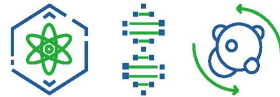


2022 July | Vol. 8

07



융합연구리뷰

Convergence Research Review

무인 이동체(드론) 정밀항법을 위한 기술

지규인(건국대학교 전기전자공학부 교수)

김규원(취만도 책임연구원)

고도 자율주행을 위한 센서기술 동향

기석철(충북대학교 지능로봇공학과 교수)

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 무인 이동체(드론) 정밀항법을 위한 기술
- 37 고도 자율주행을 위한 센서기술 동향
- 71 국가R&D 현황 분석



융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2022 July vol.8 no.7

발행일 2022년 7월 11일

발행인 김현우

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
Tel. 02-958-4977 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4785



무인 이동체(드론) 정밀항법을 위한 기술

이제는 드론이 피자를 배달하는 시대가 되었다. 2021년 8월 22일부터 10월 31일까지 약 3개월 간 국토교통부는 세종시에서 드론업체 '피스퀘어', 글로벌 피자 체인점 '도미노피자'와 함께 피자 드론 배송 서비스를 처음으로 선보였다. 이 기간 동안 세종호수공원을 찾은 시민들은 모바일 앱으로 피자를 주문하면 드론이 배달해주는 피자를 받을 수 있었다. 피자를 주문하면 주문한 곳으로 정확하게 배송이 될 뿐만 아니라 주문한 사람의 휴대폰을 통해 실시간으로 드론의 위치를 확인할 수 있었다. 이와 같은 배송 서비스는 MBC 방송사에서 5년여 기간에 걸쳐 개발한 실시간 GPS 보정 시스템(MBC RTK)인 정밀 위성 항법 기술이 활용되었기 때문에 가능했다.

항법 기술은 영상, GPS, 관성항법, 인공지능 등을 활용하여 출발 지점에서 목표 지점으로 자동으로 이동하는 기술을 의미한다. 그중에서도 정밀항법 기술은 자율비행 드론이 성공적인 임무를 수행하기 위해 필수적인 기술이다. 자율비행 드론에 대한 관심이 증대됨에 따라 정밀항법 기술 개발도 활발히 이루어지고 있다.

드론은 4차 산업혁명의 핵심인 빅데이터, 인공지능, 5G 등이 접목된 융합 기술의 집약체로 점차 활용도가 높아지고 있으며, 향후 배송 시장, 이동수단 분야 등 다양한 분야에서 변화를 이끌어낼 것으로 예측된다. 본 호 1부에서는 위성항법 기반 정밀항법 기술 외에도 영상, 라이다(LiDAR), 센서 융합을 기반으로 한 정밀항법 기술 동향에 대해 소개한다.

고도 자율주행을 위한 센서기술 동향

운전자가 운전대를 잡지 않고도 자동차를 운행할 수 있는 시대가 왔다. 지난 6월, 서울 강남 도심 한복판에서 운전자 개입 없이 자율주행차가 시범운행 되었다. '로보라이드(Roboride)'라고 불리는 이 자율주행 차량은 보행자, 버스 등으로 혼잡한 강남 테헤란로와 강남대로에서 스스로 차선을 변경하고 좌·우 회전, 유턴 등을 하였다. 로보라이드의 자율주행 수준은 레벨 4로 차량의 자동화된 시스템이 상황을 인지 및 판단하고 비상시에도 운전자의 개입 없이 차량 스스로 대처할 수 있도록 작동하는데, 이는 차량 지붕의 라이다(LiDAR)와 전후측면에 부착되어 있는 레이더(RADAR) 및 카메라 등 센서가 모두 활용되기 때문이다.

센서는 본래 운전자를 보조하는 기능을 수행하였지만 이제는 운전자를 대체할 수 있는 기술로 발전하였다. 인간이 시각, 촉각, 미각, 청각, 후각 등 5가지 감각을 이용하여 외부의 상태 및 변화를 인지하고 다양한 상황에서 대처하는 것과 마찬가지로 자동차도 센서를 통해 운전 기능을 수행한다. 자율주행자동차의 핵심인 첨단 운전자 보조 시스템(ADAS, Advanced Driver Assistance System)은 자율주행 자동차에 탑재되어 카메라, RADAR 및 LiDAR 등 일련의 센서들을 활용하여 주행 상황을 인식하고 자동으로 속도 조절을 수행한다.

첨단 운전자 보조 시스템의 핵심은 카메라, LiDAR, RADAR 등 모든 센서들을 융합하는 데 있다. 본 호 2부에서는 자율주행차 센서 기술에 대한 내용을 소개하며 자율주행자동차 시장 선점을 위한 전 세계 국가들의 기술 경쟁이 치열한 가운데 센서 기술의 발전으로 완전 자율주행자동차 상용화 계획의 빠른 실현을 기대해 본다.



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 July vol.8 no.7



01

무인 이동체(드론) 정밀항법을 위한 기술

지규인(건국대학교 전기전자공학부 교수)
김규원(주만도 책임연구원)

I 서론

4차 산업혁명 시대에 맞춰 자율주행차 또는 드론과 같은 무인 이동체에 대해 사람들의 관심이 많아지고 있다. 그 중에서도 특히 드론과 같은 쿼드콥터(quadrotor, 로터(회전날개) 네 개를 이용해 뜨고 추진하는 멀티콥터) 기반의 비행체는 다양한 분야에서 사용이 가능하기 때문에 더욱 큰 관심을 받고 있다. 군사용 정찰이나 미사일 공격 등을 목표로 처음 개발된 드론은 점차 민간 영역으로 확대되면서 취미나 촬영을 비롯하여 현재는 농업이나 택배 등의 목적으로 다양한 곳에서 활용되고 있다.

그림 1. (좌) 초창기 군사 목적으로 개발된 드론(Queen Bee), (중) 농업용 드론, (우) 택배용 드론



* 출처: (좌)한민일보(2020), (중)한스경제(2019), (우)앱스토리(2019)

초기에는 사람이 조종기를 통해 비행 컨트롤러(FC, Flight Controller)에 신호를 송신하고 이를 통해 모터를 제어하는 방식으로 비행을 수행하였다. 하지만, 드론의 용도가 다양해지고 장거리 비행이 필요해짐에 따라 사람의 시야 밖에서 비행을 해야 하는 경우가 늘어나게 되었다. 따라서, 드론이 주변 환경을 스스로 인지, 판단하여 비행하는 자율비행 기술에 대한 연구 개발이 요구되고 있다. 이러한 자율비행을 위해서 필요한 기술 중 하나가 드론에 장착된 센서들을 활용한 정밀항법 기술이다. 융합연구리뷰에서는 드론의 자율비행을 위한 정밀항법 기술에 대해 소개하고 이에 관한 분석을 수행한다.

1. 무인 드론의 시장 동향

군사적 목적으로 개발이 시작된 드론은 쿼드콥터 기술의 발전으로 소형화되었으며, 이에 따라 민간의 다양한 분야에서 활용되고 있다. 현재 드론은 취미 목적뿐만 아니라 촬영, 농업, 택배, 조난자 구조 등 다양한 목적으로 사용되고 있다.



* 출처: 뉴스1(2017)

이러한 흐름에 따라, 민간 드론 시장의 규모는 나날이 커져가고 있다. 2010년대만 하더라도 중국의 DJI社와 같은 취미용 드론을 생산하는 기업이 드론 시장을 주도하였지만, 점차 시간이 지날수록 다양한 목적의 드론이 시장을 주도할 것으로 예상된다. 이에 따라, 드론은 다양한 임무를 수행해야 하기 때문에 고도의 인공지능을 기반으로 한 자율비행은 필수적이라 할 수 있다.

표 1. 무인 드론 시장 규모 추정 (단위: 백만불)

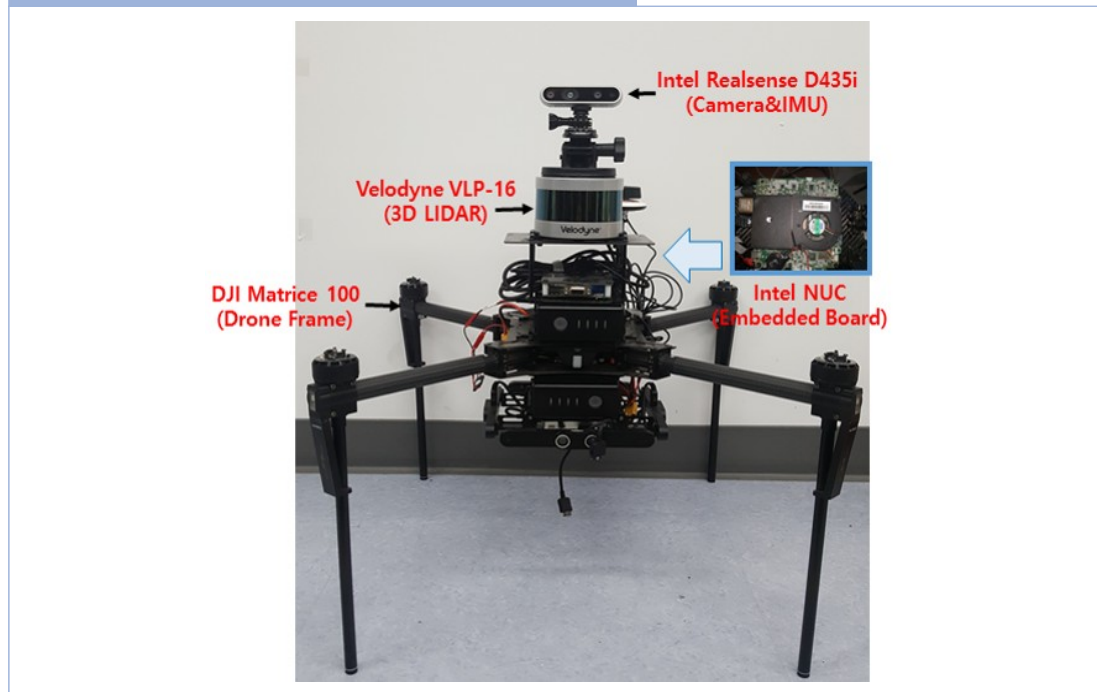
구분	2016	2019	2022	2025	합계	연평균 성장률 (GAGR, %)
공공분야	36.2	211.6	346.5	464.0	2,622.3	32.8
상업용	387.1	1,720.9	4,136.0	6,513.0	31,141.3	36.8
소비자용	2,220.0	3,500.0	3,700.0	3,900.0	34,000.0	6.6
총계	2,643.3	5,432.5	8,182.5	10,877.0	67,763.6	17.1

* 출처: 경상북도 보고서(2019)

2. 무인 드론의 자율비행을 위한 정밀항법 기술 개발 개요

드론의 자율비행을 위해 필요한 기술 중 하나는 드론에 장착된 센서들을 활용한 정밀항법 기술이다. 항법이란 이동체가 자신이 어디에 위치하고 있는지를 파악하는 기술로써, 과거 대항해 시절 선원들이 자신들이 어디 부근을 항해하고 있는지 알기 위해 별자리나 나침반 등을 사용한 것을 시작으로, 현재는 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)과 같은 위성 기반 항법 기술로 발전하였다. 초기 드론의 항법을 위해 GNSS를 사용하였다. GNSS를 통해 위성으로부터 송신된 신호를 수신하여 위치를 추정하여 현재 자신이 지구상의 어느 위·경도에 위치하고 있는지를 알 수 있다. 이러한 특성으로 인해 자신의 절대 위치를 알 수 있다는 장점이 있지만, 위성으로부터의 미약한 신호를 수신해야 됨에 따라 실내와 같이 벽으로 차단된 공간에서는 항법이 불가능하다는 단점이 있다. 또한, 실외에서도 주변에 높은 건물과 같이 전파를 가로막는 구조물이 많은 경우에도 전파가 반사되어 들어옴에 따라 항법 오차가 커지는 문제가 있다. 따라서, 드론의 자율비행을 위해 드론에 센서를 장착하고 이를 이용한 정밀항법 기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

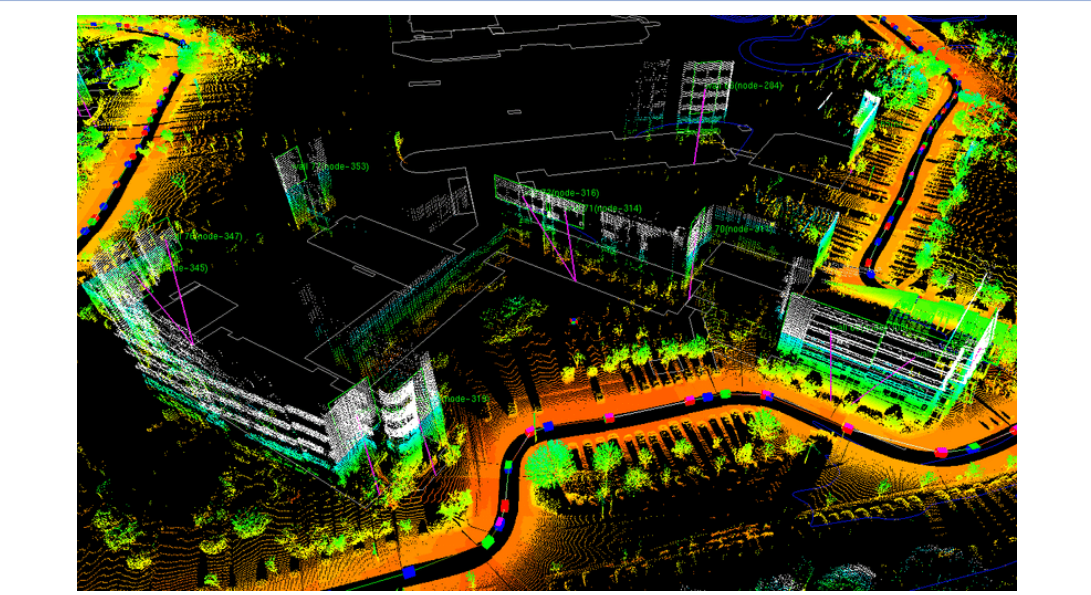
그림 3. 정밀항법을 위한 드론 및 센서 구성 예시



* 출처: 김규원 외(2020)

드론의 정밀항법을 위해 많이 활용되는 센서 중에 대표적인 것으로 GNSS, 카메라, 라이다(LiDAR, Light Detection And Ranging), 관성 측정 장치(IMU, Inertial Measurement Unit) 등이 있다. 현재 많은 대학 및 기업에서 이러한 센서들을 단독 혹은 융합한 추측 항법(Odometry)이나 동시적 위치추정 및 지도작성(SLAM, Simultaneous Localization and Mapping) 연구를 진행하고 있다. 추측 항법은 센서에서 연속해서 들어오는 데이터를 처리하여 위치와 자세를 구하는 방법이며 SLAM은 이러한 추측 항법과 항법을 위한 지도 생성을 동시에 처리하는 방법이다. 추측 항법의 경우, 빠르게 센서 데이터를 처리할 수 있지만, 항법 추정 시 발생하는 오차가 계속 누적되는 단점이 존재한다. 반면, SLAM은 위치 추정과 지도 생성을 동시에 수행하기 때문에 처리해야 될 데이터가 늘어나 처리 시간이 느리지만, 지도와 센서 데이터를 매칭함으로써 추측 항법으로 누적되는 오차를 어느 정도 보정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 현재 드론에 장착하는 임베디드 PC의 소형화 및 성능이 크게 발전됨에 따라 SLAM을 이용한 정밀항법이 주로 개발되고 있는 추세이다.

그림 4. 센서(LiDAR) 기반 SLAM 예시



* 출처: Roh et al(2016)

II 위성항법 기반 정밀항법 기술

위성항법시스템(GNSS)은 사용자의 경도, 위도 및 고도의 3차원 절대 좌표값을 제공하는 항법장치로 무인이동체의 자율운행을 위해서는 필수적이며 모든 복합항법시스템의 기준이 되는 항법 수단이다. 최근 GPS(Global Positioning System)와 GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)뿐만 아니라 Galileo, Beidou 그리고 QZSS와 NAVIC 등 다양한 위성항법체계가 완성되어 본격적으로 운영이 되면서 이에 기반한 정밀항법 기술들도 상용화되어 사용되고 있다.

고정밀 측위(RTK, Real Time Kinematic) 기술로 많이 알려져 있는 반송파 기반 정밀항법 기술에 대해 설명하고 위성 기반 보강항법시스템(SBAS, Satellite Based Augmentation System)에 대해 소개한다.

1. RTK(Real Time Kinematic, 실시간 이동 측위) 기술

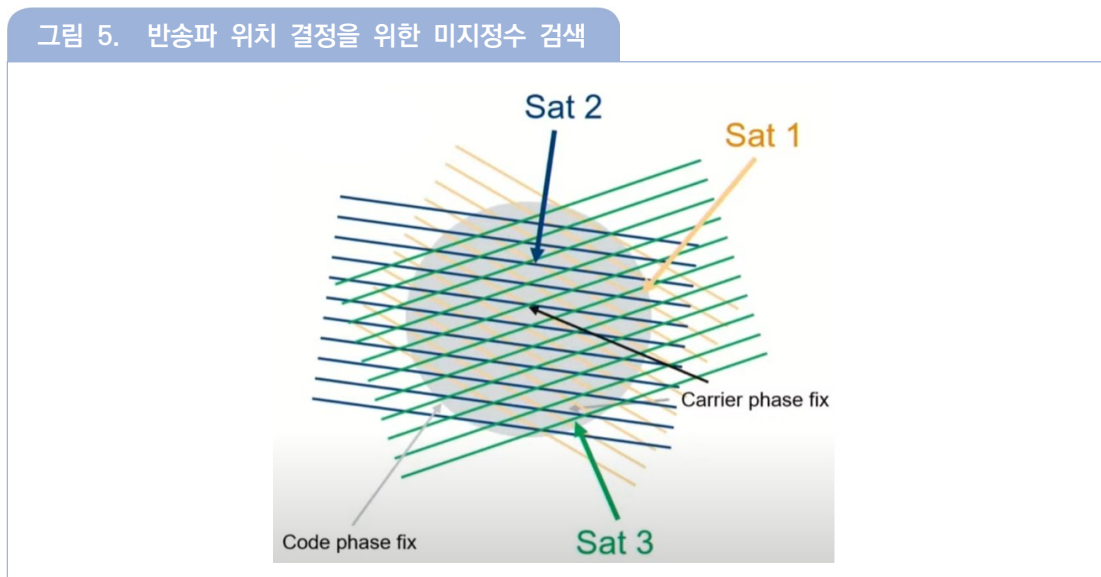
반송파 측정값을 이용하는 RTK 기법이라고 부르는 고정밀 GNSS 방법은 1990년대에 개발이 시작되어 지금까지는 주로 측지, 측량에 주로 사용되었으며 이를 위해서는 기준국과 고가의 안테나와 전용 수신기가 필요했다. 하지만 2010년도 이후부터 GPS 이외의 GNSS 시스템들이 위성시스템들을 구축하여 본격적으로 민간용 신호를 송신하고 있으며 이를 수신할 수 있는 상대적으로 저가의 수신기들이 상용화되어 드론과 같은 무인 이동체의 기본 항법장치로 활발하게 사용되고 있다. 또한 RTK와 같은 정밀 GNSS를 위한 보정정보의 제공과 RTK 알고리즘을 탑재한 저가의 수신기들도 상용화되고 있어 정밀한 GNSS 위치정보를 예전에 비해 손쉽게 또한 상대적으로 저렴하게 사용할 수 있다.

고정밀 GNSS를 위해서는 우선 측정치가 정밀해야 한다. 이를 위해 사용하는 기본적인 방법에는 이중차분(Double Differencing) 방법과 측정치 오차모델링 방법이 있다.

이중차분 방법은 RTK 기법에서 사용하는 가장 기본적인 방법으로 기준국과 사용자 수신기에서 동시에 수신한 동일한 위성으로부터의 측정값을 수신기 사이 차분(between-receivers difference)과 위성 사이 차분(between-satellite difference)을 연속적으로 수행하여 이중차분 된 측정값을 생성한다. 이중차분에

의해 두 측정값에 공통으로 존재하는 위성오차와 수신기오차가 소거되어 이상적인 경우 수신기의 측정잡음만 남아 아주 정밀한 측정값을 얻을 수 있다.

하지만 반송파 위상 측정값에는 정수 값을 갖는 모호성이 존재하고 이를 정확하게 결정하는 것이 추가적으로 필요하며 이것이 핵심 기술이다. 반송파 미지정수를 알아내는 기본적인 방법은 다음 <그림 5>와 같이 설명할 수 있다.



* 출처: 한국항공우주연구원(2021)

코드를 이용한 위치결정 결과로부터 결정한 위치의 정확도에 대한 예측 범위를 알아내고 이 범위 안에서 존재할 수 있는 미지정수 값들을 검색하여 위치오차를 가장 작게 만들어내는 미지정수의 조합을 선택하여 결정하는 것이다. 위의 회색 원이 코드를 이용해서 얻어낸 위치오차의 범위이며 직선 격자 형태로 나타난 부분이 반송파의 정수 모호성을 표시한다. 모든 위성으로부터의 미지정수가 정확히 결정되면 그 조합이 일치하는 부분이 정밀위치에 해당하게 된다.

이 방법을 사용하기 위해서는 기준국에서 동시에 수신된 의사거리와 반송파위상 측정값을 실시간으로 수신기가 별도의 통신망을 통해 수신해야 한다. 그래서 RTK 사용자는 이를 위해서 첫 번째 기준국을 설치 운영해야 하고 두 번째 이동통신망, 디지털 멀티미디어 방송(DMB, Digital Multimedia Broadcasting), 와이파이(Wifi) 등과 같은 별도의 데이터망을 구축해서 데이터를 송신해야 하는 추가적인 부담이 필요하다.

최근 국내 MBC 방송사에서는 국내 GNSS 기준국(MBC, 국토지리정보원, 국립해양측위정보원, 한국천문연구원)들의 측정값들을 Network RTK 방식 혹은 단일 기준국 RTK 방식으로 DMB 혹은 5G/LTE 망을 통해 실시간으로 전송하는 MBC RTK라는 기술을 상용화하여 서비스하고 있다.

이러한 보정방법을 관측공간보정(OSR, Observation Space Representation)이라고 하는데, 이 방식의 문제점은 기준국에 전송해주는 측정값들이 사용자와 기준국의 기하학적인 배치와 연관이 있어 기준국에 종속되는 점이다. 이에 따라 기준국과 사용자의 거리가 멀어질수록 측위성능이 떨어진다는 단점이 있다. 또한 위성으로부터 기준국이 수신한 측정값 정보를 전송하기 때문에 데이터양이 많다는 문제도 있다.

2. PPP(Precise Point Positioning, 정밀절대측위) 기술

관측공간보정(OSR)의 단점을 개선한 방식이 상태공간보정(SSR, State Space Representation) 방식이며 이를 이용한 측위방법에는 정밀절대측위(PPP) 방법이 있다.

기준국이 위성으로부터의 측정값을 보정정보로 보내는 대신 SSR 방식에서는 각 위성에 존재하는 위성시계, 위성궤도, 위성하드웨어 바이어스 오차 등을 보내주며 사용자는 이 보정정보 값을 받아서 자신이 수신한 측정값에 적합하게 오차를 계산해서 보정하는 방식이다. 이 때문에 사용자는 기준국과의 거리에 종속되지 않고 이 서비스를 광역적으로 유효하게 사용할 수 있다. 또한 사용자 입장에서는 위성별 보정정보만을 받으면 되기 때문에 요구되는 통신대역도 작게 된다.

하지만 이 방식을 통해 RTK와 대등한 정도의 측정 정밀도를 얻기 위해서는 우선 전리층보정을 위해 최소 이중주파수 수신기를 사용하여야 한다. 또한 보정성능을 얻기 위해서는 오차추정을 위한 수렴속도가 필요하다. 최근 GNSS 수신기 기술의 빠른 발전에 의해 다중주파수와 다중신호를 수신해서 다양한 PPP 혹은 RTK 알고리즘을 실시간으로 빠르게 계산하는 저가의 수신기들이 상용화되고 있기 때문에 PPP 기반의 정밀측위는 드론과 같은 무인 이동체에는 아주 적합한 정밀측위 방법으로 향후 많은 사용이 기대된다.

일본의 지역항법시스템인 QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)는 이미 L6 대역으로 이러한 SSR 방식의 PPP 서비스를 상용서비스로 제공하고 있다. 현재 개발이 예정되어 있는 한국의 한국형 위성항법시스템(KPS, Korean Positioning System)에서도 L6 대역에서 CLS(Centimeter Level Service)를 서비스할 예정이다.

3. SBAS(Satellite Based Augmentation System, 위성 기반 보강항법시스템)

항공항법정보시스템(SBAS)은 위성 기반 보강항법시스템으로 각 위성의 의사거리에 존재하는 의사거리오차에 대한 보정정보 및 위성항법시스템의 무결성에 정보를 위성을 통해 기존 위성항법신호 대역인 L1을 사용하여 전송하는 시스템이다.

이 시스템을 이용하면 위치정확도를 개선시킬 수 있는 것 이외에 항법시스템의 무결성에 관한 정보를 얻을 수 있다. 내년부터 서비스를 시작하게 될 한국의 SBAS 시스템인 KASS의 경우 만약 위성항법 신호에 오류가 있을 경우에는 SBAS 자동경보시스템이 이 항법신호의 사용 금지를 알리는 경보를 10초 이내에 제공해준다.

사람이 거주하는 지역 근처에서 무인비행을 하게 되는 드론시스템을 운영하는 경우에 KASS로부터 GPS 항법시스템 이상의 자동경보 정보를 얻을 수 있기 때문에 안전한 무인항행시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

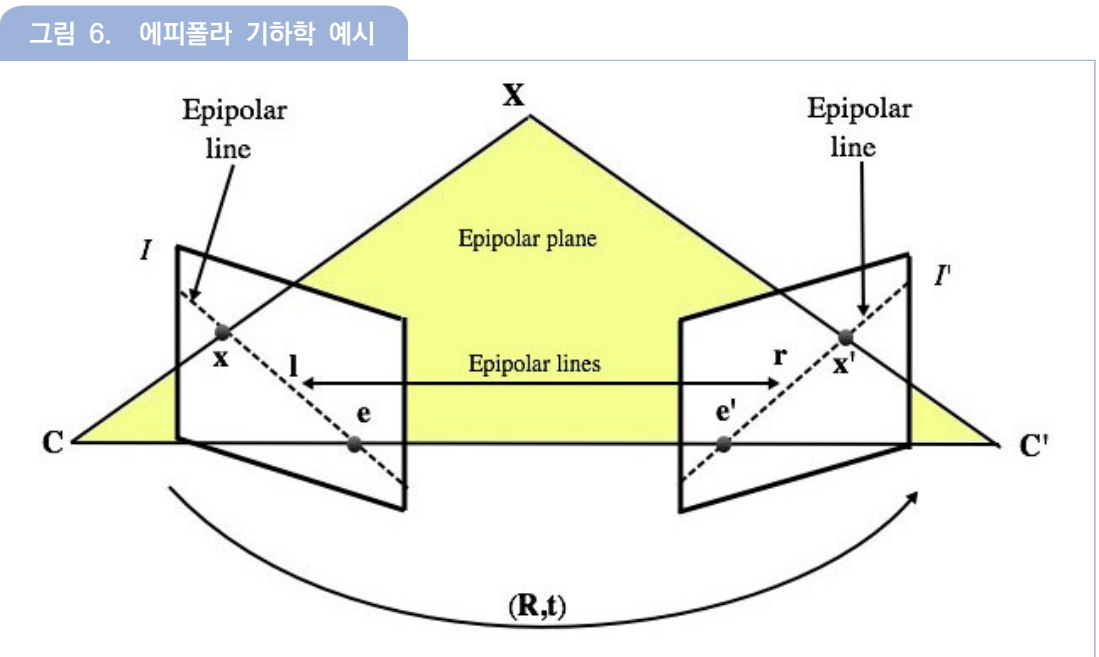
III 영상 기반 정밀항법 기술

영상 기반 정밀항법은 카메라에서 획득한 이미지를 기반으로 위치 및 자세를 추정하는 기술이다. 카메라는 무게가 가벼우며 가격이 저렴한 장점이 있다. 따라서, 다수의 카메라를 이용하여도 무게가 많이 나가지 않고 가격도 크게 부담되지 않기 때문에 영상 기반 정밀항법 기술은 드론과 같이 비행을 위한 무게 제한이 있는 이동체에 적합한 기술이다. 이러한 카메라를 이용한 항법 기술의 종류는 여러 가지가 있으며, 그 중에서 대표적인 방법들을 소개하고자 한다.

1. 단안 카메라 기반 측위 방법

단안 카메라 기반 측위는 카메라 한 대를 이용한 측위 방식을 말한다. 하지만 이미지는 3차원 공간을 2차원으로 투영하기 때문에 이 과정에서 깊이(depth) 정보가 사라지게 된다. 따라서 한 장의 이미지만 이용하여 3차원 위치를 추정하는 것은 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 단안 카메라 기반 측위는 일반적으로 이미지에서 특징점을 추출하고 각 시점 별 이미지의 공통된 특징점을 매칭하여 측위를 수행하게 된다. 이 때 사용되는 개념이 에피폴라 기하학(epipolar geometry)이다. 에피폴라 기하학은 두 개 시점 사이에 획득한 이미지 내에 공통된 점이 있을 경우, 두 이미지 사이의 기하학적 관계를 나타낸 것이다. 이를 이용하여 두 카메라 사이의 위치 및 자세 관계를 추정하게 되며, 이를 누적하여 추측 항법을 수행할 수 있다.

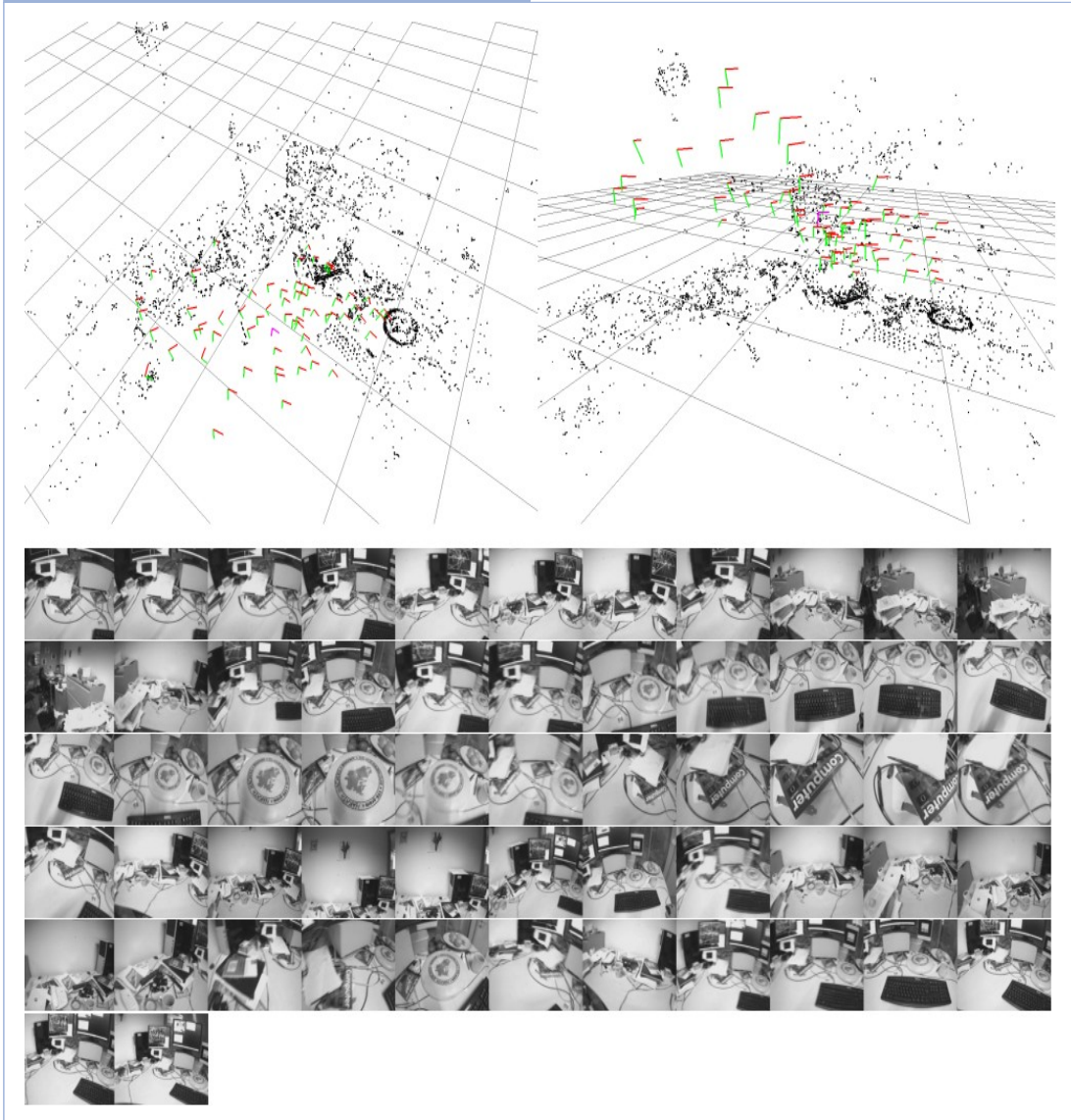
〈그림 6〉은 에피폴라 기하학을 나타낸 것이다. 그림과 같이 카메라 원점 간을 이은 선과 이미지 평면이 만나는 점을 에피폴(epipole)이라 하고 두 이미지 사이의 공통된 특징점을 이미지에 투영하였을 때 에피폴과 투영점의 직선을 에피라인(epiline)으로 나타낼 수 있다. 두 이미지 사이의 투영점은 각각의 에피라인 상에 존재해야 되는데 이를 에피폴라 제약이라 하며, 각각의 특징점들이 에피폴라 제약을 만족하도록 하는 필수 행렬(essential matrix)을 구함으로써 두 카메라 사이의 위치 및 자세 관계를 구할 수 있다.



* 출처: Azarcoya-Cabiedes et al(2014)

이러한 에피폴라 기하학을 기반으로 측위를 수행할 수 있지만, 단안 카메라로는 3차원 공간에 대한 스케일 추정이 불가능하다는 단점이 있다. 따라서, 추정된 궤적의 크기가 실제 이동 궤적보다 작게 나오는 경우가 대부분이다. 이러한 문제로 인해 단안 카메라만 이용한 측위 방법은 거의 사용되지 않으며, 다른 센서와 결합하여 사용하는 경우가 대부분이다.

그림 7. 단안 카메라 기반 SLAM(PTAM)

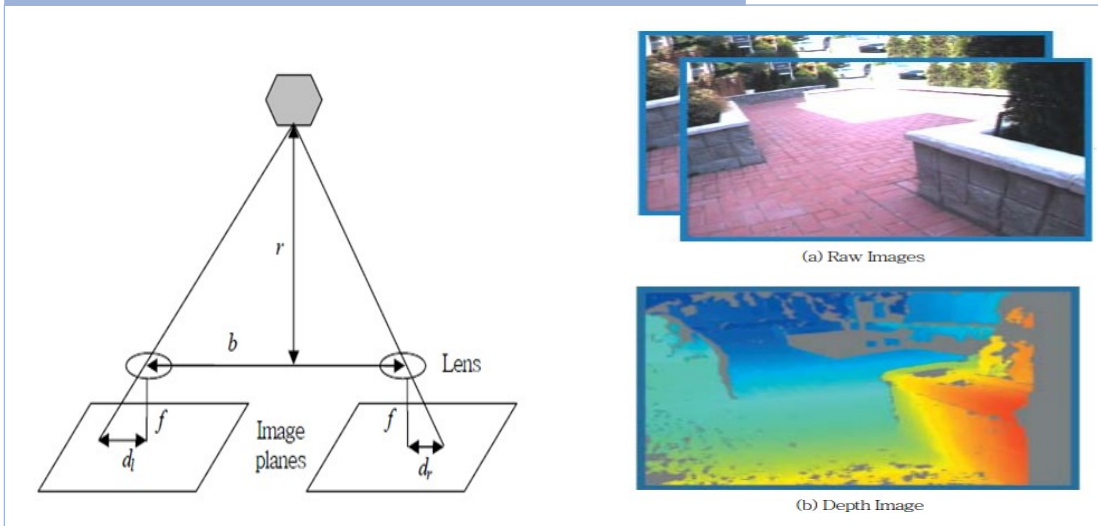


* 출처: Klein & Murray(2007)

2. 스테레오 카메라 기반 측위 방법

스테레오 카메라 기반 측위는 카메라 2대를 이용한 측위 방법을 말한다. 스테레오 카메라는 사람의 눈이 거리를 판단하는 원리를 이용하여 2차원 픽셀에서 깊이 정보를 복원하여 3차원 공간 좌표로 변환할 수 있다. 먼저 2대의 카메라에서 찍은 이미지에서 픽셀을 매칭하여 픽셀의 시차(disparity)를 구한다. 시차는 두 이미지의 공통된 픽셀 간의 거리 차이를 의미한다. 이러한 시차와 카메라 초점, 그리고 두 카메라 간의 거리인 베이스라인(baseline)을 통해 카메라 픽셀의 3차원 공간에서의 깊이 정보를 알 수 있다. 또한, 이를 이용하여 공통된 픽셀 간의 깊이 이미지를 생성할 수 있다.

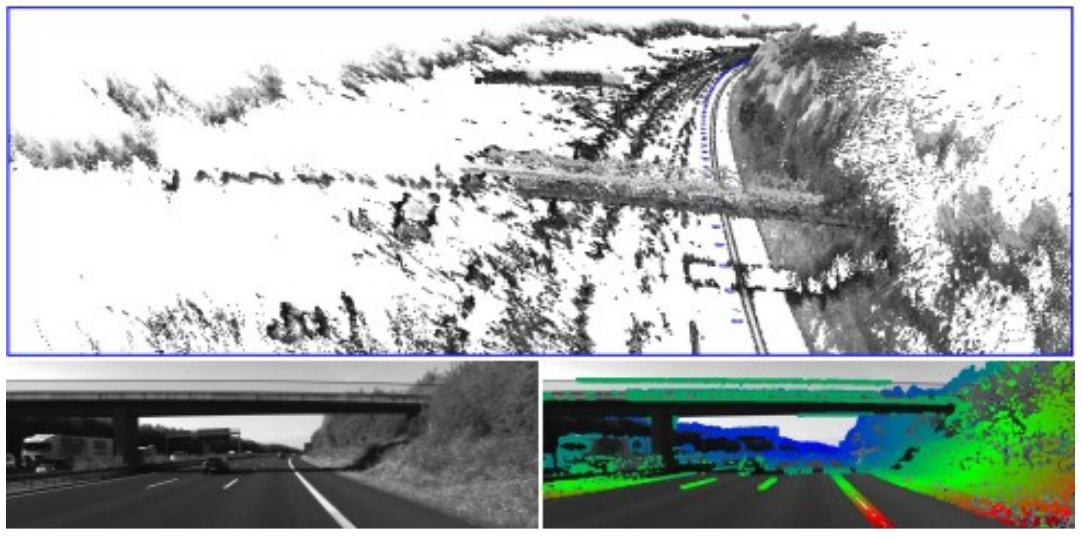
그림 8. (좌) 스테레오 카메라 깊이 추정 원리, (우) 두 이미지 간 시차를 이용한 깊이 이미지 생성



* 출처: (좌) Trucco & Verri(1998), (우) 조재일 외(2007)

이와 같이 두 이미지를 이용하여 픽셀의 깊이를 추정하고 깊이 이미지를 만들게 되면 이를 토대로 픽셀의 3차원 좌표를 알 수 있다. 이렇게 획득한 3차원 포인트를 이용하여 매칭을 수행하고 이를 토대로 SLAM을 수행할 수 있다.

그림 9. 스테레오 카메라 기반 SLAM

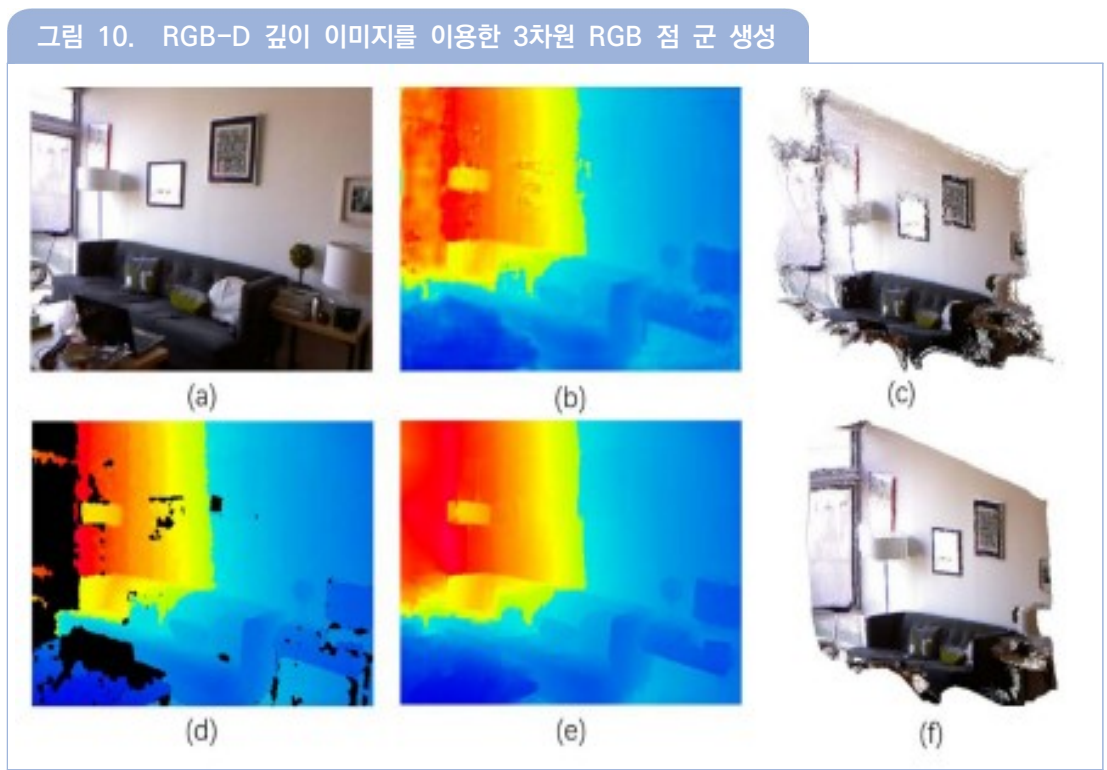


* 출처: Engel et al(2015)

하지만, 스테레오 카메라로 획득한 깊이 정보의 정밀도를 높이기 위해서는 베이스라인이 길어져야 한다. 만약, 베이스라인이 짧을 경우는 가까운 거리의 픽셀 이외에는 깊이 정보의 정밀도가 매우 떨어진다. 왜냐하면 거리가 먼 곳의 픽셀의 경우 두 이미지 간 시차가 매우 작기 때문이다. 또한, 모든 픽셀의 시차 및 깊이 계산을 위해 시간이 오래 걸리는 문제도 있다. 따라서, 실시간 처리를 위해 GPU를 사용하는 경우가 많으며, 단안 카메라 기반 측위와 같이 두 스테레오 이미지 사이의 공통된 특징점을 추출하고 이를 기반으로 하는 SLAM 연구도 많이 수행되고 있다.

3. RGB-D 카메라 기반 측위 방법

RGB-D 카메라는 RGB(적색, 녹색, 청색) 이미지에 추가로 적외선을 발사하여 돌아오는 TOF(Time of Flight, 빛을 물체에 쏘아 그로부터 반사되어 오는 시간)를 측정하고 거리를 계산하여 픽셀의 깊이를 추정하는 카메라이다. 두 이미지 간의 시차를 계산하여 깊이를 추정하는 스테레오 카메라와 달리 적외선 빛이 돌아오는 시간을 계산하여 깊이를 추정하기 때문에 픽셀의 3차원 좌표를 빠르게 얻을 수 있다.



* 출처: Xian et al(2020)

이와 같이, 추정된 깊이를 이용하여 픽셀을 3차원 좌표로 변환하고 이를 토대로 3차원 RGB 점 군 데이터를 얻을 수 있다. RGB-D 기반 측위는 라이다 기반 측위와 비슷하게 3차원 점 군 데이터 간의 스캔 매칭을 통해 수행되는 경우가 많으며, 이를 이용한 SLAM을 수행함으로써 RGB 기반의 3차원 공간 복원에 많이 사용된다. 3차원 공간 복원은 실제 공간을 RGB 데이터를 이용하여 디지털화하는 기술로써, 가상현실(Virtual Reality) 및 증강현실(Augmented Reality) 기술 발전에 따라 주목받고 있는 기술이다.

그림 11. RGB-D 카메라 기반 SLAM을 통한 3차원 공간 복원



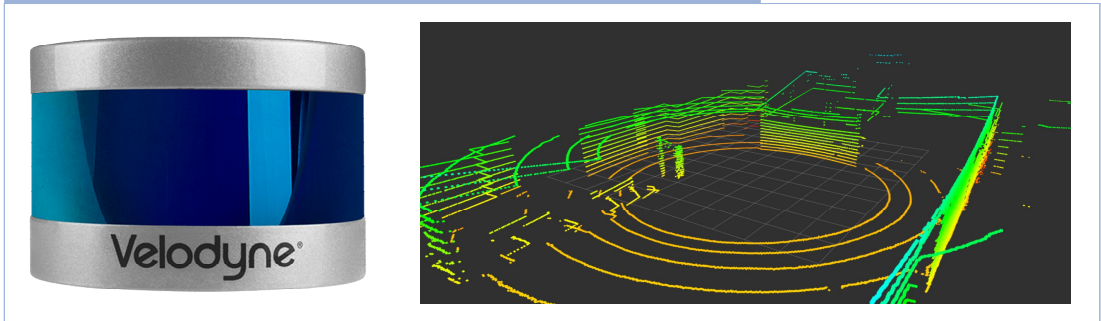
* 출처: Loo et al(2021)

RGB-D 카메라를 이용하면 RGB 이미지의 3차원 좌표를 쉽게 얻을 수 있으며 이를 이용하여 3차원 공간 복원에 사용이 가능하다. 그러나, 10~20m 정도의 가까운 거리의 깊이 정보만 획득 가능하다는 한계가 있어 실외에서의 사용이 어려운 단점이 있다. 또한, 카메라의 시야각(FOV, Field of View)이 작은 것도 단점 중 하나이다.

IV LiDAR 기반 정밀항법 기술

라이다(LiDAR)는 적외선 레이저 펄스(pulse)를 쏘고 반사되는 시간을 측정하여 반사된 지점의 거리와 각도 정보를 획득하고 이를 기반으로 주변 환경의 3차원 점 군(point cloud)을 제공하는 센서이다. 빛의 속도를 이용하여 적외선이 돌아오는 시간을 측정하여 거리를 계산하기 때문에 좌표의 정밀도가 높으며 분해능(resolution)이 높아 한 번에 많은 양의 3차원 좌표를 획득할 수 있다.

그림 12. (좌) 라이다(Velodyne VLP-16), (우) 3차원 점 군



* 출처: Velodyne Lidar 홈페이지

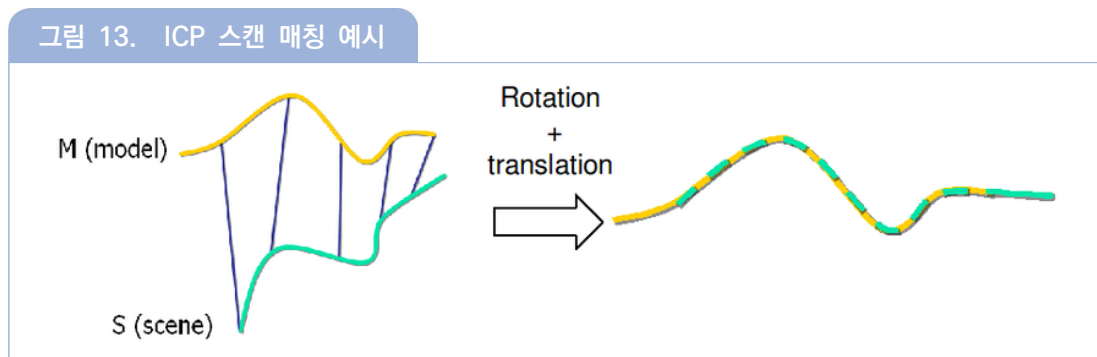
이와 같이, LiDAR는 정밀한 3차원 점 군 데이터를 제공하기 때문에 이를 효과적으로 이용하면 정밀한 항법이 가능하다. 하지만, 한 번에 제공되는 데이터가 많기 때문에 이를 전부 이용할 경우 실시간 처리가 힘든 단점이 있다. 따라서, 효과적으로 3차원 점 군을 활용하여 빠르고 정밀한 항법을 위한 연구들이 많이 진행되고 있다.

1. 스캔 매칭 기반 측위 방법

LiDAR를 이용한 정밀항법 중에 대표적인 방법으로 스캔 매칭 기반 측위가 있다. 스캔 매칭은 LiDAR에서 스캔된 3차원 점 군들을 매칭하는 방법을 지칭하는 말로, 이전 시점과 현재 시점 간의 점 군 데이터를 매칭함으로써 이동체의 위치 및 자세의 변화를 추정하여 항법을 수행하게 된다. 스캔 매칭 방법 중에 대표적인 방법으로 ICP(Iterative Closest Point, 최근접 점 반복 찾기)와 NDT(Normal Distribution Transform, 정규 분포 변환) 방법이 있으며, LiDAR가 개발된 초창기부터 제안된 방법이지만 여전히 많은 사람들이 이를 이용한 측위 기법을 연구개발하고 있다.

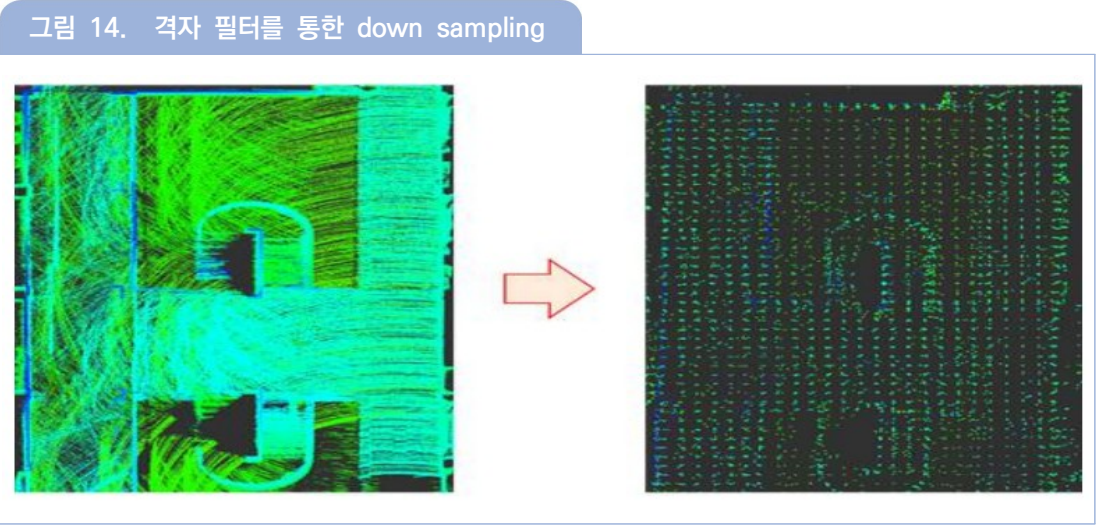
1.1. ICP 스캔 매칭 기반 측위

ICP 스캔 매칭은 두 스캔 데이터 점 군 간의 가장 가까운 점을 매칭하고 이를 최적화하는 방법이다. 가장 가까운 점을 매칭하기 때문에 간단하게 알고리즘 구성이 가능하며, 대응되는 점 군이 제대로 매칭된다면 좋은 성능을 낼 수 있기 때문에 쉽게 사용할 수 있는 방법이다.



* 출처: Molero et al(2011)

하지만, LiDAR에서 제공하는 수많은 점 군을 그대로 매칭하게 될 경우 많은 계산이 요구되어 처리 시간이 오래 걸리는 문제가 있다. 따라서, 이러한 문제를 최소화하기 위해 많은 연구들이 LiDAR 점 군을 그대로 사용하지 않고 격자 필터(grid filter)를 이용하여 다운 샘플링(down sampling, 포인트의 밀도를 줄이는 것) 후 매칭을 수행한다. 격자 필터는 일정 크기의 격자 안의 점 군을 하나의 점으로 변환하는 필터로, 이를 이용하여 점 군의 개수를 줄일 수 있으며, 그 결과 빠르게 스캔 매칭을 수행할 수 있다.



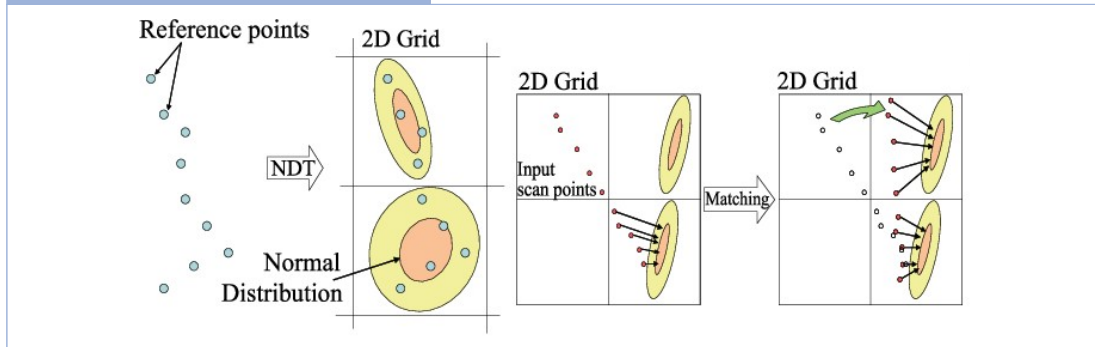
* 출처: 건국대학교(2019)

1.2. NDT 스캔 매칭 기반 측위

NDT 스캔 매칭은 점 군을 가우시안 확률 분포(Gaussian distribution)로 변환하여 매칭하는 방법이다. LiDAR 점 군을 일정 격자로 나누어 격자 안의 점을 이용하여 평균과 공분산을 구하며 이를 점과 매칭하여 계산된 확률 밀도 함수를 통해 최적화를 수행하게 된다. NDT 스캔 매칭은 점 군을 확률 분포로 변환하여 매칭하기 때문에 점과 점 사이의 매칭을 수행하는 ICP보다 계산 시간이 빠른 장점이 있다. 또한, 확률 분포와 실제 점 군 형상 간의 차이가 없을 경우 매칭 성능도 준수하다.

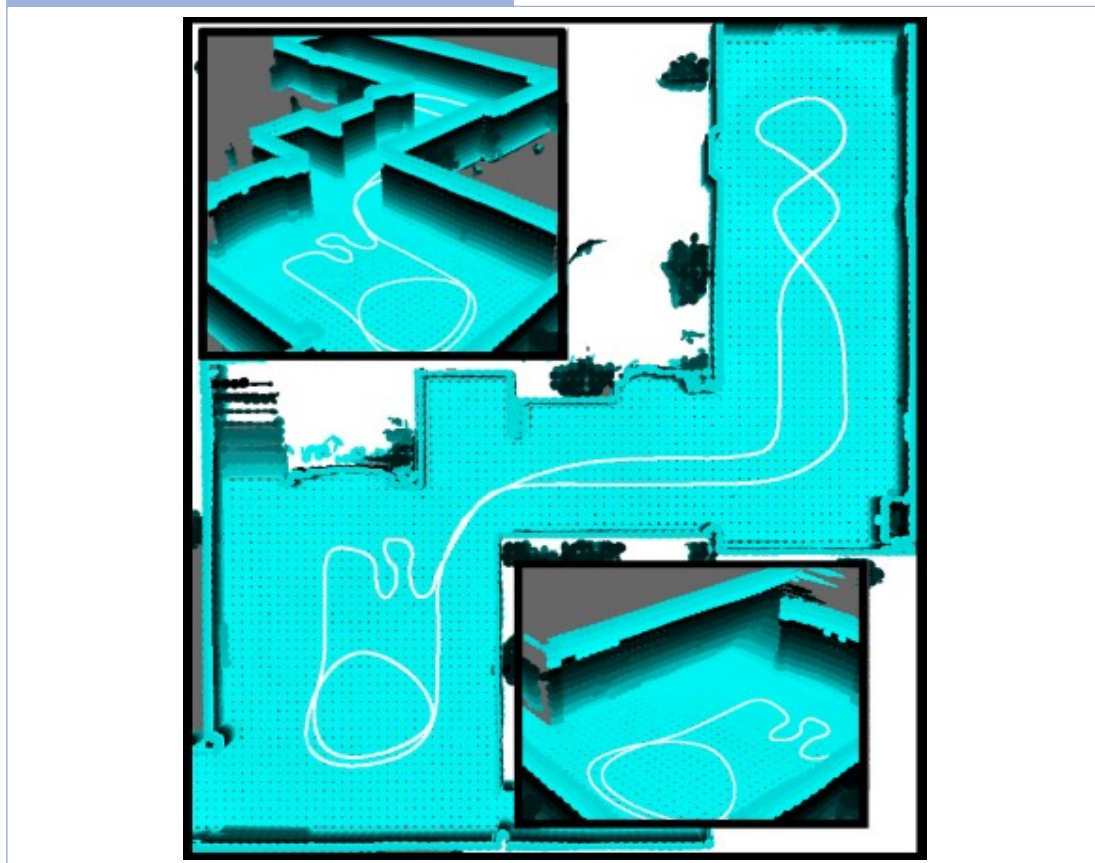
〈그림 15〉와 같이, NDT 스캔 매칭은 격자 내의 점 군을 확률 분포로 변환하고 매칭할 때에는 격자 내에 존재하는 점과 확률 분포를 매칭함으로써 최적화를 수행한다. 하지만, 격자 단위로 확률 분포를 변환하기 때문에 확률 분포와 실제 점 군과의 형상에 차이가 발생하게 되며, 이러한 차이가 클 경우 매칭 성능이 크게 저하되는 문제도 있다. 그러므로, NDT 스캔 매칭은 격자 크기를 어떻게 정할 것인가가 중요하다고 할 수 있다.

그림 15. NDT 스캔 매칭 예시



* 출처: Takubo et al(2009)

그림 16. NDT 스캔 매칭 기반 SLAM

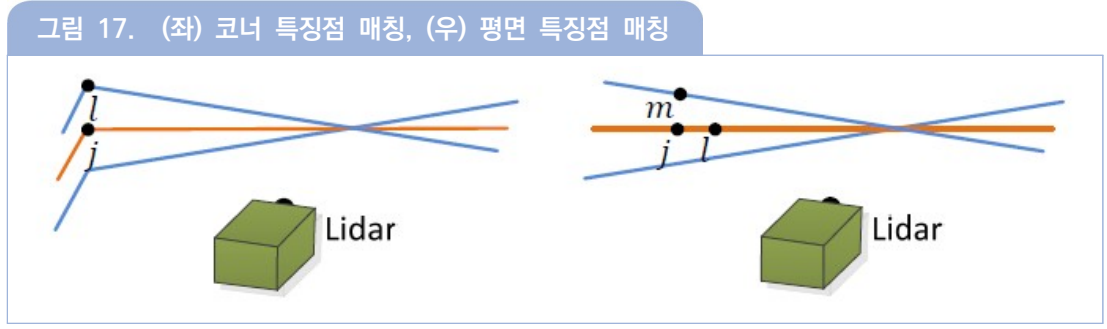


* 출처: Saarinen et al(2013)

2. 특징점 기반 매칭을 이용한 측위 방법

특징점 기반 매칭은 LiDAR의 전체 스캔 데이터를 이용하는 스캔 매칭과 달리, 스캔 데이터 중에서 특징이 되는 점을 추출하여 매칭하는 방법이다. 이를 이용하는 대표적인 방식으로 LOAM(Lidar Odometry and Mapping, 실시간 라이다 주행 거리 측정 및 지도화)이 있다. LOAM은 연속하는 LiDAR 포인트 간의 곡률을 구하여 코너와 평면에 해당되는 특징점을 추출하고 이를 각각의 해당되는 특징점과 매칭하는 방식이다.

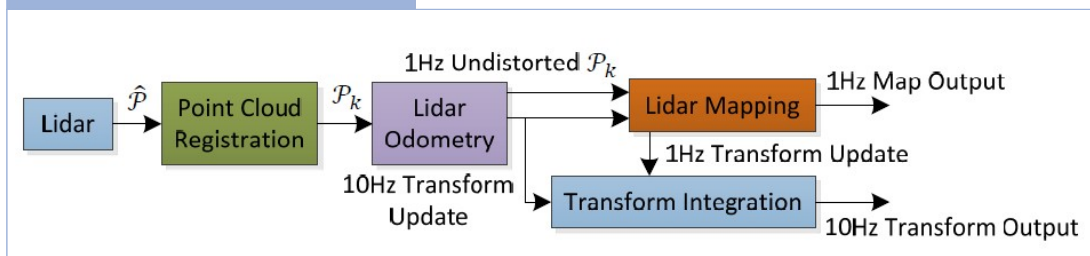
〈그림 17〉에서 보듯이, 코너와 평면의 특징점들은 각각의 특징점끼리 매칭된다. 코너의 경우 두 개의 코너 특징점을 추출하여 직선을 생성하고 이를 이용하여 직선과 점 사이의 최단 거리를 구한다. 또한, 평면의 경우에는 세 개의 평면 특징점을 추출하여 평면을 생성하고 평면과 점 사이의 최단 거리를 구한다. 이렇게 구한 거리들을 최소화하는 방법으로 매칭을 수행하게 된다. 이와 같이 특징점 매칭 기반 측위 방식은 전체 LiDAR의 스캔 데이터를 이용하는 스캔 매칭 방식에 비해 매칭에 이용되는 점의 개수가 줄어들기 때문에 처리 속도가 매우 빠르다는 장점이 있다.



* 출처: Zhang & Singh(2014)

또한, LOAM은 추측 항법과 지도 생성을 따로 수행한다는 특징이 있다. 기존의 다른 LiDAR SLAM의 경우 위치 추정과 지도 생성을 동시에 수행하는 경우가 많다. 하지만, 이를 동시에 수행할 경우 시간이 지날수록 지도에 들어가는 내용이 증가하기 때문에 실시간 처리가 힘들어진다. 따라서, LOAM은 시점 별 LiDAR 데이터를 연속으로 매칭을 수행하는 추측 항법으로 먼저 위치를 추정하고 이를 기반으로 지도와 매칭하여 최종 위치를 추정하는 방식을 사용하였다. 또한, 추측 항법은 LiDAR 주기마다 수행하고, 지도 생성은 그보다 느린 주기로 수행하여 계산 부담을 최소화함으로써 실시간으로 측위를 수행할 수 있도록 하였다.

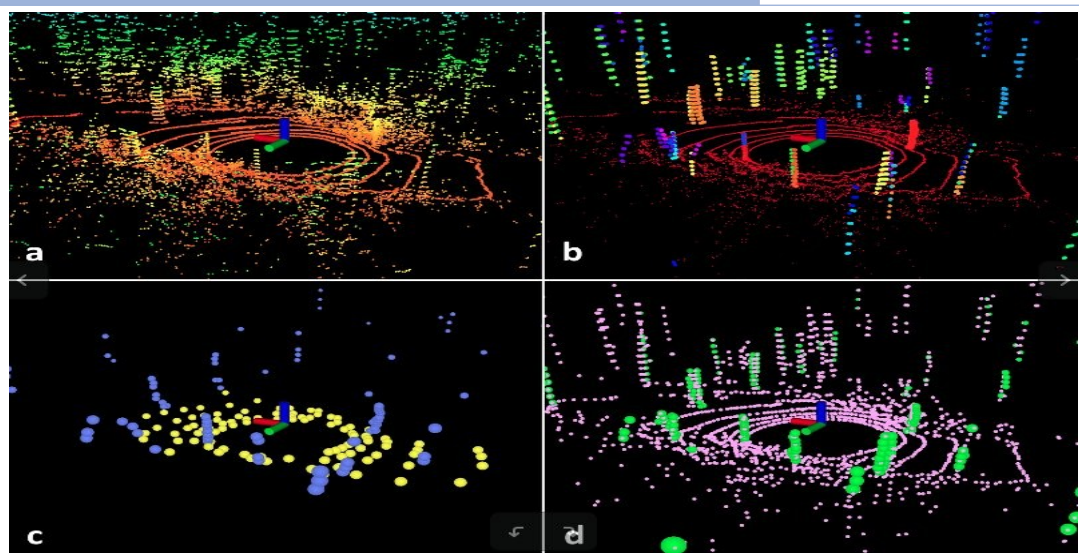
그림 18. LOAM 수행 흐름도



* 출처: Zhang & Singh(2014)

이러한 LOAM 방식에서 발전한 방법으로 LeGO-LOAM이 있다. LeGO-LOAM은 코너와 평면의 특징점을 추출하기 전에 영상 분할(segmentation) 과정을 추가하였다. segmentation은 라이다 포인트를 객체로 그룹화하는 과정이다. 이를 통해 추출된 특징점의 신뢰성을 높이고 보다 빠른 특징점 추출을 할 수 있다. <그림 19>에서 (a)의 라이다 점 군을 (b)와 같이 segmentation을 수행하여 각각의 개체로 군집화한 다음 (c)와 (d)의 과정을 통해 특징점을 추출하는 것을 확인할 수 있다.

그림 19. 효과적인 특징점 추출을 위한 point segmentation

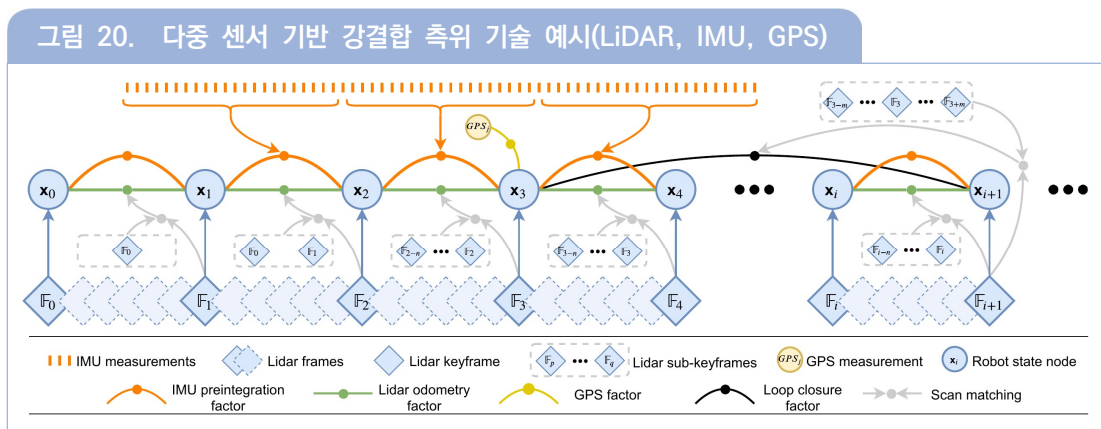


* 출처: Shan & Englot(2018)

LOAM과 같은 특징점 기반 매칭 방식을 이용한 측위 방법은 빠른 처리가 가능하고 정밀한 위치 추정 성능을 내고 있기 때문에 많은 기관에서 이를 이용한 개발 및 연구를 진행하고 있다.

V 센서 융합 기반 정밀항법 기술

센서 융합 기반 정밀항법은 복수의 센서에서 제공되는 데이터를 융합하여 측위를 수행하는 기술이다. 각각의 센서 데이터를 융합함으로써 하나의 센서가 갖고 있는 단점을 다른 센서를 이용하여 보완하며, 이를 토대로 보다 강건한 위치 추정을 가능하게 한다. 이러한 센서 데이터를 융합하는 방법으로 약결합과 강결합이 있다. 약결합은 각각의 센서 데이터로 계산된 측위 결과를 항법 필터로 계산하는 방법이며, 강결합은 각각의 센서 데이터를 같이 계산하여 측위 결과를 도출하는 방법이다. 약결합 방식의 경우 알고리즘 구성이 쉽기 때문에 시스템을 간단히 구성할 수 있으나, 시스템 안정성이 떨어지는 문제가 있다. 반면, 강결합 방식은 각각의 센서 데이터를 한 번에 계산하기 때문에 알고리즘 구성이 어려운 문제가 있으나, 하나의 센서 데이터가 잘못되더라도 다른 센서 데이터로 보정이 가능하기 때문에 시스템 안정성이 높다는 장점이 있다. 따라서, 많은 연구들이 센서 융합 기반 항법 기술 개발 시 강결합 기반으로 시스템을 구성하는 추세이다.



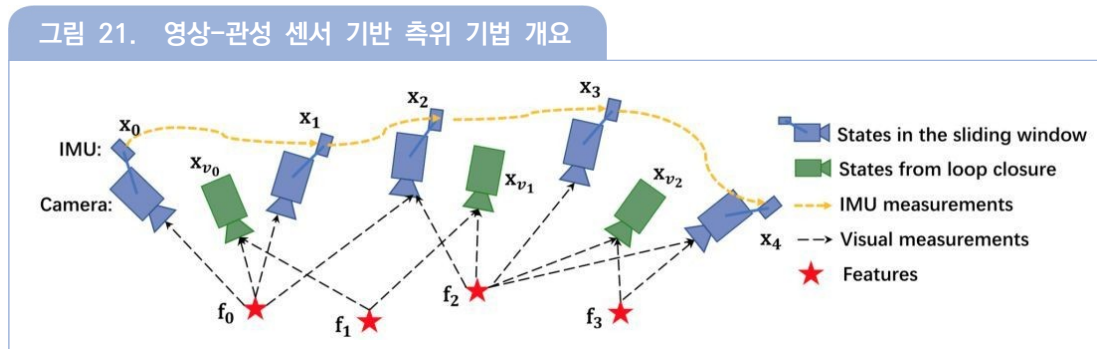
* 출처: Shan et al(2020)

1. 관성 센서 융합 기반 측위

IMU는 가속도와 자이로 센서(Gyro sensor, 회전하는 물체의 각속도를 감지하는 센서)를 이용하여 측위를 수행하는 센서이다. 가속도를 적분함으로써 속도 및 위치를 추정하고, 자이로의 각속도를 적분하여 자세를 추정할 수 있다. 하지만 제대로 측위를 수행하기 위해서는 가속도에서 중력 가속도 성분을 제대로 제거해야 한다. 또한, 센서의 잡음 및 바이어스가 존재하기 때문에 적분하여 측위를 수행하는 IMU 특성 상, 이를 제대로 제거하지 않으면 측위 오차가 계속 누적된다. 따라서, 대부분의 연구에서는 IMU만 이용하여 측위를 수행하지 않는다. 일반적으로 IMU는 다른 센서들에 비해 빠른 주기로 센서 데이터를 제공한다. 따라서, 다른 센서와 결합할 때는 다른 센서들의 주기 동안 센서 데이터를 누적하고 이를 결합하는 방법인 사전적분 방식(pre-integration)을 수행하여 사용한다.

1.1. 영상-관성 센서 기반 측위

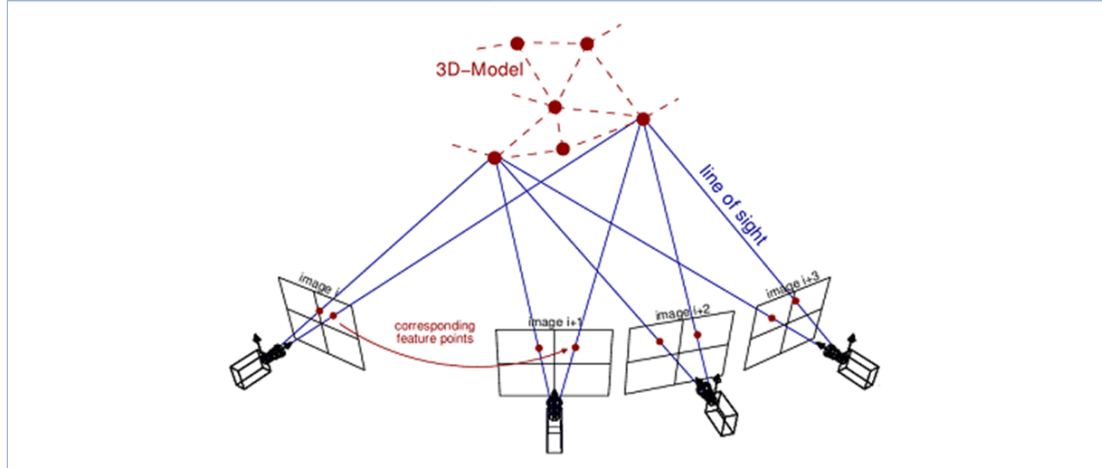
영상-관성 센서 기반 측위는 카메라와 IMU를 결합하여 측위를 수행하는 방법이다. 카메라는 3차원 공간을 2차원 이미지로 투영하는 과정에서 깊이 정보가 없어지기 때문에 추측 항법 시, 스케일을 알 수 없다는 단점이 있다. 또한, IMU는 시간이 지날수록 잡음 및 바이어스로 인한 오차가 누적되어 측위 오차가 크게 발생하게 된다. 이러한 문제를 가지고 있는 두 센서를 융합함으로써, 두 센서가 가지는 단점을 보완할 수 있다. 카메라가 갖고 있는 스케일을 알 수 없는 단점을 IMU의 데이터를 이용하여 보완하며, 오차가 누적되는 IMU의 단점은 영상 매칭을 통해 보정하여 해결할 수 있다.



* 출처: Qin et al(2018)

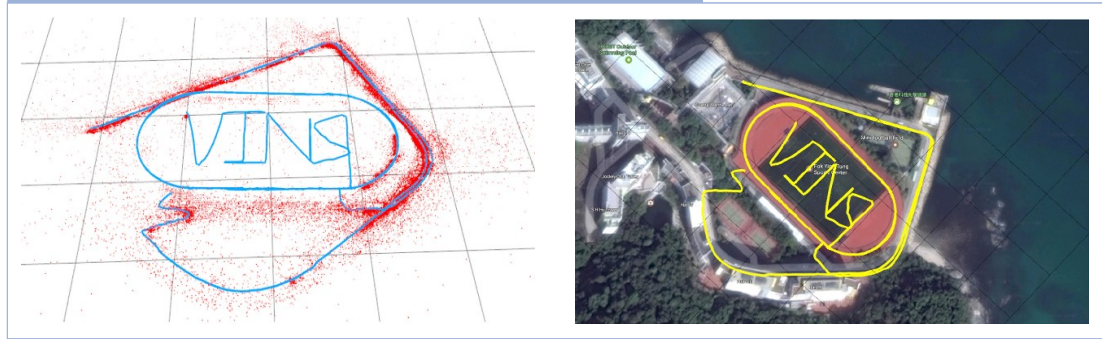
영상과 IMU를 이용하여 측위를 수행할 경우, 많은 연구들이 현재 프레임의 기준으로 일정 시점의 프레임을 묶어 한 번에 최적화하는 과정을 수행한다. 이를 번들 조정(bundle adjustment)라 한다. bundle adjustment는 시점 별 이미지 사이의 공통된 특징점을 찾고 이를 이용하여 각 시점 별 프레임을 한 번에 최적화하게 된다. 이 때, 추정된 위치 및 자세를 이용하여 3차원으로 변환된 특징점을 이미지에 재투영하며, 이를 추출된 특징점과 비교한 재투영 오차(reprojection error)를 최적화하게 된다.

그림 22. bundle adjustment 예시



* 출처: Doumit(2019)

그림 23. 영상-관성 센서 기반 측위 결과(VINS-Mono)

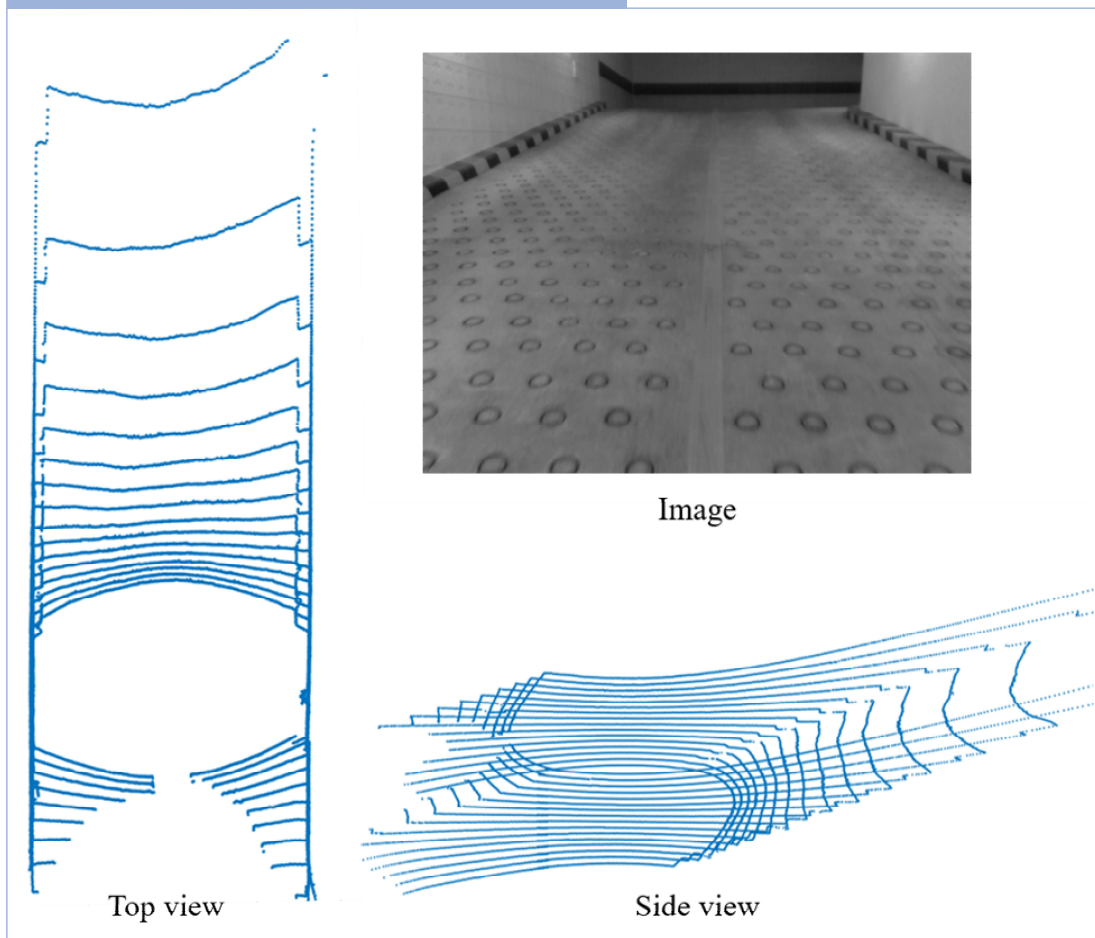


* 출처: Qin et al(2018)

1.2. LiDAR-관성 센서 기반 측위

LiDAR-관성 센서 기반 측위는 LiDAR와 IMU를 결합하여 측위를 수행하는 방법이다. LiDAR는 정밀한 점 군을 기반으로 매칭을 수행하기 때문에 정밀한 측위 결과를 도출할 수 있다. 하지만, LiDAR 기반 매칭의 경우 급격한 회전 시 매칭 성능이 저하되는 문제가 있다. 또한, 일자형 복도와 같은 기하학적으로 단순로운 공간에서도 매칭 성능이 떨어지는 문제가 있다.

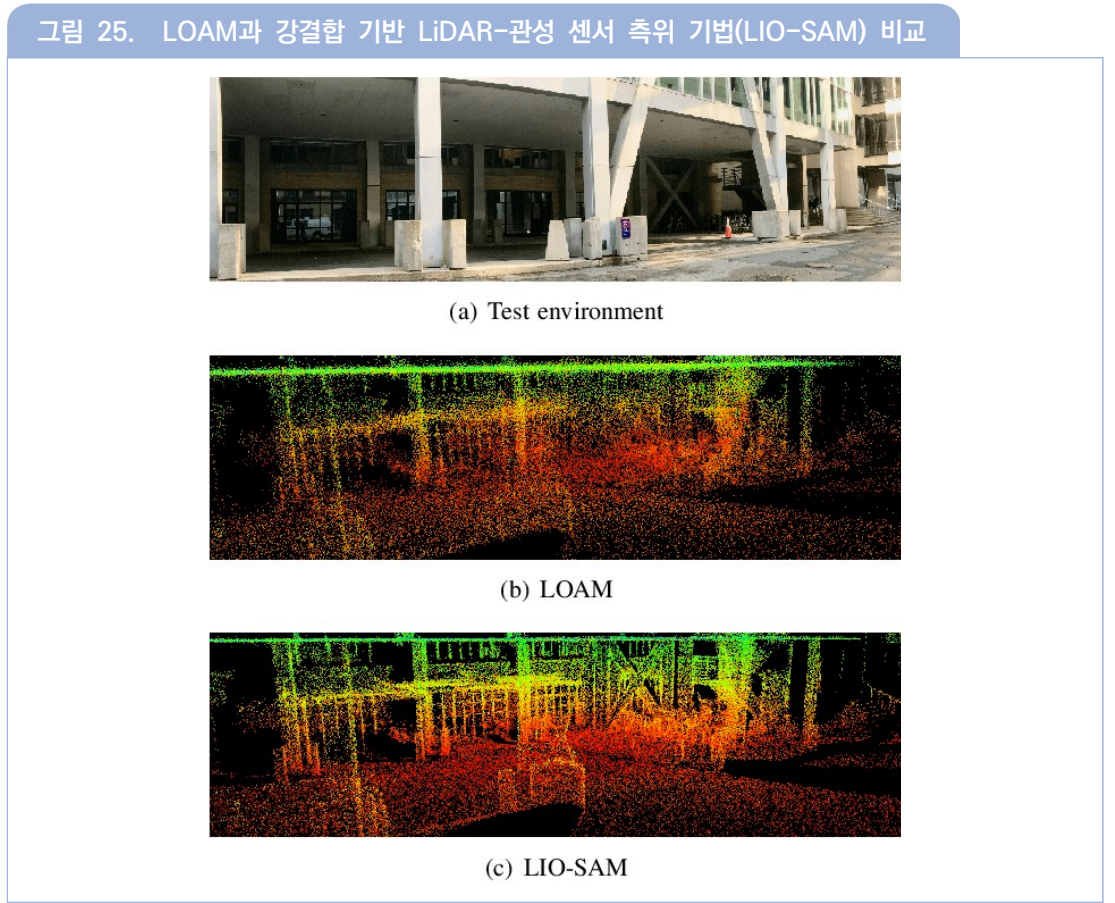
그림 24. 단조로운 환경에서의 LiDAR 스캔 결과



* 출처: 김규원 외(2019)

위와 같이 LiDAR 사용이 제한되는 상황에서 IMU와 결합함으로써 매칭 성능이 떨어지는 문제를 해결할 수 있다. 초기 LiDAR와 IMU 기반 측위는 약결합 기반으로 수행되었다. 먼저 IMU로 LiDAR 주기 동안 pre-integration을 수행하여 위치와 자세에 대한 증분 값을 도출하고 이를 기반으로 스캔 매칭을 수행하여 매칭 성능이 떨어지는 구간에서도 매칭을 수행할 수 있도록 하였다. 하지만, 약결합 기반으로 측위를 수행할 경우 LiDAR 스캔 매칭이 한 번 잘못되면 그대로 측위 오차로 작용한다는 단점이 있다. 따라서, 최근에는 IMU와 LiDAR의 센서 데이터를 한 번에 최적화하는 강결합 기반 측위 방법이 많이 연구되고 있다.

〈그림 25〉는 기존 LOAM과 강결합 기반 LiDAR-관성 센서 측위 기법인 LIO-SAM을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이, 누적된 점 군을 비교하였을 때 LIO-SAM이 LOAM보다 형태가 더 정밀하게 나온 것을 알 수 있다.



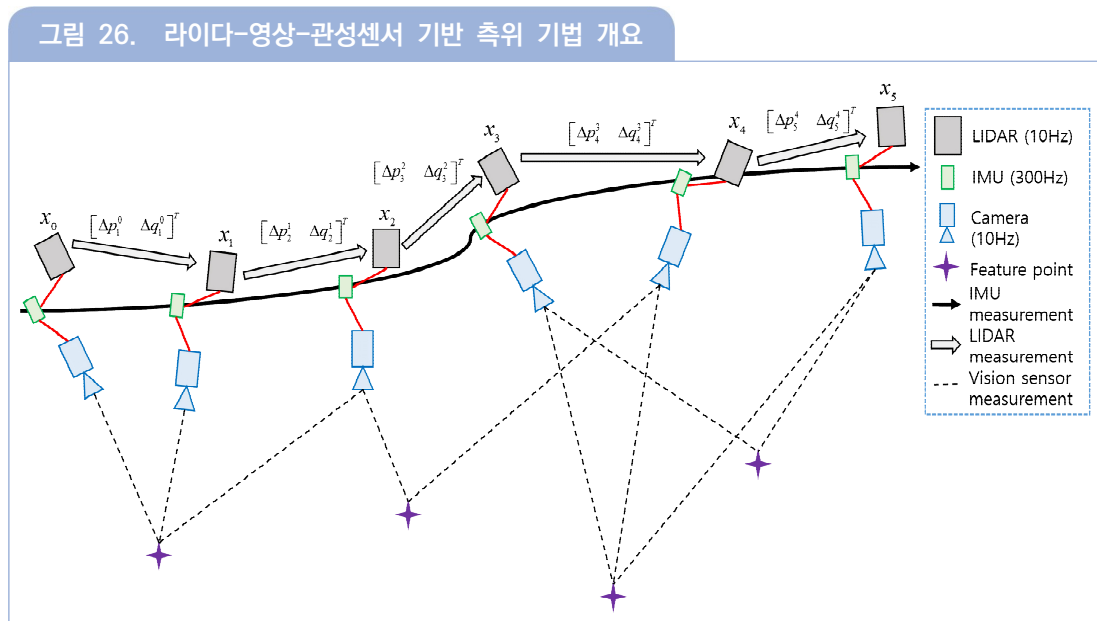
* 출처: Shan et al(2020)

2. 다중 센서 융합 기반 측위

센서 융합 기반 측위 기법은 앞에서 설명한 관성 센서와 결합하는 방법뿐만 아니라 3개 이상의 센서를 한꺼번에 융합하는 방법도 있다. 센서들이 많아질수록 시스템이 복잡해지고 구성이 힘들어지나, 이를 해결한다면 각 센서의 단점을 보완하여 매우 강건한 측위 성능을 도출할 수 있다.

다중 센서 융합 측위에서 대표적인 센서들은 LiDAR, 카메라, IMU이다. LiDAR와 카메라는 측위를 위해 많이 사용되는 센서이고 이를 보조하는 역할로 IMU도 많이 사용되고 있다. 따라서, 이를 모두 결합하여 측위를 수행하는 연구들이 진행되고 있다.

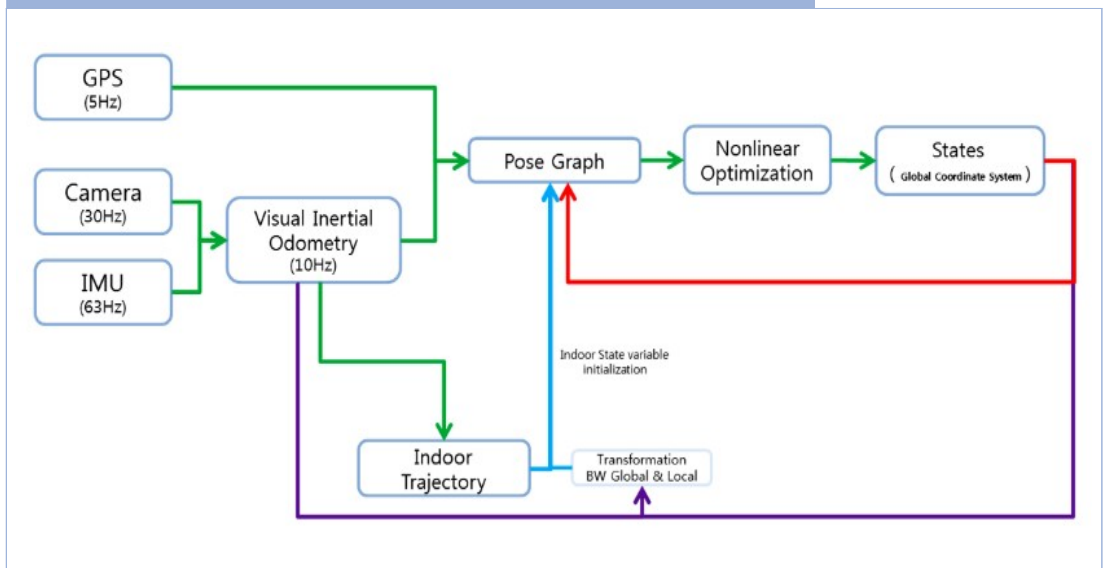
〈그림 26〉은 LiDAR, 카메라, IMU를 결합한 측위 기법을 나타낸 것이다. 위의 방법에서는 측위를 위해 카메라 이미지에서 특징점을 추출하며, LiDAR는 스캔 매칭을 통해 도출된 시점 별 위치 및 자세의 증분 값을 사용한다. 또한, IMU는 pre-integration으로 다른 센서 주기에 맞춘 증분 값을 사용한다. 이를 일정 시점 별로 모아 한 번에 최적화를 수행하여 측위를 수행하게 된다.



* 출처: 김규원 외(2020)

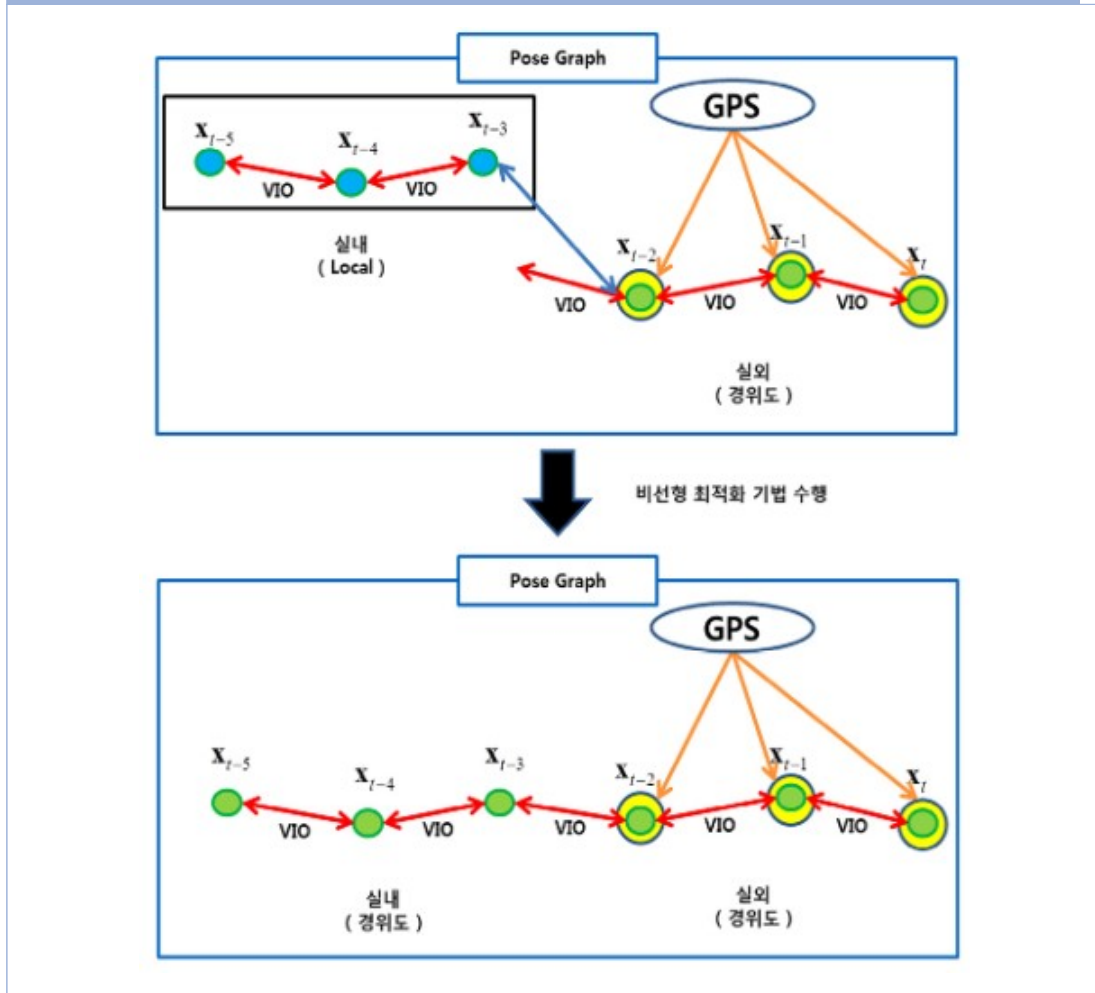
또한, 위의 센서에 더해 GNSS와 같은 위성 항법 센서와 결합하는 연구도 진행되고 있다. GNSS는 위성으로부터 신호를 수신 가능한 실외에서만 사용 가능하다는 단점이 존재한다. 하지만, 다른 센서 기반 측위와 달리 유일하게 절대 위치 좌표를 제공한다는 장점이 있다. 따라서 실내에서 드론이 비행을 하다가 실외로 나가게 될 경우 GNSS에서 절대 좌표를 획득하고 이를 기반으로 지금까지의 궤적을 절대 좌표로 변환한다면 실내외 이동 궤적에 대한 절대 좌표를 획득할 수 있다. 또한, GNSS는 절대 위치를 제공하기 때문에 위치 오차가 크게 발생하는 경우는 있어도, 오차가 누적되는 경우는 없다. 따라서, 다른 센서 기반 측위 방법에서 누적되는 오차를 보정하는 방법으로 GNSS를 활용할 수 있다.

그림 27. 위성항법-영상-관성 센서 결합 기반 측위 알고리즘 예시



* 출처: 최영동 외(2019)

그림 28. 위성항법-영상-관성 센서 결합 기반 측위를 위한 실내외 주행 시 절대좌표 변환



* 출처: 최영동 외(2019)

VI 결론

지금까지 드론의 자율비행을 위해 드론에 주로 장착하는 센서들을 활용한 정밀항법 기술에 대해 소개하고 분석을 수행하였다. 현재, 드론의 활용 영역은 점점 넓어지고 있으며 드론에 요구되는 다양한 목적을 수행하기 위해서는 자율비행이 필수적이다. 따라서, 드론에 탑재된 다양한 센서들을 활용한 측위 기술 개발의 중요성이 점점 높아지고 있다고 할 수 있다. 이러한 측면에서, 우리나라도 자율비행 드론 개발을 위한 정밀항법 기술의 연구 지원 및 원천 기술 확보를 위해 더욱 노력해야 할 것이다.

저자_ 지규인(Gyu In Jee)

• 학력

케이스 웨스턴 리저브 대학교(Case Western Reserve Univ.)
시스템공학 박사
서울대학교 제어계측 석사
서울대학교 제어계측 학사

• 경력

現) 건국대학교 전기전자공학부 교수

저자_ 김규원(Kyu Won Kim)

• 학력

건국대학교 전자정보통신공학 박사
건국대학교 전자정보통신공학 석사
건국대학교 전자공학 학사

• 경력

現) (주)만도 책임연구원

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 건국대학교. (2019). 궤적 최적화 기반 실시간 3차원 Lidar/영상 복합정보지도 구축과 지도기반 정밀 측위 및 최적경로 생성기술 개발. 무인이동체미래선도핵심기술개발(R&D) 최종보고서.
- 2) 경상북도. (2019.11). 『4차 산업혁명 기반 드론 산업』 국내외 동향연구 보고서.
- 3) 김규원, 정태기, 서성훈, 지규인. (2020). 강결합 기반 LIDAR-Visual-Inertial Odometry 기법 개발. 제어로봇 시스템학회 논문지, Vol. 26, No. 8.
- 4) 김규원, 정태기, 최영동, 지규인. (2019). 무인 드론의 실내 비행을 위한 LVIO 기반 지도 생성 및 단안 카메라를 이용한 위치 및 자세 추정. 제어로봇시스템학회 논문지, Vol. 25, No. 6.
- 5) 조재일, 최승민, 장지호, 황대한. (2007). 지능형 로봇 스테레오 비전 처리 기술. 전자통신동향분석, Vol. 22, No. 2.
- 6) 최영동, 김규원, 정태기, 서성훈, 지규인. (2019). 비선형 최적화 기법 기반 실내외 GPS/VIO 시스템. 제어로봇 시스템학회 논문지, Vol. 25, No. 12.

〈국외문헌〉

- 7) Azarcocya-Cabiedes, W., Vera-Alfaro, P., Torres-Ruiz, A., Salas-Rodríguez, J. (2014). Automatic detection of bumblebees using video analysis. Dyna, Vol. 81, No. 187.
- 8) Doumit, J. A. (2018). From Drones to Geospatial Data.
- 9) Engel, J., Stuckler, J., Cremers, D. (2015). Large-scale direct SLAM with stereo cameras. 2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems(IROS).
- 10) Klein, G., Murray, D. (2009). Parallel tracking and mapping on a camera phone. 2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality.
- 11) Loo, S. Y., Mashohor, S., Tang, S. H., Zhang, H. (2021). DeepRelativeFusion: Dense Monocular SLAM using Single-Image Relative Depth Prediction. 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS).
- 12) Moleró, R., Scherer, S., Chamberlain, L., Singh, S. (2011). Navigation and Control for Micro Aerial Vehicles in GPS-Denied Environments. Carnegie Mellon University.
- 13) Qin, T., Li, P., Shen, S. (2018). Vins-mono: A robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator. IEEE Transactions on Robotics, Vol. 34, No. 4.
- 14) Roh, H., Jeong, J., Cho, Y., Kim, A. (2016). Accurate Mobile Urban Mapping via Digital Map-Based SLAM. Sensors, Vol. 16, No. 8.

15) Saarinen, J. P., Andreasson, H., Stoyanov, T., Lilienthal, A. J. (2013). 3D normal distributions transform occupancy maps: An efficient representation for mapping in dynamic environments. The International Journal of Robotics Research, Vol. 32, No. 14.

16) Shan, T., Englot, B. (2018). Lego-loam: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS).

17) Shan, T., Englot, B., Meyers, D., Wang, W., Ratti, C., Rus, D. (2020). LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping. 2020 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems(IROS).

18) Takubo, T., Kaminade, T., Mae, Y., Ohara, K. Arai, T. (2009). NDT scan matching method for high resolution grid map. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

19) Trucco, E., Verri, A. (1998). Introductory Techniques for 3-D Computer Vision. Engelwood Cliffs: Prentice Hall.

20) Xian, C., Zhang, D., Dai, C., Wang, Charlie C. L. (2020). Fast Generation of High Fidelity RGB-D Images by Deep-Learning with Adaptive Convolution. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 18, No. 3.

21) Zhang, J., Singh, S. (2014). LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time. Robotics: Science and Systems, Vol. 2, No. 9.

〈기타자료〉

22) 김가빈. (2019.06.27). 30분 만에 택배가 날아온다고? 어떻게?. 앱스토리. <https://news.appstory.co.kr/plan11891>.

23) 이광민. (2020.04.08). 드론의 역사부터 근황과 활용, 부작용과 그를 극복하는 기술까지. 한민일보 기획특집. <http://www.hanminilbo.co.kr/news/articleView.html?idxno=32641>.

24) 이동희. (2017.12.21). 건설·하천관리 등에 드론 활용 ... 시장규모, 4.4조원까지 키운다. 뉴스1. <https://www.news1.kr/articles/?3186325>.

25) 정도영. (2019.11.05). 국내 스마트 농업 선도 한빛 드론, 신제품 'T16' 출시. 한스경제. <https://www.sporbiz.co.kr/news/articleView.html?idxno=388962>.

26) 항공우주연구원. (2021.06.25). 한국형 정밀 GPS 위치보정시스템(KASS).



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 July vol.8 no.7



02

고도 자율주행을 위한 센서기술 동향

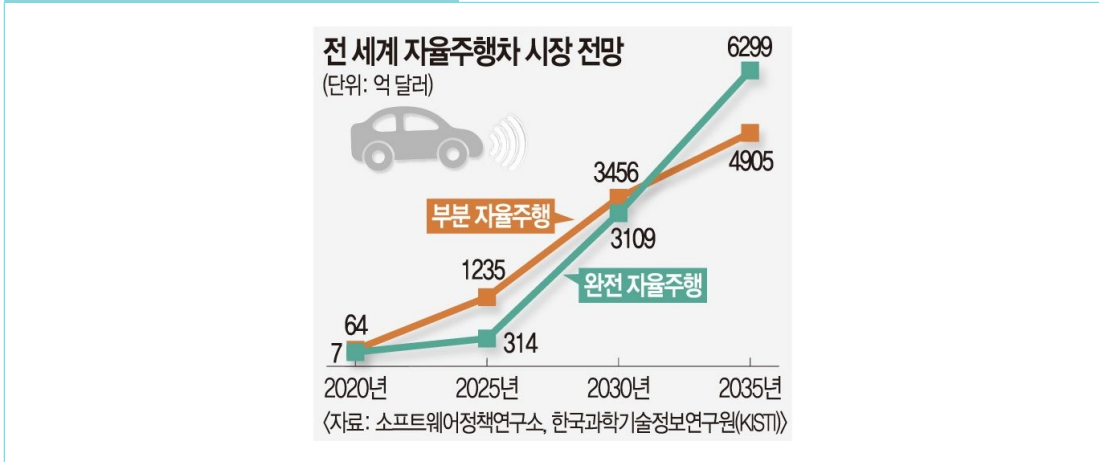
기석철(충북대학교 지능로봇공학과 교수)

I 서론

1. 자율주행차 개요

우리 정부는 자율주행차(레벨 4+)를 2027년까지 상용화한다는 목표가 포함된 미래자동차 전략을 발표한 바 있다(국토교통부 보도자료, 2019). 이를 위해, 2021년 범부처 조직으로 자율주행기술개발혁신사업단을 설립하여, 4개의 정부부처(산업통상자원부, 과학기술정보통신부, 국토교통부, 경찰청)에서 기획한 88개의 세부 과제를 추진하고 있다. 새정부에서도 수요자 중심의 ‘모빌리티’로의 정책 패러다임 전환을 강조하였고 ‘110대 국정과제’에도 완전자율주행차 기술개발 내용이 포함되었다. 현대자동차를 비롯한 글로벌 자동차 기업들도 완전 자율주행차량 상용화 시기를 빠르면 2024년, 늦어도 2027년 이내가 될 것으로 전망한 바 있다. 현대자동차는 2022년 하반기에 제네시스 G90에 레벨 3 수준의 고속도로 자율주행 기능인 ‘HDP(Highway Driving Pilot)’를 처음 적용하는 것을 포함해서 자체 개발한 레벨 4 수준의 자율주행차를 활용한 ‘로보라이드(RoboRide)’ 서비스도 국내 주요 도시에 시범 도입하여 2023년부터 상용화를 추진한다는 계획이다. <그림 1>에 제시된 바와 같이, 한국과학기술정보연구원(KISTI) 등의 자료에 의하면 글로벌 자율주행차 시장도 폭발적 성장세가 예상된다. 자율주행차 시장은 2020년 71억 달러(약 9조 원) 수준에서 2030년 6,565억 달러(약 815조 원)까지 확대될 것으로 예측된다. 2025년까지는 부분 자율주행차 시장이 1,235억 달러로 314억 달러 수준의 완전 자율주행차 시장보다 규모가 크지만, 2030년을 기점으로 부분 자율주행차는 성장세가 감소하고 완전 자율주행차가 본격적으로 시장을 주도할 것으로 예측된다. 한편, 글로벌 자동차시장은 2020년 9천만대에서 2030년 1.1억대 수준으로 횡보할 것으로 예상되지만, 전기차의 판매 비중은 50% 수준으로 급격하게 증가할 것이다.

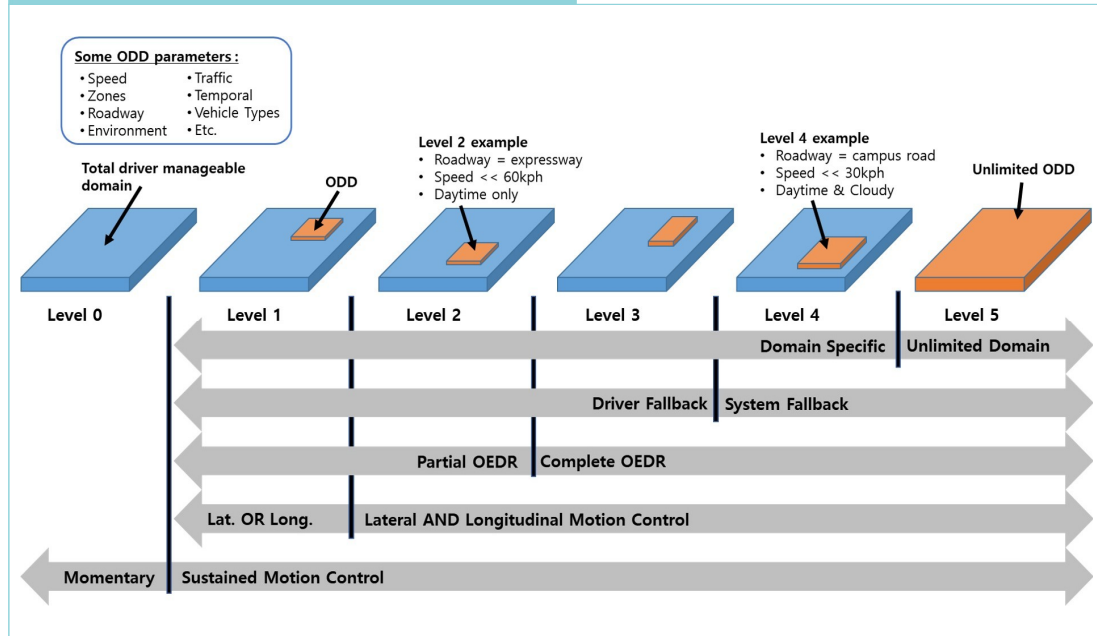
그림 1. 글로벌 자율주행 시장 전망



* 출처: 국민일보(2022)

미국자동차공학회(SAE, Society of Automotive Engineers)는 자율주행 기술을 자동화 수준에 따라 6단계(레벨 0~5)로 분류하고 있다. 현재 Tesla 등 제조사들이 생산하는 자동차에 장착된 자율주행 기술은 대부분 레벨 2+ 수준이며, 2021년부터 시범 단계의 레벨 3 자동차가 시장에 출시되고 있다. 각종 실증사업으로 안전성 검증이 가능한 제한된 운행설계영역(ODD, Operational Design Domain)을 제시하여 유상운송이 가능한 레벨 4 자율주행차 신개념 모빌리티 서비스사업자를 중심으로 시장 진출을 모색하고 있다. 그에 비해 레벨 5 자율주행차는 운행설계영역을 제한할 수 없는 수준이므로 단기간 내에 상용화 실현은 불가능할 것으로 판단된다. 자율주행 레벨과 운행설계영역과의 관계는 <그림 2>에 예시를 제시하였다. 따라서 현재 상황에서의 기술개발 및 안전성 확보의 주요 목표는 레벨 2~4이며, 특히 레벨 3에 우선순위를 두어야 한다.

그림 2. 자율주행 레벨과 운행설계영역의 예시

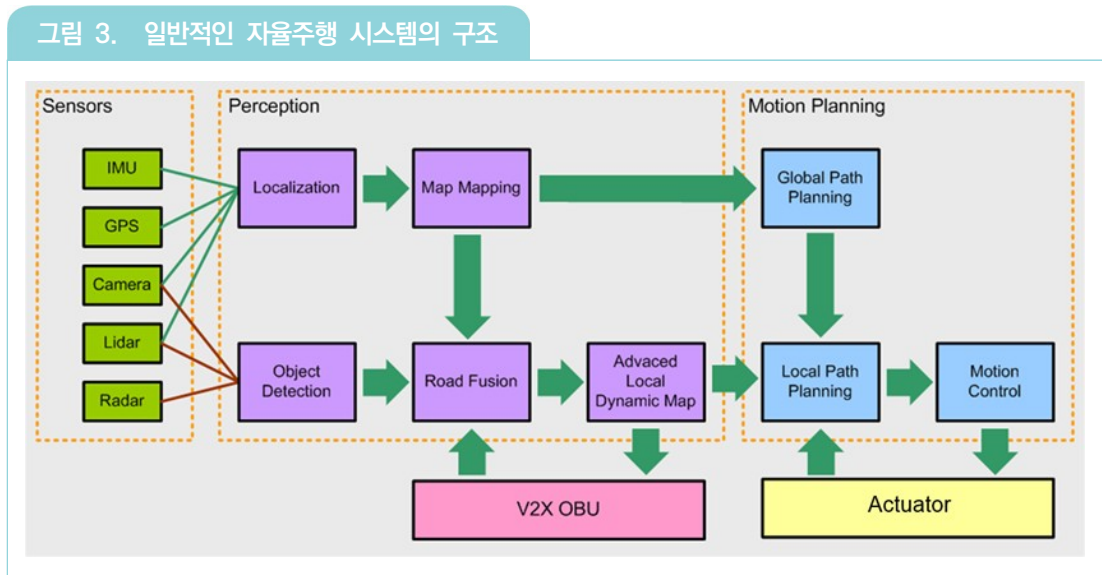


* 출처: SAE International(2019)

2. 자율주행 시스템 구조

일반적인 자율주행 시스템의 구조는 <그림 3>과 같다. 자율주행 센서는 정밀지도 위에서 자차의 위치를 인식하기 위한 센서와 주행 환경에 존재하는 다양한 객체들을 인식하기 위한 센서로 구성된다. 자차위치인식을 위해서는 관성측정센서(IMU, Inertial Measurement Unit), 위성항법센서(GPS, Global Positioning System), 카메라, 라이다(LiDAR, Light Detection And Ranging) 등이 사용되며, 객체인식을 위해서는 카메라, LiDAR, 레이더(RADAR, Radio Detection And Ranging) 등이 사용된다. 자차의 정확한 위치 정보가 획득된다면, 고정밀 자율주행지도를 참조하여 실세계 좌표계에서 전역 경로계획(global path planning)을 세울 수 있다. 전역 경로계획으로 기본적인 자율주행은 가능하지만, 실제 주행 환경에서는 자차의 주변에 있는 정적/동적 객체들을 실시간으로 인식하여 지역 경로계획(local path planning)을 수립하고, 샤시(chassis, 차량에서 차체를 제외한 나머지 부분의 통칭으로 엔진, 동력전달장치, 조향장치, 브레이크 등을 포함) 시스템의 종/횡방향 제어를 수행함으로써 안전한 자율주행이 가능하게 된다.

이상과 같이 자율주행차 시스템 구현을 위해서는 위치인식과 객체인식 기능이 반드시 필요하며 고도화된 자율주행 레벨을 실현하기 위해서는 자율주행 센서의 기능과 성능의 혁신이 동반되어야 한다. 특히, 카메라와 LiDAR는 위치 인식과 객체인식을 위해 모두 사용될 수 있으므로 자율주행 센서의 활용 범위 측면에서 중요성이 더욱 커지고 있다(기석철, 2017). RADAR 센서는 객체인식에만 특화되어 사용 가능한 센서이나 열악한 주행 환경에서도 가장 신뢰성 있는 인식 결과를 제공할 수 있기 때문에 자율주행시장에서 지속적으로 매출이 확대되고 있다.



* 출처: 저자작성

융합연구리뷰에서는 자율주행 레벨 고도화를 위해 핵심적으로 연구·개발되고 있는 자율주행 센서 중에서 카메라, RADAR, LiDAR를 중심으로 시장동향 및 기술개발 동향을 살펴보고, 자율주행 센서의 향후 주요 이슈 기술까지 정리하였다.

II 자율주행 센서 시장 동향

1. 센서의 신뢰성 이슈

자율주행 시스템은 주행 환경 인프라(V2X, HD Map 등)와 전자제동 및 조향장치 등 많은 구성요소들이 있지만, 카메라, RADAR, LiDAR, GPS 등의 센서들이 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 복잡한 주행상황을 판단할 수 있는 고도의 인공지능 기술, 최적의 제어값으로 안전한 종횡방향 제어가 가능한 기술도 필요하지만, 양산 수준의 성능과 신뢰성이 확보된 센서가 없다면 고도의 자율주행차를 구현할 수 없다. 양산 수준의 성능과 신뢰성을 보장하기 위한 조건으로는 센서의 가격, 다변화, 이중화 등이 있다. 첨단 운전자 보조 시스템(ADAS, Advanced Driver Assistance System)으로 지칭되는 레벨 2 수준의 자율주행 시스템의 시장보급이 급격히 증가된 원인은 센서의 저가화, 센서 구성의 다변화를 통해서 상용화 수준의 센서융합 솔루션이 제공되었기 때문이다. 글로벌 자동차 제조사들은 주요 센서의 예상치 못한 고장에도 대비할 수 있는 시스템 신뢰성 확보를 위해서 상호 보완적인 다수의 센서를 이중화하는 전략을 가지고 최적의 센서 구성을 설계하고 있다. 구글 Waymo, 중국 Baidu 등 로보택시(Robotaxi) 상용화를 목표로 하는 자율주행 기업들도 다수의 카메라, LiDAR, RADAR 센서를 이중화하여 장착하고 있고, AutoX, Pony.AI 등 자율주행 마일리지에서 선두권을 유지하고 있는 실리콘밸리 스타트업들도 유사한 센서 시스템 구조를 설계하고 있다. 한편, BMW, Daimler 등 독일 제조사들은 보급형 카메라, RADAR, LiDAR 센서를 사용하면서 근거리 인식을 위한 초음파 센서도 함께 사용하는 차별성을 보이고 있다. 실질적으로 레벨 3 수준의 자율주행 기능을 제공하고 있으나, 자율주행 사고책임 위험을 경감하기 위해서 레벨 2+ 제품으로 판매하고 있는 Tesla는 이례적으로 멀티 카메라 센서만으로 고도 자율주행 기술을 개발하겠다는 전략을 발표하고 있어서 안전성에 대한 이슈가 지속적으로 제기되고 있다. 현대자동차의 아이오닉 5 로보택시는 자율주행 기능을 신뢰할 수 있도록 해주는 세 가지 요소를 갖추고 있다. LiDAR, RADAR, 카메라로 이루어진 30여 가지의 센서가 차량 주변을 360도로 감시하고 있으며, 센서 이중화 시스템이 비정형 주행 환경에서도 안전하게 대응할 수 있다. 아이오닉 5 로보택시에 탑재된 모든 시스템은 백업, 즉, 메인 시스템에 오류가 있는 경우 작동되는 2차 시스템을 갖추고 있다. 이러한 시스템은

센서뿐만 아니라, 제동, 조향, 동력 시스템에도 모두 적용되어 있다. 원격 차량지원(RVA, Remote Vehicle Assistance)은 차량이 공사 현장이나 도로 침수, 다른 운전자들의 예상치 못한 혹은 불법적인 행위와 같은 모든 종류의 예측 불가능한 상황이 발생하면 자율주행차를 상시 감시하고 있는 원격 제어 시스템에 연결하여 새로운 경로를 안내하거나, 인근 주차공간에 대피하는 등 안전 제어 기능을 제공할 수 있다.

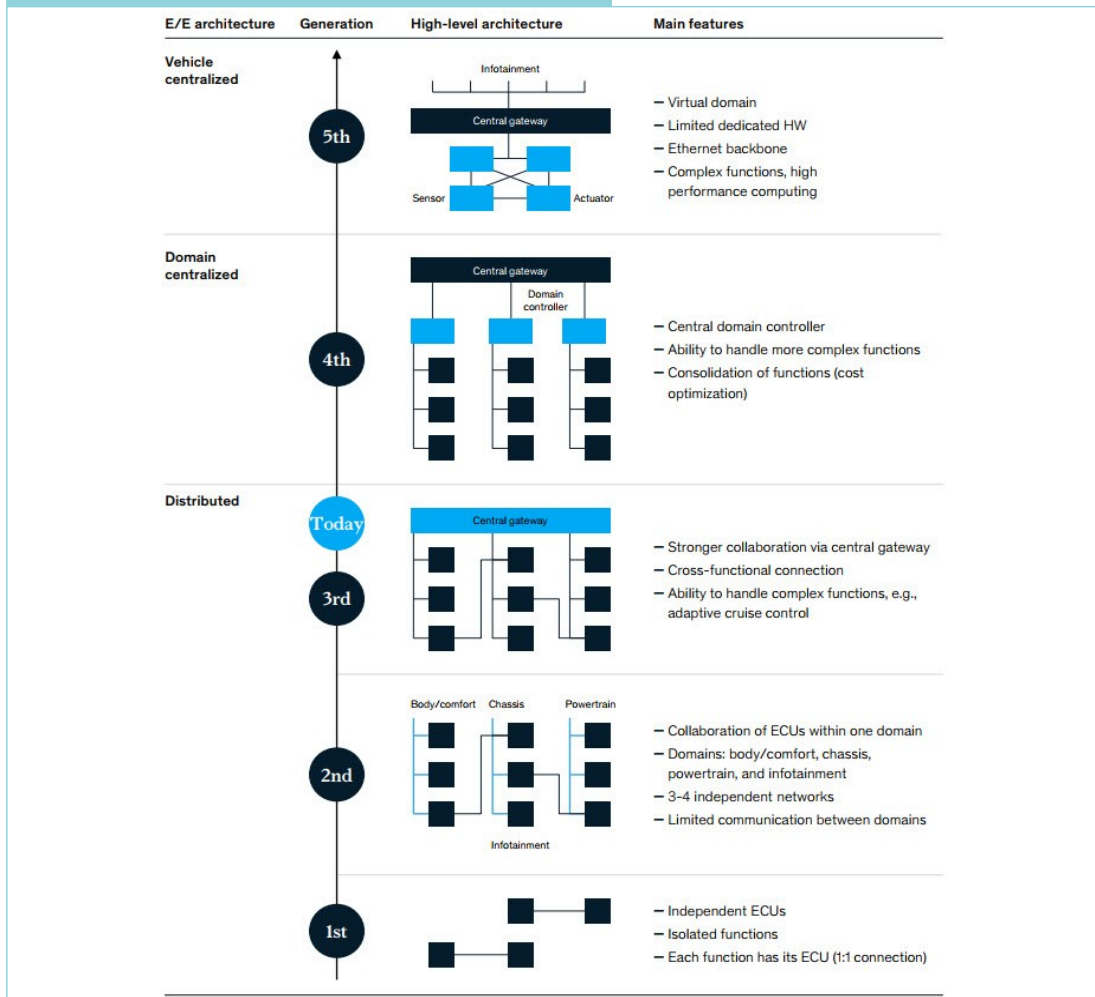
이상과 같이 대부분의 자율주행 기업들이 카메라와 RADAR를 필수 센서로 채택하고 있으며, LiDAR와 초음파 센서를 선택적으로 사용하고 있다. 특히, LiDAR는 기존 센서와 비교될 수 있는 수준의 가격 경쟁력과 기구적 경량화, 광학 환경변화에 민감한 단점 등을 극복한다면 자율주행 레벨 3 이상의 시스템에서 센서 이중화와 고신뢰도를 목적으로 카메라와 LiDAR와 같이 3대 필수 센서가 될 것으로 예상된다. 자율주행업체별로 센서 구성이 차별화되는 이유는 국가별 법규, 지역별 주행환경, 목표 시장별 사용자 요구사항을 고려한 설계의 차이에 의한 것으로, 지속적인 최적화 개발을 통해서 표준화된 센서 시스템 아키텍처가 제안될 수도 있을 것이다. 현재 진행 중인 센서 시스템 아키텍처 변화의 방향성은 센서 소형화 및 저가화를 통한 장착 센서 수 증대와 개별 센서들의 해상도(resolution) 및 감지 범위(FoV, Field of View) 확대에 요약될 수 있다(황재호, 2020).

2. 전장시스템과 자율주행 센서 시장

향후 10년 동안 자동차 산업은 한 세기 동안 볼 수 없었던 엄청난 변화에 직면하게 될 것이다. 특히, 이 변화는 자동차 전장시스템의 발전에 의해서 C.A.S.E.(Connected(연결), Autonomous(자율주행), Shared(공유), Electric(전기)) 자동차로 정의되는 4가지 혁신에 의해 주도된다. 이러한 변화는 자동차 산업에서 운전자 행동양식, 이동수단의 선호도, 가치사슬의 파괴, 혁신적 사업모델, 새로운 사업자 진입 등의 결과로 나타날 것이다. 이러한 혁신은 자동차 전장시스템과 소프트웨어 기술의 발전에 의해서 견인되고, 전장시스템과 소프트웨어 시장에도 근본적인 영향력을 미치게 될 것이다. 즉, 자동차 전장시스템 아키텍처의 변화로 설명될 수 있다. <그림 4>에서 볼 수 있듯이 전반적인 추세는 각각의 기능들이 독립된 전자제어장치(ECU, Electronic Control Unit)에서 동작하는 분산형 아키텍처(3세대 전장 아키텍처에서 중앙 게이트웨이로 연결된 구성 요소)에서 기능들의 SW-to-HW(소프트웨어-하드웨어) 통합성이 높은 도메인 제어기(4세대)로 집중화되고 있다. 최종적인 아키텍처는 하나의 제어 장치가 다른 영역(예: 인포테인먼트 및 바디 제어)의 기능 또는 서비스를 실행하는 가상 도메인(5세대)으로 진화할 것으로 예상된다. 중앙 집중화는 하드웨어와 소프트웨어가 독립성을 유지할 수 있게 개발되어 차량 시스템이 운영 체제(OS, Operating System) 및 미들웨어 계층에서 명확한 추상화 단계가 있는 계층 아키텍처로 구축된다. 이러한 변화는 시간이 지남에 따라 도메인 전반에 걸쳐 발생하겠지만,

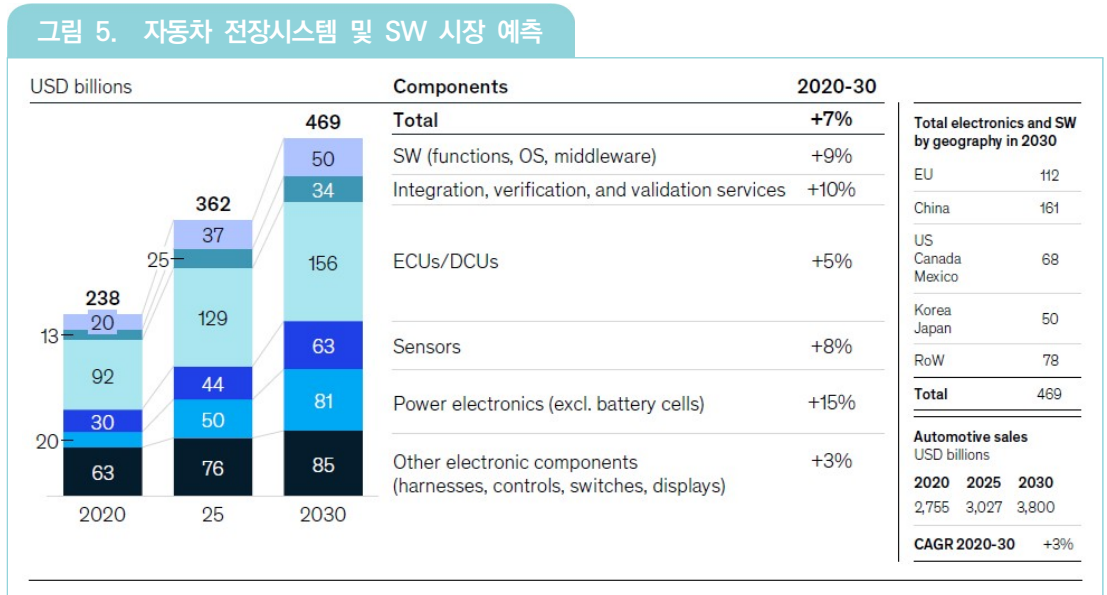
사업적 이점, 안전 요구사항, 고성능 지원 등의 사유로 인해 ADAS 및 자율주행(AD, Autonomous Driving) 도메인이 우선 적용 분야가 될 가능성이 높다. 미래 시장 관점에서 도메인 제어 장치(DCU, Domain Control Unit)는 특히 ADAS를 위해 차량에 고성능 컴퓨팅 장치가 배치되고, 고도화 자율주행 단계의 선점을 위해 보급이 급격하게 확대될 것이다. DCU에 연동되는 자동차 센서 시장은 인공지능 수준의 데이터 처리 기능이 있는 스마트 센서(카메라, RADAR, LiDAR 등)와 측정 데이터를 중앙 DCU로 단순하게 전송만하는 일반 센서로 나누어서 분석할 필요가 있다.

그림 4. 자동차 전장시스템 아키텍처의 변화 방향



* 출처: McKinsey & Company(2019)

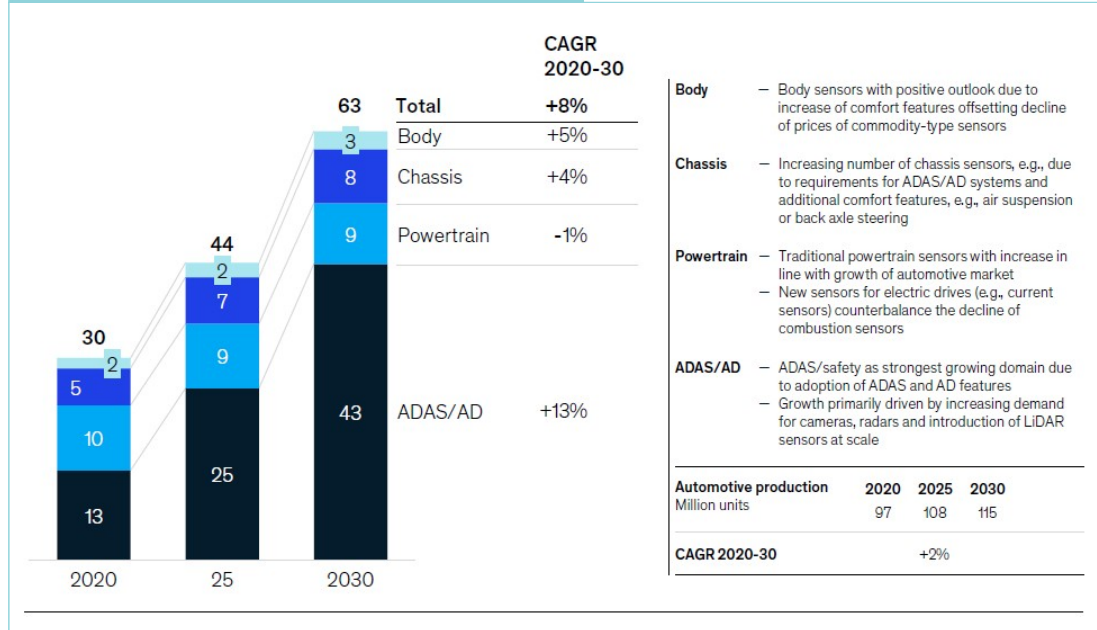
C.A.S.E. 트렌드의 영향과 아키텍처 진화 방향으로 자동차 전장과 소프트웨어 시장이 크게 성장하고 있다. 맥킨지 앤드 컴퍼니(McKinsey & Company) 보고서에 의하면, 세계 자동차 시장은 2020년 USD 2조 7,550억 달러에서 향후 10년간 연간 약 3%의 비율로 성장하여 2030년에 USD 3조 8,000억 달러로 예측되고 있다. 이에 비해 전장시스템 및 소프트웨어 시장은 같은 기간 동안 약 7%의 비율로 성장하여 2020년 USD 2,380억 달러에서 4,690억 달러로 예측된다(그림 5) 참고). 센서 시장의 성장은 주로 자율주행 기능의 개발 및 채택에 의해 주도되며, 첨단 소프트웨어 기능(예: 신경망 기반 객체 감지 및 분류, 센서 데이터 융합, 환경 모델링 및 경로 계획 알고리즘 등)과 복잡해지는 기능 안전 요구사항 및 새로운 센서의 도입(LiDAR, 4D RADAR) 등이 필요하다.



* 출처: McKinsey & Company(2019)

다음은 자동차 도메인별 센서 시장을 비교 분석한다. 대부분 도메인에서 센서 시장은 전체 자동차 시장의 성장과 함께 성장한다. ADAS/AD와 관련된 센서만 유일하게 자동차 센서시장에서 평균 이상으로 성장이 예상된다. ADAS와 자율주행 기능의 채택률이 증가함에 따라 관련 센서의 전체 예상 성장률은 약 8%를 상회할 것으로 예측된다(그림 6) 참고).

그림 6. 자동차 전체 도메인별 센서 시장 예측



* 출처: McKinsey & Company(2019)

이러한 시장 성장은 거의 완벽한 자율주행 성능을 지원하기 위해서 고성능 연산, 고안전, 고비용 요구사항(이중화 시스템 도입)을 필요로 하는 자율주행 레벨 3 시스템에서 가장 현격하게 나타날 것이다. 앞 절에서 이미 설명한 바와 같이 자율주행 스마트 센서에는 카메라, RADAR, LiDAR가 포함된다. 주로 카메라와 RADAR가 융합된 자율주행 레벨 1~2 시스템에 사용되는 센서는 대부분 안전 요구사항과 관련이 있다. EURO-NCAP 안전등급 5수준을 받기 위해 필요한 안전 기능은 카메라와 RADAR 시장 성장을 주도하였다. 레벨 2 이하의 ADAS 센서 시장과 비교하여 레벨 3 이상에서 사용되는 자율주행 센서는 당연히 더 고비용이며 이를 실현하기 위해서는 더 많은 개수의 센서가 필요하다. 특히, 높은 가격대의 LiDAR 센서가 이러한 고비용 센서 시장 성장 동력이다. 레벨 3부터 필수적인 이중화 요구 사항으로 인해서 더 많은 개수의 센서가 필요하다. 로보택시와 자율주행 셔틀버스는 레벨 4 이상으로 분류되며 센서 요구 사항과 비용은 레벨 3 보다 더 높다. 결과적으로 레벨 3 이상의 자율주행 센서뿐만 아니라 안전 규정 및 안전 테스트(특히, 자동 비상 제동(AEB, Autonomous Emergency Braking))에 의해 견인되는 ADAS 자율차량의 생산 규모가 급속하게 증가하기 때문에 자율주행 관련 센서의 연평균 성장률(CAGR)은 13%로 예상된다.

〈그림 7〉은 자율주행 레벨별 대표적인 센서 배치도를 나타내고 있다. ADAS로 명명되는 레벨 1~2 차량에는

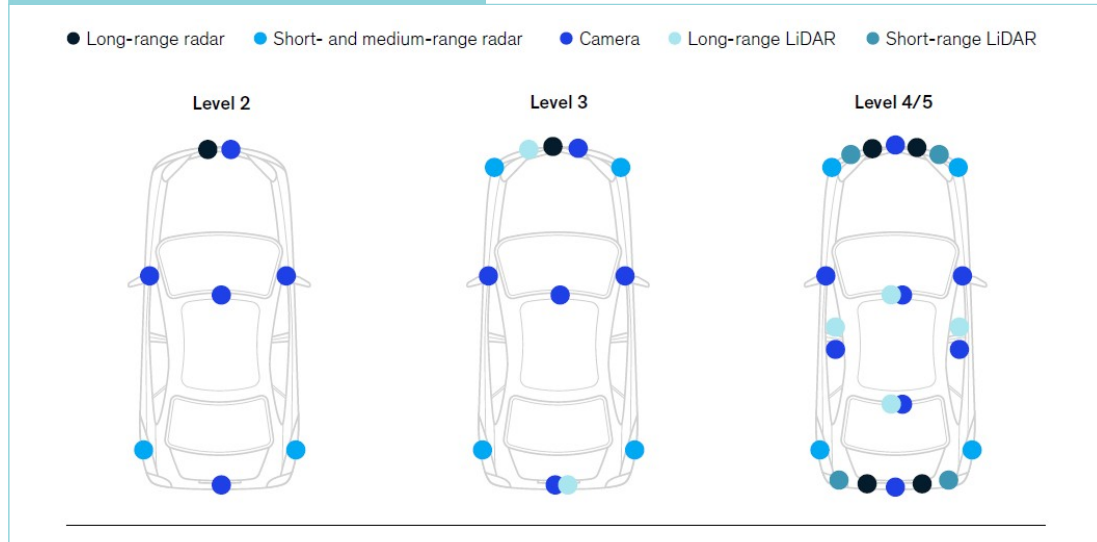
일반적으로 적응형 크루즈 컨트롤(ACC, Adaptive Cruise Control, RADAR나 카메라와 같은 전방 감지 센서를 통해 전방에 있는 물체를 감지하여 엔진과 브레이크를 자동으로 제어함으로써 차량 속도와 차간 거리를 자동으로 유지해 주는 시스템), 자동 비상 제동(AEB, Autonomous Emergency Braking), 차선 이탈 경고/보조((LDWS, Lane Departure Warning System)/(LKAS, Lane Keeping Assistance System))를 위한 전면 장거리 RADAR 센서 1개와 카메라 1개가 적용된다. 2개의 후방 중거리 RADAR 센서로 사각지대 감지(BSD, Blind Spot Detection) 기능이 사용된다. 최대 4개의 추가 카메라와 최대 12개의 초음파 센서를 통해 주차 보조 기능을 위한 360° Bird's-eye view 화면(AVM, Around View Monitoring)이 제공된다.

레벨 3 차량에는 일반적으로 레벨 1~2 센서와 이중화와 센서 융합에 의한 물리적 한계 극복을 위해서 1개 이상의 전면 장거리 LiDAR가 사용될 것으로 예상된다. 카메라 센서가 취약한 야간이나 역광 상황에서도 LiDAR 센서는 객체 검출 및 분류가 가능하고 자차 위치인식을 위한 특징점들을 추적하는 기능에도 사용되어야 하므로 고해상도와 광각 성능을 제공해야 한다. 고속도로 파일럿 기능을 위해서는 차선 변경 지원(LCA, Lane Change Assist), 자동 비상 조향(AES, Autonomous Emergency Steering) 등의 기능을 위해서 차량 후면에도 장거리 LiDAR 센서가 사용될 것이다.

추가적으로 단거리 전방 RADAR는 Cut-in(끼어들기) 차량의 감지 성능을 향상시킬 수 있으며, 후방 RADAR는 사각지대에서 접근하는 차량을 감지할 수 있다. 운전자 모니터링 시스템(driver monitoring system)은 자율주행 차가 운전 기능을 수행할 수 없는 경우에 차량 제어권을 넘겨받아야 하는 운전자의 상태를 감시하기 위해 필요하다.

레벨 4~5 차량은 일반적으로 이중화를 제공하고, 차량 주변의 360° 전 영역에서 각 센서의 단점을 보완하기 위해 서로 다른 센서와 융합하는 기술이 반드시 필요하다. 360° 전 영역을 센서 융합으로 감지하기 위해 5~10개의 카메라, 8~12개의 RADAR, 5~12개의 LiDAR 센서가 사용될 것이다. <그림 7>에서는 레벨 4~5를 위한 일반적인 센서 배치는 8개의 카메라, 8개의 RADAR, 4개의 장거리 LiDAR와 또 다른 4개의 단거리 LiDAR로 나타내었다. 초음파 센서와 같은 추가적인 센서까지 고려한다면 레벨 4~5 자율주행 센서의 개수는 50개 이상까지 사용될 수 있다. 현재의 기술 수준에서 예측할 수 없는 파괴적인 기술 혁신이나 새로운 물리 데이터를 측정할 수 있는 센서가 출현한다면 앞에서 설명한 일반적인 형태의 센서 배치는 다른 방향으로 변경될 가능성도 충분히 존재한다.

그림 7. 자율주행 단계별 센서 배치도



* 출처: Waymo(2021)

〈그림 8〉에 의하면 자율주행 센서 시장은 연간 13% 성장할 것으로 예상되며, 이러한 성장은 현재는 상용화가 본격화되지 않았지만 2030년에는 USD 130억 달러 시장으로 성장할 것으로 예상되는 LiDAR 시장에 의해 주도될 것이다. RADAR 센서 시장도 연간 13%씩 성장하여 2030년에는 시장 규모가 USD 140억 달러에 달하는 가장 큰 센서 시장이 될 것으로 예상된다. 카메라 센서 시장은 연간 7%씩 성장하여 2030년에는 시장 규모가 USD 80억 달러가 될 것이다. 기타 센서로 분류된 초음파 센서는 연간 6%의 CAGR로 성장할 것으로 예상된다. 특히 신흥 시장에서는 차량 판매가 지속적으로 증가하는데, 판매되는 차량이 유럽과 미국의 자율주행 안전 규정과 요구사항을 충족하도록 초음파 센서 사용이 증대될 것으로 예측된다. 예를 들어, Euro NCAP 규정이 신흥국가의 자동차 시장에 영향을 주어서 2030년에는 USD 90억 달러의 시장 규모에 도달할 것으로 보인다.

LiDAR 센서는 2030년까지 연간 80%의 성장을 해서 자율주행 센서 시장의 전체적인 성장을 견인할 것이다. LiDAR 센서는 아직도 제한된 영역에서 실험적인 차량 모델에만 적용되지만, 향후 급격한 성장이 예상되는 레벨 3 차량에서 핵심적인 센서가 될 것이다. 지금까지 자율주행 테스트 실증차량에는 일반적으로 기계식 스캔 라이더 센서가 장착되고 있다. 그러나 향후에는 고정형(Solid-State) LiDAR 센서로 전환이 예상된다. 초기 Solid-State LiDAR는 카메라 또는 RADAR와 비교하여 상대적으로 높은 가격대로 출시될 것이지만

대량 생산이 된다면 센서 원가는 급격히 떨어질 것으로 예상되며, 스캔 LiDAR보다 더 높은 내구성과 신뢰성을 제공할 것으로 예상된다. 그러나, Solid-State LiDAR가 스캔 LiDAR와 비교해서는 원가 절감이 가능하지만, 여전히 카메라와 RADAR 센서 가격보다는 높게 유지될 것으로 예상된다. LiDAR가 시중에 양산 판매되고 있는 승용차에 거의 적용되지 못하고, 판매 가격에 민감하지 않은 로보택시/자율주행 셔틀 등에서만 핵심 센서로 사용되는 주된 이유이다.



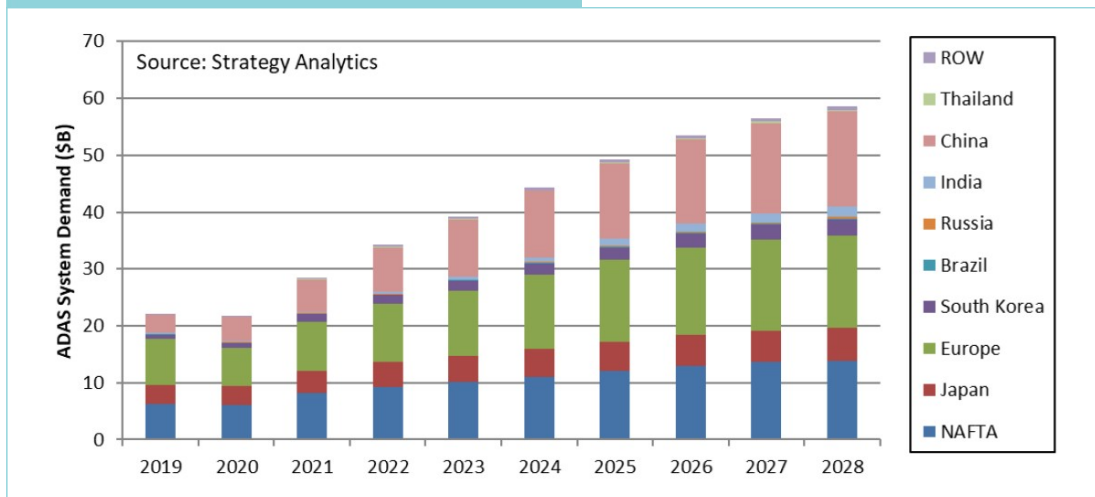
* 출처: McKinsey & Company(2019)

자율주행 센서 분야는 이미 2010년을 전후하여 많은 연구와 투자가 진행되어 왔기 때문에, 혁신적으로 시장 구조를 재편할 수 있는 신기술이 등장할 수도 있다. 이러한 새로운 센서는 자동차 대당 추정되는 총 센서의 개수 또는 센서 가격에도 영향을 줄 수 있을 것이다.

3. ADAS 센서 시장 규모

현재, 자동차 센서 시장의 성장을 견인하고 있는 ADAS 측면에서 분석한 시장자료(Strategy Analytics)에 의하면, ADAS 시장의 규모는 2025년 USD 493억 달러, 2028년 586억 달러로 전망하였다(〈그림 9〉 참고). 여기서는 북미, 유럽, 중국 등 글로벌 지역별 ADAS 시장 규모를 2028년까지 제시하였다.

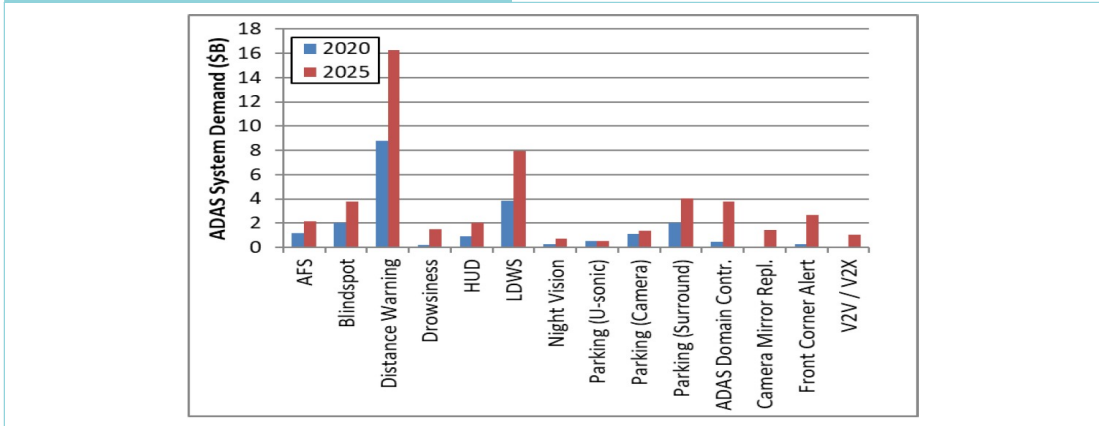
그림 9. 글로벌 지역별 ADAS 시장 규모 예측



* 출처: Strategy Analytics 사이트

ADAS 기능별로 2020년과 2025년을 비교하면 〈그림 10〉과 같다. 여기서는 전방 상향 시현기(HUD, Head-Up Display, 차동차 앞 유리에 주행 관련 정보를 보여주는 장치), 차량-사물-통신(V2X, Vehicle-to-Everything), 운전자 상태 모니터링(DSM, Driver Status Monitoring) 등의 제품까지 센서의 범주로 포함하여 ADAS 전체 시장 규모를 분석하였기 때문에 자율주행 센서 시장과 비교하여 확대된 규모로 전망하였다. 기능별로 살펴보면, 거리 경고(Distance Warning(ACC, AEB 등))가 2025년 160억 달러로 지속적으로 가장 큰 시장을 형성하고, 차선 이탈 경보(LDWS, Lane Departure Warning System)가 다음 순서로 80억 달러가 될 것으로 예측하였다. 특별히 주목할 항목은 2025년부터는 Front Corner Alert, Camera Mirror Replace, ADAS Domain Controller, DSM(Digital Side Mirror), V2X 등이 새로운 제품으로 시장에 진입하여 급성장할 것으로 예상된다는 점이다.

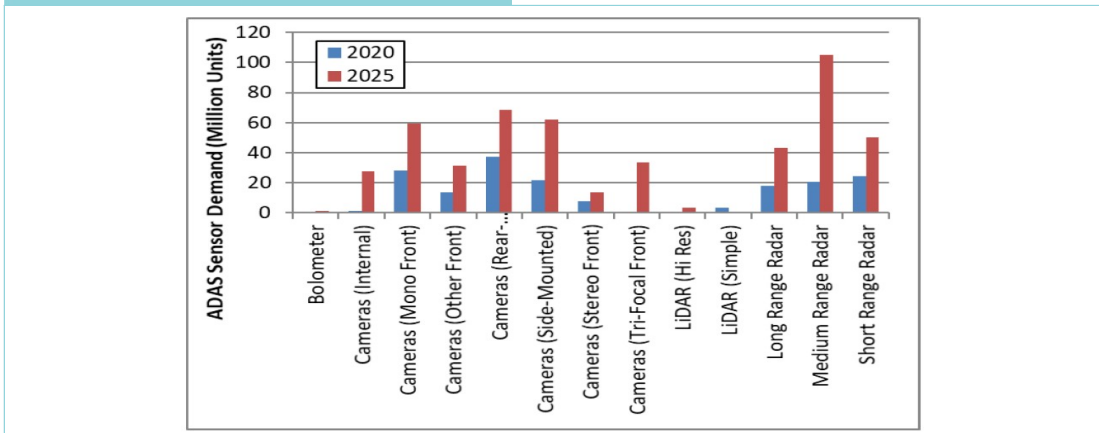
그림 10. 기능별 ADAS 시장 규모 예측



* 출처: Strategy Analytics 사이트

〈그림 11〉은 2020년과 2025년의 센서별 판매량 변화를 비교한 것이다. 카메라는 상대적으로 시장 성숙단계로 진입하고 있기 때문에 RADAR의 증가 폭과 비교하여 상대적으로 증가 폭이 적을 것으로 예측하였다. 카메라는 다른 센서와 비교하여 7가지 이상의 다양한 용도와 형태의 제품으로 확대되고 있다. RADAR는 검출거리별로 제품이 분류되는데 중거리 레이더(MRR, Medium Range Radar)의 보급이 크게 확대될 것으로 예상된다. LiDAR는 자율주행 센서로는 보급이 크게 확대될 것으로 전망하였으나, 다른 센서 대비 높은 제품 가격으로 인해서 ADAS 센서로는 보급 확대가 어려울 것으로 전망하였다.

그림 11. 센서별 ADAS 시장 규모 예측



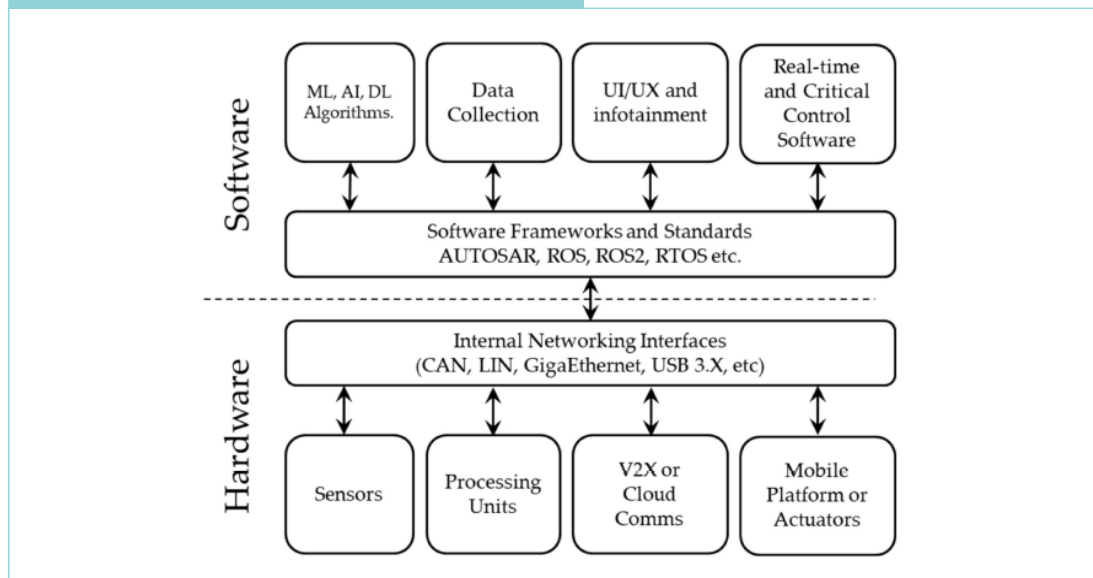
* 출처: Strategy Analytics 사이트

III 자율주행 센서 기술

1. 기술적 관점에서 자율주행시스템 구조

하드웨어와 소프트웨어는 자율주행 아키텍처의 기술적 관점의 두 가지 주요 계층이며 각 계층에는 전체 시스템을 유기적으로 연결하는 하위 구성 요소가 포함되어 있다. 자율주행 센서를 독립적인 부품으로 설명한다면 자율주행 시스템 측면에서 필요한 요구사항, 성능, 기능 융합, 안전성 검증 등의 이슈를 이해하기 어렵기 때문에 융합연구리뷰에서는 기술적 관점의 자율주행 시스템 측면에서 자율주행 센서를 설명하고자 한다(그림 12) 참고).

그림 12. 기술적 관점의 자율주행 시스템 구조



* 출처: Yeong et al(2021)

내부 및 외부 모니터링을 위해 여러 센서가 장착되어 있는 자율주행차는 실시간으로 방대한 양의 데이터를 생성하는 크고 복잡한 시스템이다. 이러한 대용량 정보를 처리하기 위한 차량의 통신 및 정보처리 장치는

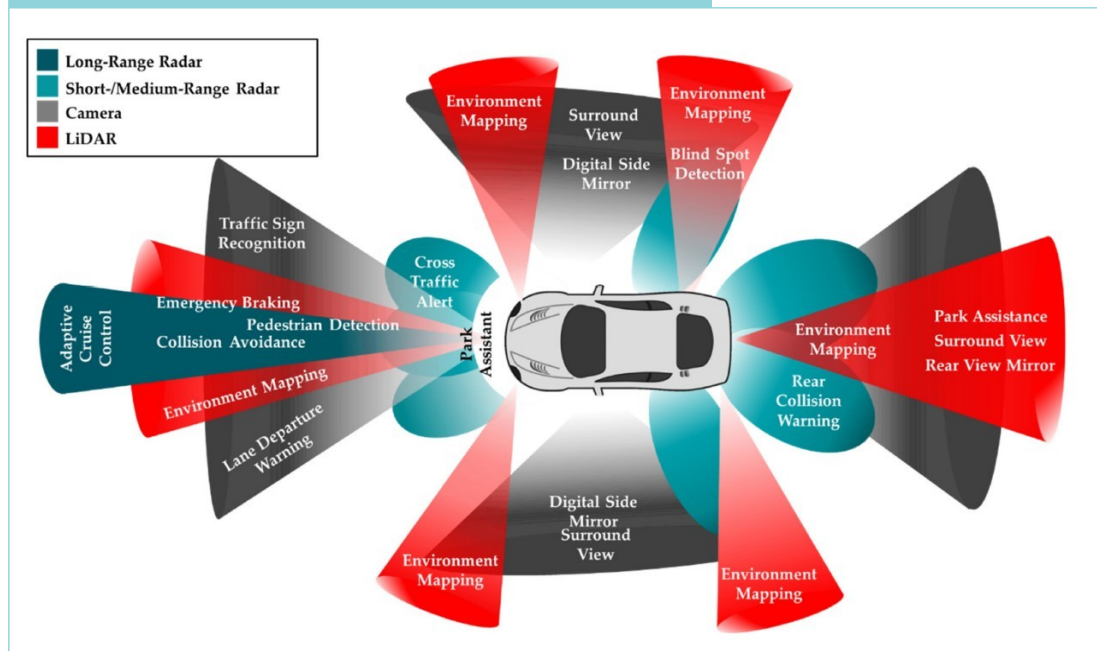
더 이상 기존의 저대역폭 네트워크로 연결되는 분산형 엔진제어장치(ECU, Electronic Control Unit) 구조가 적합하지 않게 되었다. 다중 코어가 있는 이기종 컴퓨팅 플랫폼, GPU 및 FPGA(Field Programmable Gate Array, 프로그램이 가능한 반도체 소자)와 같이 자율주행 센서에서 생성되는 대용량 데이터들을 수집하고, 실시간으로 처리하기 위한 강력한 컴퓨팅 장치가 요구된다. 차량에서 생성되는 데이터 이외에도 V2X 통신으로 외부 데이터(인터넷, 주변 차량 정보, 교통인프라 정보 등)를 수신하여 자율주행의 데이터로 활용한다. 나머지 하드웨어 부분은 차량 자체의 모바일 플랫폼과 이를 지원하는 액추에이터들로 구성된다. 차량 내부 통신 인터페이스를 통해 각 하위 시스템들이 서로 정보를 교환한다. 차량 내부 통신은 센서 데이터 전송을 위한 USB 3.x 또는 기가비트 이더넷과 같은 고대역폭 인터페이스가 새로이 등장하고, 기존의 저대역 통신을 위한 CAN(Controller Area Network) 및 LIN(Local Interconnect Network) 네트워크도 병행하여 사용된다. 현재 자율주행 차량의 컴퓨팅 능력은 바퀴 달린 슈퍼컴퓨터라고 불릴 정도이다. 이러한 표현은 강력한 하드웨어 연산 능력 측면에서 사실과 다르지 않고, 차량의 소프트웨어 측면에서도 ECU의 실시간 운영 체제(RTOS, Real Time Operating System)에서 실행되는 임베디드 소프트웨어(Embedded Software)에서 빅데이터 처리에 필요한 인공지능, 딥러닝을 지원하는 프레임워크, 라이브러리 및 모듈을 포함한 고급 소프트웨어로 진화하고 있다. 또한 인간 운전자처럼 센서에서 데이터를 수집하는 기능, 인포테인먼트(infotainment) 시스템을 통한 사용자 인터페이스, 액추에이터 제어 및 차량 상태 모니터링과 같은 실시간 중요 소프트웨어와 같이 자율차량의 안전 주행을 담당하는 다양한 소프트웨어 구성요소가 있다. 소프트웨어의 이러한 복잡성은 낮은 수준(하드 실시간 소프트웨어/펌웨어)부터 높은 수준(탐지, 추론 또는 예측 소프트웨어)의 소프트웨어까지 성공적인 개발, 관리, 적용을 가능하게 하는 소프트웨어 개발 표준을 도입하게 하였다.

이러한 소프트웨어 프레임워크 및 표준은 소프트웨어가 동시적이고 협력적인 방식으로 작동하는 구조화된 방법을 제공한다. 소프트웨어 프레임워크의 대표적인 사례는 현재 자동차 산업에서 널리 사용되고 있는 AUTOSAR(AUTomotive Open System ARchitecture)이다. AUTOSAR의 주요 목표는 컴포넌트 기반 소프트웨어 설계 접근 방식을 사용하여 ECU를 위한 개방형 표준화 아키텍처를 만들고 구축하는 것이다. 또 다른 예는 인식, 탐색 및 모션 제어 알고리즘을 쉽게 구현 가능하게 하는 기능을 포함하여 로봇 응용 프로그램을 위한 도구와 라이브러리를 제공하는 소프트웨어 프레임워크인 로봇 운영체제(ROS, Robot Operating System)이다. 이러한 특성 때문에 ROS는 선형 기술을 연구하는 대학 자율주행 연구팀에서 많이 사용되고 있다. 2009년에 첫 버전이 발표된 ROS는 로봇 공학 및 자율 주행 환경이 급속하게 발전되고 변화됨에 따라 실시간 처리 및 안전 중심 시스템에 대한 고려사항을 보완하여 새로운 버전인 ROS2로 발표되었다.

2. 자율주행 센서 융합

다양한 센서를 조합하여 사용하는 자율주행차의 인지 기능은 전체 자율주행 시스템에서 가장 필수적인 요소이다. 이러한 개별 센서들의 성능과 장단점을 고려한 조합 방법은 자율주행차의 경쟁력 및 안전성과 직접적인 연관이 있다. 본질적으로 주행 환경의 신뢰할 수 있는 정보를 인식하고 공식화하는 인간의 능력을 모방하는 데 사용되는 적절한 센서 배열 및 최적 조합의 선택은 모든 자율주행 시스템에서 핵심 설계사항 중 하나이다. 일반적인 고도 자율주행차에서 주행 환경 인식을 위한 센서의 배치, 감지 범위 및 담당 기능을 <그림 13>에 나타내었다. 즉, 차량이 주행 환경을 인식할 수 있도록 하는 일반적인 센서 유형 및 설치 위치에 대한 예제이다. 빨간색 영역은 라이다 감지 범위, 회색 영역은 차량 주변의 카메라 감지 범위, 파란색 영역은 단거리 및 중거리 레이더 감지 범위를 표시하고, 각각의 영역에서 구현할 수 있는 자율주행 단위 기능까지 표시하였다.

그림 13. 자율주행 센서 배치도와 감지 범위 및 담당 기능



* 출처: Wendt & Cook(2019)

최적의 센서 조합을 구현하기 위해서는 개별 센서의 물리적 특성에 의한 장단점을 이해하고 상호 보완적으로 융합할 수 있어야 한다. 또한, 다수의 센서들이 기준 좌표계에서 동일한 객체가 동일한 위치에서 감지될 수 있도록 센서 보정(sensor calibration) 과정도 필요하다. 최적의 센서 융합을 설계함으로써 주요 객체 인식의 정밀도와 정확도를 개선할 수 있고, 센서 이중화를 통해 특정 센서가 고장이나 인지 불가능으로 동작할 수 없는 상황에서도 보완 센서가 안전한 주행이 가능하도록 인지 기능을 제공할 수 있게 된다.

자율주행차 개발을 위해 특정 센서의 적용 가능 여부는 센서 자체가 가지고 있는 동작 원리와 물리적인 한계를 고려하여 결정될 수 있다. 간단한 사례로 조명이 없는 어두운 환경, 눈이나 비가 내리는 날씨에서 카메라 센서는 유효한 데이터를 취득할 수 없게 된다. 레이더 센서는 대상 물체의 전파반사 특성과 산란 특성에 의해서 데이터의 신뢰성에 영향을 받는다. 또한, 개별 센서마다 감지할 수 있는 데이터의 물리량과 데이터를 취득할 수 있는 유효 감지 범위가 다르고, 데이터를 취득할 수 있는 속도(frame rate)와 데이터의 해상도에 한계가 있기 때문에 자동차에 구현될 수 있는 기능도 제한이 생기게 된다. 자율주행 기능을 구현하기 위해서는 양산 가능한 센서를 이용하여 빠른 속도, 넓은 범위, 다양한 물리량(거리, 넓이, 깊이) 등의 데이터를 환경 변화에 무관하게 취득할 수 있어야 한다. 하지만, <그림 14>에 나타난 바와 같이 각각의 센서는 근본적인 물리적 한계를 가지고 있어서 단일 센서만으로 양산 가능한 자율주행차 구현을 기대하기는 어렵다. 개별 센서는 유효 거리, 해상도, 취득 속도 등이 개선된 신제품이 계속 소개되고 있으나, 당분간 단일 센서의 물리적 한계를 극복할 수 있는 혁신적 발전은 불가하다. 결국 센서 융합을 통해 단일 센서에서 발생하는 문제점을 보완하여 센서 인지의 한계를 극복하는 접근법을 택해야 한다. 센서의 인지 성능 측면에서는 센서 융합의 장점이 명확하게 기대되지만, 실제 차량 구현 측면에서는 센서의 크기, 무게, 차량 장착성, 전력 소모량, 신호 간섭, 데이터 전송량, 가격 등 다양한 설계 요소도 같이 고려되어야 한다. 특히, 차량 동력계가 내연기관에서 전기차로 전환되고 있는 단계에서 다수의 자율주행 센서 장착은 전기차 외관 디자인 설계와 배터리에만 의존하는 전력 시스템 설계에 심각한 부담 요소가 되고 있다.

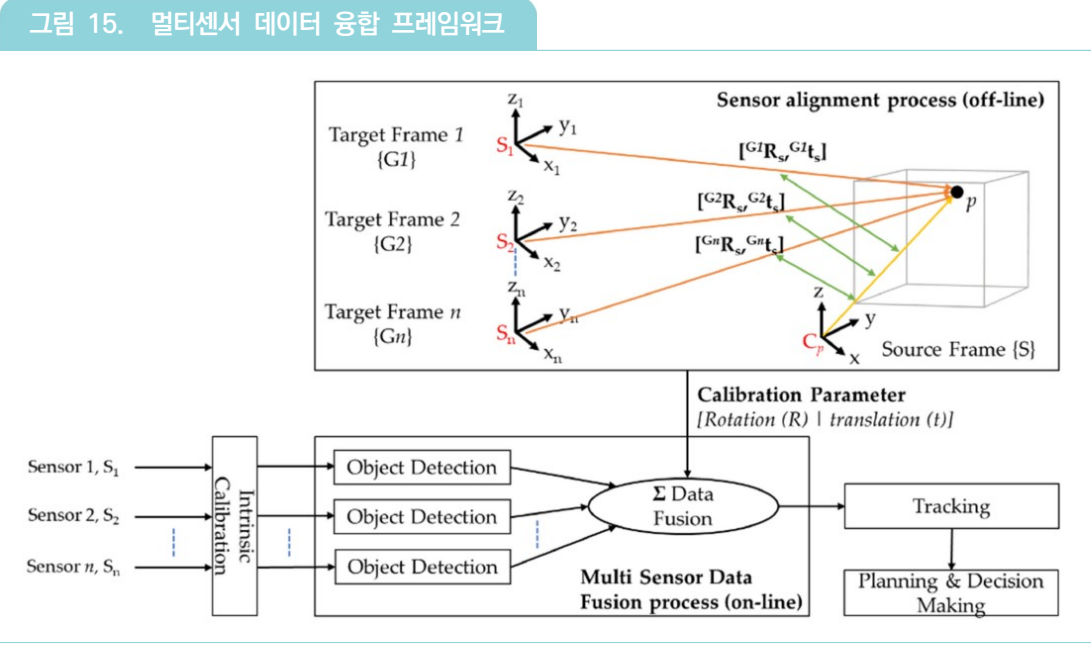
그림 14. 자율주행 센서의 성능 비교

비교 항목	카메라	라이다	레이다	융합
감지 거리	●	●	●	●
해상도	●	●	●	●
거리 정확도	●	●	●	●
속도	●	●	●	●
색상 인지	●	●	●	●
객체 검출	●	●	●	●
객체 분류	●	●	●	●
객체 윤곽선 검출	●	●	●	●
차선 인식	●	●	●	●
조명 변화	●	●	●	●
날씨	●	●	●	●
크기 및 무게	●	●	●	●
전력소모	●	●	●	●

* 출처: 저자작성

자율차 개발을 선도하는 완성차업체, 1차 부품업체, 스타트업들은 자신들이 제안하는 센서조합과 장착위치, 센서 인터페이스 등의 센서 융합 시스템 구조를 설계하고 데모 시연과 주행 안전성을 검증하고 있으나 객관적으로 입증된 최적의 센서 융합 아키텍처는 아직도 정립되지 않았다. 개별 기업들의 차별화된 자율주행 단계, 모빌리티 서비스 형태, 목표 시장 등에 의해서 다양한 센서 융합 아키텍처가 제안되고 있는 상황이다.

센서 융합의 중요성에 대한 논의와 비교하면 센서 보정에 대한 연구는 자율주행 기술 개발에서 가장 적게 논의되는 주제 중 하나이다. 센서 보정은 자율주행차를 구성하는 모든 센서의 기초 기능이며, 센서 융합 기술 및 알고리즘을 구현하기 전에 반드시 필요한 전처리 처리 단계이다. 센서 보정은 각각의 센서에 의해 감지된 특징점들의 상대적 위치와 방향을 비교하여 실세계 좌표에서 모든 센서의 위치와 방향을 자율주행 시스템에 제공한다. 정교한 센서 보정은 센서 융합 및 장애물 감지, 자차 위치 인식 및 정밀지도 매핑, 종횡방향 제어를 위한 알고리즘 구현 단계에서 매우 중요하다. Bouain 외(2018)에서는 <그림 15>와 같이 자율주행을 위한 멀티센서 데이터 융합(MSDF, Multi-Sensor Data Fusion) 프레임워크를 제시했다. MSDF 프레임워크는 각 센서의 내부 보정 프로세스를 마치고 객체 인식을 수행한다. 서로 다른 센서에서 인식된 객체들은 오프라인으로 처리된 센서 교정 파라미터(parameter)를 이용하여 실세계 좌표계로 투영되어서 통합적으로 추적하게 된다.



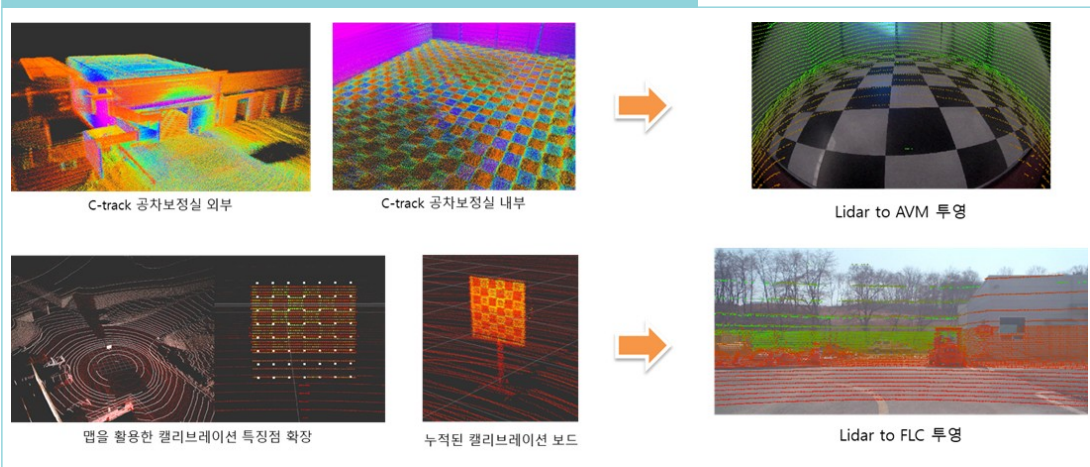
* 출처: Bouain et al(2018)

내부 보정(intrinsic calibration)은 센서별로 보정 파라미터를 찾아서 수행하는데 외부 보정 및 객체 검출 알고리즘을 구현하기 전에 수행된다. 내부 보정은 카메라 시스템의 초점 거리 등과 같은 센서의 내부 파라미터를 추정하여 시스템의 수차를 수정한다. 이러한 파라미터는 한번 추정이 되면 시스템이 운영되는 동안 일관성이 유지되는 것으로 가정할 수 있다. Velodyne Lidar社의 라이더는 미국 국립표준기술연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)가 표준으로 제시하는 10% 물체 반사율로 보정되어 있다. 따라서 반사율이 10% 미만인 객체들은 LiDAR에서 감지되지 않을 수 있다. 센서의 내부 보정을 위한 알고리즘 및 방법론은 지난 몇 년 동안 상당한 발전을 거듭하여 현재는 많은 연구 결과들이 발표되고 있다. 이러한 알고리즘과 방법론은 개별 센서의 물리적 특성에 의해서 서로 다른 방법을 적용하고 있다.

외부 보정(extrinsic calibration)은 3차원 좌표계에서 하나의 점을 다른 점으로 강성변환(또는 유클리드 변환)하는 과정이다. 예를 들면 3D LiDAR 좌표계에 존재하는 주요 특징점들을 3D 카메라 좌표계로 유클리드 변환하는 것이다. 외부 보정은 기준점을 중심으로 3D 공간(또는 DoF(6 Degree of Freedom)) 상에서 3개의 직교축을 기준으로 센서의 위치와 방향을 추정하는 과정이다. 외부 보정 과정을 거쳐서 센서의 회전(rotation) 정보와 병진운동(translation) 정보로 구성된 외부 파라미터를 출력하며, 이는 일반적으로 3x4 행렬 형태로

표현된다. 최근 충북대학교 자율차연구실에서 수행 중인 카메라-LiDAR 센서 융합을 위한 외부 보정 결과 영상을 <그림 16>에 참조로 나타내었다. 그림의 상단은 충북대학교가 보유하고 있는 자율주행 테스트베드 C-track의 공차 보정실에서 라이다 센서를 AVM(Around-View Monitoring) 카메라 시스템에 투영한 결과 영상이고, 그림의 하단은 LiDAR 센서를 전방 감시 카메라 시스템에 투영한 결과 영상이다. AVM은 차량의 바닥부분을 광학 렌즈로 영상을 취득하고, 전방 카메라는 협각 렌즈로 원거리 영상을 취득하는 특징이 서로 다르기 때문에 내부 보정과 외부 보정 과정에서 모두 차별화된 보정 방식을 사용한다.

그림 16. 카메라-라이다 센서융합을 위한 센서 보정 과정



* 출처: 저자작성

시간 보정(temporal calibration)은 센서 융합에서 서로 다른 샘플링 주파수와 대기 시간을 가진 이종 센서 데이터 스트림의 동기화(또는 상대적 시간 지연)를 보상하는 프로세스이다. 예를 들어 카메라는 일반적으로 30fps 으로 영상을 캡처하지만 라이다 센서는 5Hz의 낮은 속도로 스캔하기 때문에 이종 센서 사이의 샘플링 시간 보정이 필요하다. 센서 데이터를 동기화하는 가장 보편적인 접근 방식은 컴퓨터 운영체제(OS)에서 얻을 수 있는 메시지 헤더 타임스탬프에서 가장 근접한 스탬프에 일치시키는 것이다. 그러나 원칙적으로 메시지 타임스탬프(message timestamp, 메시지가 수신된 시간)를 기반으로 하는 동기화는 센서 회로에서 통신 전송 지연 또는 사전 처리 지연과 같은 알 수 없는 대기 시간이 있을 수 있기 때문에 최적의 방식이라고 할 수는 없다. 이러한 알 수 없는 대기 시간은 직접 결정할 수 없으며 센서마다 다를 수 있다. ROS 메시지 필터 모듈의 근사화 시간 동기화 방법은 적응 알고리즘을 사용하는 시간 동기화 수단으로 헤더 타임스탬프를

기반으로 각 감지 방식(또는 ROS 토픽)의 메시지를 일치시키는 방법이다. 적응 알고리즘은 먼저 주제별 대기열의 헤드 중 최신 메시지를 기준으로 결정하고 예상 기준점을 기반으로 주어진 임계값 내에서 이러한 메시지를 근사적으로 동기화한다.

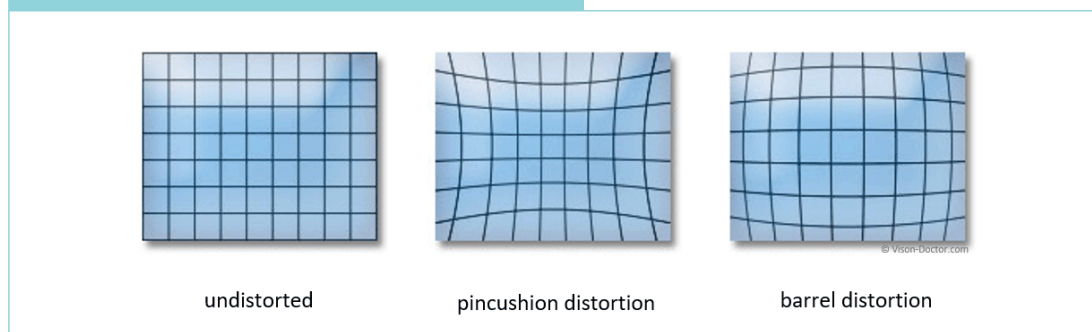
3. 카메라 기술

카메라는 주행 환경을 인식하기 위해 양산차에 가장 많이 적용된 기술이다. 카메라는 카메라 렌즈를 통해 주변에서 방출되는 빛을 감광면(이미지 평면)에서 감지하는 원리로 작동하여 주행 환경에 대한 선명한 영상을 생성한다. 카메라는 비교적 저렴하고 적절한 소프트웨어를 사용하여 FoV 내에서 동적 객체와 정적 객체를 모두 감지할 수 있으며 주행 환경에 대한 고해상도 컬러영상을 제공한다. 이러한 기능을 통해 자율차의 인식 시스템은 도로 표지판, 신호등, 도로 차선 표시 및 경계면 등의 교통 인프라 정보를 식별하고, 차량, 보행자, 이륜차 등의 장애물도 식별할 수 있다. 자율주행 카메라 시스템은 단안 카메라, 스테레오 카메라 또는 다수의 카메라 조합으로도 사용할 수 있다. 단안 카메라는 단일 렌즈를 사용하여 초당 30 프레임(frame) 정도의 순차적 컬러영상을 생성한다. 기존의 컬러 단안 카메라는 원리적으로는 영상의 깊이 정보를 계산할 수 없는 단점이 있어서 스테레오 카메라보다 기능이 제한적이지만, 2D 영상에서 깊이 정보를 추출하는 응용 프로그램을 적용하거나 듀얼 픽셀 자동 초점 하드웨어를 사용하는 고급 단안 카메라에서는 깊이 정보를 계산할 수도 있다. 결과적으로 다수의 카메라 시스템을 적용하여 자율주행 차량을 구성하는 추세로 발전하고 있다.

양안 카메라라고도 하는 스테레오 카메라는 2개의 눈으로 깊이를 인식하는 사람의 생체 시각 모델을 모방하여 설계되었다. 2개 카메라가 서로 다른 위치에서 동일한 물체를 바라볼 때 생기는 미세한 영상 변화(disparity map, 시차맵)를 추출하여 깊이 정보를 계산하는 원리이다. 스테레오 카메라에는 기준선(baseline)으로 구분된 2개의 영상센서를 배치한다. 기준선이라는 용어는 영상센서 사이의 거리를 의미하며 스테레오 카메라 모델에 따라 기준선 거리는 7.5cm ~ 24.0cm로 차이가 있다. 스테레오 카메라 이미지에서 계산된 시차 맵은 에피폴라 기하학(epipolar geometry) 및 삼각 측량 방법을 사용하여 깊이 정보를 생성할 수 있다.

차량의 광범위한 주변 영역을 인식하기 위해서 사용되는 또 다른 카메라에는 어안 카메라가 있다. 어안 카메라는 일반적으로 주차 및 교통 체증 지원과 같은 근거리 감지 용도로 사용되며 차량 전면을 360°로 보기 위한 AVM 시스템은 4대의 카메라를 사용한다. 일반적인 렌즈 형상을 변형하면 영상의 왜곡현상이 발생하는데, 어안 렌즈와 같이 180° 정도의 극단적인 형상 변경이 있는 경우는 직선 영상이 곡선으로 취득될 수도 있다. 카메라 렌즈 기하학에서는 이것을 광학 왜곡이라고 하며 일반적으로 실패형 왜곡(pincushion distortion)과 원통형 왜곡(barrel distortion) 등으로 분류한다(〈그림 17〉 참고). 이러한 왜곡은 영상에서 감지된 객체의 위치나 특징점 추정에 오류를 초래하게 한다. 이러한 렌즈의 기하학적 왜곡을 보정하는 과정이 내부 보정에서 필요한 과정 중에 하나이다.

그림 17. 광학 렌즈에서 발생하는 왜곡 영상들



* 출처: Vision-Doctor 사이트

일반적으로 카메라로 캡처한 영상의 품질은 조명 및 악천후 상황(예: 눈, 강렬한 태양 눈부심, 폭풍우, 흐린 날씨 등)에 의해 크게 영향을 받는다는 문제가 있다. 또한, 영상 데이터에서 의미있는 정보를 분석하기 위해서 높은 연산 능력이 필요하다는 것이다. 최근에는 카메라 인지 요구사항이 지속적으로 확장되고 있어서, 1M 픽셀 이상의 고해상도 영상을 처리하고, 복잡한 딥러닝 알고리즘을 처리할 수 있는 그래픽 처리 장치(GPU, Graphics Processing Unit)를 내장하는 방향으로 발전하고 있다. 자율주행 카메라 시장을 주도하고 있는 Intel社의 자율주행 회사인 Mobileye는 CES2022(소비자 가전 전시회)에서 아이큐 울트라(EyeQ Ultra)라는 새로운 시스템 온 칩(SoC, System on Chip)을 소개했다. 176조 TOPS(Trillion Operation Per Second, 초당 작업 수)를 처리할 수 있는 아이큐 울트라 SoC는 2023년 말에 시험 샘플이 공개되고, 2025년에 양산 자동차에 공급될 것으로 예상한다고 밝혔다.

4. 레이더(RADAR) 기술

레이더(RADAR)는 제2차 세계 대전 직전에 처음 배치되었으며, 관심 영역 내에서 전자기파를 방사하고 표적에서 발생하는 산란파(또는 반사파)를 수신하는 원리로 작동된다. 수신된 전자기파는 추가적인 신호처리 과정을 거쳐 노이즈를 제거하고 표적에 대한 거리 정보를 얻게 된다. 거리 정보를 계산하는 원리는 전자기파의 도플러 효과(Doppler Effect)를 사용하여 감지된 표적의 상대 속도와 상대 위치를 계산한다. 도플러 효과는 파동 소스와 해당 물체 사이의 상대 운동으로 인해 발생하는 파동 주파수의 변화 또는 이동을 의미한다. 예를 들어, 표적이 RADAR 시스템 방향으로 이동할 때 수신된 신호의 주파수는 증가하고 반대의 경우는 감소하는 현상을 이용하는 것이다. 실제로 RADAR의 도플러 주파수 편이는 두 번 발생한다. 첫 번째는 전자기파가 표적으로 방출될 때이고, 두 번째는 도플러반사가 RADAR로 되돌아오는 경로에서 발생한다.

현재 자동차에 양산 적용되고 있는 RADAR는 24GHz, 77GHz, 79GHz 제품들이다. 24GHz RADAR는 79GHz RADAR와 비교하여 범위, 속도 및 각도 분해능이 제한되어 있어서 최고의 안전성을 요구하는 자율주행의 인지 성능을 만족시키기에는 부족한 문제가 있으며 향후 단계적으로 시장 점유율이 하락할 것으로 예상된다. RADAR 전자기파는 악천후 조건에 영향을 거의 받지 않아서 RADAR 기능은 환경 조명과 무관하다고 할 수 있다. 카메라와는 달리 안개, 눈 또는 흐린 날씨 조건이나, 급격한 조명변화 환경에서도 정상적으로 작동할 수 있다. RADAR의 단점은 도로 표지판이나 가드레일과 같이 주행 환경의 금속 물체를 잘못 감지하거나, 정적 객체를 식별하는 문제이다. 예를 들어 도로면에 방치된 동물 사체는 도플러 편이의 유사성으로 인해 도로면과 구분하여 식별하기가 어렵다.

일반적으로 RADAR는 차량의 앞 유리 상단 부근의 지붕, 차량 범퍼 또는 브랜드 엠블럼 뒤와 같은 위치에 내장되어 장착된다. 차량 생산과정에서 LiDAR의 장착 위치 및 방향에 대한 정밀한 정렬(alignment)을 보장하는 것이 필수적이다. 장착 각도 오정렬은 주변 장애물을 잘못 감지하거나 감지 속도 지연 등의 오류와 같이 차량 작동에 치명적인 결과를 초래할 수 있기 때문이다. 자동차용 RADAR는 중거리 레이더(MRR, Medium Range Radar), 장거리 레이더(LRR, Long Range Radar) 및 단거리 레이더(SRR, Short Range Radar)로 나뉜다. SRR은 주차 지원 및 충돌 근접 경고에, MRR은 측면/후방 충돌 방지 시스템 및 사각지대 경보에, 감지에 MRR, LRR은 적응형 크루즈 컨트롤 및 자동 긴급 제동 등의 기능에 사용된다. 지금까지 설명한 RADAR는 물체의 거리, 도플러 편이, 수평 각도를 측정할 수 있다. 최근에는 물체의 높이에 해당하는 수직 각도까지 측정할 수 있는 4D 이미징 RADAR 기술이 개발되면서 물체의 형태까지 식별할 수 있는 RADAR의 적용이 검토되고 있다.

5. 라이다(LiDAR) 기술

라이다(LiDAR)는 1960년대에 처음 개발되어서 항공 및 항공 우주 지형 매핑에 널리 사용되었다. 1990년대 중반, 레이저 스캐너 제조업체는 지형 매핑 애플리케이션을 위한 2,000 ~ 25,000pps(pulse for second) 수준의 상업용 LiDAR를 최초로 생산하기 시작했다. LiDAR 기술의 개발은 지난 수십 년 동안 상당한 속도로 발전해왔으며, 현재 ADAS 및 자율주행을 위한 핵심 센서 중에 하나로 자리매김하고 있다. LiDAR는 적외선 빔이나 레이저 광의 펄스를 방출하여 표적 표면의 반사 펄스를 검출하는 원리로 동작하는 원격 감지 센서이다. 방출된 펄스와 반사에 의해 수신된 펄스 사이의 시간 간격을 계산하여 센서와 표적 사이의 거리를 측정할 수 있으며, 반사는 기기와 측정된 간격에 의해 감지된다. 이러한 작동원리로 LiDAR는 센서 주변을 스캔하면서 주변 환경을 3D 포인트 클라우드 형태로 표현한다.

자율주행차, 드론, 휴머노이드 로봇 등과 같은 자율 이동체 관련 연구 및 사업화 기업의 급속한 성장으로 라이다의 측정 범위, 정확도, 환경 변화에 대한 견고성 및 고속 스캔 속도와 같은 성능지표에서 높은 수준의 요구사항이 제시되고 있다. 최근 발표되는 제품들은 기본적으로 360°회전 및 30°수직 FoV를 포함하여 초당 최대 200,000포인트 이상의 데이터를 취득할 수 있다. 결과적으로 최근 수많은 LiDAR 센서 기업들이 등장하여 이러한 고 사양 요구사항들을 해결할 수 있는 제품들을 출시하고 있다. 자율주행차에 사용되는 LiDAR 센서의 파장은 일반적으로 905nm와 1550nm 대역이 검토되고 있다. 905nm 제품은 양산이 용이하여 원가 절감이 가능하고 소모전력도 낮다. 물에 의한 흡수력이 1550nm 제품보다 낮아서 공기 중의 수분에 상대적으로 영향을 적게 받는다는 장점도 있다. 하지만, 지구로 투과되는 태양광에 905nm 대역이 존재하기 때문에 태양광 노이즈에 민감하여 탐지 거리가 상대적으로 짧다는 단점도 있다. 2개의 비교 파장 대역은 모두 1등급 레이저(Eye Safety Class 1, 망원경이나 확대경 등의 광학 장치를 사용하고 있는 상태에서 레이저 빔에 장시간 노출되어도 안전한 레이저)이기 때문에 시력 손상은 발생하지 않지만 1550nm가 조금은 더 안전하다고 할 수 있다.

다양한 응용 분야에 적용될 수 있는 LiDAR 센서는 1D, 2D 및 3D LiDAR로 제품 형태를 구분할 수 있다. 3가지 제품은 모두 포인트 클라우드 데이터(PCD, Point Cloud Data)라고 명명되는 1D, 2D, 3D 공간에 존재하는 점들의 집합체(반사 강도(intensity) 정보도 포함)로 출력 데이터를 생성한다. 즉, 3D LiDAR 센서의 경우는 주변에 존재하는 객체들이 반사 강도 정보가 포함된 x, y, z 좌표 상에서의 PCD를 생성한다. 시범 운영을 위한 자율주행차에는 보통 64채널 또는 128개 채널의 3D LiDAR 센서가 고해상도의 PCD를 생성하는 용도로 사용된다. 1D 센서만 사용된다면 특정 감시 영역에 존재하는 객체의 거리 정보(x 좌표)를 측정할 수 있고, 2D 센서를 사용하면 관심 객체의 각도 정보(y 좌표)도 추가로 획득할 수 있다. 3D 센서는

수직 축으로 다채널 레이저 빔을 발사하여 관심 객체의 높이 정보(z 좌표)를 포함하여 측정할 수 있다.

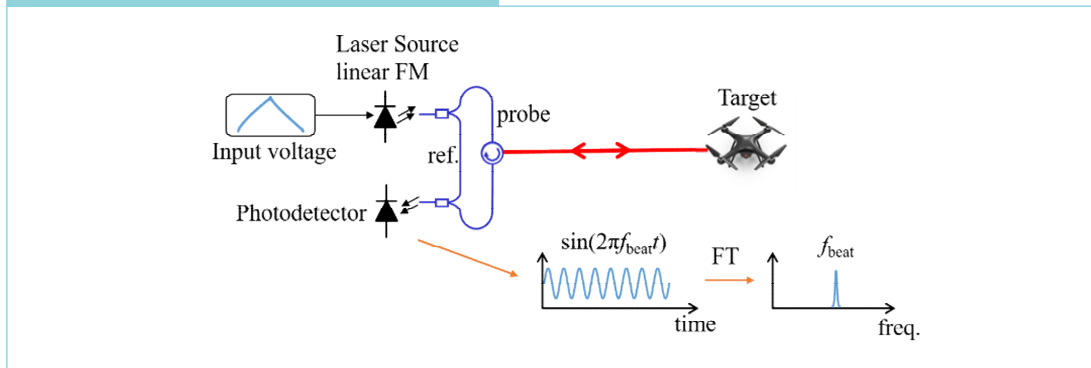
데이터 취득 차원이 아니라 스캔방식에 의하면 기계식 LiDAR와 Solid-State LiDAR로 분류할 수 있다. 기계식 LiDAR는 지금까지 자율주행 연구 개발 분야에서 가장 널리 사용되었던 원거리 스캐닝 센서이다. 이것은 레이저 빔을 직접 인가할 수 있는 고급 광학 기술이 적용된 회전 렌즈를 전기식 모터에 의해 스캔하는 방식이다. 반면에 Solid-State LiDAR는 모터로 회전하는 렌즈를 제거하여 기계적 결함을 방지할 수 있다. 이는 수많은 미세 구조 도파관을 사용하여 레이저 빔이 주변 환경의 다결정 다이아몬드(PCD, Polycrystalline Diamond)를 생성한다. Solid-State LiDAR는 기존의 기계식 LiDAR와 비교하여 견고성, 신뢰성 및 저렴한 가격으로 인해 최근 많은 관심을 받고 있으나 보통 120°이하의 좁은 수평 감지 영역만 유효하다는 제약사항이 있다.

LiDAR는 강한 조명과 악천후, 특히 강수량이 많고 균일하지 않거나 짙은 안개가 있는 곳에서 크게 성능 열화가 발생한다. 레이저 반사는 레이저 펄스가 표적에 흡수되거나 반사되면서 기록되는 이산형 데이터이다. 이때 동일한 레이저 펄스에서 여러 반환값을 수집할 수 있으며 최신 센서는 각 레이저 펄스마다 최대 5개의 반환값을 수신할 수 있다. 예를 들어 Velodyne VLP-32C는 설정된 레이저 반환 모드에 의해서 최강 반환값, 최종 반환값 또는 이중 반환값 등 다수의 반환값을 분석할 수 있다. 단일 레이저 반환 모드에서는 단일 방향으로 레이저 빔에서 수신된 펄스를 분석하여 거리 및 반사 강도 정보를 결정하고, 이 정보를 기반으로 최종 반환값인지 최강 반환값인지를 결정한다. 이와 비교하여 이중 반환 모드에서는 최강 반환값과 최종 반환값을 동시에 반환한다. 만일, 최강 반환값이 최종 반환값과 같은 경우에는 두 번째 최강 반환값이 최강값으로 반환된다. 이때 반환 강도가 충분하지 않은 점들은 무시한다. LiDAR는 카메라와 비교하여 신뢰성 있는 3D PCD를 제공할 수 있는 장점은 있으나, 색상 정보는 제공할 수 없으며 해상도도 낮은 편이다.

한편, 기존 LiDAR의 거리 해상도(range resolution)를 개선하고 감지 가능한 표적의 범위(dynamic range)도 확대하면서 표적과의 거리와 상대속도로 측정할 수 있는 주파수 변조 연속파(FMCW, Frequency Modulated Continuous Wave) 방식의 LiDAR도 개발되고 있다. <그림 18>은 FMCW LiDAR의 작동원리를 보여준다. 선형 주파수 처프(chirp, 광파의 파장이 시간에 따라 편이되는 특성) 레이저의 출력은 로컬 발진기로써의 기준 경로와 표적을 향한 Probe 경로로 분할된다. 광검출기의 두 경로에 있는 빛의 간섭 신호는 주파수가 표적과의 거리에 비례하는 sinusoidal 비트 신호를 생성한다. 푸리에 변환(Fourier transform, 시간이나 공간에 대한 함수를 시간 또는 공간 주파수 성분으로 분해하는 변환)은 이 시간 영역 비트 신호를 주파수 영역의 피크로 변환하므로 목표 거리를 간단히 추출할 수 있다. 또한 목표물이 움직이고 있는 경우 레이저의

up-chirp과 down-chirp를 모두 활용하여 속도와 거리를 동시에 감지할 수도 있다. FMCW LiDAR를 구현하려면 일반적으로 간섭 길이가 긴 고가의 레이저와 레이저 주파수 chirp를 선형화하기 위한 복잡한 제어 시스템이 필요하다.

그림 18. FMCW LiDAR의 작동 원리



* 출처: 버클리대학 사이트

IV 향후 기술 이슈

1. 3D 객체 인식

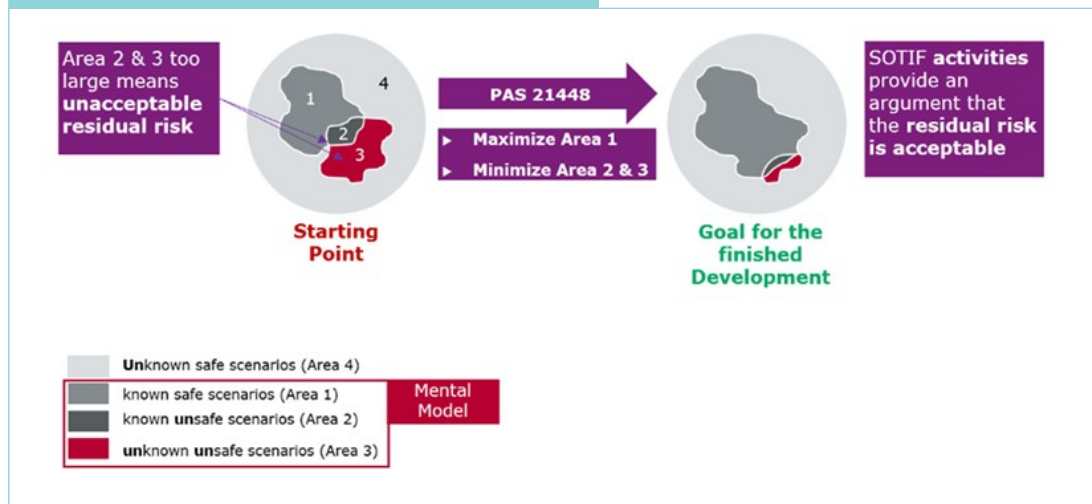
3D 공간에서의 객체인식은 고도 자율주행을 위한 필수 전제 조건이다. 3D 객체 인식의 최종 목표는 현재 차량 주변에서 무슨 일이 일어나고 있는지 완전히 이해해서 주행 판단과 제어 등의 자율주행 하위 기능들이 그에 따라 안전하게 동작할 수 있도록 하는 것이다. 3D 객체 인식은 레이블로 지정된 경계상자 내에 존재하는 객체가 어떤 모양인지, 자차와의 거리는 얼마나 떨어져 있는지, 진행하는 방향과 각도는 어떻게 되는지 이해하는 작업이라고 설명할 수 있다. 일반적으로 사용되는 두 가지 3D 객체 인식 방법은 카메라 2D 영상에서 3차원 정보를 복구하는 방법과 해상도가 낮은 LiDAR PCD를 직접 이용하는 방법이다. 2D 영상에서 깊이 정보를 복구하는 연구에는 수많은 진전이 있었지만, 여전히 최적 해법이 존재할 수 없는 불량 조건(ill-pose) 문제이다. 동일한 객체를 서로 다른 방향에서 2D 영상으로 취득한다면 외관 모습이 다르게 보이게 되고, 이는 객체 분류 학습에 도움이 되지 않는다. 또한 카메라는 수동 센서이기 때문에 자연적으로 조명(예: 야간)이나 우천 조건에 취약하다. LiDAR PCD를 이용하는 방법은 데이터 자체의 해상도가 낮아서 학습에 필요한 충분한 데이터 포인트를 확보할 수 없다. PCD는 본질적으로 불규칙하고, 순서도 없다. 그래서 컨볼루션(convolution) 연산자를 PCD에 직접 적용하면, 형태 정보의 이탈과 포인트 순서에 대한 변형 현상이 발생하게 된다. 게다가 PCD는 빈번하게 데이터 누락, 주변 객체에 의한 가리어짐, 자차에 의한 가리어짐이 발생하므로 실제적으로는 2.5D 수준이다. 이 문제를 해결하는 한 가지 방법은 PCD를 규칙적인 복셀(voxel)로 표현하는 방법이다. 그런데 복셀 크기를 늘리면 해상도가 손실되어 결과적으로 인식 정확도가 저하되는 반면 크기를 줄이면 입력 해상도가 증가함에 따라 복잡성과 메모리 소비가 기하급수적으로 증가한다는 것이 딜레마이다. 다음은 카메라 LiDAR 센서 융합으로 2D 영상과 3D PCD를 이용하는 방법이다. 서로 다른 이기종 센서 융합의 경우 정밀한 센서 보정 과정이 필요한 점 이외에도 관심 객체의 동일한 특징점이 영상과 PCD에서 대응점으로 정교하게 정합하기가 어렵다.

KITTI와 같은 공개된 DB를 기반으로 다양한 3D 객체인식 방식과 알고리즘의 인식 성능을 비교 평가할 필요가 있으며, 동시에 실행 시간 분석, 오류 분석, 강인성 분석 연구를 통해서 목표하는 자율주행 시스템에 적합한 3D 객체인식 알고리즘을 선택해야 할 것이다.

2. SOTIF(Safety Of The Intended Functionality)

SOTIF(ISO 21448) 표준은 기능안전(ISO 26262)과 달리 오작동, 고장, 결함에 관련된 것을 다루는 것이 아니라 의도된 설계 자체가 안전을 확보하기에 불충분·부적절한 경우를 다룬다. 예를 들어, 자율주행 시 센서의 성능 저하로 위험 상황에서 차량이 대처하지 못하고 계속 주행하는 경우를 상정해볼 수 있다. SOTIF의 개발 동기는 차량의 하드웨어나 소프트웨어에 의한 오작동이 없는 경우에도 ADAS나 자율주행차에서 불합리한 위험(unreasonable risk)을 방지하기 위함이다. 실제로 하드웨어가 기능안전 표준을 준수하고 소프트웨어에 버그가 없기 때문에 안전하다고 판단되는 ADAS 및 자율주행 시스템조차도 경우에 따라서는 오류가 발생할 수 있다. 기능안전 표준을 준수하는 완벽한 소프트웨어 및 하드웨어를 탑재한 차량이 센서나 시스템의 성능 제한, 예기치 않은 도로 환경의 변화, 예상할 수 없는 운전자의 기능 오용으로 인해 사고는 비변하게 발생할 수 있다. 또는 기계학습(ML, Machine Learning), 딥러닝 알고리즘이 주행 환경을 정확하게 해석하지 못할 수도 있다. <그림 19>는 SOTIF 활동이 목표하는 위험 영역 축소 개념을 설명하고 있다. 영역 1(Known/Safe)은 시스템 설계자가 알고 있는 안전한 상황, 영역 2(Known/Unsafe)는 알고 있지만 위험한 상황, 영역 3(Unknown/Unsafe)은 알려지지 않은 위험한 상황을 나타낸다. SOTIF 활동은 영역 1을 최대화하고, 영역 2와 3을 최소화하는 방향으로 센서나 시스템을 설계하는 것이다.

그림 19. SOTIF의 위험 영역 최소화 개발 목표



* 출처: Vector 컨설팅 사이트

SOTIF는 이러한 위험 상황을 식별하기 위한 프레임워크이며 수용 가능한 수준까지 위험도를 낮추기 위한 과정을 확인하고 검증하는 방법이다. 그러나 알려지지 않은 안전하지 않은 조건의 영역을 줄이는 것이 쉬운 일은 아니다. 이들 중 많은 부분이 코너 케이스에서 발생하기 때문에 실제 운전의 복잡성을 감안할 때 방대한 시나리오를 테스트해야 한다. 그래서 SOTIF는 시뮬레이션과 충분한 실차 테스트를 요구한다.

V 결론

자동차 산업은 향후 10년간 자율주행 기술의 도입으로 새로운 시장과 생태계가 형성될 것으로 예측된다. SAE의 정의를 인용하여 레벨 2~4까지 자율차의 사업화가 예상되고, 이러한 산업을 견인하는 핵심 부품은 카메라, 레이더, 라이다 센서가 될 것이다. 시장 예측 자료에 의하면 2030년까지 자율주행 센서 시장은 13%의 고도 연평균 성장률을 기록할 것이며, 특히 라이다 센서는 80% 이상의 급격한 성장이 예측되고 있다. 고도의 자율차 개발을 위해서는 센서 융합이 반드시 필요하기 때문에 이종 센서 간의 내부, 외부, 시간 보정기술이 중요해 질 것이다. 카메라는 최소 8대 이상의 멀티 카메라 시스템이 적용될 것이고 1M급 이상의 고해상도 제품이 요구되고 있다. 레이더도 8대 이상이 장착되고, 4D 이미징 레이더의 개발이 주목을 받고 있다. 라이다는 5대 이상이 장착될 것으로 예상되며, 해상도는 높이면서 소형화가 가능하고 수분이나 태양광에 의한 영향을 적게 받는 라이다 개발을 추진하고 있다. 향후 센서와 관련된 자율주행기술의 주요 이슈는 3D 객체인식기술과 SOTIF 표준화이다.

최근 국내에도 여러 벤처기업들이 첨단 자율주행 센서 개발을 목표로 창업을 하고 긍정적인 투자도 이어지고 있다. 기존의 자동차업체와 부품업체는 양산 수준의 국산 센서 개발을 위해 노력하고 있다. 이러한 노력들이 성과로 이어져서 정부가 목표하는 2027년 레벨 4 자율주행 상용화가 성공적으로 달성되기를 바란다.

저자_ 기석철(Seok Cheol Kee)

• 학력

서울대학교 전기공학 박사
 서울대학교 제어계측공학 석사
 서울대학교 제어계측공학 학사

• 경력

現) 충북대학교 지능로봇공학과 교수
 現) 충북대학교 스마트카연구센터 센터장
 前) ㈜만도 전자연구센터 센터장
 前) 삼성전자종합기술원 수석연구원

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 기석철. (2017). 자율주행차 센서 기술 동향. TTA 저널, Vol. 173.
- 2) 황재호. (2020). 자율주행을 위한 센서기술 동향. 한국자동차공학회 오토저널. 제42권 제4호(통권 제283호).

〈국외문헌〉

- 3) Bouain, M., Ali, K.M.A., Berdjag, D., Fakhfakh, N., Atitallah, R.B. (2018). An Embedded Multi-Sensor Data Fusion Design for Vehicle Perception Tasks. Journal of Communications, 13(1), 18-14.
- 4) Burkacky, O., Deichmann, J., Stein, J. P. (2019). Automotive Software and Electronics 2030 – Mapping the Sector’s Future Landscape. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/mapping-the-automotive-software-and-electronics-landscape-through-2030>. McKinsey & Company.
- 5) Yeong, D. J., Velasco-Hernandez, G., Barry, J., Walsh, J. (2021). Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review. Sensors, 21(6), 2140.
- 6) Waymo. (2021). Waymo Safety Report, <https://waymo.com/safety/>
- 7) Wendt, Z., Cook, J. S. (2019). Saved by the Sensor: Vehicle Awareness in the Self-Driving Age. Machine Design. <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21836344/saved-by-the-sensor-vehicle-awareness-in-the-selfdriving-age>.

〈기타문헌〉

- 8) 국토교통부 보도자료. (2019). 미래차 산업 신속전환을 위한 3대 전략. http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95082915.
- 9) 모빌아이 사이트. <https://www.mobileye.com/ces-2022/>
- 10) 버클리대학 사이트. <http://www.mingwulab.berkeley.edu/research/fmcwldar/>
- 11) 이용상. (2022.03.15). 시장은 폭발적으로 커지는데...갈 길 먼 ‘한국 자율주행차 산업’. 국민일보. <http://news.kmib.co.kr/article/view.asp?sid1=all&arcid=0016870326&code=61172011>
- 12) 현대자동차 홈페이지 미래 모빌리티 서비스. 사람의 마음을 담은, 새로운 자율주행의 시작: 아이오닉 5 기반의 레벨 4 자율주행 자동차. <https://www.hyundai.com/worldwide/ko/brand/ioniq-5-based-robotaxi>
- 13) AUTOSAR 사이트. <https://www.autosar.org/>
- 14) EURO-NCAP 사이트. Euro NCAP Launches Road Map 2025 – In Pursuit of Vision Zero. <https://www.euroncap.com/en/press-media/press-releases/euro-ncap-launches-road-map-2025-in-pursuit-of-vision-zero/>

- 15) ISO 사이트. <https://www.iso.org/standard/70939.html>
- 16) ROS 사이트. <https://www.ros.org/>
- 17) Shuttleworth J. (2019). SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update. <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>.
- 18) Smart Radar System 사이트. <https://www.smartradarsystem.com/>
- 19) Strategy Analytics 사이트. <https://www.strategyanalytics.com/>
- 20) Vector 컨설팅 사이트. <https://consulting.vector.com/kr/ko/solutions/safety-solutions/sotif/#c182422>
- 21) Vision-Doctor 사이트. <https://www.vision-doctor.com/en/optical-errors/distortion.html>



03

국가R&D 현황 분석

융합연구리뷰 7월호에서 다룬 2개의 주제(무인 이동체(드론) 정밀항법 기술 및 자율주행차 센서 기술)에 대한 각각의 국가R&D 현황을 살펴보기 위해 국가연구개발 과제 분석을 수행하였다. 연구비를 기준으로 연구비 규모별 과제수, 연구수행주체, 연구수준, 연구분야(국가과학기술표준분류, 미래유망신기술분류) 등 여러 측면에서의 분석 결과를 제시한다.

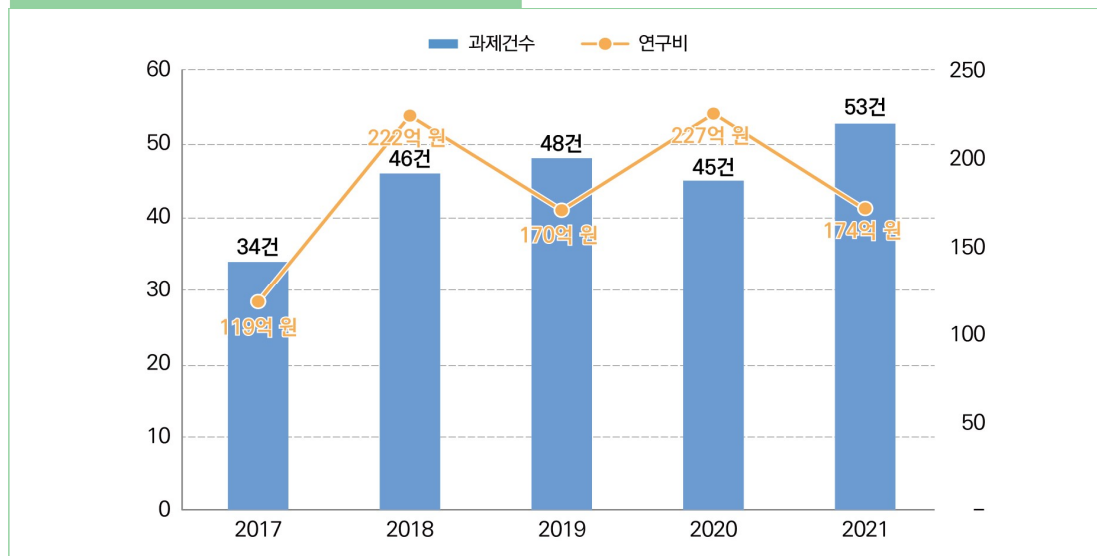
I 무인 이동체(드론) 정밀항법 기술

□ (총괄) 최근 5년간('17~'21) 총 226건의 과제에 대해 912억 원의 연구비가 투자됨

※ 국가과학기술지식정보서비스(NTIS) 플랫폼을 기반으로 관련 국가 연구개발 과제 분석 수행 : 원고의 핵심 키워드를 고려하여 검색 실시

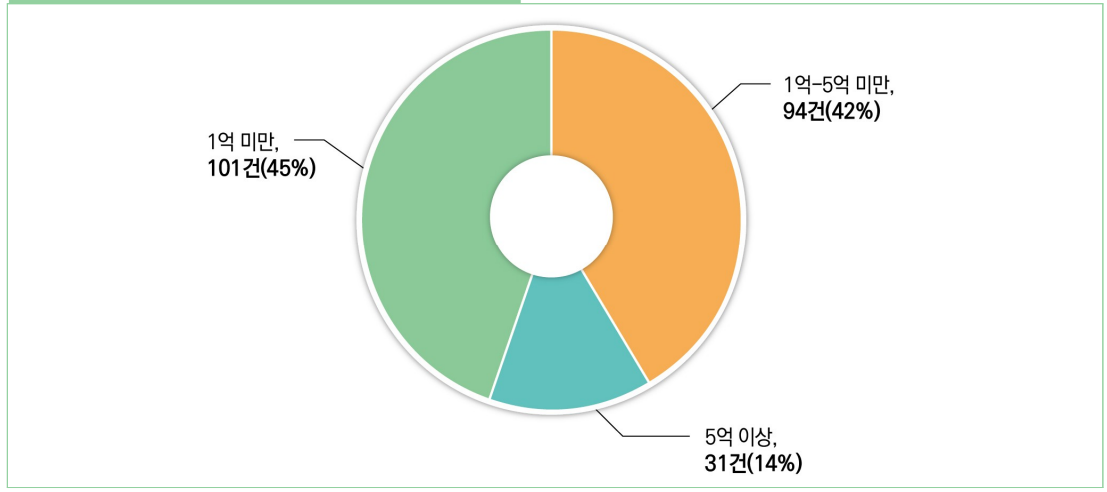
* (SLAM or 자율비행 or 정밀항법) and (드론 or 멀티콥터 or 무인비행체)

그림 1. 연도별 연구과제 건수 및 연구비



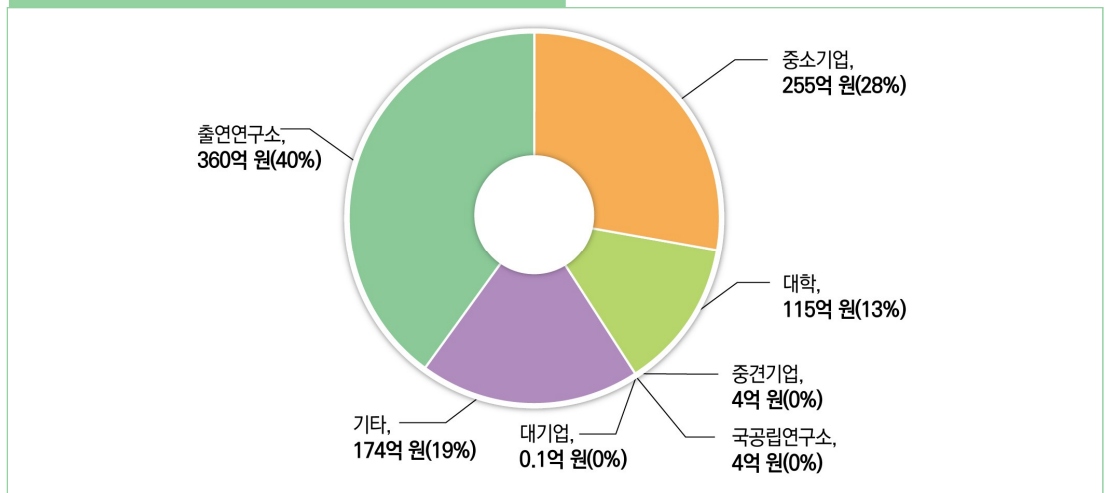
□ (연구비 규모별 과제 수) 연구비가 1억 원 미만인 과제가 45%(101건)를 차지하고, 1억 원 이상 5억 원 미만의 과제가 42%(94건)를 차지하는 반면, 5억 원 이상 과제의 비중은 14%(31건)에 불과한 것으로 나타남

그림 2. 연구비 규모별 과제 수 및 비율



□ (연구수행주체) 연구수행주체 별 지원받는 연구비 비중은 출연연구소(40%, 360억 원), 중소기업 (28%, 255억 원), 대학(13%, 115억 원) 순으로 큰 것으로 드러남

그림 3. 연구수행주체별 연구비 규모 및 비율



- (연구수준) 무인 이동체(드론) 정밀항법 기술은 도입기이며 응용연구 단계인 것으로 확인됨
 - (연구개발단계 분석 결과) 응용연구에 투자되는 연구비 비중이 34%(307억 원)로 가장 큰 것으로 나타났으며, 개발연구와 기초연구는 각각 26%(237억 원), 14%(127억 원)의 비중을 차지하는 것으로 드러남
 - (연구개발성격 분석 결과) 시작품 개발 관련 연구에 투자되는 연구비의 비중이 18%(167억 원)로 가장 큰 비중을 차지하고, 아이디어 개발의 연구비 비중은 15%(136억 원), 제품 또는 공정개발의 연구비 비중은 10%(89억 원)인 것으로 나타남
 - (기술수명주기 분석 결과) 도입기에 투자되는 연구비 비중(42%, 380억 원)이 성장기(19%, 176억 원)와 성숙기(7%, 62억 원)에 투자되는 연구비 비중의 합(26%, 238억 원)보다도 큰 것으로 드러남

그림 4. 연구개발단계별 연구비 규모 및 비율

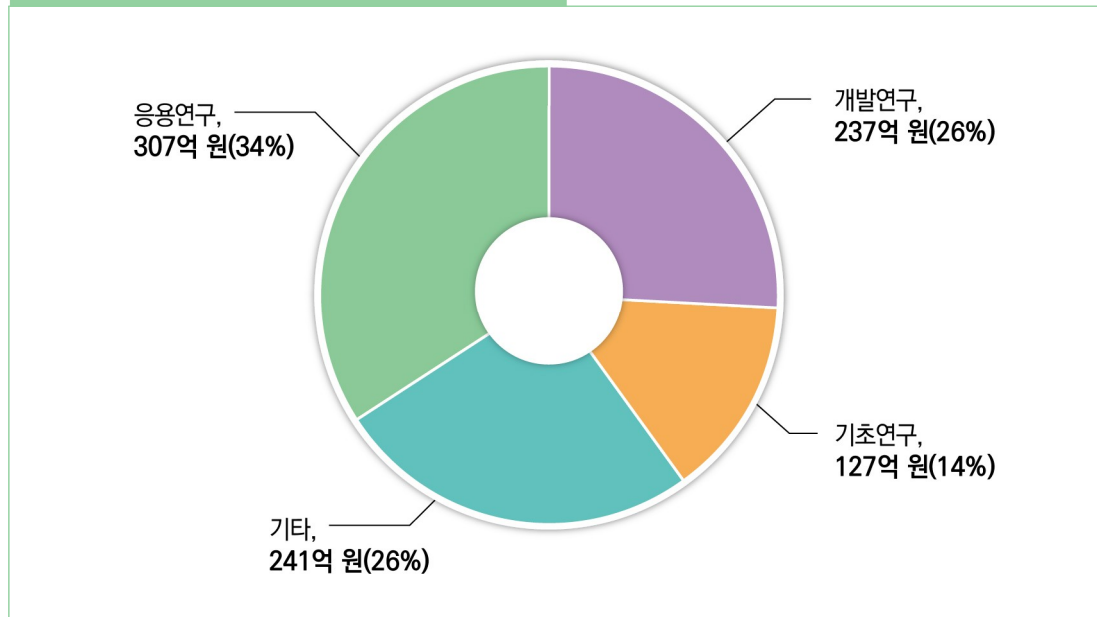


그림 5. 연구개발성격별 연구비 규모 및 비율

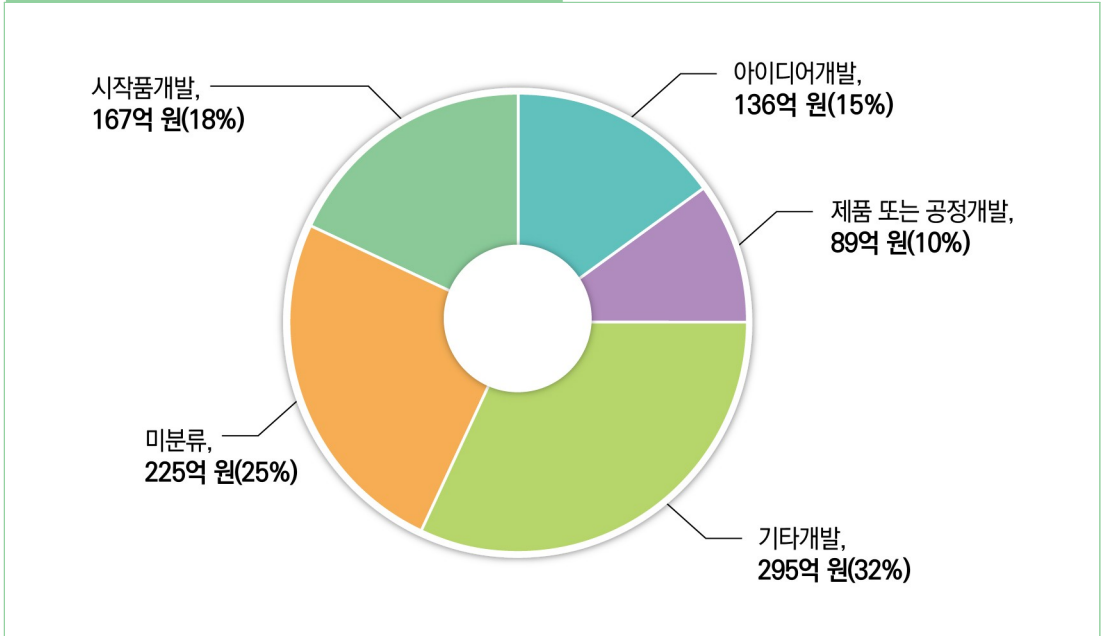
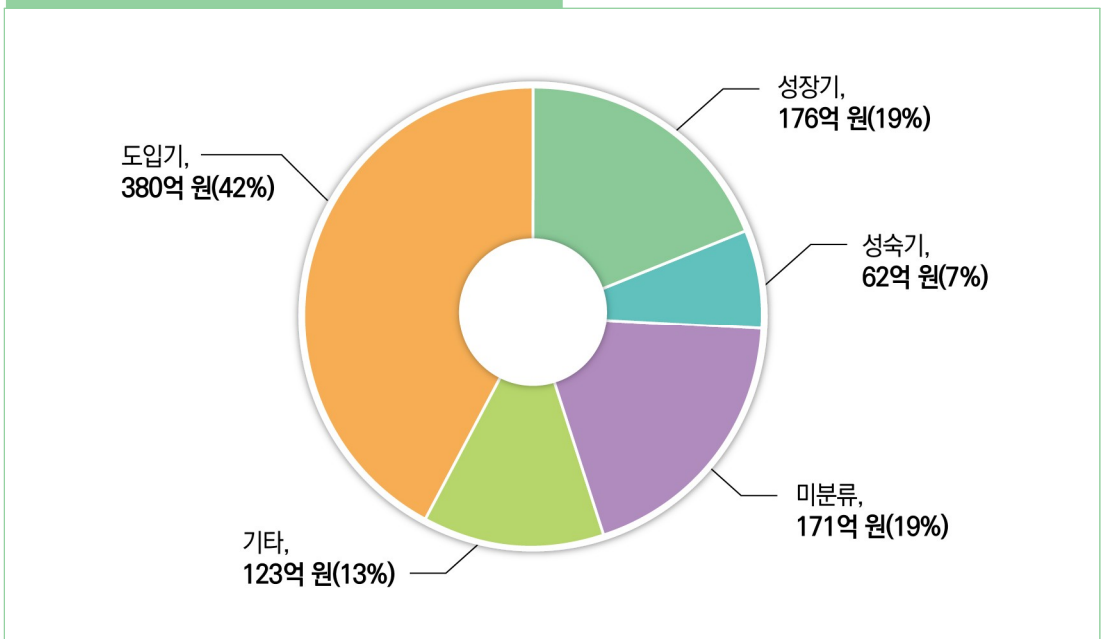


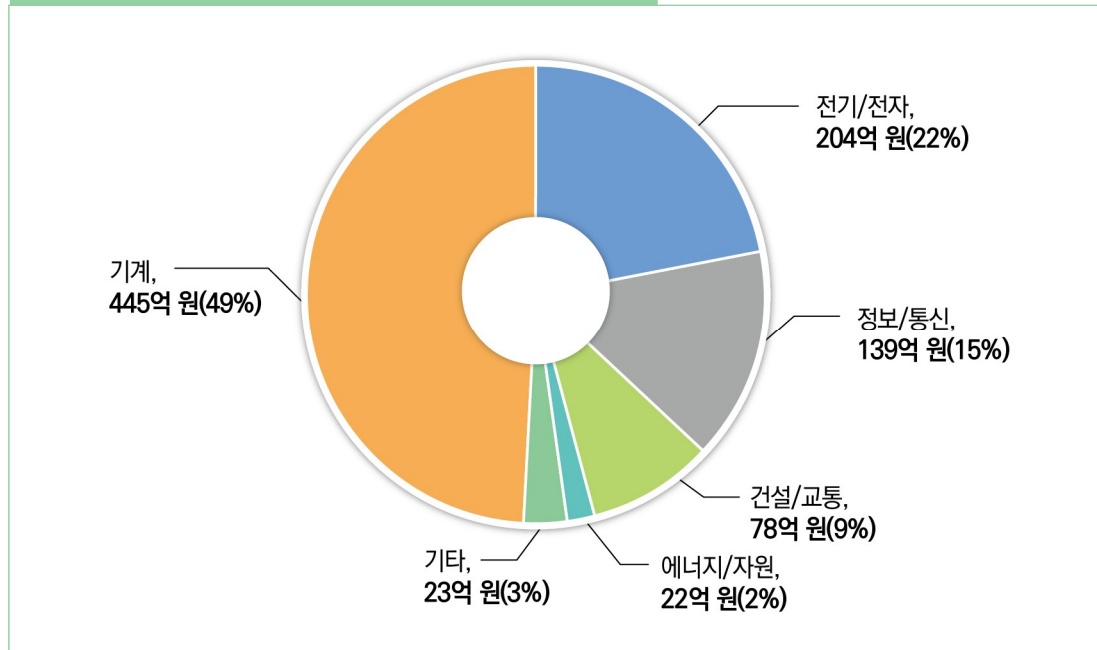
그림 6. 기술수명주기별 연구비 규모 및 비율



□ **(연구분야)** 국가과학기술표준분류와 미래유망신기술분류(6T) 분석 결과, 기계 분야 및 우주항공기술(ST) 분야를 중심으로 무인 이동체(드론) 정밀항법 연구가 이루어짐

- **(국가과학기술표준분류 분석 결과)** 기계 분야에 대한 연구비 비중이 무인 이동체(드론) 정밀항법 기술 관련 전체 연구비의 절반 수준(49%, 445억 원)을 차지하는 것으로 드러났으며, 전기/전자 분야 22%(204억 원), 정보/통신 분야 15%(139억 원) 순으로 연구비 비중이 높은 것으로 확인됨
 - ※ 연구책임자가 최대 3개까지 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류에 대한 각 가중치를 고려한 결과임
 - 융합과제에 지원된 연구비 비중은 무인 이동체(드론) 정밀항법 연구에 투자된 전체 연구비의 34%를 차지하며 약 313억 원이 지원됨
 - ※ 융합과제란 연구책임자가 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류가 두 개 이상의 분류에 해당하는 과제를 의미함
- **(미래유망신기술분류(6T) 결과)** ST 관련 연구에 대한 연구비 비중이 69%(629억 원)로 가장 큰 것으로 확인됨

그림 7. 국가과학기술표준분류별 연구비 규모 및 비율



□ (주요 과제) 원고의 주요 내용 및 키워드 등을 기준으로 선정함

과제명 (사업명, 부처명)	수행기관, 총 연구기간, 연구비 규모	과제 주요 내용
5G 드론 시스템 및 원격운영시스템 개발 (DNA+드론기술개발, 과학기술정보통신부)	한국전자통신연구원, 2020-2024년, 28억 원('21)	5G 이동통신 네트워크를 기반으로 다수의 드론을 원격으로 실시간 자율 운영하고 획득한 데이터를 실시간으로 수집·저장할 수 있는 5G 드론 시스템 및 원격운영시스템 개발
가상비행환경을 이용한 ADP/DL 기반 자율비행 멀티콥터 핵심기술 개발 (인공지능산업원천기술개발, 과학기술정보통신부)	한국항공대학교교산학협력단, 2019-2020년, 3억 원('20)	실내 인공지능형 자율비행 멀티콥터 개발을 위해 오픈소스 개발환경에서 Approximate Dynamic Programming를 이용해 새로운 3차원 경로계획 알고리즘과 딥 러닝 기반 충돌회피 알고리즘 개발
정밀농업 예찰을 위한 정밀측위 기반 다목적 드론 시스템 개발 (산학연협력기술개발, 중소벤처기업부)	케이엔알스페이스(주), 2017-2018년, 0.3억 원('18)	다중센서 및 정밀측위 시스템을 탑재한 전문 예찰용 드론과 한국형 운용소프트웨어 개발

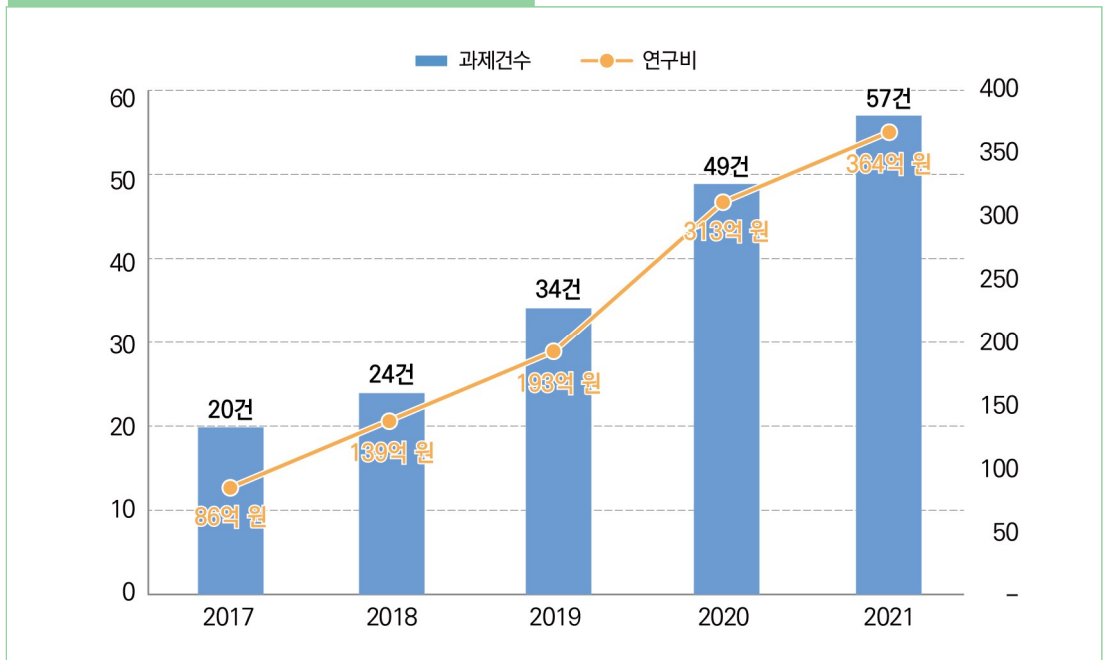
II 자율주행차 센서 기술

□ (총괄) 최근 5년간('17~'21) 총 184건의 과제에 대해 1,095억 원의 연구비가 투자됨

※ 국가과학기술지식정보서비스(NTIS) 플랫폼을 기반으로 관련 국가 연구개발 과제 분석 수행 : 원고의 핵심 키워드를 고려하여 검색 실시

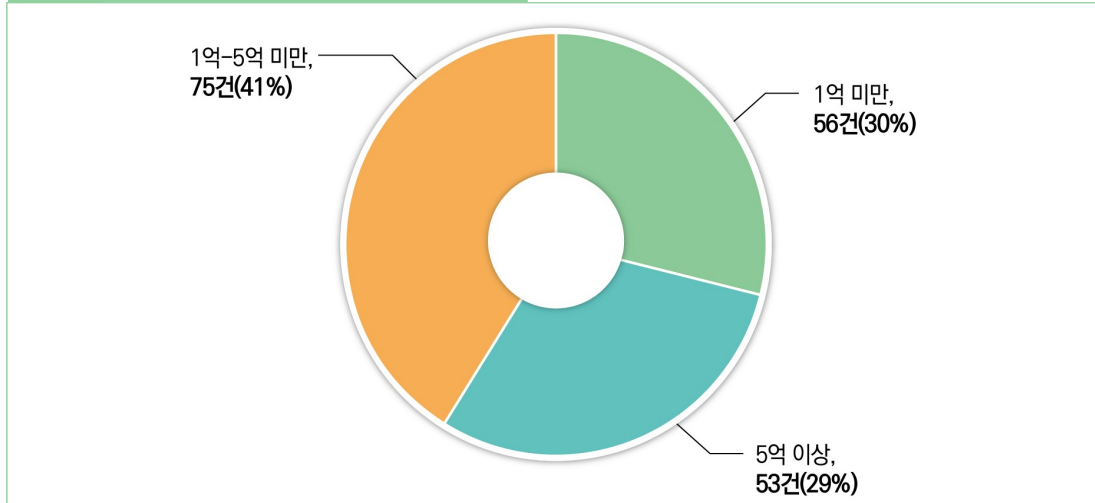
* 차량 and (카메라 or 레이다 or 라이다) and 자율주행

그림 10. 연도별 연구과제 건수 및 연구비



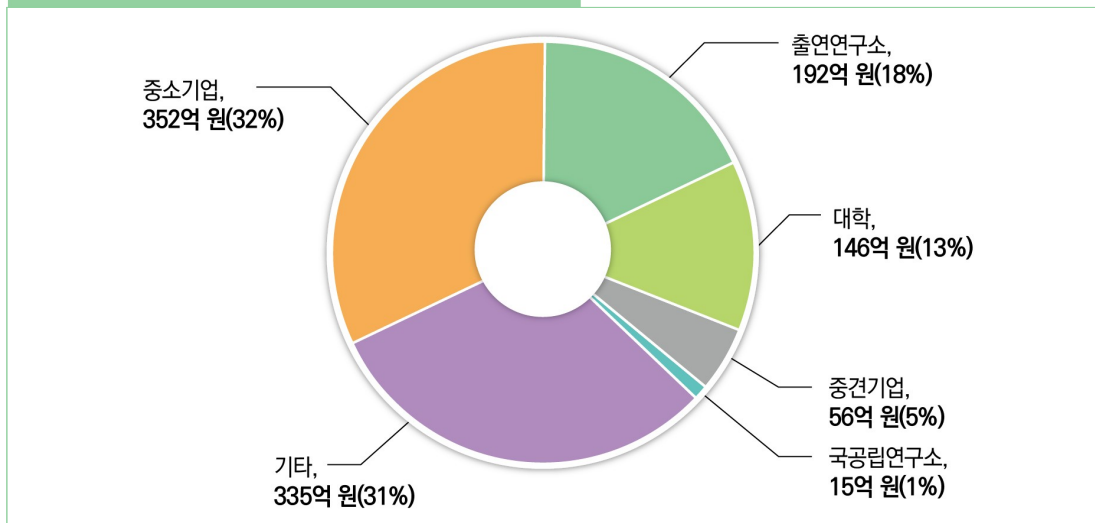
□ (연구비 규모별 과제 수) 1억 원 이상 5억 원 미만인 과제가 41%(75건)로 가장 큰 비중을 차지하고, 1억 원 미만 과제와 5억 원 이상 과제는 각각 30%(56건), 29%(53건)로 유사한 비중을 차지하는 것으로 확인됨

그림 11. 연구비 규모별 과제 수 및 비율



□ (연구수행주체) 중소기업이 지원받는 연구비의 비중이 32%(352억 원)로 가장 큰 것으로 나타났고, 출연연구소 (18%, 192억 원), 대학(13%, 146억 원) 순으로 연구비 비중이 큰 것으로 드러남

그림 12. 연구수행주체별 연구비 규모 및 비율



□ (연구수준) 연구수준을 분석한 결과, 자율주행차 센서 기술 관련 연구는 도입기이며 개발연구 단계인 것으로 나타남

- (연구개발단계 분석 결과) 개발연구에 자율주행차 센서 기술 관련 전체 연구비의 절반 이상(61%, 668억 원)의 연구비가 투자되고 있으며 응용연구와 기초연구의 연구비 비중은 각각 23%(255억 원)와 10%(106억 원)인 것으로 확인됨
- (연구개발성격 분석 결과) 시작품개발 관련 연구의 연구비 비중(45%, 495억 원)이 제품 또는 공정개발 (18%, 201억 원), 아이디어 개발(4%, 39억 원)에 비해 월등히 높은 것으로 드러남
- (기술수명주기 분석 결과) 도입기에 대한 연구비의 비중이 44%(188억 원)로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 성장기(22%, 239억 원)와 성숙기(14%, 159억 원) 순으로 연구비 비중이 큰 것으로 나타남

그림 13. 연구개발단계별 연구비 규모 및 비율

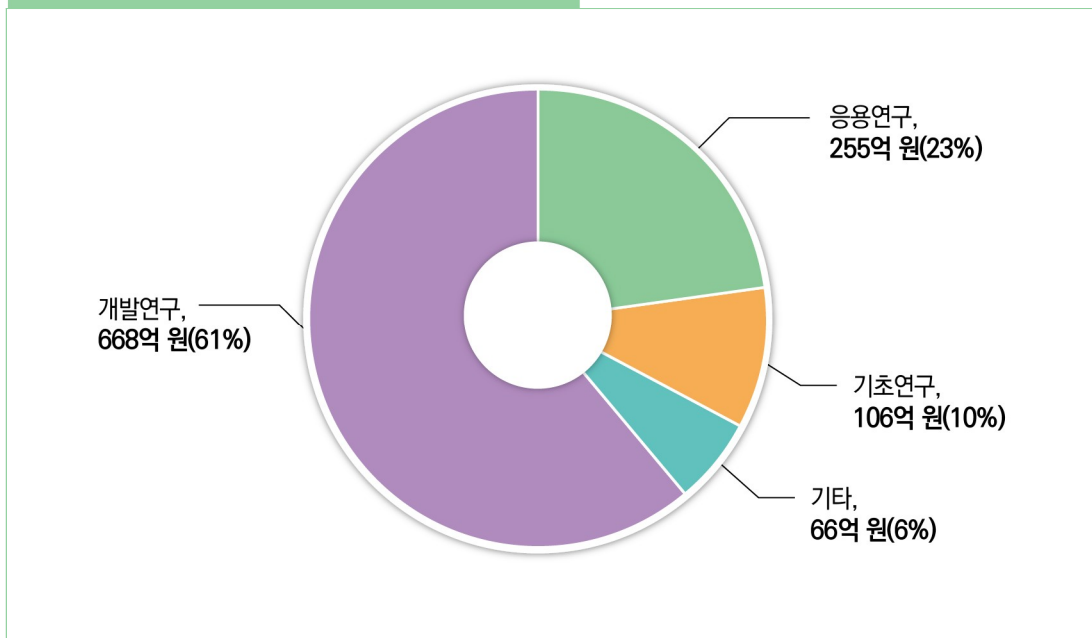


그림 14. 연구개발성격별 연구비 규모 및 비율

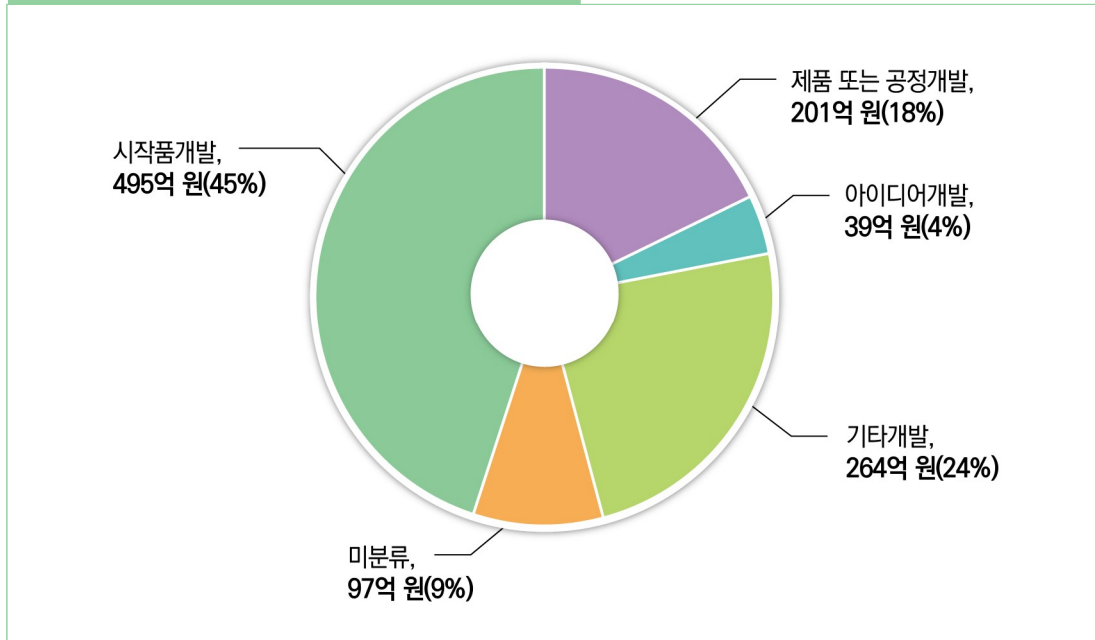
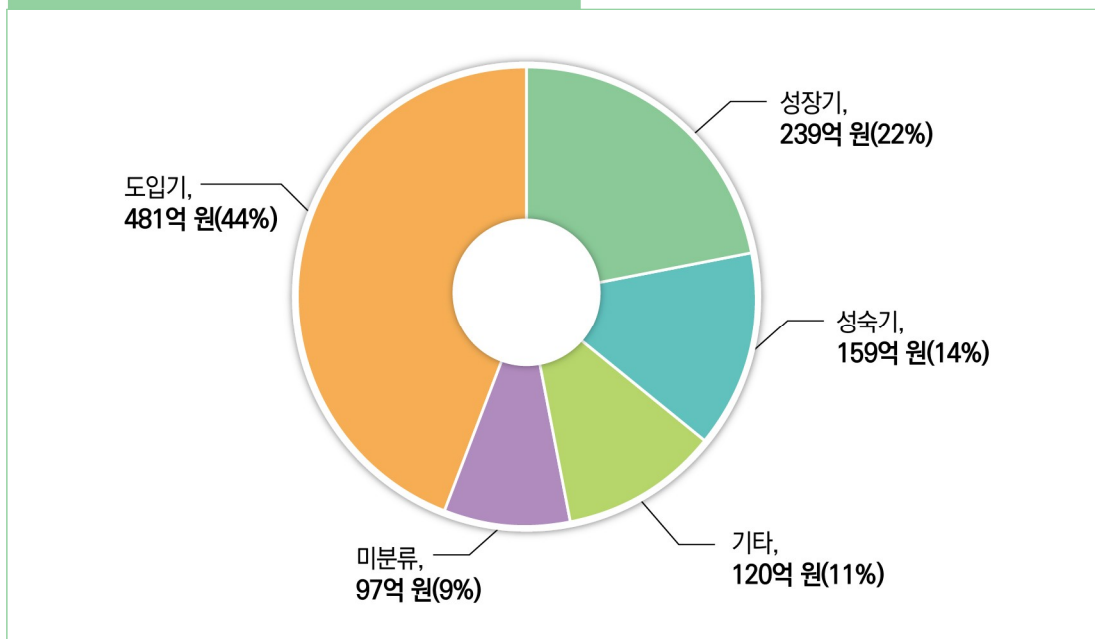


그림 15. 기술수명주기별 연구비 규모 및 비율



- (연구분야) 국가과학기술표준분류와 미래유망신기술분류(6T) 분석 결과, 자율주행차 센서 기술에 대한 연구비 투자는 정보통신 기술(IT) 및 기계 분야 위주로 이루어지고 있는 것으로 나타남
 - (국가과학기술표준분류 분석 결과) 국가과학기술표준분류 중 기계 분야에 대한 연구비 비중(54%, 588억 원)이 가장 큰 것으로 나타났으며 정보/통신(25%, 270억 원) 분야가 그 다음으로 큰 것으로 확인됨
 - ※ 연구책임자가 최대 3개까지 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류에 대한 각 가중치를 고려한 결과임
 - 자율주행차 센서 기술에 대한 연구 중 융합과제에 지원된 연구비 비중은 22%(246억 원)인 것으로 드러남
 - ※ 융합과제란 연구책임자가 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류가 두 개 이상의 분류에 해당하는 과제를 의미함
 - (미래유망신기술분류(6T) 결과) 정보통신 기술(IT) 관련 연구에 대한 투자 비중이 68%(748억 원)로 자율주행차 센서 기술 전체 연구비의 절반 이상을 차지하고 있으며, 나노 기술(NT)에 대한 연구비는 4%(42억 원)의 비중을 차지함

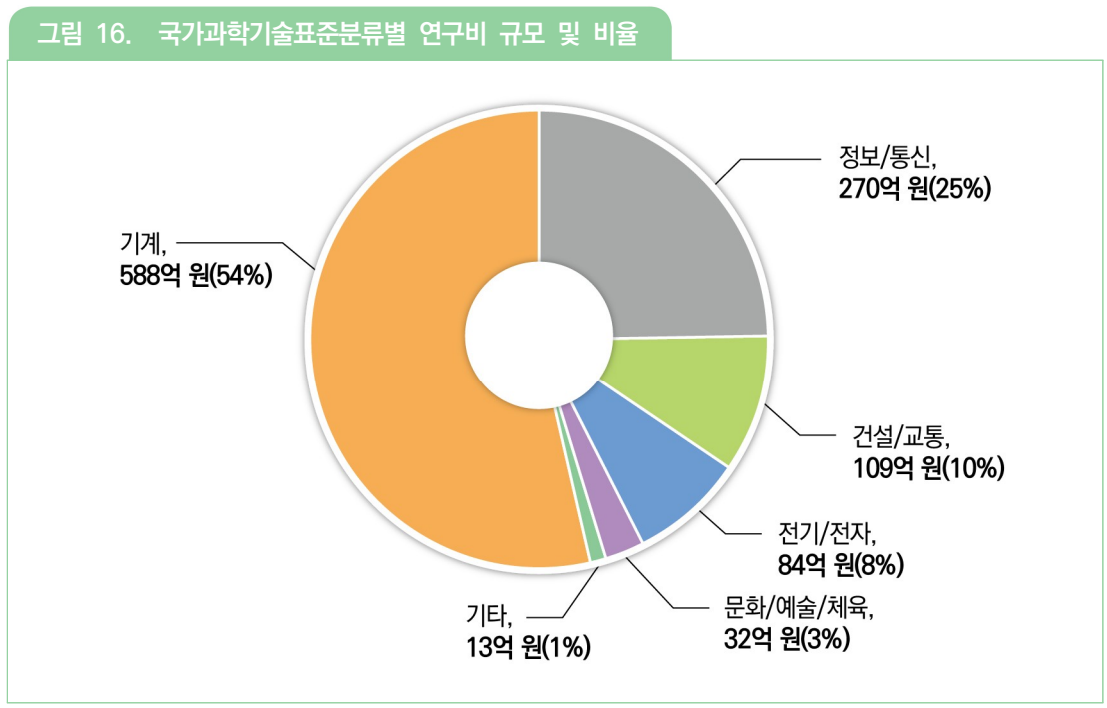


그림 17. 융합 R&D 과제 연구비 규모 및 비율

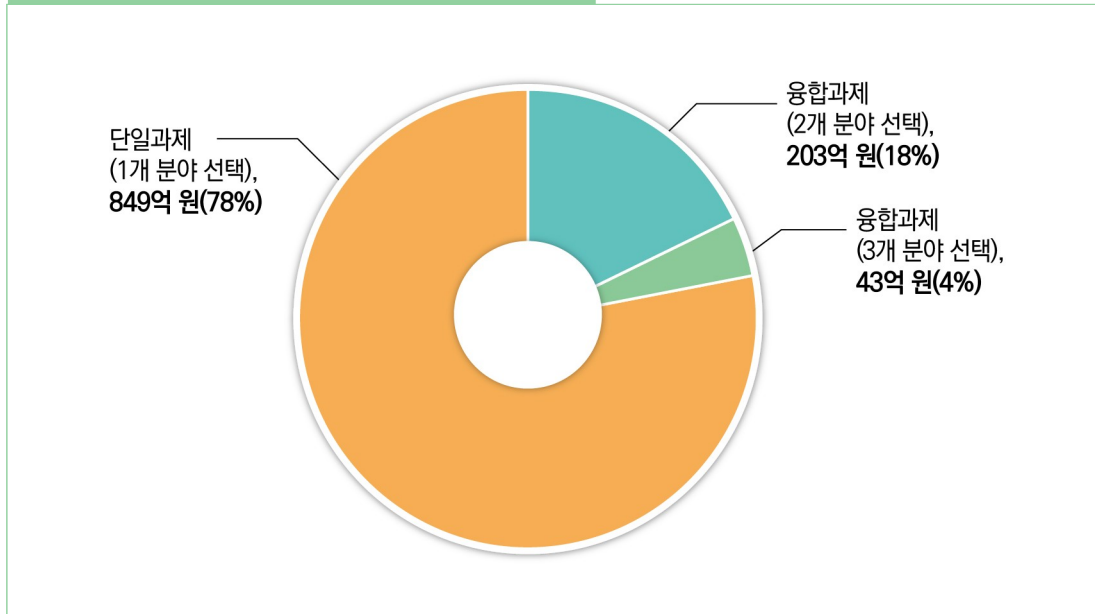
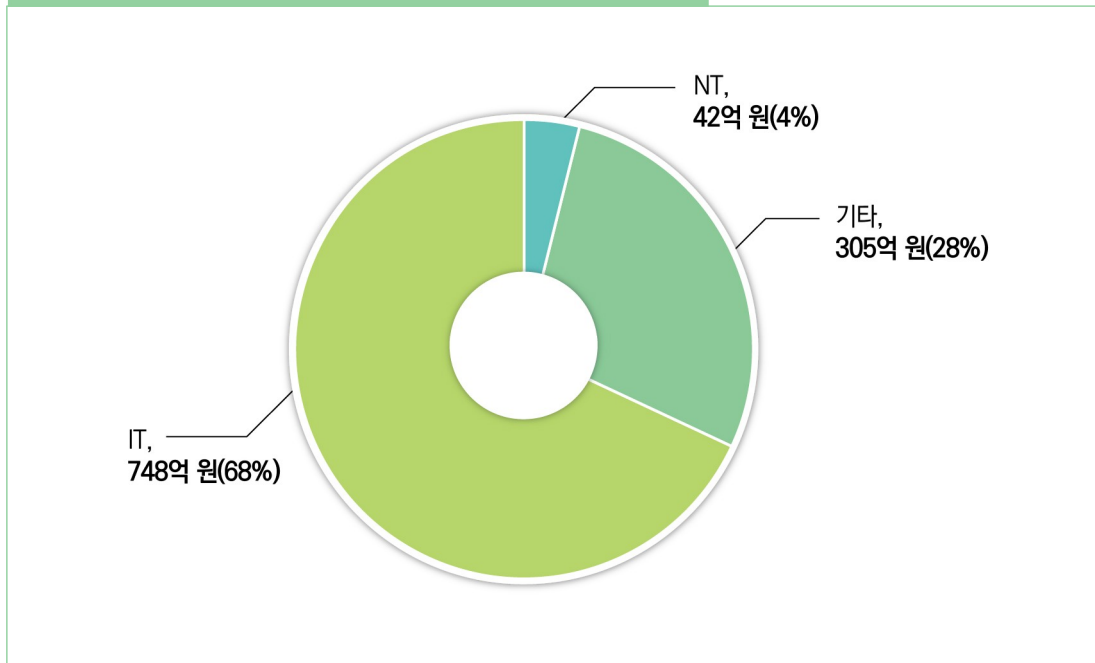


그림 18. 미래유망 신기술분류(6T)별 연구비 규모 및 비율



□ (주요 과제) 원고의 주요 내용 및 키워드 등을 기준으로 선정함

과제명 (사업명, 부처명)	수행기관, 총 연구기간, 연구비 규모	과제 주요 내용
대형버스용 자율주행 부품 및 차량장착 기술개발 (자동차산업핵심기술개발, 산업통상자원부)	(주)솔루션링크, 2019-2021년, 38억 원('21)	관제시스템과 차량 안전 정보를 상호 교환할 수 있는 시스템 개발을 통해 안전하고 정확한 자율주행 버스용 센서 개발
정부청사 인근 환승형 라스트마일 서비스를 위한 지역특화 자율주행 기술 개발 (지역혁신클러스터육성(R&D)(세종), 산업통상자원부)	주식회사 라이드플릭스, 2020-2022년, 4억 원('21)	인프라(통신 인프라, 전용도로 등) 의존도를 최소화한 자율주행 기술 개발 및 자율주행 알고리즘(측위, 인지, 예측, 계획, 제어) 기술 고도화
대리안전지표를 활용한 신뢰성 기반의 자율주행 잠재 위험도 평가방법 개발 (4단계두뇌한국21사업, 교육부)	서울대학교, 2019-2024년, 0.1억 원('21)	On-Board Diagnosis, GPS, 블랙박스영상, 주변 교통신호자료 등의 현재 주행상황을 표현할 수 있는 IoT 자료를 통해 얻는 주행 정보를 이용하여 자동차의 주행 안전성을 실시간으로 평가하는 방법론 개발

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 July vol.8 no.7

이 보고서는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 사업임

(No. NRF-2012M3C1A1050726)