각을 추정하는 방법은 간단하고, 일반적인 선회 상황에서 우수한 성능을 보이지만 차량 파라미터가 변하거나 큰 롤 각이 발생하거나 표면이 고르지 못한 도로에서는 추정 성능이 떨어진다. 롤 각속도(roll rate)를 측정하여 롤 각을 추정하는 방법은 차량 파라미터에 무관하고, 롤 각이 빠르게 변하거나 클 때에 우수한 성능을 보이지만, 센서 바이어스(sensor bias)의 영향을 크게 받고 롤 각이 천천히 변할 때는 추정 성능이 떨어진다. 이에 Adaptive closed-loop observer를 통하여 두 방법의 단점을 보완한 롤 각 추정기를 제안하였다. 또한 추정된 롤 각과 측정된 횡방향 가속도, 롤 각속도의 함수로 RI를 제안하였다. Yang은 차량 무게중심의 위치, 전복을 일으키는 에너지, 타이어의 수직하중을 이용하여 각각의 지수를 만들고 그것을 적절히 결합하는 방법으로 RI를 계산하였다[17].

Larish는 RI를 하중 전달 비율(LTR)로 정의 하고 횡방향 가속도와 롤 각속도를 측정하여 LTR을 표현하는 방법을 소개하였다[22]. 이어서 현재 횡방향 가속도만을 측정하여 예측된 LTR(PLTR)을 제시하였다. PLTR 기반 전복 방지 알고리즘은 LTR기반 알고리즘보다 먼저 차량 전복 위험을 예측하여 더 안전한 주행을 가능하게 하였다.

차량 전복 방지 제어 알고리즘도 다방면으로 연구되어 왔다. 기본적으로 차량의 높이가 높을수록, 횡가속도가 클수록, 타이어 횡력이 클수록 차량 전복의 위험성은 높아진다. 이에 능동 서스펜션을 통한 롤 각 제어, 차량 안정성 제어 모듈(VSC: Vehicle Stability Control)를 통한 횡력과 횡가속도 제어로

그림 2. Preview suspension 시스템 차량의 개략도[12].

Fig. 2. System components of preview suspension [12].

전복을 방지하는 제어 로직이 연구되었다[18]. 능동형 서스펜션은 차량의 전복을 막는데 효과적이지만 차량의 방향 안정성이 상실된다는 단점이 있다. 이에 VSC를 결합하여 이러한 단점을 보완하였다.

Yoon은 roll angle-roll rate phase plane에서 분석한 rollover 위험성을 나타내는 RI를 제안하고, VSC를 통한 RI 기반의 차량 안정성 제어 알고리즘을 제안하였다[19]. 이 알고리즘에선 RI가 임계 값을 넘어가면 RI가 목표 값으로 떨어질 때까지 ROM (Rollover Mitigation) control이 작동하고 그렇지 않을 땐 lateral stability control을 작동하는 방식을 사용하였다.

Yoon은 전복 방지를 위해 VSC와 가변 감쇄력 제어시스템(CDC: Continuous Damping Control)를 결합한 통합 차시 제어(UCC: Unified Chassis Control) 전략을 제안했다[20]. 또한 전복 방지뿐만 아니라 횡방향 안정성을 동시에 확보할 수 있는 알고리즘이 제안되었다[21].

2.2 ABS

차량이 주행하고 있을 때 4개의 바퀴에 동일한 하중이 걸리지 않는다. 이 때 운전자가 급제동을 하게 되면 일부 바퀴에 바퀴 잠김 현상이 발생하고 이로 인해 차량이 차체 안정성을 잃고 옆으로 미끄러져서 운전자가 차량의 거동을 제어할 수 없게 된다. 이러한 문제를 방지하기 위하여 차량의 바퀴가 잠기지 않도록 하는 제어 장치가 ABS (Anti-lock Brake System)이다. ABS의 기능을 확장시킨 차체 안정성 제어 장치로는 TCS (Traction Control System)가 있다. ABS가 차량의 제동력만을 조절하는 제어 장치라면 TCS는 차의 제동력뿐만 아니라 엔진으로부터의 구동력도 조절하는 제어 장치이다. TCS는 미끄러운 노면에서 발진 또는 가속을 할 때 노면과 타이어간의 정지 마찰력을 개선하여 차량의 궤적 유지성을 개선시키고, 노면과 타이어사이의 접지 마찰력에 따라 엔진토크를 자동으로 조정하여 구동륜이 미끄러지는 것을 방지함으로써 선회 안전성을 개선시켜주는 기능을 한다.

ABS와 TCS에 대한 초기 연구 개발은 Kachroo 와 Shurr에 의해서 수행되었다[24,25]. 일반 상용 ABS 시스템은 센서, 제어기 및 브레이크 압력 조절기로 구성된다. 차량의 상태를 추정하기 위해 차륜 각속도 및 가속도 정보를 사용한다. 이러한 알고리즘은 수학적으로보다는 실험적으로 설계하는 것이 일반적이었는데 타이어와 도로의 불확실성으로 인해 강건성을 확보하기가 어렵다. Tan은 Lyapunov 분석을 통해 안정성을 분석하고 슬라이딩 모드 제어 기법(sliding mode control method)을 구동력 제어에 적용하였다[26]. 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용하여 목표 슬립률을 추종할 때에는 파라미터의 불확정성에 대한 강건성을 확보할 수 있었지만 지연에 의한 진동을 막을 수 없었다.

Tan은 진동을 해결하기 위하여 이산시간 강건 제어를 제안하였다[27]. 이 연구의 핵심은 타이어-노면 특성을 실시간으로 추정하여 추종해야 하는 최적의 슬립률을 결정하는 것이다. 또한 Tan과 Tomizuka는 weighted least square method를 이용한 피크 추정 알고리즘을 개발하여 combined sliding model control를 개발하였다[28]. Taheri는 Lyapunov stability에 기반한 비선형 ABS제어방식을 제안하였고[7], Harifi는 통합 switching surface를 이용한 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하여 진동을

감소시켰다[23].

변화하는 도로 조건에서 제어 전략을 적절히 변경하기 위한 방법으로 신경망 및 fuzzy 로직이 사용되었다. Zhang은 외란의 영향과 도로 변화에 의한 차량 동역학적 불확정성을 줄이기 위한 neuro-adaptive unit을 제안하였다[30]. 이 연구에서는 변화하는 도로 조건하에 제안된 제어 전략의 제동성능에 대한 분석을 진행하였다.

2.3 VSC

앞 절에서 소개한 ABS와 TCS 기능을 통합하여 차체 자세를 운전자가 원하는 방향으로 움직이도록 도와주는 안전 제어 장치가 VSC (Vehicle Stability Control) 이다. VSC는 차륜속도센서, 조향각센서, 압력센서, 가속페달센서, 선회속도센서, 측방향 가속도센서 등을 통해 차량이 어떻게 움직이고 있는지 판단하고 정상적인 주행 상태인지, 아니면 차량이 미끄러지는 중인지를 판단하여 제동과 구동에 능동적인 제어 개입을 하는 제어 장치이다. VSC 시스템이 90년대 중반에 소개된 이후 시장의 수요가 빠르게 증가하고 있다. 이에 따라 차량의 한계 상황에서의 제어와 차량의 거동에 대한 중요한 연구들이 진행되었다[31-34].

Leffler (BMW)는 1994 년에 한계 거동에서 차량을 안정화시키기 위해 스로틀 및 브레이크를 제어하는 DSC (Dynamic Stability Control) 시스템을 도입했다[35,36]. Zanten은 노면 마찰 계수를 고려하여 차량의 횡미끄럼각과 요속도를 제한하는 차량 안정성 제어 시스템을 제안하였다[37]. Heeß는 산업적인 측면에서 ABS와 TCS를 통합하고 차량의 서스펜션과 조향까지 사용하는 제어 시스템을 제안하였다[38]. 이 연구는 4륜 ABS/TCS로 적용되어 후에 Bosch의 VDC (Vehicle Dynamics Control system)로 발전하게 된다. 실제 VDC 시스템은 차량이 제동 중일 때뿐만 아니라 감, 가속 등의 상황에서도 차량의 거동을 제어한다.

Shibahata는 차량의 조종안정성을 대표하는 횡슬립각의 영향도를 분석하는 β -method를 제안하였다[39]. 이 연구에서는 조향각의 변화에 따른 차량의 요 모멘트 민감도가 차량의 횡슬립각이 커질수록 급격하게 감소하는 것을 보여준다. 따라서 요 제어를 위해서는 종방향 타이어 힘을 제어하는 것 효과적임을 이 연구를 통해서 알 수 있다. 또한, 차량 선회상황에서 한계 성능을 높이는 사시 제어에 대한 연구도 발표되었다[40]. 이 연구에서 차량의 안정성이 필요할 때는 전륜 브레이크를 제어하고 차량의 선회 한계 성능 향상을 위해서는 후륜 브레이크를 제어하는 것이 효과적임을 밝혀내었다.

Shino는 전기 자동차의 구동력과 제동력을 제어하여 차량의 안정성뿐만 아니라 조종성도 향상시키는 요 모멘트 제어기를 제안하였다[41]. 차량의 조종성과 안정성을 향상시키기 위하여 차량의 횡슬립각과 요속도의 목표 값을 추종하는 제어 방식을 사용하였다.

또한, 3 자유도 차량 모델 기반의 차등제동만을 이용하는 VSC가 발표되었다[42]. 이 연구에서는 요속도, 목표 요속도, 그리고 횡 슬립각으로 구성된 sliding surface를 가지는 슬라이딩 모드 제어 기법을 사용하여 한계 주행 조건에서 브레이크 작동을 통해 안정성을 더 잘 확보하는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

You는 gain-scheduled H_∞ optimal control에 기반한 차량의 횡방향 안정성을 확보하는 요속도 제어를 개발하였다[43]. 차량의 질량과 타이어 선회 강성에 대한 불확정성을 극복하여 차량의 안정성과 성능의 강건함을 보장하기 위하여 H_∞ 최적화 방법이 피드백 제어 입력 결정에 적용되었다.

3. Engine Control

3.1 Powertrain and Engine Models

그림 3은 엔진, 토크컨버터, 트랜스미션, 드라이브라인, 차체질량, 그리고 타이어를 포함하는 파워트레인 모델의 개략도이다[50]. 앞선 연구에서는 엔진/트랜스미션 컨트롤을 위한 파워트레인모델이 설계, 제시된바 있다. 이 모델에서 각 요소 모델들은 제어법칙의 적용이 가능하게끔 최대한 간략하게 모델링 되었다[44].

제어기설계를 위해 많은 엔진모델들이 제시된 바 있다 [60-62]. 일반적으로 엔진모델은 그 하위 요소로 intake manifold, combustion chamber, fuel-delivery system, 그리고 engine inertia를 포함한다[50]. 이러한 엔진모델들은 대부분 비선형성이 크고 정상상태 동력계 실험(steady-state dynamometer test)을 통해 얻어진 3차원 맵 형태로 구성된다. 엔진은 ETC (Electronic Throttle Control), EFI (Electronic Fuel Injection), spark timing, 그리고 EGR (Exhaust Gas Recirculation) valve 등 다양한 제어입력들을 지닌다.

3.2 Engine Control

Idle speed control과 같이 작동영역이 제한되어있을 때, 비선형 모델은 연속시간모델 또는 디지털제어기의 설계에 적절한 형태로 선형화할 수 있다[48]. 이러한 모델들은 시간 또는 크랭크 각을 기초로 할 수 있고 이러한 선형화 모델들은 LQ (Linear Quadratic) 제어기의 설계 방식에 사용될 수 있다[49]. 엔진제어에 있어서 중요한 문제 중 연소 기간 동안 공연 비 (AFR: Air to Fuel Ratio)에 대한 정확한 제어이다. 현재의 배출 기준을 만족하기 위해서, AFR은 반드시 stoichiometric 비율에 매우 근접해야만 한다. 이것은 TWC (Three-Way catalytic Converter)의 사용 때문에 특히 중요하다. 제어문제는 그 높은 비선형 동역학과 신호지연의 문제를 지니는 배기 매니폴드에 binary oxygen sensor에서 기인하다. 이에 대해 [51]에서는 슬라이딩 모드 제어 기법이 다음과 같은 장점을 지님을 보인

바 있다. 1)산소량 센서의 binary 또는 부호만을 지니는 신호에 대한 부합성 그리고 2)모델불확실성에 대한 강건성 확보를 직접적으로 고려할 수 있다는 점이다. 더 발전된 형태로써 dynamic observer를 활용하여 제어기의 성능을 향상시킨 바 있고 engine/dynamometer 설비를 이용하여 실험적으로 몇몇 비선형제어기의 성능을 비교하기도 하였다[52,53]. 또한 최근에는 action-depended heuristic dynamic programming 기법을 이용하여 모델을 사용하지 않고 AFR과 엔진토크를 제어하는 방식이 제시된 바 있다.

3.3 Transmission Modeling and Control

많은 제조업체에서는 전기신호를 사용한 트랜스미션제어를 통해 현재의 유압/기계식 제어방식과 같은 품질을 유지하면서 생산비용을 줄이려는 시도를 하고 있다. 트랜스미션제어를 위해 두 개의 planetary gear set으로 이루어진 모델이 제시된 바 있다[44]. 부드러운 shift 나 전륜차량에 대한 traction control을 위해서는 엔진과 트랜스미션에 대한 통합제어가 필요하다. 이 두 시스템의 높은 비선형성으로 인해 다시금 슬라이딩 모드 제어 기법이 이 문제에 대해 매우 적합한 방법으로 생각되고 있다. 이에 따라 엔진 스피드와 트랜스미션 입력 속도를 조절하기 위한 슬라이딩 모드 제어 기법이 throttle과 spark advance를 제어입력으로 활용하여 개발된 바 있다[46]. 또한 전기적으로 제어되는 트랜스미션에 대해 부드러운면서도 빠른 변속을 위해 적응 슬라이딩 모드 제어 기법이 개발되었다[54].

4. Platooning Control

군집 주행은 지능형 교통체계의 중요한 요소로서 여러 대의 차량이 선도 차량을 뒤따라 기차의 객차처럼 붙어서 주행하는 기술이다. 군집주행에서 군집은 도로를 주행하는 행위가 차량간 통신에 의해 조절되는 차량 집단을 뜻한다. 이때 군집의 첫 번째 차량을 그 군집의 리더라고 명칭 한다. 군집 리더의 역할은 도로에서 군집을 관리하고 인도하는 역할을 한다. 이러한 군집 주행은 협조제어의 수위에 따라 3가지 (Longitudinal platoon control, Semi-autonomous platoon control, Fully-autonomous platoon control) 로 분류 된다[55].

Longitudinal platoon control은 리더차량의 운전자는 조향 및 속도 제어를 직접 하여 리더의 역할을 수행하고 멤버 차량은 조향을 운전자에게 맡기고 속도만을 자동으로 제어하여 리더를 추종하는 군집주행을 말한다. Semi-autonomous platoon control은 이에 더하여 멤버 차량의 조향까지 자동으로 제어하는 군집주행을 뜻한다. Fully-autonomous platoon control은 멤버 차량뿐만 아니라 리더 차량의 주행까지 자율 주행하는 것을 뜻한다.

4.1 Longitudinal Platoon Control

앞에서 언급하였듯이 Longitudinal platoon control은 군집 멤버 차량의 운전자들을 전방차량과의 안전거리 유지임무로부터 자유롭게 해준다. 그림 4는 단일 차선 군집 주행 차량들을 나타낸다. 군집의 리더 L은 자차량의 거동을 군집 차량들에게 통신을 통해 알리고 군집 멤버 M도 각자의 주행 상태를 통신을 통해 알리게 된다. 그리고 이를 통하여 군집 주행하는 각 멤버들은 차량 사이의 안전거리를 유지하기 위하여 각자의 가속도와 속도를 제어한다.

그림 3. 차량파워트레인의 개략도[50].

Fig. 3. Schematic of vehicle powertrain [50].

그림 4. 군집 차량의 리더와 멤버차량들 [55].

Fig. 4. Platooning Vehicles [55].

차량 간격 정책은 두 가지 카테고리로 분류된다. 하나는 속도와 관계없이 두 차량 간의 거리를 일정하게 유지하는 방식이고 다른 하나는 속도에 따라 차량 간격 거리를 조절하는 방식이다. 차량 간격 정책에 대해 여러 가지 제어 전략들이 연구되었다[56,57]. 그리고 차량 거리를 일정하게 유지하는 전략을 사용하는 군집 차량들 만이 **String stability**가 보장된다는 것이 여러 연구들에 의해 증명되었다[58,59].

선행 차량 자동 추종 시스템은 군집주행을 위한 가장 기초 기술이다. 그래서 이에 대한 연구는 군집주행을 연구하는 대부분의 연구자들에 의해 제어 이론 관점에서 광범위하게 연구되었다. 이 기술을 연구하는 대부분의 연구자들은 다양한 PID 기법을 사용하였다[60]. PID 제어는 좋은 페루프 응답 특성을 가지고 있고 상대적으로 간단한 방법으로 제어기의 튜닝이 가능하다. 그리고 아날로그 시스템과 디지털 시스템 모두에 적용하기 용이하다. 그래서 선행 차량 자동 추종을 위해서 PID를 이용한 다양한 피드백 전략이 개발되었다. 시스템 설계자가 차량의 무게나 특성을 정확히 고려할 수 있다면 이러한 제어 방식은 완벽한 안전성과 빠른 수렴성을 가질 것이다. 하지만 불행히도 현실에서 차량의 무게와 특성은 승차 인원과 짐들에 의해 변한다. Swaroop는 두 대 이상의 차량으로 구성된 군집 주행 차량의 제어 안정성을 위협하는 불확실성들을 열거하고 그 해결책을 제시하였다[56].

시간지연으로 발생하는 불안전성을 제거하기 위해서 PID 제어기는 거리, 속도 그리고 가속도에 대한 common reference 필요하다. Huang과 Ren의 연구에 따르면 이런 기준을 따르는 자연적인 위치가 군집주행의 리더이다[61]. 모든 차량은 각자의 일반적인 기준이 있기 때문에 일부의 오차가 slinky effect로 인해 주행 중에 군집 주행하는 차량 뒤쪽으로 증폭되지 않는다. No는 그의 연구에서 차량 모델 내의 불확실성에 의해 야기되는 문제를 완화하기 위해서 Lyapunov function approach를 사용하였다[62]. 더욱이 제안된 Lyapunov controller는 오직 local communication link에 의존하기 때문에 리더 차량과 통신 문제가 발생하여도 대처가 가능하다.

4.2 Semi-autonomous Platoon Control

Semi-autonomous platoon에서는 군집의 리더가 모든 군집 멤버를 인도한다. 앞 세션의 Longitudinal platoon control에서는 도로가 완벽히 직선이라고 가정하였다. 하지만 군집 주행의 다음 단계인 Semi-autonomous platoon에서는 기본적으로 다양한 도로에 대해서 주행 가능하다. 이 단계의 군집 주행을 위해서는 멤버 차량이 방향에 대한 정보를 필요로 하기 때문에 전 보다 많은 양의 통신이 필요하다.

Semi-autonomous platoon 멤버의 차량 제어를 위해서는 종방향 제어 기능에 더하여 횡방향 제어를 해야 한다. 이때 횡방향 제어는 두 가지 주요 기능을 가진다. 첫 번째는 차선

그림 5. 자율주행 차량의 Safety cell [66].

Fig. 5. Safety cell of autonomous vehicle [66].

추종이다. 이는 1960년 초반부터 연구 되었고[63], 주목할 많은 연구들이 이루어졌다[64]. 차선 추종 하에서 주요한 제어 목표는 차선 중심으로부터 거리오차가 최소가 되도록 차선을 추종하며 다양한 주행 환경에서 좋은 승차감을 유지하도록 조향 제어를 하는 것이다[65]. 두 번째 기능은 차선 변경이다. 이 기능은 군집 주행의 분할 변경 및 차선 병합 과정의 일부이다. 엄밀히 말하면 군집 주행은 전방부, 이탈부, 후방부로 이렇게 세 부분으로 나누어져 있다. 이탈부 차량이 차선을 변경을 하면 나머지 두 부분은 다시 합쳐서 군집을 이루어 주행한다. 차선변경은 변경할 차선의 차량과 충돌하지 않을 만큼의 공간이 있는지 확인하는 작업이 필요하기 때문에 매우 복잡하다.

Ban은 그의 연구에서 Semi-autonomous platoon 중인 멤버 차량의 안전은 차량주위의 safety cell 이라고 불리는 영역을 얼마나 잘 준수하는지에 따라 결정된다고 언급하였다[66]. Safety cell은 그림 5와 같이 종/횡방향 안전거리의 조합으로 나타내어 진다. 그림에서 나타나 있는 d^x_{safety} , d^y_{safety} 값은 차량의 상태와 사용된 제어 알고리즘에 따라 결정된다.

다양한 road reference system 또한 연구되어 왔다. 가장 오래된 방식은 전선을 도로에 이식하여 교류 전류로부터 피드백을 받는 방식인 wire reference 전략이다. 차량은 감지기를 이용하여 자기장을 감지하고 이를 바탕으로 차량의 위치를 보정한다. 다른 방식으로는 광학 차선 시스템, 차선 추종 시스템, 다양한 radar와 vision 기반 시스템, 도로 측방 경계를 이용한 측방 radar 전략 및 magnetic marker 전략 등이 있다.

Permanent magnetic marker를 이용한 횡방향 유도도는 70년대 초반에 많이 연구되다가 80년도 후반에 Zang에 의해서 다시 주목 받기 시작했다[67]. 이 전략에서는 차량의 횡방향 위치가 자기장의 강도에 의해서 계산되어진다. Zang은 횡방향 거리 오차를 얻기 위한 강건한 신호처리 전략을 제안하고 제어기에 도로 곡률 정보와 같은 다른 정보들을 제공하는 알고리즘을 개발 하였다. 이 전략은 다른 가능한 전략들과 비교 우수함이 입증되었고 PATH 프로젝트에 적용되었다[66].

차선 인식을 통한 횡방향 차량 유도 시스템도 성공적으로 개발되었다. Redmil은 단안 카메라를 이용한 영상 처리 기술을 통해 차선을 추종하는 시스템에 대해 기술 하였다[68]. 이 시스템은 이미지의 행을 탐색하여 색상 강도의 최대 변화량을 찾아 내어 차선 후보 들을 찾아내고 그 후보들을 box filter를 통과 시킴으로써 오인지 확률을 낮추면서 차선 인지 성능을 향상시켰다.

4.3 Fully-autonomous Platoon Control

Fully-autonomous platoon은 군집 주행의 최종 단계이다. 하지만 이를 달성하기 위해서는 아직 많은 문제들이 해결 되어

야 한다. 이 단계에서는 군집 주행의 멤버들뿐만 아니라 리더 차량까지 모두 자동으로 제어된다.

군집 리더차량의 종방향 제어는 일반적으로 자동 지능형 순항 제어 (AICC) 법칙을 따른다. Godbole는 그의 연구에서 각 군집의 리더 차량은 정상상태 주행 상황에서 선행 군집 차량의 속도를 추종하면서 군집 주행간의 요구 거리를 만족시켜야 한다고 언급하였다[69]. 리더 차량은 합류, 분리 또는 차선 변경 조작에 의해 정상 상태를 불가피하게 방해 받을 수 있다. 그리고 통신 장치가 고장 난 상태에서 차선변경을 하는 차량이 있는 경우와 같이 예기치 않은 사건에 의해 방해가 있을 수 있다. 이때 리더 차량의 제어기는 이러한 외란을 군집으로 증폭시키지 않고 가능한 빨리 정상 상태로 회복할 수 있어야 한다.

이와 관련하여서는 vision과 radar 기반의 장애물 및 차선 인지 기술이 연구되었다. Bertozzi와 Broggi 스테레오 카메라 기반의 일반적인 장애물과 차선 인지 시스템을 제안하였다 [70]. 이 시스템은 대용량 병렬 처리 하드웨어를 이용하여 형상에 상관없이 일반 적인 장애물과 희미한 차선 위치까지도 감지하였다. 차선인지는 차선의 형태에 의존하는 패턴 매칭 기술에 기반하였고 장애물 위치 인지는 스테레오 이미지 처리를 통해 수행되었다. 계산 속도를 향상 시키면서 카메라 calibration과 차량 움직임에 대하여 강건성을 확보하기 위해서 장애물 인지 부분은 차량 전방에서 차량이 이동 가능한 free-space 부분만 감지하도록 간소화 되었다. Broggi는 또한 그의 연구에서 GOLD라고 명칭 된 차량 인식 알고리즘을 개발하였다[71]. 이 알고리즘은 일반적인 장애물에서 특정한 형상과 크기를 가진 물체를 매칭 시킴으로써 차량을 인지하였다. 단안 카메라를 이용하여 차량을 인지하고 위치를 추종하며 스테레오 이미지를 이용하여 거리 정보를 추출하였다. 또한 이 알고리즘은 사람과 같은 다른 크기의 장애물 인식에도 적용되어 검증되었다. 하지만 이 알고리즘의 감지 성능은 장애물의 높이와 거리에 의존하기 때문에 먼 거리의 큰 장애물은 차량 근처의 작은 물체만큼 인지가 힘든 단점이 있다.

장애물 주변으로 주행하거나 주행 전략을 결정하기 위해서 횡방향 제어기는 vision 시스템으로부터 얻어지는 차선 정보를 이용한다. 대부분의 경우 리더 차량의 횡방향 제어기는 선택된 차선 추종을 목표로 한다. 그리고 군집 멤버들의 횡방향 제어는 앞 절에서 소개한 semi-autonomous platoon control 방법과 일치 한다. 그러나 장애물이나 다른 차량 회피가 불가피한 경우에는 조향 제어를 한다. 이때는 효과적인 회피를 위해서 리더 차량이 독립적으로 작동하지 않고 군집 차량들과 협조 제어를 한다[72].

5. Hybrid Vehicle Control

화석 연료 사용량 저감 및 대기환경오염 문제에 대한 전세계적인 관심이 증가하고 이에 관련하여 차량에 대한 다양한 규제 법안이 등장함에 따라 하이브리드 차량에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하이브리드 차량을 구성하고 있는 주요 요소로는 엔진, 배터리, 전기 모터가 있으며 구동 방식에 따라 변속장치 및 발전기가 함께 시스템을 이루고 있다.

하이브리드 차량은 동력전달계의 구조에 따라 크게 직렬형(series type), 병렬형(parallel type) 그리고 복합형(Power-split

그림 6. 하이브리드 차량의 동력전달계 구조.

Fig. 6. Powertrain structure of hybrid vehicle.

type) 방식으로 구분된다. 직렬형 방식은 그림 6(a)와 같이 엔진과 상시 연결되어 있는 발전기를 통해 생산된 전기가 전기 모터를 비롯한 차량의 전기시스템에 공급되는 구조로 이루어져 있다. 그림 6(b)의 병렬형 방식은 엔진과 차량 바퀴가 연결되어 있으며 전기 모터가 함께 연결되어 두 개의 동력원이 동시에 차량을 구동하는 동력을 발생시킨다.

하이브리드 차량의 구동 성능과 연비 및 오염물질 배출 성능을 평가하기 위하여 차량의 주행 성능과 연료 소모량을 해석할 수 있는 방법이 개발되어 그 성능이 비교 분석되었다. 또한 하이브리드 차량의 연비 성능을 극대화하고 오염물질 배출을 저감할 수 있도록 각 요소들의 동력 분배를 제어하는 전략이 지속적으로 제안되었다. 하이브리드 차량 전체 시스템의 효율을 극대화 시키기 위한 최적전략을 개발하기 위해서는 보조 동력 장치인 엔진과 배터리의 특성이 전체 시스템에 큰 영향이 미친다는 사실이 보고된 바 있으며[73] Francis Roy는 전기 모터 효율과 배터리 용량이 차량의 연료 소모량에 미치는 영향을 분석하였다[74].

5.1 규칙기반 제어 전략

규칙기반 동력관리 전략은 주로 경험, 직관, 수학적 모델 및 운전자의 전문성 등에 기반하여 설계된다. 이러한 제어 전략은 크게 결정론적(deterministic) 규칙기반 제어 전략과 퍼지(fuzzy) 제어 전략으로 구분된다. 규칙기반 제어 전략의 핵심은 부하 균등화(load-leveling)에 있다. 이에 기초한 규칙기반 제어 전략은 엔진의 운전점을 가능한 최고 효율점으로 이동시키도록 한다. 운전자의 의도와 높은 효율 달성을 모두 만족시키기 위하여 운전자 요구 출력과 엔진의 실제 출력 간의 차이는 전기 모터를 이용하여 보상하도록 제어한다.

배터리의 충전상태(SOC)를 설계된 범위 내에서 유지할 수 있도록 충전상태만이 엔진의 on/off를 결정하도록 하는 Thermostat 방법이 제안되었다[75]. 차량의 주행 상태에 따라 전기 모터의 구동 출력과 엔진 가동 여부를 결정하는 알고리즘이 제안되었으며 기본 규칙만으로 구성된 제어 전략의 성능을 향상시키기 위하여 적응형 규칙기반 제어 전략(adaptive rule-based control strategy)이 제안된 바 있다[76].

결정론적 규칙기반 제어 전략의 단점을 보완하기 위하여 차량의 상태를 실시간으로 반영하여 동력을 분배하도록 하는 퍼지 전략을 적용한 전략이 제안되었다[77]. Syed 등은 복합형 하이브리드 차량에서 엔진 출력을 제어하기 위한 퍼지 비선형 제어를 개발하였다[78]. 차량 출력만을 이용하여 개발한 퍼지 전략은 배터리의 적정 충전상태를 보장하지 못한다. 이를 보완하기 위하여 운전자의 의도 계산, 배터리 충전상태 정보를 포함한 출력 제어 방법이 개발되었다. Rajagopalan 등은 배출가스 발생량이 높은 엔진의 영역의 가중치를 높이는 적응형 퍼지 전략을 제안하였다[79].

5.2 최적화 기반 제어 전략

최적화 기반 제어 전략에서는 연료 소모량이나 배출가스에 관한 함수로 설정된 목적함수(cost function)를 최소화하도록 하는 최적 출력 또는 최적 기어비를 계산하여 도출한다. Bumby는 승용 하이브리드 차량에 대하여 두 동력원간의 최적 동력 분배비를 계산하기 위하여 주행 부하, 주행 사이클, 변속 단수를 목적함수로 하는 알고리즘을 개발하였고 Michel은 연료 소모량과 오염물질 배출량을 저감하기 위하여 다이나믹 프로그래밍(dynamic programming)에 기반한 Heuristic 제어 전략을 제안하였다[80].

이러한 최적화 방법은 미리 설정된 차량의 주행 조건에 대하여 수행되면 전역 최적해(global optimal)를 얻을 수 있으나 실시간 제어 전략을 개발하는 데에는 직접적으로 적용될 수 없다. 그러나 최적해 분석 통하여 최적화 기반 규칙을 설계하는데 활용할 수 있다는 장점이 있다.

전영역 최적화를 통한 제어의 비실시간성을 보완하기 위하여 시간에 대한 변수만을 포함하는 목적함수를 설정하여 현재 시간에 대한 최적해만을 도출하는 방법이 제안되었다. 엔진의 연료 소모량과 배터리의 전력 소모량을 등가 연료 소모량으로 환산하여 목적함수로 설정하고 이 값을 최소화 하는 엔진과 전기모터의 출력을 계산하는 ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy)가 제안되었다[81].

이러한 방법을 통해 얻은 입력은 준 최적해(sub-optimal)를 만족하지만 실시간으로 제어 전략에 이용될 수 있다. Salman은 실시간 예측 최적 제어 입력을 계산하기 위하여 GPS를 통해 얻은 정보에 예견제이론을 적용한 A-ECMS (Adaptive ECMS)를 제안하였다[82].

Borhan은 배터리와 울트라 캐패시터를 장착한 복합형 하이브리드 차량에 모델 예측 제어(model predictive control)기법을 적용하였으며 Kermani는 모델 예측 제어방법을 적용한 직렬형 하이브리드 차량의 동력관리 전략을 제안하였다[83].

6. Electric Vehicle Control

과거 몇 년 동안, 모터 토크를 발생시켜 차량을 구동시키는 모터 구동 기반의 전기 차량에 대한 개발 및 연구는 환경

그림 7. 토크벡터링을 통한 추가적인 요 모멘트[86].

Fig. 7. Additional Yaw Moment using Torque Vectoring [86].

및 에너지 문제에 대비하여 점점 그 수요와 관심이 증가하였다. 전기 차량은 인휠 및 인라인 모터를 사용하여, 여러 경우에 대한 차량 구성이 가능하다. 모터 구동 기반의 전기 차량은 차량의 제동 시 기존의 제동 시스템과는 다르게 회생 제동이 가능하기 때문에 에너지 효율 면에서 상당한 장점이 있다. 또한, 모터를 사용한 회생 제동은 기존의 유압 제동에 비해서 반응 및 제어 속도가 매우 빠르고 정확하다[84]. 인휠 모터의 경우, 기존의 엔진 차량과는 다르게 좌우 모터의 토크를 다르게 제어함으로써 원하는 만큼의 요 모멘트를 발생시킬 수 있다. 이는 차량의 선회 성능 및 횡방향 안정성을 향상시키는 데 도움이 된다[85]. 즉, 모터를 사용하는 전기 차량은 전후 및 좌우 동력 배분이 가능하고, 회생 제동과 제어 전략 수립에 있어 기존 차량에 비해 매우 용이하다는 장점이 있다.

전기 차량은 토크 분배에 대한 기존 연구가 활발히 진행되었다. 토크 분배 제어 즉, 토크 벡터링은 차량의 안정성 및 선회 성능을 향상시키기 위한 것으로, 각 휠에 토크를 적절히 분배하는 것이 목적으로 그림 7과 같이 기존의 제동 제어에 비해 큰 모멘트 발생이 가능하고 이에 따른 선회 성능의 향상에 큰 도움이 된다[86].

각 휠의 토크 분배를 이용한 휠 잠김 방지 등의 연구[87] 등은 기존의 엔진 차량에서의 제어 방식을 전기 차량에 적용시킨 한 사례로 등장하였다. 운전자의 감/가속 및 조향 명령을 따라가기 위한 종방향 힘과 요 모멘트를 계산하여 이를 모터 및 브레이크에 분배하는 방식의 제어 또한 연구되었다[88]. 각 휠에 대한 토크 분배 제어에 대해 항공기에서 주로 사용되었던 최소 자승법 [89]이 연구되었고, 차량의 안정성을 유지하면서 분배하는 방법[90], over-actuated 시스템의 제동 토크 분배 방법[91] 등이 연구되었다.

최근의 연구 동향에서 Kang 등은 Control Allocation 기법을 이용하여 4륜 구동 전기 차량의 토크 벡터링 기법에 대하여 연구하였다[92]. Wang 등은 4륜 인휠 구동 전기 차량에 대하여 각 휠의 목표 휠속도를 추종하는 PID 제어를 구현하고, 여기에 슬립율을 제어하기 위해 Fuzzy 제어를 이용한 추가적인 토크를 계산하는 방식의 제어를 개발하였다[93].

Masaki는 각 휠의 종방향 및 횡방향 타이어힘을 추정하여 타이어힘 사용률을 계산하고, 각 타이어의 타이어힘 사용률과 전체 종방향 및 횡방향 힘, 전체 요모멘트, 각 타이어의 슬립율을 고려하는 최적 타이어힘 분배를 구현하였다[94].

최신 Electric vehicle control 분야는 또한 운전자의 핸들링 특성을 개선하기 위한 방향으로 연구가 진행되고 있다. General Motors의 Athari는 운전자의 의도를 파악하고, state-derivative feedback 제어를 이용하여 핸들링 특성을 향상시키도록 하는 4륜 인휠구동 최적 토크제어를 제시하였다[95]. Zhang는 능동 조향 제어(active front steering control)와 함께, 목표 요속도와 차체 슬립앵글을 추종하도록 하는 4륜 인휠구동 토크 분배 전략을 연구하였다[96]. Wang 등은 또한 차량 속도에 따른 목표 조향 토크와 실제 조향 토크의 차이를 최소화 하도록 하는 토크 분배 알고리즘을 개발하였다[97].

4륜 독립구동뿐만 아니라 특정 차륜에만 모터가 장착된 경우에 대한 연구도 진행되고 있다. Kaiser 는 전륜에 2개의 모터가 독립적으로 구동되는 플랫폼에 대하여 vehicle dynamics controller와 motor torque and wheel slip limiter로 구성된 제어기를 개발하였다. 이 연구에서 vehicle dynamics controller는 차량 속도와 요속도를 추종하기 위한 Linear Parameter-Varying gain-scheduled controller로 설계되었다[98]. 또한 Pinto는 후륜에 2개의 모터가 독립적으로 구동되는 플랫폼에 대하여 yaw motion 제어를 위한 토크 분배 제어 알고리즘을 개발하였다[99].

모터의 출력이 높아지고 배터리와 인버터 등의 경량화가 가능해지면서 고성능 Electric Vehicle에 관한 연구도 활발해지고 있다. Fu.C. 등은 2개의 모터가 후륜에 직결된 전기 경주용 차량에 관한 연구를 통해, 오버스티어나 언더스티어 현상을 억제하기 위하여 구동륜간의 타이어힘 차이와 조향 컨디션을 고려한 구동 토크 제어 방법을 개발하였다[100]. 또한 IDIADA 에서는 Volar-e라는 4륜 독립 구동 전기 고성능 스포츠카를 개발하였다. 이 차량에 탑재된 제어기는 코너링 성능을 극대화할 수 있는 iTORQ+, 코너 진입 전 안정된 턴-인을 구현할 수 있는 iTORQ-, 가감속시 슬립을 방지하는 Traction control, 그리고 실제 고성능 스포츠카에 장착되는 것과 같이 구현한 Launch control로 구성되어있어, track에서의 실질적인 성능을 극대화할 수 있도록 개발하였다[101].

III. INTEGRATED VEHICLE SAFETY AND AUTOMATED DRIVING CONTROL

1. ADAS / Active Safety

최근의 자동차산업은 단순한 이동수단으로서의 가치를 넘어서, 운전자에게 보다 안락하고 안전한 주행환경을 제공하고자 하는 방향으로 발전하고 있다. 이러한 추세에 따라 운전자 지원시스템(advanced driver assist system) 및 능동안전시스템(active safety system)의 장착을 통한 운전자 편의성 향상 및 차량 사고의 감소를 추구하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 상용화되고 있는 운전자 지원 및 능동 안전시스템은 크게 종방향 안전시스템과 횡방향 안전시스템으로 구분할 수 있다. 대표적인 종방향 안전시스템으로는 능동자동순항제어 시스템(ACC: Adaptive Cruise Control), 전방충돌 경고시스템(FVCW: Front Vehicle Collision Warning) 및 자동비상제동장치(AEB: Advanced Emergency Braking)를 들 수 있다[102]. 전방충돌이 발생의 위험이 존재하는 경우 운전자에게 경보를 제공하는 전방충돌 경고시스템(FVCW)은 1990년대 초에 Nissan이 최초로 레이더 기반으로 제품화를 하였다. 능동자동

순항제어시스템(ACC)은 선행차량이 없는 경우 운전자가 설정한 속도로 주행하고, 선행차량이 있는 경우는 선행차량과 안전한 차간거리를 유지하면서 선행차량을 추종하는 종방향 자동주행 시스템이다. 최근의 능동자동순항제어시스템이 장착된 차량의 경우, 전방충돌 경고시스템의 경보 기능이 추가되어 제품화되는 추세이다. 일례로 GM은 자사의 Cadillac에 FCW 기능을 갖는 능동자동순항제어시스템을 제품화하고 있다. 이 시스템은 전방의 차량과의 거리를 5단계의 Time gap으로 구분하여 운전자로 하여금 자신이 원하는 정도로 전방차량을 추종하도록 하는 시스템이다. 이러한 자동순항제어시스템은 도심의 저속영역의 복잡한 주행환경뿐 아니라 고속도로와 같은 고속영역의 주행환경과 같은 다양한 환경에서의 운전자의 운전부하를 줄여주어 보다 편안한 주행환경을 제공한다.

능동자동순항제어시스템은 전방의 차량을 인지하는 센서와 주행 상황에 따라 차량의 가/감속을 결정하는 제어로직, 제어로직에 의해 결정된 구동력을 발생시키기 위한 엔진/브레이크 및 제동을 위한 브레이크 모듈, 그리고 운전자와의 입/출력을 위한 인터페이스로 구성된다.

전방감지센서는 전방/주변차량에 대한 상대속도, 차간거리, 자차선 주행여부를 인식하여 해당 정보를 제어로직에 전달 해주며, Lidar 센서나 Radar 센서, Vision 센서 및 Laser scanner 등의 다양한 센서가 활용된다. 센서의 정보처리 과정에서 발생할 수 있는 신호의 잡음(noise)나 불확실성 등을 보완하기 위하여 다양한 추정방식과 필터가 활용되며, Kalman 필터를 활용한 Bayes-optimal 기법 등이 연구/활용되었다[104,105]. 또한 센서 감지범위의 확대 및 성능 향상으로 인하여, 다차량에 대한 감지가 가능해짐에 따라 감지된 대상물체의 종류를 판단하고, 차량의 주행상태에 따른 제어 대상 선정 등의 문제가 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 지표로 부상하고 있다. 특히나 주변차량을 인지하여 제어 대상을 정확히 판단하는 것은 끼어들기 및 합류 도로 등의 돌발상황에서의 충돌을 방지하기 위해서는 매우 중요한 부분이다[104,106]. 또한, 단일센서를 활용한 감지의 한계를 보완하기 위하여, 다중센서를 활용한 센서융합의 연구도 활발히 진행되어, Continental을 비롯한 다양한 회사에서 Radar 센서와 Vision 센서융합을 통한 보다 정확한 인지기술을 발표하기도 하였다[107].

차량간의 종방향 움직임을 제어하기 위한 연구는 단순한 가/감속 제어를 위한 연구를 비롯하여, 플레톤 및 자율주행을 위한 연구 등의 일환으로 1970년대부터 꾸준히 진행되었으며, 이러한 기존의 연구를 바탕으로 1990년대부터 차량간 거리제어 알고리즘의 연구가 활발히 진행되어 왔다[105,108]. 전방 차량과의 상대속도와 차간거리를 활용하여 주행상황의 위험도를 나타낼 수 있는 인덱스를 구성하고, 해당 인덱스가 안전한 영역에 존재하도록 제어입력을 조정하는 방식이 일반적으로 많이 활용되고 있다. 특히, 충돌예상시간(TTC: Time-To-Collision)의 경우 종방향 제어에서 일반적으로 활용되는 인덱스로, 전방차량과의 거리와 상대속도로의 비율로 전방차량과의 충돌까지 소요될 것으로 예상되는 시간을 나타내는 수치이다. 또한, 운전자가 전방차량에 대하여 느끼는

감각(looming effect)와 밀접한 관계가 있다[103]. Barber는 충돌 예상시간과 차간거리, 상대속도를 이용한 두가지 인덱스를 활용한 알고리즘을 제안하기도 했다[108].

또한, 제어시스템의 작동에 대한 운전자의 이질감을 줄이기 위하여 운전자의 주행패턴을 반영한 제어알고리즘을 구성하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, Bando는 제한한 전방의 차량을 추종하기 위한 운전자의 주행패턴을 통하여, 전방차량과의 추종거리에 따라 운전자가 유지하고자 하는 안전속도의 경향이 존재함을 분석하였다[106].

능동자동순항제어시스템과 같은 운전자 지원시스템의 경우, 시스템의 특성상 운전자의 잘못된 조작이나 운전자가 시스템을 작동시키지 않는 상태에서 발생할 수 있는 사고위험에 대해서는 적극적인 대처가 불가능하다. 따라서 보다 안전하고 적극적인 제어를 위한 능동제어시스템의 개발 및 장착을 의무화하는 활동이 활발히 진행되고 있으며, 이러한 활동의 일환으로 상용차량의 경우 전방충돌 방지 및 충격완화를 위한 자동비상제동장치(AEB)의 시스템 장착의무화가 적용될 예정이다[109].

자동비상제동시스템은 전방의 장애물에 대한 충돌위험을 판단하여 충돌위험이 존재하는 경우 운전자에게 경보를 제공한다. 또한, 자동적으로 차량의 제동을 수행하여 전방장애물 및 차량에 대한 충돌을 방지하고, 충돌을 방지할 수 없는 경우에는 차량의 속도를 줄여 충격을 경감시키도록 한다.

자동비상제동시스템의 구성은 능동자동순항제어시스템과 거의 동일하다. 하지만, 자동비상제동장치는 보다 긴박하고 위험한 상황에서 작동되는 시스템이므로 보다 다양한 상황에서의 충돌한계상황에 대한 분석이 진행되어야 한다.

1990년대 Doi에 의해 진행된 충돌방지와 관련된 연구는 고속도로의 직선구간뿐만 아니라, 곡선구간에서도 전방차량과의 충돌이 방지될 수 있는 방안에 대한 연구였다[110]. 이를 위하여 전방차량을 감지하는 동시에 차량의 경로를 예측하고, 이를 기반으로 충돌위험을 예측하여 제동을 수행할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. 또한, Araki은 CCD카메라와 Radar 센서, Fuzzy-learning 알고리즘을 활용한 후방충돌 방지 시스템을 제안하였고[111], Seiler은 타이어와 노면 사이의 마찰력 추정을 통하여 노면환경에 따라 적절한 시기에 충돌경보를 제공할 수 있는 알고리즘을 제안하였다[112].

이러한 기존의 연구를 바탕으로, 다양한 차량제조회사에서 자동비상제동장치가 장착된 차량을 출시하고 있다. Volvo의 경우, S60,S70,V70 등에 장착된 'City Safety'기능을 통하여 시속40km이내의 주행상황에서 발생할 수 있는 전방의 정지타

겟과의 충돌을 방지할 수 있는 기술을 출시하였다. Audi는 'Pre sense front plus' 라고 종방향 충돌 위험 단계에 따라 경보 및 단계별 제동을 제공하는 자동비상제동장치를 개발하여 A6차량에 제품화하고 있다.

한편 벤츠에서 실시한 연구 결과에 따르면 전체적인 교통사고발생 수 중, 차선이탈로 인한 사고가 20%를 차지하였다. 이러한 사고의 90% 이상은 운전자의 부주의나 주행 부담으로 인한 순간적인 운전자의 졸음이 원인인 것으로 조사되었다. 연구 결과에 따르면 운전자가 0.5초만 사전에 대응하였다면 60% 이상의 사고를 방지할 수 있었고, 1초만 사전에 대응하였다면 90% 이상의 사고를 방지할 수 있었던 것으로 나타났다[113]. 이러한 요구에 맞게 차선 이탈이 예상되면 운전자에게 경보를 제공하는 차선 이탈 경보 시스템(LDWS: Lane Departure Warning System)이 활발히 보급되고 있는 추세이다.

하지만 이러한 경보 시스템들의 단점은 운전자에게 경보만을 제공할 뿐 능동적으로 차량을 제어를 하지 않기 때문에 운전자가 경보에 제때 반응하지 못해 차선 이탈이 일어나는 것까지는 방지하지 못한다는 것이다. 따라서 운전자의 부주의로 인한 차선 이탈을 능동적으로 방지하기 위한 차선 유지 보조 시스템(LKAS: Lane Keeping Assistance System)이 활발하게 연구 및 개발되고 있다. 2000년대 중반까지는 조향각을 직접 제어하여 차선을 유지하도록 제어하는 방식에 대한 연구가 진행되었다[114,115]. 운전자의 편의를 위해 주행 중 운전자의 조향을 보조하여 주행 부담을 덜어주기 위한 속도 감응형 전동식 파워스티어링 휠(MDPS: Motor Driven Power Steering)이 개발되고 차량에 양산 적용이 점차적으로 늘어남에 따라 조향각을 제어하는 대신 조향 보조 토크를 제어하는 방식에 대한 연구가 진행되었다. Minoiu는 운전자의 조향 토크를 보상하면서 차선을 유지하도록 제어하는 조향 보조 토크 제어 알고리즘을 개발하였다[116]. 조향 개입을 통한 차선 유지 보조 시스템을 개발함에 있어서 주요 이슈는 차선 유지 보조를 위한 능동적인 제어 개입량을 결정할 때 운전자의 조향 입력과 제어기에 의한 조향 보조 토크간의 상호 작용을 고려하여 운전자의 조종성(manueverability)를 최대한 보장하고 운전자가 제어 개입에 대한 이질감을 줄이는 것이다.

운전자가 직접적으로 제어를 하고 있는 조향 휠에 대해 제어 개입을 하는 것보다는 차등 제동 개입으로 차량의 요모멘트를 직접적으로 제어하는 것이 운전자의 조향 입력과 제어기간의 높은 호환성을 보장할 수 있다고 보고되었다[118]. Pilluti는 LQ 기법과 Pole placement 기법을 사용하여 차량의 요모멘트를 제어하기 위한 차등 제동을 계산하는 알고리즘을 제안하였다[119]. LeBlanc은 차선 이탈 사고를 방지하기 위한 각 바퀴 제동 압력 제어 알고리즘을 제안하였다[120]. Lee는 차선 이탈을 방지하기 위해 요모멘트를 제어하는 계층적 구조의 알고리즘을 설계하였다[121]. Lee의 연구는 차선 이탈을 방지하기 위한 요속도를 모델 파라미터의 불확실성과 시변성에 강건하면서 운전자의 승차감을 최대한 만족시키도록 설계하는 방식을 제안하였다. 차등 제동 제어 개입을 통해 차량의 차선 이탈을 방지하는 LKAS 기술은 Infiniti와 Benz에서 양산되었다[122,123].

한편 인적 과오로 인한 충돌 사고 중 12~13%는 차선 변경

그림 8. 자동비상제동시스템 개념도.

Fig. 8. Concept map of AEB.

도중 발생하는 횡방향 충돌 사고인 것으로 조사되었다[124]. 이에 따라 운전자의 차선 변경을 지원하는 차선 변경 보조 시스템(LCA: Lane Change Assistance)에 대한 개발 및 연구가 활발하게 진행되고 있다. Audi는 자차량의 속도가 30kph 이상이 조건에서 측후방에 위험차량이 존재하는 경우 운전자에게 시각적인 경보를 제공해주는 Side Assist 시스템을 양산 적용하였다[125]. Benz는 측후방에 위험차량이 존재하는 경우 운전자에게 1차적으로 사이드미러를 통해 시각적인 경보를 제공하고, 이를 무시하고 운전자가 차선을 변경하려고 한다면 경보음과 함께 차등 제동 제어 개입을 통해 운전자의 차선 변경을 방지하는 Active Blind Spot Assist 기능을 양산 적용하였다[126]. Eidehall은 자차량의 차선 변경이 예상될 때 자차량과 측후방 접근 차량간의 충돌 예상 시간이 작을수록 MDPS를 통해 큰 조향 보조 토크를 제공하여 자차량의 차선 변경을 방지하도록 하는 제어 알고리즘에 대한 연구를 진행하였다[127]. Hayakawa는 DYC (Direct Yaw Moment Control) 기법을 사용하여 측후방 접근 차량과의 충돌을 방지하는 제어 알고리즘에 대한 연구를 진행하였다[118]. 하지만 VSC의 제어 개입을 통한 차등 제동으로 발생시킬 수 있는 최대 요속도는 2~2.5deg/sec로 이는 운전자의 차선 변경 조향 입력에 반하여 측후방 접근 차량과의 충돌을 방지하도록 차량을 제어하기에는 불충분할 수 있다. 이를 보완하기 위해서 MDPS와 VSC를 함께 사용하여 조향 보조 토크 및 차등 제동 제어를 통해 차선 변경시 측후방 접근 차량과 자차량 간의 충돌을 방지하는 제어 알고리즘에 대한 연구가 진행되었다[128].

2. Automated driving

최근 차량의 각종 전자장비 및 센서의 성능이 고도화되고 지능형 교통시스템과 텔레메틱스 등과 같이 첨단 기반 시설들이 자동차와 호환되는 기술이 발전함에 따라 운전자의 조작 없이 자동차 스스로 주행 환경을 인식하여 목표지점까지 운행할 수 있도록 하는 자율 주행 차량에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 무인 자율 주행 기술에 대한 관심과 수요가 증가함에 따라 Google 등의 IT업체와 해외 완성차 업체들이 자율 주행 기술의 일부를 양산화하는 방향으로 연구를 활발히 진행하고 있다. Ford 및 여러 차량 제작 업체들은 능동 안전 시스템 통합 및 무인 자율 주행 기술 개발의 일환으로 저속 정체 구간에서의 주행 자동화를 통해 운전자의 주행 부담을 경감시키는 TJA (Traffic Jam Assist) 기능에 대한 연구를 진행하고 있다[129]. 또한 LKS (Lane Keeping System)와 ACC의 통합을 통해 고속도로에서 차선을 추종하면서 전방 차량과의 안전 거리를 유지하도록 하는 기술의 연구 역시 진행되고 있다[130].

자율 주행 기술을 구현하기 위해 필요한 요소 기술로는 차선 중앙 추종(lane keeping or lane following), 차선 변경 (Lane change) 및 충돌 회피(collision avoidance) 기술이 있다. 차선 중앙 추종 제어 기술을 개발하는데 있어서 크게 두 가지 중요한 제어 이슈가 존재한다. 하나는 차선의 중앙으로부터 차량의 무게 중심까지의 횡방향 거리오차가 작도록 조향각을 제어하는 것이고, 다른 하나는 차량의 속도, 무게, 도로 형상의 변화 및 횡풍 등의 외란의 존재에도 승차감을 유지하는 것이다[132]. Fenton은 LQ 이론을 적용하여 차량의 속도 변화에 적응하면서 차선 중앙 추종을 위한 조향각을 계산할 수

있는 방법을 제안하였다[131]. Ackermann은 파라미터에 기초한 강인 제어 방법을 도입하여 자동 조향 제어를 설계하였다[133]. Peng과 Tomizuka는 연속적인 시간에 대한 FSLQ (Frequency Shaped Linear Quadratic) Preview control 이론을 적용하여 차선 추종 제어를 설계하였고 이러한 방법이 차선 추종 성능 및 승차감을 향상시키는데 유효하다는 것을 입증하였다[134]. 제어 알고리즘 설계 시 사용하는 차량 모델 파라미터의 불확실성에 대해서 강건한 차선 중앙 추종 제어 성능을 보장하기 위하여 H_{∞} 이론을 적용하여 차선 추종 제어 알고리즘을 개발한 연구도 진행되었다[135].

자율 주행 기술의 구현을 위해서는 자율 차선 추종 제어 기술과 마찬가지로 자율 차선 변경 제어 기술의 개발이 요구된다. 자차량이 주행중인 차선의 주변 차선에 대한 기준 경로가 센서 혹은 지능형 교통시스템으로부터 제공된다면 기준 경로를 자차선 중앙에 선언된 경로에서 주변 차선의 중앙에 선언된 경로로 변경함으로써 앞서 언급한 자율 차선 추종 제어를 활용하여 자율 차선 변경 제어 기술을 구현할 수 있다. Chee와 Tomizuka는 주변 차선에 대한 기준 경로가 제공되지 않는 경우에 대하여 차량 센서로부터 얻어지는 횡방향 가속도 및 요속도 정보를 활용하여 차선 변경 제어를 하는 알고리즘을 연구하였다[136]. Kato는 비전 시스템을 활용하여 자차량의 주행 차선에 대한 기준 경로와 주변 차선에 대한 기준 경로를 연결하는 전이 경로를 생성하여 부드러운 차선 변경 제어가 가능하도록 하였다[137].

자율 주행 기술을 실제 도로 환경에 대해 적용하기 위해서는 일반적인 상황에서 수행하는 차선 추종 및 차선 변경 기능 이외에 위험 상황에서의 운전자의 안전 확보를 위한 충돌 회피 기술이 요구된다. 충돌 회피는 차선을 변경하는 횡방향 제어, 제동을 통해 안전 거리를 확보하는 종방향 제어 혹은 종방향 및 횡방향의 통합 제어를 통해 구현할 수 있다. Smith는 전방 장애물과의 상대거리가 짧은 경우 급격한 차선 변경 제어를 통해 충돌을 회피하는 알고리즘을 제안하였다[138]. 이 연구에서는 선형 차량 모델을 이용하여 설계된 제어 계인을 차량 모델의 비선형적 거동을 고려하여 최적화하였다. Shiller는 충돌 위험 상황에 대해 정의된 충돌 회피 궤적을 최단 시간에 주행하도록 제어하는 전략을 제안하였다[139].

개별적으로 연구가 진행된 차선 중앙 추종, 차선 변경 및 충돌 회피 제어 기술을 통합하여 자차량 주변 전방방향의 주행 위험을 판단하고 운전자의 안전을 확보하면서 차량을 제어하는 자율 주행 기술을 구현하기 위한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 앞서 언급한 차선 중앙 추종, 차선 변경 및 충돌 회피 제어 기술을 통합한 자율 주행 기술의 구현을 위해서는 주변 교통 상황을 인지하여 자차량이 주행해야 할 경로를 생성(path planning) 하고 경로를 추종하기 위한 요구 모션 결정(motion planning)이 주요 이슈이다. 이를 위해 최근에는 Potential Field 이론과 모델 예측 기법(model predictive control)을 도입하여 자율 주행 기술을 구현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.

Potential Field 이론은 로봇틱스 분야에서 자율 주행 로봇을 개발하는데 주로 사용되었던 제어 기법으로 최근 자동차 제어분야에도 활발히 도입되고 있다. Potential Field 이론의 주요 아이디어는 목표 지점에 대한 인력과 주변 장애물에 대한 척

그림 9. 주위차량의 예측위치 및 불확실성을 고려한 안전영역 설정.

Fig. 9. Safety envelope based on multi-traffic prediction and its uncertainty.

력을 임의로 설정하여 인력과 척력의 합력으로부터 목표 주행 궤적 및 목표 거동을 계산하는 것이다. Potential Field 이론을 적용하여 제어 알고리즘을 설계하는 경우 임의로 설정한 인력과 척력이 평형을 이루는 국소 최저치(local minima)에 제어 대상이 고립되는 것을 주의해야 한다[140]. 이러한 현상을 방지하기 위한 첫 번째 방법으로는 임의의 함수로 디자인하는 인력과 척력을 조화 함수(harmonic function)로 디자인하여 인력과 척력이 평형을 이루는 국소 최저치에 제어 대상이 이르는 것을 방지하는 방법이 연구되었다[141]. 제어 대상이 국소 최저치에 고립되는 것을 방지하기 위한 또 다른 방법으로는 Elastic bands를 활용한 변형 가능한 충돌 방지 주행 궤적을 생성하는 방법이 연구되었다[142].

이에 반해 모델 예측 제어 기법은 제어 대상의 동역학 모델을 기반으로 현재시점부터 유한한 시간 영역에 대하여 제한 조건들을 만족시키면서 예측되는 비용을 최소화하는 제어 입력 값을 계산하는 것을 기본으로 한다[143]. Falcone은 모델 예측 기법을 활용하여 차량의 제동과 조향을 동시에 제어하는 자율 주행 제어 알고리즘에 대한 연구를 진행하였다[144]. 또한 모델의 선형 시변성을 고려한 모델 예측 기법을 기반으로 차량의 조향, 제동 및 가속을 동시에 제어하는 자율 주행 제어 알고리즘에 대한 연구 역시 진행되었다[145]. 앞서 언급한 기존의 연구들에서는 주변 차량 및 장애물의 잠재적인 거동 및 센서 노이즈에 대한 고려가 되지 않은 상태에서 자차량의 주행 안전 영역이 선언되고 자차량 상태에 대한 제한 조건들이 정의되었다. 하지만 현재 무인자동차 개발 분야에서 가장 앞서 있다는 평가를 받는 구글(google)에서 낸 특허를 살펴보면 자차량과 주변 차량의 현재 상태에서부터 미래의 주변 차량의 움직임을 예측하고 예측된 움직임의 Confidence Level을 고려하여 차량을 제어하는 기술이 필요하다는 것을 알 수 있다[146]. 이에 따라 센서 노이즈 특성뿐만 아니라 주변 주행 차량의 확실적인 거동 범위를 고려하여 그림 9와 같이 안전 주행 영역(safe driving envelope)을 판단하고 유한한 시간 영역 내에 자차량이 안전 주행 영역 내에 있을 수 있도록 하여 자차량의 안전을 보장하도록 하는 제어 알고리즘에 대한 연구가 진행되고 있다.

IV. CONCLUSION

본 논문에서는 차량 시스템에 적용되는 첨단 제어 기술들을 검토하고 최근 선진 연구 동향에 대해 살펴보았다. 운전자의 승차감 및 차량의 안정성을 위한 차체 제어 장치, 하이브리드 차량과 전기 자동차 제어 기술, 운전자 안전 보조 제

어 기술 및 자율 주행 기술에 대한 기존 연구와 최근 연구 동향에 대해 자세히 살펴보았다. 결론적으로 차량 시스템에 적용되는 첨단 제어 기술들은 센서와 액추에이터를 비롯한 기반기술들의 획기적인 발전으로 인하여 제한적인 수동 안전 제어 기술들에서 점차적으로 능동 안전 제어 기술들로 확대되고 있는 추세이다. 또한 다양한 기능의 능동 안전 제어 장치들이 안전, 편의 등의 소비자 욕구에 대응하기 위해 양산화 및 제품화되면서 이들의 통합 제어 기술에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 차량 사시 제어 시스템의 경우 조향과 제동, 능동 서스펜션의 통합 제어에 대해 많은 연구 개발이 진행되었다. 이와 유사하게 운전자 지원 시스템들의 통합 제어 및 자율 주행 제어 기술의 연구 역시 활발하게 진행되고 있다. 앞으로도 지속적이고 체계적으로 첨단 제어 기술들에 대한 연구 및 기술개발이 진행되어 보다 편하고 안전한 자동차로 발전할 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [1] D. Hrovat, "Survey on advanced suspension developments and related optimal control applications," *Automatica*, vol. 33, no. 10, pp. 1781-1817, 1997.
- [2] E. M. Elbeheiry, et al., "Advanced ground vehicle suspension systems," *Vehicle System Dynamics*, vol. 24, pp. 231-258, 1995.
- [3] D. Karnopp, "Vibration control using semi-active force generators," *ASME J. Eng. Ind.*, vol. 96, no. 2, pp. 619-626, 1974.
- [4] K. Singal and R. Rajamani, "Zero-energy active suspension system for automobiles with adaptive sky-hook damping," *Journal of Vibration and Acoustics*, 2013.
- [5] Bose, Bose Suspension System, 2004; available at http://www.bose.com/pdf/technologies/bose_suspension_system.pdf (retrieved July 2009).
- [6] J. Kendall, "Michelin re-invents the wheel," *Automotive Engineering International*, SAE, pp. 35-36, 2008.
- [7] J. W. Park and K. Yi, "Development of motorized active suspension damper control algorithm," *Master thesis, Seoul National University*, 2011.
- [8] Y. Kawamoto and T. Kondo, "Modeling of electromagnetic damper for automobile suspension," *Journal of System Design and Dynamics*, vol. 1, no. 3, pp. 524-535, 2007.
- [9] Hassanzadeh, Iraj, et al. "A new optimal nonlinear approach to half car active suspension control," *IACSIT International Journal of Engineering and Technology 2.1*, pp. 78-84, 2010.
- [10] Rajamani, Rajesh, and J. Karl Hedrick, "Adaptive observers for active automotive suspensions: theory and experiment," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on 3.1*, pp. 86-93, 1995.
- [11] K. Yoshioka, S. Buma, R. Kanda, and T. Yahagi, "Study of preview control for electric active suspension," *Trans Jpn Soc Mech Eng C 76 (770)*, pp. 20-27, 2010.
- [12] Sugai, Haruhiko, et al. "Preview ride comfort control for electric active suspension," *Proc. of the FISITA 2012 World Automotive Congress*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [13] National Highway Traffic Safety Administration, "Motor vehicle traffic crash injury and fatality estimates, 2002 early assessment," *NCSA Advanced Research and Analysis*, 2003.
- [14] B. Chen and H. Peng, "Rollover warning of articulated vehicles

- based on a time-to-rollover metric," in *Proc. ASME, Dyn. Syst. Control Division DSC*, vol. 67, pp. 247-254, IMECE, 1999.
- [15] B.-C. Chen and H. Peng, "Differential-braking-based rollover prevention for sport utility vehicles with human-in-the-loop evaluations," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 36, no. 4/5, pp. 359-389, Nov. 2001.
- [16] A. Hac, T. Brown, and J. Martens, "Detection of vehicle rollover," *SAE Trans.*, paper 2004-01-1757, 2004.
- [17] H. Yang and L. Y. Liu, "A robust active suspension controller with rollover prevention," *SAE Trans.*, paper 2003-01-0959, 2003.
- [18] Y. Seongjin, P. Yongjin, and P. Younsik, "Design of active suspension and ESP for rollover prevention," *Trans. KSAE*, vol. 2, pp. 807-812, 2005.
- [19] J. Yoon, D. Kim, and K. Yi, "Design of a rollover index-based vehicle stability control scheme," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 45, no. 5, pp. 459-475, 2007.
- [20] J. Yoon, K. Yi, W. Cho, and D. Kim, "Unified chassis control to prevent vehicle rollover," in *Proc. KSME Spring Conf.*, Seoul, Korea, pp. 895-900, BEXCO, 2007.
- [21] J. Yoon, W. Cho, B. Koo, and K. Yi, "Unified chassis control for rollover prevention and lateral stability," *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, vol. 58, no. 2, pp. 596-609, Feb. 2009.
- [22] C. Larish, D. Piyabongkam, V. Tsourapas, and R. Rajamani, "A new predictive lateral load transfer ratio for rollover prevention systems," *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, vol. 62, no. 7, pp. 2928-2936, Sep. 2013.
- [23] A. Harifi, A. Aghagolzadeh, G. Alizadeh, and M. Sadeghi, "Designing a sliding mode controller for slip control of antilock brake systems," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 16, no. 6, 731-741, 2008.
- [24] P. Kachroo and M. Tomizuka, "Vehicle traction control and its applications," *California PATH Research Paper*, UCB-ITS-PRR-94-08, Mar. 1994.
- [25] H. Schurr and A. Dittner, "A new anti-skip-brake system for disc and drum brakes, braking: recent development," *SAE* 840486, May 1984.
- [26] H.-S. Tan and Y. Chin, "Vehicle Traction Control : Variable-structure control approach," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 113, pp. 223-230, 1991.
- [27] H.-S. Tan and M. Tomizuka, "Discrete-time controller design for robust vehicle traction," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 107-113, Apr. 1990.
- [28] H.-S. Tan and M. Tomizuka, "An adaptive sliding mode vehicle traction controller design," *Proc. of the 1990 American Control Conference*, vol. 3, pp. 1856-1861.
- [29] S. Taheri, "A feasibility study of the use of a new nonlinear control law for automobile anti-lock braking systems," *Proceedings of the 1990 American Control Conference*, vol. 2, 1990.
- [30] X. Zhang, Y. Lou, and X. Yang, "Study of control logic for automobile anti-lock braking system," *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation ICICTA*, pp. 493-497, 2008.
- [31] A. T. Van Zanten, R. Erhardt, K. Landesfeind, and G. Pfaff, "VDC Systems Development and Perspective," *SAE* 980235, 1998.
- [32] A. T. Van Zanten, "Bosch ESP systems: 5 years of experience," *SAE* 2000-01-1633, 2000.
- [33] P. E. Rieth and R. Schwarz, "ESC II ~ ESC with active steering intervention," *SAE* 2004-01-0260, 2004.
- [34] H. E. Tseng, B. Ashrafi, D. Madau, T. A. Brown, and D. Recker, "The development of vehicle stability control at ford," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 4, pp. 223-234, 1999.
- [35] H. Leffler, "Consideration of lateral and longitudinal vehicle stability by function enhanced brake and stability control system," *SAE* 940832, 1994.
- [36] H. Leffler, "BMW's dynamic stability control DSC~A stability system with active longitudinal and lateral wheel slip control," *SAE* 95A006, 1995.
- [37] A. T. Van Zanten, R. Erhardt, G. Pfaff, F. Kost, U. Hartmann, and T. Ehret, "Control Aspects of the Bosch-VDC," *Proc. of International Symposium on Advanced Vehicle Control*, pp. 573-608, 1996.
- [38] G. Heeß and A. T. Van Zanten, "System approach to vehicle dynamics control," *Visita* 1988, No. 885107, pp. 2.109-2.121, 1988.
- [39] Y. Shibahata, K. Shimada, and T. Tomari, "Improvement of vehicle maneuverability by direct yaw moment control," *Vehicle System Dynamics*, vol. 22, pp. 465-481, 1993.
- [40] Y. Shibahata, M. Abe, K. Shimada, and Y. Furukawa, "Improvement on limit performance of vehicle motion by chassis control," *Vehicle System Dynamics*, vol. 23, pp. 449-468, 1994.
- [41] M. Shino and M. Nagai, "Yaw-moment control of electric vehicle for improving handling and stability," *JSAE Review*, vol. 22, pp. 473-480, 2001.
- [42] T. Chung and K. Yi, "Design of vehicle stability control algorithm based on 3-DOF vehicle model," *Transactions of KSME*, vol. 13, no. 1, pp. 83-89, 2005.
- [43] S.-H. You, J.-S. Jo, S. Yoo, J.-O. Hahn, and K. I. Lee, "Vehicle lateral stability management using gain-scheduled robust control," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 20, no. 11, pp. 1898-1913, 2006.
- [44] D. Cho and J. Karl Hedrick, "Automotive powertrain modeling for control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 111.4, pp. 568-576, 1989.
- [45] J. D. Powell, "A review of IC engine models for control system design," *Proceedings of 1987 IFAC World Congress*, 1987.
- [46] J. J. Moskwa and J. Hedrick, "Nonlinear algorithms for automotive engine control," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 88-93.
- [47] E. Hendricks and T. Vesterholm, "The analysis of mean value SI engine models," *SAE Paper No.* 920682, 1992.
- [48] D. Hrovat and W. F. Powers, "Computer control systems for automotive power trains," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 3-10, Aug. 1988.
- [49] J. F. Cassidy Jr., M. Athans, and W.-H. Lee, "On the design of electronic automotive engine controls using linear quadratic control theory," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-25, no. 5, pp. 901-910, Oct. 1981.
- [50] Tomizuka, Masayoshi, and J. Karl Hedrick, "Advanced control methods for automotive applications," *Vehicle System Dynamics* 24.6-7, pp. 449-468, 1995.
- [51] D. Cho and J. K. Hedrick, "Sliding mode fuel-injection controller," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement*

- and Control, vol. 113, pp. 537-541, Sep. 1991.
- [52] S. B. Choi and J. K. Hedrick, "An observer based controller design method for automotive fuel-injection systems," *Proc. of ACC*, pp. 2567-2571, 1993.
 - [53] J. K. Hedrick and M. Won, "An application of nonlinear robust control," *IFAC Workshop on Non-Linear Control System Design*, Tahoe, CA, Jun. 1995.
 - [54] Liu, Derong, et al. "Adaptive critic learning techniques for engine torque and air-fuel ratio control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 38, no. 4, pp. 988-993, 2008.
 - [55] S. Hallé, F. Gilbert, J. Laumonier, and B. Chaib-draa, "Architectures for collaborative driving vehicles: From a review to a proposal," *Dép. d'informatique et de génie Logiciel*, Université Laval, 2003.
 - [56] D. Swaroop, "Direct adaptative longitudinal control of vehicle platoons," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 1, 2001.
 - [57] W. L. Garrard, A. L. Caudill, A. L. Kornhauser, D. McKinnon, and S. J. Brown, "State-of-the-art longitudinal control and automated guideway transit vehicles," *High Speed Ground Transport Journal*, vol. 12, no. 2, 1978.
 - [58] E. R. Foster, "A constant separation control law for use in automated guided transit," *In Proc. of the 20th IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 358-361, Arlington Heights, 1979.
 - [59] S. Sheikholeslam, "Control of a class of interconnected dynamical systems," Ph.D. thesis, University of California, Berkely, 1991.
 - [60] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos, "Longitudinal control of automated CHVs with significant actuator delays," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 5, pp. 1289-1297, Sep. 2001.
 - [61] S. Huang and W. Ren. "Autonomous intelligent vehicle and its performance in automated traffic systems," *Int. Jour. Control*, vol. 72, pp. 1665-1668, Apr. 1999.
 - [62] S. T. No, K.-T. Chong, and D.-H. Roh, "A lyapunov function approach to longitudinal control of vehicle in a platoon," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 1, 2001.
 - [63] K. Gardels, "Automatic car controls for electronic highways," General Motors Research Lab., GMR-276, Gneral Motors, CS Berkely, 1960.
 - [64] K. H. W. Cardew, The Automatic Steering of Vehicles-An Experiment System Fitted on a ds19 Citroën Car. Road Research Lab Report LR340N, Great Britain, CS Berkely, 1970.
 - [65] P. Varaiya, J. K. Hedrick, M. Tomizuka, "Control issues in automated highway systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 14, no. 2, pp. 21-32, 1994.
 - [66] S. V. Bana, "Coordinating automated vehicles via Communication, PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2001-20," CS Berkely, 2001.
 - [67] W. Zang, "An intelligent roadway reference system for a vehicle lateral guidance/control," *Proc. of 1990 American Control Conference*, pp. 281-286, 1990.
 - [68] K. A. Redmill, S. Upadhyay, A. Krishnamurthy, and U. Ozguner. "A lane tracking system for intelligent vehicle applications," *In Proceedings of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp. 273-279, Okland, USA, 1995.
 - [69] D. Godbole and J. "Lygeros, Longitudinal control on the lead car of a platoon," PATH, Technical Memorandum, 93-7, CS Berkely, 1993.
 - [70] B. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli, C. Guarino, L. Bianco, and A. Piazzi, "The ARGO autonomous vehicle's vision and control systems," *Int. Journ. of Intelligent Control and Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 409-441, 1999.
 - [71] M. Bertozzi and A. Broggi, "GOLD: a parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 17, no. 1, pp. 62-81, 1998.
 - [72] R. Tatchikou, "Cooperative vehicle collision avoidance using inter-vehicle packet forwarding," *Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '05. IEEE* (vol. 5), 2005.
 - [73] O. Tremblay, L.-A. Dessaint, and A.-I. Dekkiche, "A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 284-289, 2007.
 - [74] Francis Roy^{1,2}, Angela M. Catania², Florence Ossart², Claude Marchand², "Hybrid powertrain design using optimal control strategies," EVS2013.
 - [75] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. Boca Raton, FL: CRC, 2004.
 - [76] D. Diop, Y. Ait-Amirat, J. M. Kauffmann, and K. El Kadri, "Power Management of a series Hybrid Electric Vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 74-80, 2002.
 - [77] P. Pisu, K. Koprubasi, and G. Rizzoni, "Energy management and drivability control problems for hybrid electric vehicles," *in Proc. 44th IEEE Conf. Decision Control*, pp. 1824-1830, 2005.
 - [78] Fazal U. Syed et. al., "Fuzzy gain-scheduling proportional-integral control for improving engine power and speed behavior in a hybrid electric vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 69-84, 2009.
 - [79] A. Rajagopalan, G. Washington, G. Rizzoni, and Y. Guezennec, "Development of fuzzy logic control and advanced emissions modelling for parallel hybrid vehicles," *NREL Tech. Rep., NREL/SR-540-32919*, 2003.
 - [80] P. Michel, A. Charlet, G. Colin, Y. Chamailard, C. edric Nouillant, and G. erard Bloch, "Energy management of HEV to optimize fuel consumption and pollutant emissions," *International Symposium on Advanced Vehicle Control*, 2012.
 - [81] P. Pisu and G. Rizzoni, "A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007.
 - [82] J. Han and Y. Park, "Adaptive-ECMS method of fuel cell hybrid electric vehicle based on minimum altitude information," *International Symposium on Advanced Vehicle Control*, 2012.
 - [83] S. Kermani, S. Delprat, T. M. Guerra, R. Trigui, and B. Jeanneret "Predictive energy management for hybrid vehicle," *Control Engineering Practice*, vol. 20, no. 4, pp. 408-420, 2012.
 - [84] Y. Hori, "Future vehicle driven by electricity and control – research on four-wheel-motored UOT electric march II," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 5 pp. 954-962, 2004.
 - [85] P. He and Y. Hori, "Optimum traction force distribution for stability improvement of 4WD EV in critical driving

- condition," *IEEE Int. Workshop Adv. Motion Control*, pp. 596-601, 2006.
- [86] K. Sawase, Y. Ushiroda, and T. Miura, "Left-right torque vectoring technology as the core of super all wheel control," *Technical Review, Mitsubishi motors*, no. 18, 2006.
- [87] N. Mutoh and H. Yahagi, "Control methods suitable for electric vehicles with independently driven front and rear wheel structures," *Vehicle Power And Propulsion Conference-(VPPC 2005)*, Chicago, Illinois, USA, Sep. 2005.
- [88] J. Kang, W. Kim, J. Lee, and K. Yi, "Skid steering based control of a robotic vehicle with six-wheel drives," *Proc. IMechE, part D: Journal of Automotive Engineering*, vol. 224, pp. 1369-1391, 2010.
- [89] J. S. Brinker and A. Wise, "Flight testing of reconfigurable control law on the x-36 tailless aircraft, Journal of Guidance," *Control and Dynamics*, vol. 24, no. 5, Sep. 2001.
- [90] P. Tondel and T. A. Johanson, "Control allocation for yaw stabilization in automotive vehicle using multi parametric nonlinear programming," *Proc. of the 2005 American Control Conference*, 2005.
- [91] B. Schofield, T. Hagglund, and A. Rantzer, "Vehicle dynamics control and control allocation for rollover prevention," *Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications, Munich*, German, pp. 149-154, Oct. 2006.
- [92] J. Kang, K. Yi, and H. Heo, "Control allocation based optimal torque vectoring for 4WD electric vehicle," *SAE Technical Paper 2012-01-0246*, 2012.
- [93] Q. Wang, L. Zhai, J. Wang, and H. Feng, "Study on acceleration slip regulation torque distribution control strategy for four in-wheel-motors electric vehicle steering," *In 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Guiyang, China, pp. 3832-3837, 2013.
- [94] M. Nobuo, H. Iwano, T. Kamada, and M. Nagai, "Vehicle dynamics control of in-wheel electric motor drive vehicles based on averaging of tire force usage," *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, vol. 5, no. 1, pp. 14-29, 2012.
- [95] A. Athari, S. Fallah, B. Li, A. Khajepour, S. Chen, and B. Litkouhi, "Optimal torque control for an electric-drive vehicle with in-wheel motors: implementation and experiments," *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, vol. 6, no. 1, pp. 82-92, 2013.
- [96] J. Zhang, Y. Zhao, X. Guan, and T. Lu, "Dynamic stability control strategy development for an in-wheel motorized electric vehicle," *In Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, pp. 657-668, 2013.
- [97] J. Wang, Q. Wang, L. Jin, and C. Song, "Independent wheel torque control of 4WD electric vehicle for differential drive assisted steering," *Mechatronics*, vol. 21, no. 1, pp. 63-76, 2011.
- [98] G. Kaiser, Q. Liu, C. Hoffmann, M. Korte, and H. Werner, "Torque vectoring for an electric vehicle using an LPV drive controller and a torque and slip limiter," *In Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on*, pp. 5016-5021, 2012.
- [99] L. Pinto, S. Aldworth, M. Watkinson, P. Jeary, and M. Franco-Jorge, "Advanced yaw motion control of a hybrid vehicle using twin rear electric motors," *in Advanced Vehicle Control, AVEC*, pp. 640-645, 2010.
- [100] C. Fu, R. Hoseinnezhad, S. Watkins, and R. Jazar, "Direct torque control for electronic differential in an electric racing car," *Sustainable Automotive Technologies*, pp. 177-183, 2012.
- [101] P. Paula, W. Jonathan, C. Alex, B. Guillermo, M. Christophe, and B. Sandro, "Control systems for high performance electric cars," *The 27th International Electric Vehicle Symposium (EVS27)*, 2013.
- [102] P. Venhovens et. al., Stop and go cruise control, Proceedings of Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, Seoul, Korea, Jun. 2000.
- [103] P. Fancher et. al., "Relationships between manual driving and driving with adaptive cruise control," *Proceedings of AVEC2004, 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Arnhem*, The Netherlands, Aug. 2004.
- [104] S. E. Shladover, "Longitudinal control of automotive vehicles in close-vehicle formation platoons," *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, vol. 100, no. 4, pp. 302-310.
- [105] S. Germann and R. Isermann, "Nonlinear distance and cruise control for passenger cars," *Proc. of the 1995 American Control Conference*, pp. 3081-3085, Seattle, Washington, Jun. 1995.
- [106] M. Bando et. al., "Dynamic model of traffic congestion and numerical simulation," *Phy. Rev. E51*, pp. 1035-1042, 1995, *Automotive Engineering International*, Tech Brief, 2007.
- [107] H. Peng, "Evaluation of driver assistance systems-a human centered approach," *Proc. of AVEC2002, 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Japan, 2002.
- [108] P. Barber and N. Clarke, "Advanced collision warning systems," *IEE Colloquium*, 234, pp. 2/1-2/9, 1998.
- [109] Report of Two Years Activities in WP29 ITS Informal Group, 2007. UN/ECE/WP29.
- [110] A. Doi, T. Butsuen, T. Niibe, T. Takeshi, Y. Yamamoto, and H. Seni, "Development of a rear-end collision avoidance system with automatic brake control," *JSAE Review*, vol. 15, pp. 335-340, 1994.
- [111] H. Araki, K. Yamada, Y. Hiroshima, and T. Ito, Development of rear-end collision avoidance system," *JSAE Review*, 18, pp. 301-322, 1997.
- [112] P. Seiler, B. Song, and K. Hedrick, "Development of a collision avoidance system," *ITS Advanced Controls and Vehicle Navigation Systems SAE Special Publications*, 1332 980853, pp. 97-103, 1998.
- [113] X. An, M. Wu, and H. He, "A novel approach to provide lane departure warning using only one forward-looking camera," *Collaborative Technologies and Systems*, 2006.
- [114] S. Chaib, M. Netto, and S. Mammar, "H ∞ , Adaptive, PID and fuzzy control: a comparison of controllers for vehicle lane keeping," *Proc. of IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pp. 139-144, 2004.
- [115] M. Netto, S. Chaib, and S. Mammar, "Lateral adaptive control for vehicle lane keeping," *Proc. of American Control Conference*, vol. 3, pp. 2693-2698, 2004.
- [116] N. Minoiu, M. Netto, S. Mammar, and B. Lusetti, "Driver steering assistance for lane departure avoidance," *Control Engineering Practice*, vol. 17, pp. 642-651, 2009.
- [117] http://www.euroncap.com/rewards/vw_lane_assist.aspx
- [118] Y. Hayakawa, K. Sato, and M. Kobayashi, "Development of blind spot assistance system based on lane marker detection

- and blind spot vehicle detection,” *Fast-zero 2011*, Tokyo, Japan, 2011.
- [119] T. Pilutti, G. Ulsoy, and D. Hrovat, “Vehicle steering intervention through differential braking,” *Proceedings of American Control Conference*, Seattle Washington, USA, vol. 3, pp. 1667-1671, Jun. 1995.
- [120] D. LeBlanc, P. Venhovens, C. Lin, T. Pilluti, R. Ervin, A. Ulsoy, C. MacAdam, and G. Johnson, “A warning and intervention system to prevent road-departure accidents,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 25, no. 1, pp. 383-396, 1996.
- [121] J. Lee, J. Choi, K. Yi, M. Shin, and B. Ko, “Lane keeping assistance control algorithm using differential braking to prevent unintended lane departures,” *Control Engineering Practice*, vol. 23, pp. 1-13, 2014.
- [122] http://www.euroncap.com/rewards/infiniti_ldp.aspx
- [123] http://www.m-sedan.com/active_lane_keeping_assist-4511.html
- [124] S. Habenicht, H. Winner, S. Bone, F. Sasse, and P. Korzeniet, “A maneuver based lane change assistance system,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Germany, pp. 375-380, 2011.
- [125] http://www.audiusa.com/us/brand/en/tools/advice/glossary/audi_side_assist.browser.html
- [126] <http://www4.mercedes-benz.com/manual-cars/ba/cars/221/en/overview/fahrssysteme4.html>
- [127] A. Eidehall, J. Pohl, and F. Gustafsson, “A new approach to lane guidance systems,” *Intelligent Transportation Systems Conference*, Austria, pp. 108-112, 2005.
- [128] J. Lee, K. Kim, D. Kim, and K. Yi, “Development of an integrated control algorithm of driving support system for enhancement of lateral safety,” *23rd IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, Qingdao, China, Aug. 2013.
- [129] <http://www.extremetech.com/extreme/132147-ford-self-driving-cars-2017>
- [130] <http://www.digitaltrends.com/cars/cadillac-super-cruise/>
- [131] R. E. Fenton and I. Slim, “On the optimal design of an automotive lateral controller,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 108-113, May 1988.
- [132] J. K. Hedrick, M. Tomizuka, and P. Varaiya, “Control issues in automated highway systems,” *IEEE Contr. Syst. Mag.*, pp. 23-32, December, 1994.
- [133] J. Ackermann, “Robust control for automatic steering,” *Proc. of the American Control Conference*, pp. 795-800, 1990.
- [134] H. Peng and M. Tomizuka, “Preview control for vehicle lateral guidance in highway automation,” *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 115, no. 4, pp. 678-686, 1993.
- [135] R. T. O’Brien, P. A. Iglesias, and T. J. Urban, “Vehicle lateral control for automated highway systems,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 266-273, 1996.
- [136] W. S. Chee and M. Tomizuka, “Lane change maneuver for AHS applications,” *Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Tsukuba, Japan, pp. 420-425, Oct. 1994.
- [137] S. Kato, K. Tomita, and S. Tsugawa, “Lane change maneuvers for vision-based vehicle,” *Proc. of IEEE ITSC Conf.*, Boston, MA, pp. 129-134, 1997.
- [138] D. E. Smith and J. Starkey, “Effects of model complexity on the performance of automated vehicle steering controllers: controller development and evaluation,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 23, pp. 627-645, 2007.
- [139] Z. Shiller and S. Sundar, “Emergency maneuvers for AHS vehicles,” *SAE 1995 Trans. J. of Passenger Cars*, vol. 104, pp. 2633-2643, 1995.
- [140] T. Sattel and T. Brandt, “From robotics to automotive: Lane keeping and collision avoidance based on elastic bands,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 46, no. 7, pp. 597-619, Jul. 2008.
- [141] C. I. Connolly and R. A. Grupen, “The applications of harmonic functions to robotics,” *J. Robotic Syst.*, vol. 10, no. 7, pp. 931-946, 1993.
- [142] T. Brakndt, T. Sattel, and J. Wallaschek, “Elastic bands: Connecting path planning and control,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, USA, vol. 2, pp. 802-807, 1993.
- [143] C. Garcia, D. Prett, and M. Morari, “Model predictive control: Theory and practice-a survey,” *Automatica*, vol. 25, pp. 335-348, 1989.
- [144] P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H. E. Tseng, and D. Hrovat, “A model predictive control approach for combined braking and steering in autonomous vehicles,” *Presented at the 15th Med. Conf. Control & Automation*, Athens, Greece, pp. 1-6, Jun. 2007.
- [145] P. Falcone, M. Tufo, F. Borrelli, J. Asgari, and H. E. Tseng, “A linear time varying model predictive control approach to the integrated vehicle dynamics control problem in autonomous systems,” *IEEE Conference on Decision and Control*, LA, USA, pp. 2980-2985, Dec. 2007.
- [146] D. I. F. Ferguson and D. A. Dolgov, “Modifying behavior of autonomous vehicle based on predicted behavior of other vehicles,” Pat. no. 20130261872A1, United States, 2013.

이 경 수

1985년 서울대학교 기계공학부 졸업. 1987년 동 대학원 석사. 1992년 Univ. of California, Berkeley, Mechanical Engineering 박사. 1993년~2006년 한양대학교 기계공학과 교수. 2006년~현재 서울대학교 기계항공공학부 교수. 관심분야는 차량 사시 시스템 제어, 운전자 지원 시스템, 무인 자율 주행 제어 시스템.

이 준 영

2008년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 석박사 통합 과정 재학중. 관심분야는 운전자 지원 시스템, 무인 자율 주행 제어 시스템.