

정 우 진 고려대학교 기계공학부 교수

| e-mail : smartrobot@korea.ac.kr

진 지 용 고려대학교 기계공학부 학생

| e-mail : jin8644@gmail.com

권 현 기 고려대학교 기계공학부 학생

| e-mail : fedaykin@korea.ac.kr

김 지 용 고려대학교 기계공학부 학생

| e-mail : guy0207@korea.ac.kr

차 동 근 고려대학교 기계공학부 학생

| e-mail : donggeun.cha@gmail.com

이 우 식 고려대학교 기계공학부 학생

| e-mail : WeeingChiking@gmail.com

김 주 엽 고려대학교 기계공학부 학생

| e-mail : dawitt91@korea.ac.kr

이 글에서는 지능형 로봇의 자율주행기술이 자율주행자동차를 위하여 응용된 사례에 대해서 살펴본다. 주로 로봇분야 연구자들이 자율주행자동차를 위하여 개발한 위치 추정, 경로 생성 및 운동제어, 동적 장애물 감지 및 추적 등의 다양한 주제에 관한 기술 개발 동향을 소개한다.

최근 자율주행자동차가 주목받고 있으며, 세계적으로 다양한 분야의 전문가들에 의하여 활발한 기술개발이 이루어지고 있다. 이러한 배경에는 자율주행자동차에 대한 압축적 기술개발의 계기가 된 2005년의 DARPA Grand Challenge와 2007년의 Urban Challenge가 있다. 사막의 비포장 도로와 도시환경에서의 자율주행 자동차 경진대회를 통하여 단기간에 기존의 기술적 한계를 돌파한 성공적인 R&D의 예이다. 해당 대회에서 상위권에 입상한 팀들은 대부분 로봇분야에서 자율주행기술을 개발해오던 연구팀들이었고, 미국의 개방적인 기술개발환경에 힘입어 지금도 미국에서는 지능형로봇, 자동차 및 인공지능 등 다양한 분야의 연구자들이 긴밀히 교류, 협력하며 많은 성과를 창출하

*미국 DARPA에서 주최한 자율주행자동차 경진대회에서 로봇 연구팀이 우승하였고 미국의 개방적인 기술개발환경에 힘입어 지능형로봇, 자동차 및 인공지능 등 다양한 분야의 연구자들이 긴밀히 교류, 협력하며 많은 성과를 창출하고 있다.*

논문들을 참조하였다.

고 있다. 이 글에서는 주로 로봇분야의 배경을 가진 연구자들이 자율주행자동차를 대상으로 수행하고 있는 연구동향을 소개하고자 한다. 조사를 위하여 IEEE international conference on Robotics and Automation과 같은 주요 학술대회와 IEEE Transactions on Robotics와 같은 주요 학술지에 최근에 게재된

### 위치추정기술 동향

GNSS(Global Navigation Satellite System) 센서를 이용한 위치추정기술은 자율주행자동차의 위치추정을 위해 가장 보편적으로 이용되어온 기술이다.

GNSS 센서를 이용한 위치추정기술의 정밀도는 주행환경의 특성에 많은 영향을 받는데, 주행환경은 특성에 따라 크게 개활지(open area), 준-도심 환경(semi urban area), 도심 환경(urban area)로 구분된다.

캐나다 켈거리 대학 연구팀(그림 1)은 고가의 GNSS 센서를 이용하여 개활지와 준-도심 환경에서 센티미터 수준의 위치추정이 가능함을 검증했다. 반면에 위성신호의 수신이 어려운 도심 환경에서는 동일한 GNSS 센서만으로는 정밀한 위치추정이 어렵다는 결과를 보였다. 또한, 개활지와 준-도심 환경에서 저가의 GNSS 센서를 이용한 경우에는 센서 고유의 성능차이 때문에 위치추정 성능이 크게 저하됨을 보였다. 즉, GNSS를 이용해 정밀한 위치추정결과를 얻기 위해서는 고가의 센서시스템이 필요하며, 고가의 센서시스템으로도 여전히 위치추정이 어려운 환경이 존재함을 보여준다.

이러한 GNSS 센서의 한계를 극복하기 위해서는 타 센서 정보와의 융합이 필요하며, 최근에는 라이다 센서와 비전 센서를 이용한 위치추정기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 라이다 센서와 비전 센서를 이용한 위치추정기술 연구에 있어서 주목받는 이슈 중 하나는 저가의 센서시스템 구축이다. 최근 수천만 원대에 이르는 고가의 라이다 센서와 비전 센서를 이용한 위치추정기술 연구들은 다양한 환경에서 잘 동작하며 높은 기술적 완성도를 보여주고 있다. 하지만 자율주행자동차의 시장 진입장벽을 낮추고 상용화를 촉진시키기 위해서는 저가의 센서시스템으로도 강인하게 동작하는 위치추정기술이 필요하다.

미국 미시건 대학의 연구팀(그림 2)은 저가의 단안 카메라 한 대만 장착된 차량을 이용하여 도시환경에서 센티미터 수준의 위치추정이 가능한 기술을 소개하였다. 고가의 GNSS, INS, 3차원 라이다 센서가 장



그림 1 GNSS센서를 이용한 위치 추정 검증(캐나다, 켈거리대학)



그림 2 단안 카메라 한 대를 이용한 위치추정기술(미국, 미시건 대학)



그림 3 2차원 라이다 센서를 이용한 위치추정기술(영국, 옥스퍼드 대학)

착된 차량을 이용하여 정밀한 3차원 환경지도를 미리 작성하고, 단안 카메라를 통해 얻어지는 환경정보를 미리 작성된 지도와 비교함으로써 차량의 위치를 추정하였다. 지도 작성을 위한 한 대의 고가의 차량 플랫폼만 있으면, 다수의 차량이 저가의 단안 카메라 한 대만으로 위치추정이 가능하기 때문에 위치추정을 위한 센서시스템의 구축비용을 크게 절감시킨 기술이다. 한편, 영국의 옥스퍼드 대학의 연구팀(그림 3)은 차량의 후방범퍼에 장착된 2차원 라이더 센서 한 대를 이용한 위치추정기술을 선보였다. 라이더 센서를 통해 연속적으로 얻은 2차원적 환경정보를 2.5차원적 정보로 변환하여 위치추정에 이용하였다. 도시 환경에서 센티미터 수준의 위치추정 성능을 보였으며, 지도 작성을 위한 별도의 플랫폼을 요구하지 않는다는 장점이 있다.

날씨, 계절, 장애물의 위치 또는 형상 등이 변화하는 동적 환경에서의 위치추정기술 연구도 활발히 연구되고 있다. 위치추정 성능은 환경지도 작성시점 대비 환경변화의 정도에 따라 크게 저하 될 수 있다. 자율주행자동차가 주행하는 환경에서는 실제로 많은 변화가 발생하기 때문에, 장기간 자율주행을 위해서

*위치추정 성능은 환경지도 작성시점 대비 환경변화의 정도에 따라 크게 저하될 수 있다. 자율주행자동차가 주행하는 환경에서는 실제로 많은 변화가 발생하기 때문에, 장기간 자율주행을 위해서는 환경변화를 극복할 수 있는 위치추정기술의 연구가 중요하다.*

는 환경변화를 극복할 수 있는 위치추정기술의 연구가 중요하다.

다양한 환경변화 중에서도 정적 장애물의 위치 또는 형상의 변화를 극복하기 위한 기술을 많은 연구팀에서 다루고 있다. 독일 프라이부르크 대학의 연구팀(그림 4)은 정적 장애물의 변화를 스스로 감지하여 지도가 자동으로 업데이트되는 동적 점유격자지도 작성기술을 개발하였다. 또한, 영국 옥스퍼드 대학의 연구팀(그림 5)은 라이더 센서를

통해 얻은 환경정보에 대한 다수의 경험을 축적하고, 그 축적된 경험을 바탕으로 현재의 위치를 추정하는 기술을 개발하였다. 두 기술 모두 시간에 따라 변화하는 환경에서 성공적인 위치추정 결과를 보여주었다.

이처럼 자율주행자동차의 위치추정기술에 대한 연구가 폭넓게 수행되고 있지만 여전히 미해결 문제들이 남아 있다. 위치추정에 이용되는 라이더 센서와 비전 센서는 각각 특정 환경조건에서 성능이 저하되기 때문에, 센서시스템에 따라 위치추정이 어려운 환경이 존재할 수 있다. 또한, 환경변화의 종류나 조건에 따라 극복해야 할 환경적 특성이 다르다. 따라서 지금까지 개발된 기술들이 실제 환경의 다양하고 복잡한 변화에도 완벽히 대응할 수 있다고 보기는 어렵다.

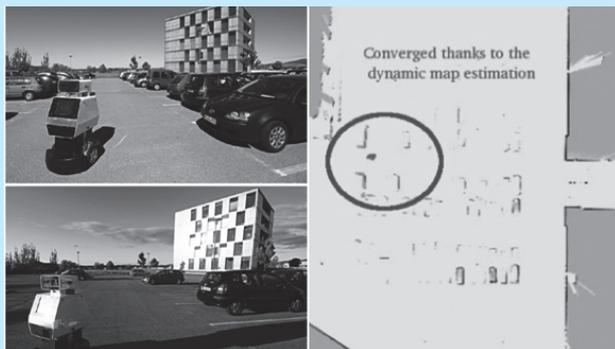


그림 4 동적 점유격자지도를 이용한 위치추정기술(독일, 프라이부르크대학)



그림 5 경험 축적을 이용한 위치추정기술(영국, 옥스퍼드대학)

### 경로생성 및 주행제어기술 동향

자율주행자동차의 경로생성 및 주행제어 분야에서 지능형 로봇기술 관련 연구동향은 다음과 같다. 자율주행자동차의 초창기 연구에서 차량 동역학을 고려한 차로 내에서의 국소궤적을 생성하는 기술과, 생성된 궤적을 바탕으로 실시간으로 차량의 위치를 제어하는 기술은 다양한 연구팀에 의해 폭넓게 진행되었다.

DARPA Urban Challenge에 참가한 카네기멜론 대학팀(그림 6)은 차량의 가능한 모든 제어입력에 대한 경로를 사전에 계산하여 표 색인(Lookup table)에 저장한 후 지도 정보를 바탕으로 주행 가능한 궤적

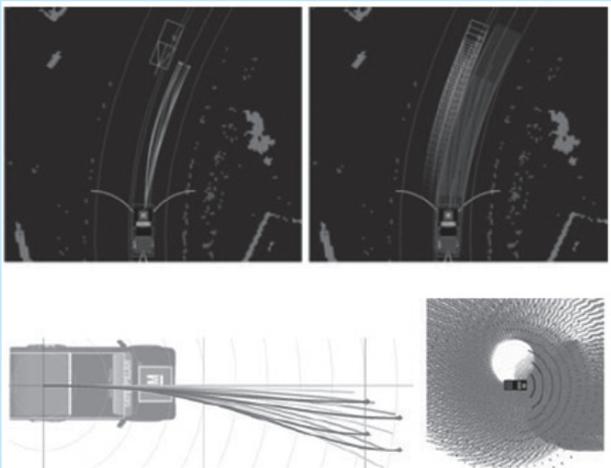


그림 6 표 색인을 이용한 국소궤적 생성 방법(미국, 카네기 멜론대학)

들을 실시간으로 탐색하여 목적에 맞는 궤적을 생성하는 기술을 사용하여 DAPRA Urban Challenge에서 우승한 바 있다.

최근에 자율주행차량의 경로생성 및 주행 분야에서는 합류점이나 분기점에서 차량의 진입 여부를 판단하거나 도로 주행 시 차로변경 여부를 판단하는 기술들이 주로 연구되고 있다. 이런 기법들에선 차량의 현재 속도와 위치, 가능한 제어입력, 주행 중인 주변 차량의 속도 등의 다양한 정보를 이용하여 최선의 행동을 선택하는 상황 판단 기술이 사용된다.

미국 미시건 대학교의 Ryan Eustice 교수팀(그림 7)은 ‘차로 유지’ ‘차로 변경’ ‘정지’ 세 가지의 행동 중 최

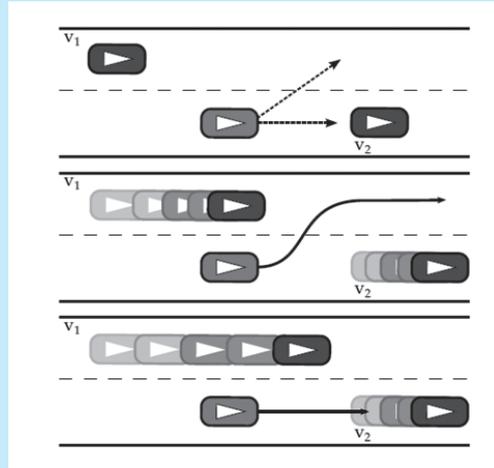


그림 7 도로 위 주행을 위한 세 가지 행동 패턴(미국, 미시건 대학교)

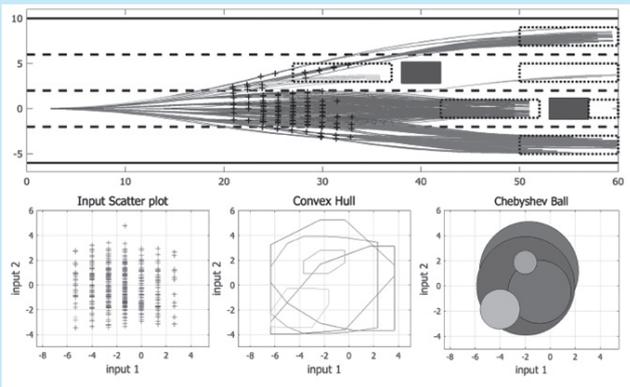


그림 8 Chebyshev Ball을 이용한 제어입력 선택 방법(미국, MIT)

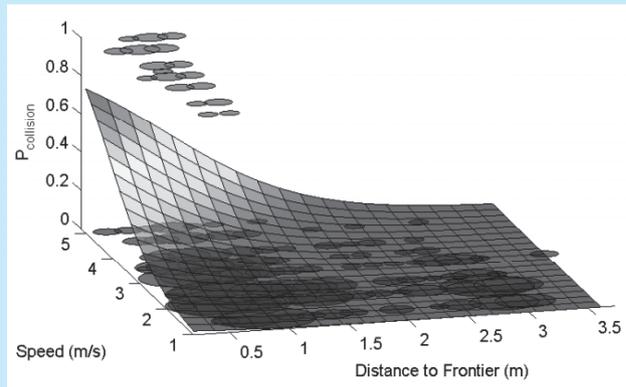


그림 9 충돌회피 학습을 이용한 안전한 고속 자율주행(미국, MIT)

적의 행동을 판단하는 기법을 제안하였다. 마코프 의사 결정 과정에 기반한 이 기법은 최적의 상황을 판단하기 위해 목적지까지의 거리, 차량의 조향각의 변화율 등을 고려하였으며, 본인 차량뿐만 아니라 주변의 다른 차량들의 행동 패턴 또한 반영한 기법으로 주행 중 차량의 차로 변경 여부를 결정하거나 합류점에서의 행동을 결정하는 데 적용이 가능하다.

MIT의 Karl Iagnemma 교수팀(그림 8)은 주행 가능한 모든 차로에 대한 가능한 모든 후보 궤적을 생성하고, 그 중 제어입력의 여유(margin)가 가장 많은 차로를 선택하여 주행하는 제어 기법을 제안하였다. Iagnemma 교수팀은 다양한 속도로 주행하는 다른 차량들이 존재하는 다차선 환경에서 차량의 주행 속도를 최대한 높게 유지할 수 있는 방향으로 차로를 바꾸가며 주행하는 시뮬레이션을 수행하여 성공적인 결과를 보였다.

MIT의 Nicholas Roy 교수팀(그림 9)은 차량형 로봇이 알려지지 않은 환경에서의 충돌위험을 시뮬레이션에서의 학습을 통해 계산하여 고속에서도 안전한 주행제어기법을 제안하였다. 주행할 수 있는 후보 궤적 각각에서의 충돌확률을 장애물까지의 거리와 장애물로 향하는 속력, 지도에서 가려진 환경까지의 거리 및 가려진 부분으로 향하는 속력, 그리고 로봇의 속력 총 다섯 가지의 충돌 위험 요인을 바탕으로 계산하였다. 다양한 시뮬레이션 환경에서의 주행을 통해 각 요인에 따른 로봇의 충돌확률을 학습하였다. Nicholas Roy 교수팀은 시뮬레이션 및 실환경 실험을 통해 제안한 기법이 고속에서도 안전하게 주행함을 보였다.

### 동적 장애물 감지 및 추적기술 동향

동적 장애물 감지 및 추적기술 개발은 보행자나 다른 차량 같은 동적 장애물에 대한 추적 능력 향상을 위해서 장애물 감지, 추적, 의도파악의 세 가지 관점으로 문제에 접근하고 있다. 대량의 훈련 데이터를 통

한 학습과 수작업으로 분류된 훈련 데이터를 필요로 하지 않는 자가 지도학습 등의 감지기술과 장애물이 타 장애물에 의해 가려지는 상황에서도 강인한 추적 성능을 보일 수 있는 추적기술, 그리고 충돌 회피를 할 수 있도록 보행자의 의도를 파악하는 데에 초점이 맞추어져 기술개발이 진행되고 있다.

지난 수년간의 연구 결과로 감지 알고리즘이 향상되어 고속도로와 같은 복잡도가 낮은 곳에서의 동적 장애물 추적기술은 상용화 단계에 도달하였지만, 장애물이 타 장애물에 의해 가려지거나 겹쳐지는 특수한 조건이나 갑작스러운 변화에도 대응할 수 있는 감지 및 추적기술에 대한 연구는 진행 중에 있다. Romero-Cano의 연구(그림 10)는 매개변수 설정을 경험적으로 하는 것과는 달리 다중물체 추적에 확률 모델을 적용하여 학습한다. 장애물이 가려지거나 겹쳐지는 상황에서도 강인한 추적 성능을 보이지만, 비교적 단순한 환경 조건에서 진행된 연구로 다양한 환경조건에서의 검증이 필요하다.

기존의 동적 장애물 감지, 추적 기술들은 주로 지도 학습 또는 준-지도학습을 바탕으로 연구되었다. 최근 누적된 데이터 세트의 양이 크게 증가하며 검출 및 추적능력이 향상되었지만, 학습에 필요한 시간이 오래 걸리고 데이터 크기가 증가하는 단점이 존재하여 비지도

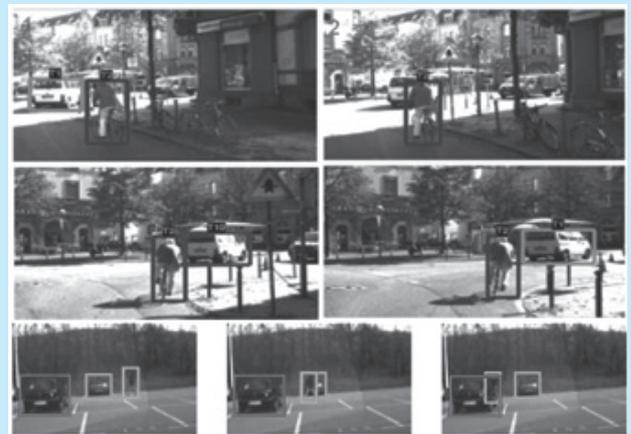


그림 10 가려짐 및 겹쳐짐 상황에서의 동적 장애물 감지 및 추적(Romero-Cano et al.)



그림 11 복잡한 골목길과 교차로



그림 12 지능시스템 및 로봇틱스 연구실 자율주행 플랫폼

학습 기술들이 요구되고 있다. Vitor Guizilini의 연구는 차량에 장착된 한 대의 스테레오 카메라를 이용하여 50km/h 이하의 속도에서 가우시안 프로세스와 베이저안 기법을 기반으로 환경에 대한 사전지식이 없이 비지도학습을 통해 동적 장애물을 감지한다. 장애물의 그림자를 동적 장애물로 인식하는 경우가 있으며, 먼 거리에 위치한 동적 장애물에 대한 감지는 제한적이다. 계산 비용이 높아 모델 갱신속도가 낮은 편이다.

장애물 회피 주행에 있어서는 단순히 장애물을 회피하며 한적한 캠퍼스 내부를 주행하는 기술수준에는 도달하였다. 이보다 복잡한 골목길이나 교차로에서 주행하려면 보행자나 다른 차량을 정확히 찾아내어 대상의 의도를 파악할 수 있어야 돌발적으로 발생하는 충돌사고를 막을 수 있다. 이러한 대상의 의도 파악에는 대상의 위치, 속도 등의 예측이 필요하다.

Haoyu Bai의 연구에서는 신뢰 추적기(belief tracker)를 이용하여 보행자의 움직임으로부터 의도를 추론하고 부분관찰 마르코프 의사결정과정(POMDP)으로 1m/s 이하의 속도를 가진 보행자가 많은 환경에서 회피주행이 가능하다.

C. G. Keller의 연구에서는 보행자가 횡단보도에서 길을 건널지 건너지 않을지에 대한 보행자의 의도를 짧은 시간 내에 파악하는 것에 성공하였으며, 이를 이용한 경로 계획도 가능함을 보였다. 제한된 환경에서의 감지 및 추적은 상당히 진척되었지만, 복잡한 환경에서의 가려짐 상황에 대한 문제와 골목에서의 보

행자나 차량의 돌발행동을 구분하는 문제 등과 같은 연구는 보행자의 행동 패턴에 대한 정이가 부족하고 학습할 행동 정보가 불충분하다는 점에 있어 연구가 계속되고 있는 중이다.

### 고려대학교 기계공학부의 자율주행자동차 연구

고려대학교 기계공학부 지능시스템 및 로봇틱스 연구실(지도교수 : 정우진)에서는 한국연구재단 중견연구지원사업의 수혜를 받아 “혼잡한 생활도로환경에서 안전하게 동작하는 무인자동차의 지능성장형 자율주행시스템”이라는 과제명으로 연구를 수행하고 있으며, 차량형 플랫폼을 이용하여 다양한 자율주행기술을 연구하고 있다. 플랫폼에 장착된 센서로는 GNSS 수신기, 엔코더, 2D/3D 레이저거리센서, 카메라 등이 있으며, 위치 추정, 지도 작성, 경로 생성, 장애물 감지 및 충돌회피 운동제어 등에 관한 연구를 진행하고 있다.

본 연구실에서는 지난 20년간에 걸친 지능형로봇의 실내외 자율주행기술에 관한 전문적인 연구경험을 축적하고 있으며, 그동안 개발한 기술을 자동차의 자율주행에 응용하는 형태로 연구를 진행하고 있다. 최근에는 도심 환경에서의 정밀한 자율 주행을 위하여 센서들의 실환경 동작특성을 반영한 정교한 모델링과 오도메트리(Odometry) 기반의 운동 불확실성 모델 구축을 완료하고 맵매칭을 통한 골목길환경에서의 정밀위치추정 등의 연구를 수행 중이다.