



# Selvitys saatavilla olevista sensoreista ja sensorifuusioista itsenäisesti liikkuvan työkoneen saavuttamiseksi

Martin Joenperä

OPINNÄYTETYÖ  
Joulukuu 2022

Ajoneuvotekniikka  
Älykkäät koneet

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma  
Älykkäät koneet

JOENPERÄ, MARTIN

Selvitys saatavilla olevista sensoreista ja sensorifuusioista itsenäisesti liikkuvan työkoneen saavuttamiseksi

Opinnäytetyö 40 sivua, joista liitteitä 10 sivua  
Joulukuu 2022

---

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tarjota kattava katsaus ajoneuvoteollisuuden yleisimmistä havaitsevista sensoreista ja sensorifuusioista ja arvioida niiden soveltuvuutta pienkuormaajan automatisointiin. Työ oli taustatutkimus saatavilla olevista sensoreista ja se on osa isompaa Tampereen ammattikorkeakoulun projektia automatisoida Avant pienkuormaaja.

Työssä käytiin läpi yleisimmät ajoneuvoteollisuudessa käytettävät havaitsevat sensorit ja sensorifuusiot, niiden toiminta, eri versiot, käyttökohteet, sekä soveltuvuus projektiin. Työssä käsiteltävät sensorit olivat tutka, kamera, ultraäänisensori, sekä lidar. Sensorien soveltuvuutta arvioitiin tieteellisistä artikkeleista ja tutkimuksista kerätyn tiedon perusteella.

Tutkimusten tulosten perusteella työssä päädyttiin siihen johtopäätökseen, että kameroiden ja kiinteiden lidarien fuusiolla saavutetaan hyvä tulos kattavan näkökentän ja ominaisuuksien puolesta. Mikäli työkoneita käytetään huonoissa olosuhteissa, kuten kovassa lumi- tai vesisateessa, voi tutkan tai ultraäänisensorien lisääminen olla kuitenkin suotavaa. Pohdinnan perusteella minkä tahansa sensorin käyttö voi siis olla perusteltua riippuen työkoneen lopullisesta käyttökohteesta, sillä jokaisella sensorilla on omat heikkous- ja vahvuusalueensa.

---

Asiasanat: sensorit, sensorifuusio, automaatio, työkone

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Vehicle Engineering  
Intelligent machines

JOENPERÄ, MARTIN

An inquiry on available sensors and sensor fusions required to achieve fully automated non-road mobile machinery

Bachelor's thesis 40 pages, appendices 10 pages  
December 2022

---

The purpose of this thesis was to provide an extensive review of the most common sensors and sensor fusions used in automotive perception systems and to evaluate their suitability for the automation of a skid-steer loader. This thesis is a part of a larger project of Tampere University of Applied Sciences which aims to automate an Avant skid-steer loader.

This paper focused on the most common sensors in the automotive field, which are cameras, ultrasonic sensors, radars and lidars and presents the working principle, different versions, uses and suitability of those sensors for this project. The applicability of each sensor was evaluated based on information collected from scientific articles and studies.

Based on the results of this research, it was concluded that the sensor fusion of multiple cameras and solid state lidars yield a good result in terms of field of view and usability in different levels of lighting. However, if the loader is going to be used in harsh weather conditions, the addition of radars or ultrasonic sensors be beneficial. The findings indicate that the use of any sensor can be beneficial and picking the best sensors for the project depends on the final application of the loader.

---

Key words: sensors, sensor fusion, automation, loader

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	AUTONOMINEN LIIKKUMINEN .....	7
2.1	Toimintaperiaate .....	7
2.2	Luokittelu ja standardit .....	8
3	SENSORIT .....	11
3.1	Tutka .....	11
3.1.1	Ominaisuudet .....	12
3.1.2	Käyttökohteet .....	12
3.1.3	Soveltuvuus .....	13
3.2	Ultraäänisensori .....	14
3.2.1	Ominaisuudet .....	14
3.2.2	Käyttökohteet .....	14
3.2.3	Soveltuvuus .....	15
3.3	Kamera .....	15
3.3.1	Ominaisuudet .....	16
3.3.2	Käyttökohteet .....	16
3.3.3	Soveltuvuus .....	19
3.4	Lidar .....	19
3.4.1	Ominaisuudet .....	20
3.4.2	Käyttökohteet .....	21
3.4.3	Soveltuvuus .....	21
3.5	Sensorit nykypäivän ajoneuvoissa .....	22
4	SENSORIFUUSIO .....	24
4.1	CL, RC ja RCL sensorifuusiot .....	24
5	POHDINTA .....	27
	LÄHTEET .....	30
	LIITTEET .....	32
	Liite 1. Einstein T-79 .....	32
	Liite 2. 24GHz Millimeter-Wave Obstacle Avoidance Radar .....	33
	Liite 3. Bosch ultraäänisensori .....	34
	Liite 4. Stereolabs ZED 2i Stereo Camera .....	35
	Liite 5. Marshall Electronics CV503 Mini Full HD Camera .....	36
	Liite 6. Velodyne Puck .....	37
	Liite 7. DFRobot DFR0445 .....	38
	Liite 8. Velodyne Lidar Velarray M1600 .....	39
	Liite 9. Velodyne Lidar Velabit .....	40

**LYHENTEET JA TERMIT**

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CW	Continuous Wave
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FoV	Field of view
FPS	Frames per second
IR	Infrared
LRR	Long Range Radar
MIR	Mid-Infrared
MRR	Medium Range Radar
NIR	Near-Infrared
SRR	Short Range Radar
ToF	Time of Flight

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Tampereen ammattikorkeakoululle. Työn tavoitteena on tarjota Tampereen ammattikorkeakoululle kattava esitys saatavilla olevista havaitsevista sensoreista ja sensorifuusioista Avant pienkuormaajan automatisointiin. Projektissa automatisoitava pienkuormaaja on suhteellisen hitaasti liikkuva työkone, joten sensoreilta vaadittavat ominaisuudet eriävät ajoneuvoissa vaadittavista korkeiden nopeuden ominaisuuksista, kuten pitkästä kantamasta.

Työssä käydään läpi ajoneuvoteollisuuden yleisimpiä sensoreita, eli tutkia, ultraäänisensoreita, kameroita ja lidareita eli valotutkia, ja vertaillaan niiden soveltuvuutta projektiin. Soveltuvuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa sensorin näkökentän suuruus, toiminta eri sääolosuhteissa, sekä hinta. Sensorien soveltuvuutta arvioidaan tieteellisistä artikkeleista ja tutkimuksista kerätyn tiedon perusteella.

Työn rakenne koostuu viidestä luvusta, jotka ovat johdanto, autonominen liikkuminen, sensorit, sensorifuusio, sekä pohdinta. Luvussa kaksi käsitellään autonomista liikkumista ja siihen liittyviä termejä, luokittelua, sekä standardeja. Kolmannessa luvussa käydään läpi ajoneuvoteollisuuden yleisimmät havaitsevat sensorit, esitellään niiden toimintaperiaate, ominaisuudet, sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta projektiin. Luvussa neljä käsitellään sensorifuusiota ja sen eri sovelluksia. Viidennessä ja viimeisessä luvussa käydään läpi kolmannessa ja neljännessä luvussa esitellyt sensorit ja sensorifuusiot ja pohditaan niiden sovelluksia, yhdistelmiä ja yleistä soveltuvuutta projektiin. Opinnäytetyön lopussa liitteet-osiassa esitetään vaihtoehtoja kullekin sensorille, ja esitellään kyseisten sensorien datalehdet. Tarkempi standardien ja luokittelujen tarkastelu ei ole osa opinnäytetyötä. Työn tavoite ei myöskään ole tarjota lopullista oikeaa vastausta täydellisistä sensoreista ja sensorifuusioista, vaan antaa kattava katsaus sensorien ominaisuuksiin ja tuoda esiin niiden heikkouksia ja vahvuuksia.

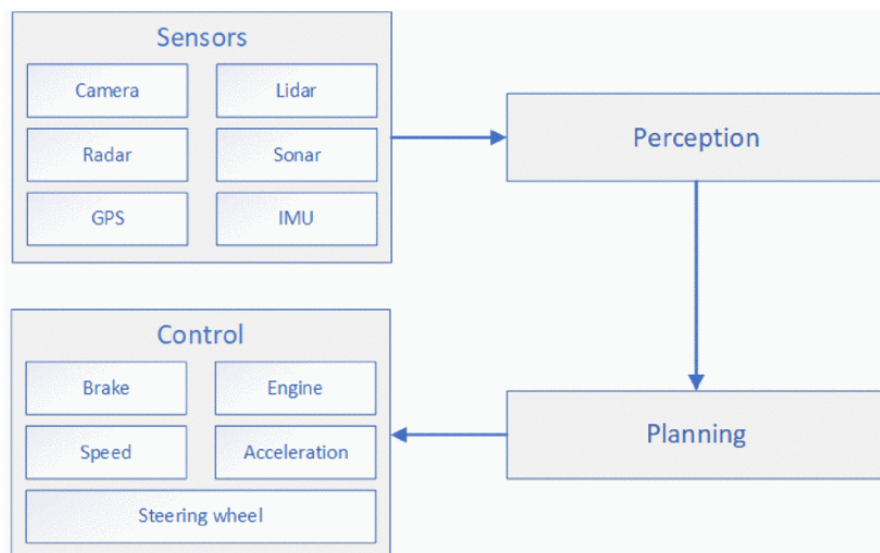
## 2 AUTONOMINEN LIIKKUMINEN

Luvussa 2 käydään läpi automatisoitujen ajoneuvojen määritelmää, toimintaperiaatetta, sekä niihin liittyviä luokituksia ja standardeja. Toiminnan ja standardien tarkempi käsittely ei ole osa tätä opinnäytetyötä.

### 2.1 Toimintaperiaate

Yhdysvaltalainen elektroniikkasuunnittelun automaatioyritys Synopsys määrittelee autonomisen auton seuraavasti: Autonominen auto on ajoneuvo, joka kykenee aistimaan ympäristöään ja toimimaan ilman ihmisen osallistumista. Ihmisen ei tarvitse millään hetkellä ottaa ajoneuvoa hallintaansa, eikä ihmisen tarvitse edes olla ajoneuvossa kyydissä. Autonominen auto voi kulkea mihin tahansa, mihin perinteinen autokin pystyy ja tekemään kaiken, mihin kokenut ihmiskuljettaja pystyy. (Synopsys. n.d.) Etenkin englannin kielessä itseohjautuvista autoista puhutaan usein termeillä autonomous, automated tai self-driving, eli autonominen, automatisoitu ja itseajava. Vaikka termeillä on eroja, niitä käytetään usein synonyymeinä toisilleen. Tässä opinnäytetyössä käytetään johdonmukaisuuden vuoksi samaa terminologiaa kuin lähteissä on käytetty.

Kocićin, Jovičićin ja Drndarevićin (2018) mukaan autonominen ajoneuvojärjestelmä voidaan jakaa neljään kuviossa 1 esitettyyn lohkoon. Ajoneuvo havaitsee ympäristöään ja omaa sijaintiaan siinä hyödyntäen ympäri ajoneuvoa asennettuja sensoreita, kuten lidareita eli valotutkia, kameroita ja tutkia. Sensorien keräämä tieto käsitellään havaintolohkossa (Perception), jossa sensorien keräämä tieto yhdistetään merkittäväksi dataksi. Suunnittelulohko (Planning) hyödyntää havaintolohkon tuottamaa dataa käytöksen ja reitin suunnitteluun. Ohjauslohko (Control) pitää huolen, että ajoneuvo seuraa suunnittelulohkon antamaa reittiä ja lähettää ohjauskomentoja ajoneuville.



KUVIO 1. Autonomisen ajoneuvojärjestelmän lohkokkaavio (Kocić, Jovičić & Drndarević, 2018)

## 2.2 Luokittelu ja standardit

Jotta poliittisia ratkaisuja ja säädöksiä voidaan tehdä automatisoiduille ajoneuvoille, on tärkeää päästä yhteisymmärrykseen yleisistä termeistä ja kategorioista automaation eri muotoihin liittyen. Tällä hetkellä automatisoiduille ajoneuvoille on olemassa monia erilaisia luokittelutapoja, mutta useat organisaatiot, kuten Yhdysvaltojen liikenneministeriö noudattavat International Society of Automotive Engineers, SAE:n standardia J3016 Levels of driving automation. (SAE International 2021.)

SAE:n J3016 standardissa itseohjautuvat autot luokitellaan kuuteen eri tasoon (0–5), jotka ovat

1. Taso 0: Ei automaatiota
2. Taso 1: Kuljettajan avustus
3. Taso 2: Osittainen ajamisen automaatio
4. Taso 3: Ajamisen automaatio tilanteen mukaan
5. Taso 4: Korkea ajamisen automaatio
6. Taso 5: Täysi ajamisen automaatio

(SAE International 2021.)



Kuten J3016 standardin visualisoinnista kuviossa 2 voidaan nähdä, tasot 0–2 on luokiteltu kuljettajaa avustaviksi ja tasot 3–5 itsestään ajaviksi tasoiksi. Täysin autonomisia, tasolle 5 ylettäviä autoja, jotka pystyisivät selviytymään kaikista olosuhteista, ei ole vielä olemassa. Esimerkiksi nk. Autopilot toiminnolla varustetut Teslan ajoneuvot yltyvät todellisuudessa vain tasolle 2. Tason 2 ajoneuvoista käytetään usein termiä ADAS, eli Advanced Driver Assistance Systems, joka tarkoittaa kehittyneitä kuljettajaa tukevia apujärjestelmiä. Kuuluisin tasolle 4 yltäviä autoja valmistava yritys on Googlen Waymo. Waymon ajoneuvot ovat täysin autonomisia ajoneuvoja, jotka toimivat takseina rajoitetun alueen sisällä Arizonan Phoenixissa, Yhdysvalloissa. Vaikka ajoneuvot ovat täysin autonomisia, Waymonkaan ajoneuvot eivät yllä tasolle 5, sillä niiden käyttö on rajoitettu vain tietylle alueelle.

**SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™**  
 Learn more here: [sae.org/standards/content/j3016\\_202104](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104)

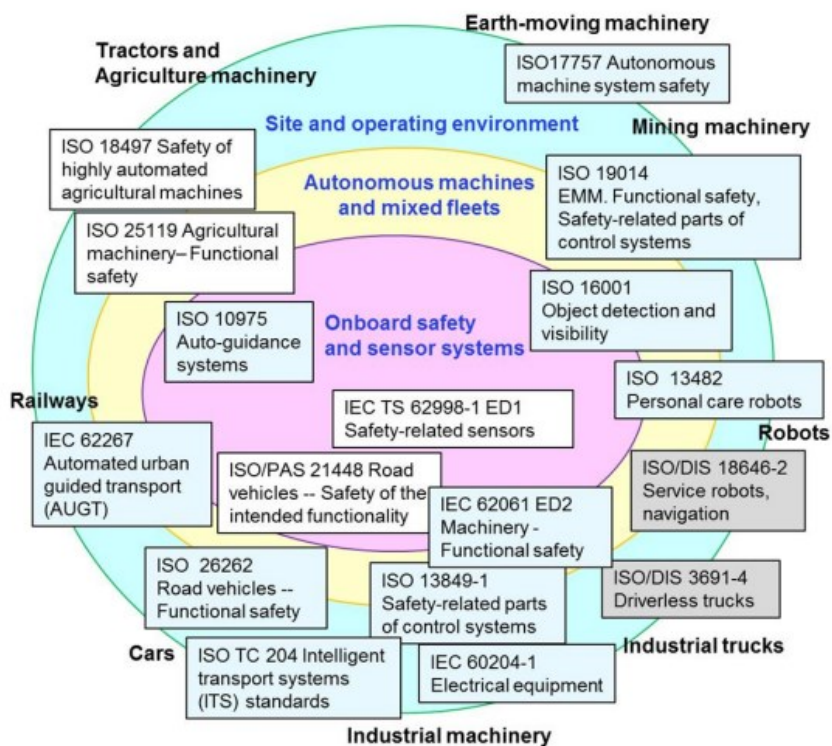
Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You <b>are</b> driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You <b>are not</b> driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in "the driver's seat"		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
	Copyright © 2021 SAE International.					
	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering <b>OR</b> brake/acceleration support to the driver	These features provide steering <b>AND</b> brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatic emergency braking</li> <li>• blind spot warning</li> <li>• lane departure warning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering <b>OR</b></li> <li>• adaptive cruise control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering <b>AND</b></li> <li>• adaptive cruise control at the same time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• traffic jam chauffeur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• local driverless taxi</li> <li>• pedals/steering wheel may or may not be installed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions</li> </ul>

KUVIO 2. Standardin J3016 visualisointi (Shuttleworth 2019)

SAE:n standardi on tarkoitettu liikenteessä liikkuvien autojen luokitteluun, ja sen käytössä on päästy hyvin laajasti yhteisymmärrykseen. Tavallisen liikenteen ulkopuolella standardointi ei ole niin selkeää. Työkoneista puhuttaessa standardeja on useita, ja ne on jaoteltu toimintaympäristön mukaan. Kuviossa 3 on esitelty

Tiusanen, Malmin ja Ronkaisen (2020) yhteenveto kansainvälisistä, automaattisesti toimiviin koneisiin liittyvistä standardeista. Kuvio 3 on esitelty tässä opinnäytetyössä yleisenä suunnanantajana. Oleelliseen standardiin voidaan perehtyä syvemmin, kun saadaan tieto projektin pienkuormaajan todellisesta käyttökohteesta.



KUVIO 3. Standardit (Tiusanen, Malm & Ronkainen, 2020)

### 3 SENSORIT

Sensorit ovat laitteita, jotka kartoittavat ja havaitsevat tapahtumia tai muutoksia ympäristössä jatkoprosessointia varten (Yeong, Velasco-Henrandez, Barry & Walsh 2021). Sensorien tehtävä on siis toimia ajoneuvon aisteina, joiden avulla saadaan luotua kokonaisuus, joka tiedostaa ajoneuvon omat liikkeet ja kaiken ympärillä tapahtuvan. Yleisesti sensorit voidaan luokitella kahteen eri luokkaan, ympäristöä havaitseviin, sekä tilaa havaitseviin sensoreihin. Ympäristöä havaitsevat sensorit (esimerkiksi lidar) pyrkivät luomaan kuvaa ajoneuvon ympäristöstä, tiedostamaan ympärillä tapahtuvat liikkeet, sekä havaitsemaan esineitä halutulla kantama-alueella. Tilaa havaitsevat sensorit (esimerkiksi kiihtyvyyssanturi) havaitsevat muutoksia dynaamisen laitteen, kuten auton omassa tilassa. (Yeong ym. 2021.)

Lisäksi havaitsevat sensorit voidaan luokitella passiivisiin ja aktiivisiin sensoreihin. Passiivisella sensorilla tarkoitetaan sensoria, joka havaitsee ympärillään olevien esineiden lähettämää säteilyä. Esimerkki passiivisesta sensorista on infrapunakamera, joka havaitsee ihmisen, eläimen tai ajoneuvon lähettämää lämpösäteilyä. Aktiivinen sensori lähettää itse energiaa jossakin muodossa ja mittaa sen perusteella haluttua tietoa. Esimerkki aktiivisesta sensorista on tutka, joka lähettää sähkömagneettista säteilyä ja laskee esineestä takaisin heijastuvan säteilyn edestakaiseen matkaan kuluvan ajan laskeakseen etäisyyden kohteeseen. (Yeong ym. 2021.)

#### 3.1 Tutka

Tutka, englanniksi radar (radio detection and ranging) on aktiivinen mittauslaite, joka lähettää ja vastaanottaa sähkömagneettista säteilyä eli radioaaltoja, mitaten säteilyn matkaan kulunutta aikaa, ToF (Time of Flight) tai muutosta säteilyn taajuudessa. Eri tyyppin tutkia hyödyntäen on mahdollista mitata kohteen etäisyyttä, nopeutta, sekä arvio kohteen suunnasta. (Patole, Torlak, Wang & Ali 2017.) Ajoneuvoteollisuudessa käytettävät tutkat toimivat millimetriaalto taajuuksilla 24, 77, sekä 79 GHz (Rosique, Navarro, Fernández & Padilla 2019).

### 3.1.1 Ominaisuudet

Jatkuvan aallon tutka (Continuous Wave, CW) on tutkan yksinkertaisin muoto. Sillä voidaan mitata kohteen nopeus Doppler-ilmiön avulla lähettämällä jatkuvaa signaalia ja mittaamalla lähetetyn ja vastaanotetun signaalin taajuuseroa. (Patole ym. 2017.)

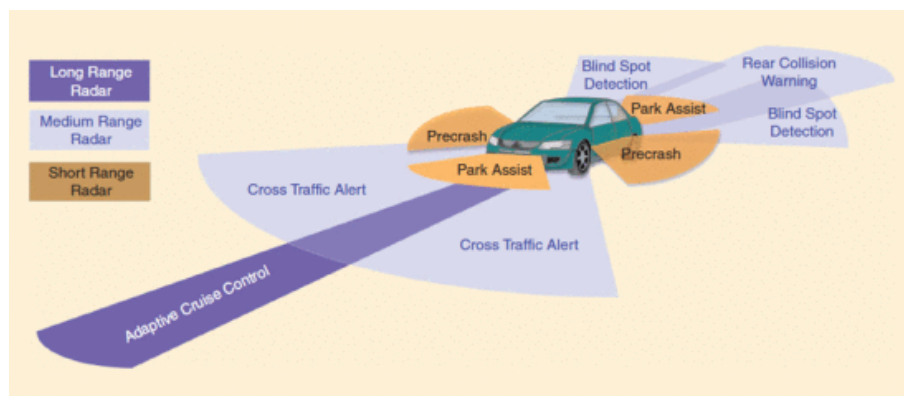
Pulssitutka (Pulsed Continuous Wave, Pulsed CW) pystyy mittaamaan etäisyyksiä lähettämällä signaalia pulsseina ja mittaamalla ajan, joka signaalilla kestää kulkea kohteeseen ja takaisin (Patole ym. 2017).

Taajuusmoduloitu jatkuvan aallon tutka (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) pystyy mittaamaan kohteen nopeuden, sekä etäisyyden. Se lähettää signaalia jatkuvana tai pulssitettuna, jonka ansiosta sillä on mahdollista mitata kohteen etäisyyttä, sekä nopeutta. (Wolff 2018.)

Suunnan määrittäminen on mahdollista antenniryhmien avulla. Ryhmässä olevat antennit lähettävät signaalia ja kohteen suunnasta riippuen vastaanottavat takaisin heijastuneen signaalin eri aikaan. (Wolff 2018.)

### 3.1.2 Käyttökohteet

Tutkia on saatavilla lyhyille, keskipitkille, sekä pitkille etäisyyksille. Alla annetut etäisyydet, sekä asteet ovat suuntaa antavia. Todellinen kantama ja näkökentän suuruus riippuu tutkan merkistä ja mallista. Kuviossa 4 ja alla on esitetty tyypillisimmät käyttökohteet eri kantamille.



KUVIO 4. Tutkatyyppit (Patole ym. 2017)

Lyhyen kantaman tutkan (Short Range Radar, SRR) toimintakantama on noin 0,15–30 metriä ja sen näkökenttä (Field of view, FoV) on noin 80 astetta. Lyhyen kantaman tutkia käytetään usein pysäköintitutkissa, esteiden tunnistuksessa, sekä nk. Pre-crash- järjestelmässä. (Patole ym. 2017.)

Keskipitkän kantaman tutkan (Medium Range Radar, MRR) toimintakantama on noin 1–100 metriä ja sen näkökenttä on noin 40 astetta. Keskipitkän kantaman tutkien sovelluksia ovat mm. kaistanvaihtoavustin, poikkiliikennehälytys, kuolleen kulman tunnistus, sekä takatörmäysvaroitus. (Patole ym. 2017.)

Pitkän kantaman tutkan (Long Range Radar, LRR) toimintakantama on noin 10–250 metriä, mutta sen näkökenttä on vain noin 15 astetta. Pitkän kantaman ja pienen näkökentän vuoksi se soveltuu esimerkiksi vakionopeudensäätimiin. (Patole ym. 2017.)

IDTechEx:n tekemän tutkimuksen mukaan nykypäivänä yli 50 %:ssa uusista autoista on tutka. Tutkimuksen mukaan tason 3 ajoneuvoissa hyödynnetään tyypillisimmin viittä tutkaa muiden sensorien ohella. Yksi pitkän kantaman tutka keulassa ja neljä lyhyen kantaman tutkaa ajoneuvon eri sivuilla pystyvät muodostamaan 360 asteen kuvan lähiympäristöstä (4+1). (Jefferies & Chang 2021.)

### **3.1.3 Soveltuvuus**

Tutkan vahvuuksia ovat sen alhainen hinta, kyky toimia huonoissakin olosuhteissa kuten sateella, lumella, sekä huonossa valaistuksessa, sekä kyky mitata esineen etäisyys ja nopeus hyvin tarkasti. Tutkan heikkouksia ovat sen alhainen resoluutio, sekä väärät positiiviset, jotka johtuvat väärin kimpoavista signaaleista. (Steinbaeck, Steger, Holweg & Druml 2017.)

Tutkan soveltuvuus Avant-projektiin riippuu suuresti kuormaajan lopullisesta käyttökohteesta. Lähtökohtaisesti olen tullut siihen tulokseen, että tutka soveltuu projektiin, mutta se on myös korvattavissa. Tutkan alhaiset huoltovaatimukset, sekä toimintakyky huonoissa olosuhteissa ovat sen suurimmat myyntivalitit, mutta pitkä kantama ja sensorin hyödyntämä monimutkainen teknologia kasvattavat

tuotteen hintaa. Hitaasti liikkuvassa työkoneessa tutka ei ole mielestäni välttämätön.

Tutkavalmistaja Ainstein tarjoaa T-79 mallin 77 GHz:in tutkaa (Liite 1.), jonka toiminta-alue on 0,5–80 metriä hintaan 3400 €. T-79 on tarkoitettu ajoneuvokäyttöön ja sitä kaupataan kuolleen kulman ja kaistavahdin sensorina. Droneja valmistava Foxtechfpv tarjoaa 24 GHz:in tutkaa esteiden havaitsemiseen hintaan 350 € (Liite 2.)

## **3.2 Ultraäänisensori**

Ultraäänisensori on tutkan kaltainen aktiivinen sensori, joka käyttää radioaaltojen sijaan ääniaaltoja. Sensori mittaa etäisyyksiä lähettämällä ääniaaltoja pulsseina ja mittaamalla, kuinka kauan ääniaallolla kestää kulkea sensorilta kohteeseen ja heijastua takaisin. (Yu & Marinov 2020.) Autoissa ultraäänisensorit toimivat tyypillisimmin 40–50 kHz taajuudella. 40–50 kHz:in taajuusalue on todettu parhaaksi kompromissiksi sensorin kantaman, havaitsemisherkkyuden, sekä häiriöiden minimoinnin välillä. Taajuusalue on myös huomattavasti korkeammalla, kuin mitä ihminen pystyy kuulemaan. Ihmisen kuuleman taajuuden yläraja on noin 20 kHz. (Xu, Yen, Jia, Ji & Liu 2018.)

### **3.2.1 Ominaisuudet**

Ajoneuvoteollisuudessa ultraäänisensoreita voidaan hyödyntää lähellä olevien asioiden havaitsemiseen, sillä suuremman kantaman saavuttamiseksi vaadittaisiin voimakkaampia ääniaaltoja, jotka voisivat olla vaarallisia ympäröivälle maailmalle. (Yu & Marinov 2020.)

### **3.2.2 Käyttökohteet**

Lyhyen, mutta luotettavan kantamansa takia ultraäänisensorit soveltuvat erityisesti parkki- ja peruutustutkiin, jotka havaitsevat hitaissa nopeuksissa lähellä olevia ja lähestyviä esineitä.

### 3.2.3 Soveltuvuus

Ultraäänisensorin suurin etu on sen erittäin alhainen hinta suhteessa muihin sensoreihin, sekä paras tarkkuus hyvin lyhyillä etäisyyksillä. Huonoja puolia ovat sen lyhyt kantama, sekä ympäristön muiden äänien aiheuttamat häiriöt. Yleisesti ajateltuna ultraäänisensori toimii hyvin sääoloista riippumatta, mutta kovissa nopeuksissa tuulen aiheuttama melu voi aiheuttaa häiriöitä, siksi sensori soveltuu parhaiten alhaisiin nopeuksiin. (Yu & Marinov 2020.)

Saksalainen monialayritys Bosch tarjoaa useita erilaisia ultraäänisensoreita, jotka on tarkoitettu autojen parkkisensoreiksi (Liite 3.). Sensoreita on saatavilla useilta eri jälleenmyyjiltä ja niiden hinnat alkavat noin 60:stä eurosta. Valmistajasta riippuen ultraäänisensoreita on myynnissä jopa alle 10 euron kappalehintaan.

Mielestäni ultraäänisensorilla on oma paikkansa projektissa, sillä se tarjoaa arvokasta tietoa hyvin pieniltä etäisyyksiltä. Boschin suunnittelemassa sensorissa ilmoitettu minimi tunnistusetäisyys, josta sensori antaa tarkan etäisyydestiedon on 15 cm. 3–15 cm etäisyydellä sensori havaitsee esineet, mutta ei anna tarkkaa etäisyydestietoa. Vertailukohteeksi; liitteessä 1 esitellyn tutkan minimi tunnistusetäisyys on 50 cm.

### 3.3 Kamera

Kameran hyödyntämisen aallonpituuden perusteella ne on mahdollista luokitella kahteen eri luokkaan: perinteisiin näkyvän valon RGB-kameroihin (visible, VIS), sekä infrapunakameroihin (Infrared, IR) (Rosique ym. 2019). Kameran käyttävät joko CCD (charge-coupled device) tai CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) teknologiaa. CCD:llä on monimutkainen valmistusprosessi, pienempi kohina, korkea dynaaminen alue, sekä korkea kuvanlaatu heikossa valaistuksessa. CCD sensoreihin verrattuna CMOS uhraa jonkin verran suorituskykyä hinnan alentamiseksi. Erojen pienentyessä on odotettavissa, että tulevaisuudessa CMOS-teknologia korvaa CCD:n. (Wang 2020.)

### 3.3.1 Ominaisuudet

RGB-kamera on aktiivinen sensori, joka toimii samalla aallonpituudella kuin ihmisen silmä, eli noin 400–780 nm. Kamera kykenee siis näkemään värejä ihmisen silmän tavoin R, G ja B eli Red, Green ja Blue kanavien avulla. Värikuvan, korkean resoluution ja kuvataajuuden (Frames per second, FPS), sekä suuren näkökentän takia kameran tallentaman kuvan käsittely vaatii suurta prosessointitehoa. Yhdistämällä kaksi kameraa on mahdollista lisätä kanava D, depth, eli syvyys. RGBD-kameralla on mahdollista luoda 3D-esitys ympäristöstä. (Rosique ym. 2019.)

Infrapunakamerat ovat passiivisia sensoreita, jotka toimivat 780–1 nm aallonpituudella, useimmiten laitteet hyödyntävät lähi-infrapuna aallonpituutta 780 nm – 3 µm (Near-Infrared, NIR), tai keski-infrapuna aallonpituutta 3–50 µm (Mid-Infrared, MIR), MIR-kamerat tunnetaan yleisemmin lämpökameroina. Time-of-flight eli ToF kamerat lähettävät LED ryhmän (Light Emitting Diodes) avulla lähi-infrapun aallonpituudella valopulsseja ja mittaavat muutosta lähetetyn ja vastaanotetun signaali vaiheessa. Muutoksen perusteella voidaan määrittää etäisyys kohteeseen. (Rosique ym. 2019.)

### 3.3.2 Käyttökohteet

Kamerojen tehtävät ajoneuvoteollisuudessa vaihtelevat riippuen niiden sijoituksessa ajoneuvossa. Eteenpäin osoittavat kamerat, jotka ovat usein asennettuna taustapeilin läheisyyteen, pyrkivät käsittelemään seuraavia asioita:

- Jalankulkijoiden tunnistus
- Kaistapoikkeamisvaroitus
- Liikennemerkkien tunnistus
- Automaattinen hätäjarrutus
- Mukautuva vakionopeudensäädin

Ajoneuvoissa eteen- ja taaksepäin osoittavien kameroiden olennainen ero on se, että eteenpäin osoittavien kameroiden kuva ei lähes koskaan ole kuljettajan nähtävissä sellaisenaan, vaan se on osana suurempaa kokonaisuutta, joka ilmoittaa



kuljettajalle tapahtuvista asioista eri keinoin. Taaksepäin osoittavan kameran kuva lähetetään näyttöön, josta kuljettaja voi itse havaita helpommin asioita, joita ei näkisi peruutuspeilien avulla. (Dabral ym. 2014.)

Itseohjautuvien autojen kamerajärjestelmät voivat hyödyntää mono-, tai stereo-kameroita tai yhdistelmää molemmista. Englanniksi monocular camera tai mono camera tarkoittaa kameraa, jossa on vain yksi linssi ja stereo camera kameraa, jossa on vähintään kaksi linssiä (Yeong ym. 2021).

Monokamerat ovat pohjimmiltaan rajoitetumpia kuin stereokamerat, sillä niillä ei tyypillisesti voi kerätä tietoa kappaleen etäisyydestä. Jos monokamerassa kuitenkin hyödynnetään dual-pixel autofocus- järjestelmää, on syvyystietoja mahdollista laskea monimutkaisten algoritmien avulla. Usein hyödynnetään kahta monokameraa, jotka asennetaan rinnakkain, jotta niillä voidaan saavuttaa stereonäkö. (Yeong ym. 2021.)

Stereokamerat imitoivat eläimen tai ihmisen näkökykyä sillä linssien välisen etäisyyden ansiosta kappaleiden etäisyydestä kerääminen on mahdollista. Stereokameran haittapuolia ovat sen korkea hinta ja lyhyempi kantama monokameraan verrattuna. (Yeong ym. 2021)

Infrapunakameroita käytetään usein täydentämään perinteistä RGB-kameraa. Infrapunakamera kykenee toimimaan pimeässä, eikä sokaistu suorasta aurin-  
gonvalosta toisin kuin RGB-kamera. IR-kameralla voidaan myös havaita ihmisen, eläimen tai ajoneuvon lähettämää lämpösäteilyä. IR-kamera ei kuitenkaan voi täysin korvata RGB-kameraa ajoneuvoteollisuudessa, koska sen tuottama kuva on mustavalkoista ja sen resoluutio on huonompi. (Yeong ym. 2021.)

Kalansilmäobjektiivin, englanniksi Fisheye lens, avulla voidaan kameroissa saavuttaa jopa 180 asteen näkökenttä. Ajoneuvoteollisuudessa kalansilmää käytetään usein peruutuskameroissa suuren näkökentän takia. Kalansilmä vääristää kameran tallentamaa kuvaa huomattavasti ja kuva on sen takia korjattava ennen sen lähettämistä kuljettajalle. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty kalansilmällä otettu kuva ennen korjausta ja sen jälkeen. (Debral ym. 2014.)



KUVA 1. Kalansilmä ennen korjausta (Dabral ym. 2014)



KUVA 2. Kalansilmä korjauksen jälkeen (Dabral ym. 2014)

Yhdistämällä 4–6 kameraa on mahdollista saavuttaa 360 asteen kuva ajoneuvon ympäristöstä. Kameroista koostuva 360 asteen tarkkailujärjestelmä soveltuu ai-noastaan hitaisiin nopeuksiin ja ne on usein rajoitettu alle 24 kilometrin tuntino-peuksiin. Alhaisen nopeuden vuoksi järjestelmissä hyödynnetään usein kame-roita, joiden kuvataajuus on 15 tai 30 FPS. Kameroiden päällekkäiset näkökentät mahdollistavat saumattoman 360 asteen kuvan, mutta kalansilmän tavoin kuva vaatii suuren määrän käsittelyä, jotta lopputulos olisi saumaton. Useiden kame-roiden näkökentät on kohdistettava ja valotukset tasattava, jotta kuvan virheistä päästään eroon. (Debral ym. 2014)

### 3.3.3 Soveltuvuus

Mielestäni kameran suurimpia etuja tähän projektiin ovat sen suuri FoV, korkea resoluutio ja värinäkö. Tästä syystä uskon perinteisen VIS kameran soveltuvan parhaiten projektiin. Infrapunakamera tarjoaa toimintakyvyn huonoissa olosuhteissa ja pimeällä, mutta mikäli projektiin hankitaan tutkia tai lidareita, on IR kameran kantama ja hinta turhan suuri etuihin nähden. Samankaltaisesti ToF kamera uhraa tärkeimpiä ominaisuuksia, kuten FoV, resoluutio ja värinäkö mitattakseen etäisyyksiä, jotka voidaan paremmin mitata muilla sensoreilla.

Stereolabs tarjoaa ZED 2i stereo kameran kahdella linssillä noin 480 € kappalehintaan (Liite 4.) Kamerassa on 120 asteen näkökenttä ja se on IP-luokituksestaan IP66, eli pölytiivis, sekä suojattu voimakkaalta vesisuihkulta. Kamera soveltuu esineiden tunnistukseen tilassa.

Marshall Electronics tarjoaa perinteistä monokameraa 355 € kappalehintaan jälleenmyyjältä. Kameran mukana tuleva linssi mahdollistaa 72 asteen horisontaalisen FoV:n, mutta linssi on vaihdettavissa. Kamera pystyy jakamaan 1080p full HD kuvaa 60 FPS kuvataajuudella. (Liite 5.) Kameroiden hintaan vaikuttavat suuresti kuvanlaatu, sekä kuvataajuus. Kuormaajan hitaan huippunopeuden ansiosta korkea kuvataajuus ei ole välttämätön, joten projektiin voidaan soveltaa myös edullisempia 25:n tai 30:n FPS:n kameroita.

### 3.4 Lidar

Lidar on kirjainlyhenne sanoista light detection and ranging ja sillä tarkoitetaan valotutkaa. Lidar on optinen aktiivinen sensori etäisyyksien mittaamiseen, joka on toimintaperiaatteeltaan hyvin samankaltainen kuin tutka, mutta se käyttää radioaaltojen sijaan valoa näkyvän valon, infrapunan tai ultravioletin alueella. Lidar mittaa etäisyyden kohteen ja sensorin välillä laskemalla valon edestakaiseen matkaan kuluvan ajan. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019.) Lidarin lähettämä pulssitettu laser skannaa sensorin näkökentän halki, jonka jälkeen vastaanotettujen mittausten perusteella voidaan luoda 3D-pistekartta sensorin ”näkemistä” asioista (Yeong ym. 2021).

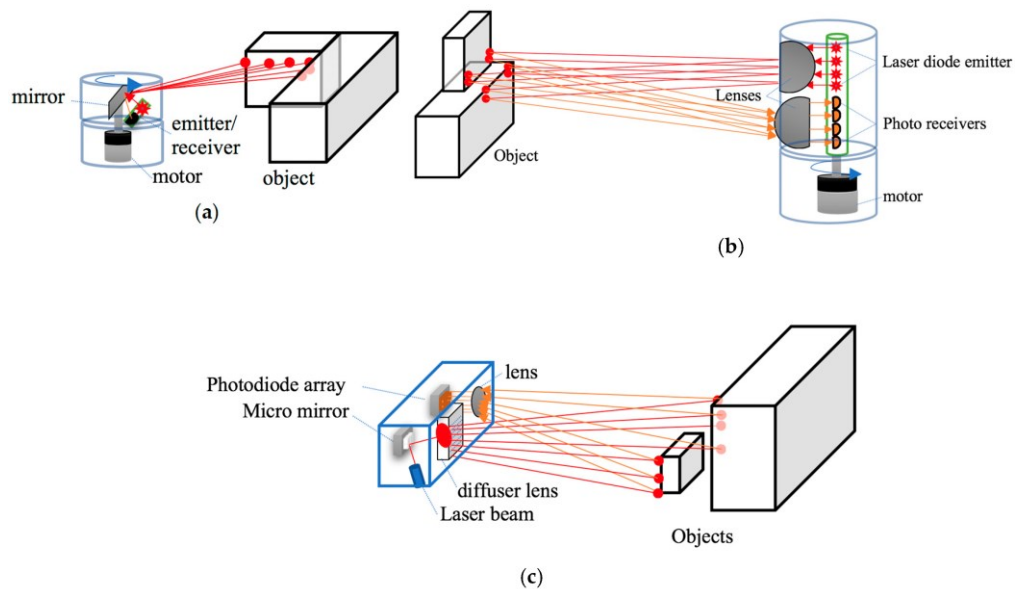
Lidarin etuja ovat sen pitkä kantama, korkea resoluutio, suuri näkökenttä sekä toimintakyky pimeässä. Heikkouksia ovat korkea hinta, sekä sääolosuhteiden vaikutus laitteen toimintaan. Suomen Lapissa toteutetussa tutkimuksessa Kutila, Pyykönen, Ritter, Sawade ja Schäufele (2016) totesivat, että sumu, sade, tai lumisade näkyvät skannerin keräämässä datassa ja sääolosuhteet heikensivät sensorin toimintaa jopa 25 %.

### 3.4.1 Ominaisuudet

Ajoneuvoteollisuudessa lidarit toimivat useimmiten 905 tai 1550 nm:in aallonpituudella. Lidarit voidaan jaotella joko niiden ympäristöstä keräämän tiedon perusteella 2D tai 3D lidareihin, tai niiden fyysisen rakenteen mukaan, joko pyöriviin (rotary) tai kiinteisiin (solid state). (Rosique ym. 2019.)

2D lidarin toiminta perustuu yksittäiseen laseriin, joka ammutaan kohti 45 asteen kulmassa olevaan pyörivään peiliin (Kuva 3a). Peili heijastaa laserin ajoneuvon ympäristöön ja vastaanotin kerää tiedon ympäristöstä. 3D lidar käyttää sarjaa laserdiodeja ja vastaanottimia, jotka ovat asennettu nopeasti pyöriviin koteloihin (Kuva 3b). Laserien määrä kotelossa määrittää pistepilven tarkkuuden. Tällä hetkellä lasereita on tyypillisesti 4–128 riippuen siitä, kuinka tarkkaa tietoa lidarilla halutaan kerätä. Molempien lidar tyyppien horisontaalinen FoV on 360 astetta ja 3D lidarin verikaalinen FoV on yleisesti 20–45 astetta. (Rosique ym. 2019.)

Kiinteä lidar luo 3D kuvaa ympäristöstään ilman liikkuvia osia ampumalla laserin mikropeiliin, joka heijastaa laserin diffuusorilinssiin. Diffuusorilinssi levittää laserin vertikaaliseksi viivaksi, joka pyyhkäisee näkökentän halki ja heijastuu takaisin vastaanottimelle (Kuva 3c). Prosessi toistetaan, kunnes kuva ympäristöstä on luotu. Kiinteä lidar on huomattavasti halvempi, sekä kestävämpi vaihtoehto, mutta sen FoV on pienempi. Kiinteitä lidareita yhdistämällä on mahdollista luoda 360 asteen kuva ympäristöstä. (Rosique ym. 2019.)



KUVA 3. Eri Lidar tyypit (Rosique ym. 2019)

### 3.4.2 Käyttökohteet

Nykyään pyöriviä 3D lidareita käytetään itseohjautuvissa autoissa, koska niillä voidaan luoda luotettava ja tarkka 3D kuva ympäristöstä pimeällä ja valoisalla säällä suuren näkökentän, pitkän kantaman ja syvyyksinäön ansiosta. Lidar ei kuitenkaan näe värejä, joten niiden keräämä data yhdistetään usein kameroiden keräämän datan kanssa sensorifuusiolla. (Yeong ym. 2021)

Alhaisemman hinnan ja pienemmän huollon tarpeen myötä kiinteät solid state lidarit ovat yleistymässä ja ajoneuvoteollisuus on kehittymässä suuntaan, jossa pyöriviä rotary lidareita korvataan auton ympäri runkoon integroiduilla kiinteillä lidareilla. (Rosique ym. 2019) Lidarin markkinaosuuden oletetaan kasvavan vuoden 2021 1.38 miljardista eurosta 6.22 miljardiin euroon vuoteen 2030 mennessä (GlobeNewswire 2022).

### 3.4.3 Soveltuvuus

Lidarien hinta on pudonnut vuosien varrella hurjasti. Esimerkiksi vuonna 2008 järjestetyn automatisoiden autojen kilpailun DARPA Grand Challengeen voittanut ajoneuvo käytti yhdysvaltalaisen yrityksen Velodyne Lidar valmistamia pyöriviä lidareita. Tuolloin kyseiset lidarit maksoivat noin 80 000 dollaria kappaleelta.

(Abuelsamid 2020.) Vuonna 2014 Velodyne julkaisi Velodyne Puck nimisen lidarin, jonka hinnaksi ilmoitettiin 8000 dollaria (GeoWeekNews 2014) ja vuonna 2018 saman lidarin hinta laski 4000 dollariin (GeoWeekNews 2018). Puck mallin (Liite 6.) nykyisiä hintatietoja ei ole saatavilla rekisteröitymättä tilaajaksi valmistajien sivuilla. Edullisin löytämäni vaihtoehto pyörivälle lidarille on DFRobot'in DFR0445 (Liite 7.), joka maksaa noin 400 euroa. Sensorin kantama on vain 8 metriä ja sillä saadaan 2D pistetietoa ympäristöstä. Pyörivien 3D lidarien hinta on yhä korkea ja mielestäni tässä projektissa ne ovat korvattavissa käyttämällä useampaa kiinteää lidaria yhden pyörivän sijaan.

Solid state lidarien hinta on suhteellisen alhainen. Esimerkiksi Velodyne tarjoaa Velarray (Liite 7.) mallia noin 500 dollarin kappalehintaan Abuelsamid (2020) mukaan. Sensorin toimintaetäisyys on 0.1–30 m ja sen FoV on 120 astetta horisontaalisesti ja 32 vertikaalisesti. Velodyne tarjoaa myös äärimmäisen pienikokoista ja edullista Velabit (Liite 9.) mallia, jonka kappalehintaa on Scimeca (2020) mukaan vain 100 dollaria. Velabitin kantama on jopa 100 m ja FoV on 90 astetta horisontaalisesti ja 70 astetta vertikaalisesti.

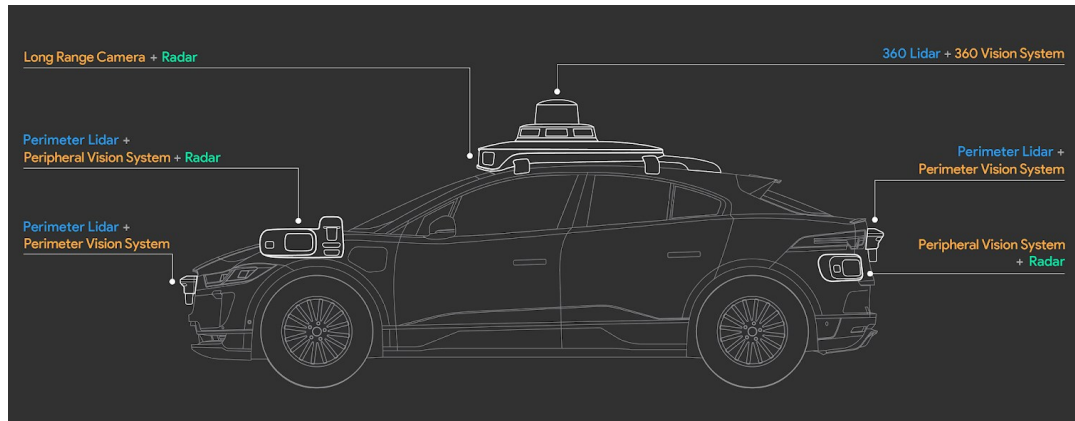
### **3.5 Sensorit nykypäivän ajoneuvoissa**

Ajoneuvovalmistajien välillä ei ole yhtenäistä mielipidettä parhaista sensoreista automatisoiduissa ajoneuvoissa. Halutun käyttökohteen mukaan valmistajat ovat päätyneet eri sensoriyhdistelmiin automatisoiduissa ajoneuvoissaan.

Kun Teslan Model 3 julkaistiin vuonna 2021 se hyödynsi useita kameroita, ultraäänisensoreita sekä tutkia ympäristön tarkkailuun. Vuonna 2021 Tesla kuitenkin ilmoitti korvaamassa tutkan ja ultraäänisensorit niin kutsutulla Tesla Visionilla, jonka toiminta perustuu täysin kameroihin. (Tesla 2021.) Tesla on SAE tasolla 2.

Mercedes-Benzin vuoden 2022 EQS puolestaan hyödyntää kameroiden, ultraäänisensorien ja tutkan lisäksi myös lidaria. Ajoneuvoon on tarjolla niin kutsuttu Drive Pilot, joka on SAE tason 3 automatisoidun ajamisen järjestelmä. (Korosec 2021.)

Korkeimman saavutetun tason, eli tason 4 Waymon ajoneuvot taas hyödyntävät useita tutkia, kameroita, sekä lidareita eri muodoissa. Kuvassa 4 on esitetty Waymon hyödyntämien sensorien sijainnit ajoneuvossa. Kuvasta voimme nähdä, kuinka suuri määrä sensoreita vaaditaan tason 4 saavuttamiseksi.



KUVA 4. Waymon havaitsevat sensorit (Jeyachandran 2020)

John Deere julkaisi vuonna 2022 Consumer Electronics Show:ssa (CES 2022) täysin autonomisen traktorin. Traktori hyödyntää kuutta stereokameraa, joiden avulla saavutetaan 360 asteen esteiden ja etäisyyksien havaitseminen. Kameroitten tuottama kuva syötetään syväoppimisen neuroverkkoihin, jotka luokittelevat jokaisen pikselin noin sadassa millisekunnissa ja määrittävät, jatkaako laite liikettä vai pysähtyykö se. (Deere 2022.)

Ajoneuvoja vertaamalla voi selvästi nähdä kuinka automaation tason kasvaessa vaadittu informaation määrä ympäristöstäkin kasvaa. Liikenteeseen tarkoitetuissa Teslassa, Mercedes-Benzissä, sekä Waymossa halutun automaation tason mukaan ajoneuvo joutuu soveltumaan aina monimutkaisempiin ympäristöihin. Tason 2 Tesla kykenee ajamaan liikenteessä omatoimisesti, mutta vaatii aina valppaana olevan kuljettajan. Tason 3 EQS tarjoaa automatisoitua ajoa tasolla, jolla kuljettajan ei enää tarvitse olla kontrollissa jokaisessa tilanteessa. Tason 4 Waymo tarjoaa täysin automatisoitua ajoa ilman kuljettajaa. Liikenteen ulkopuolella John Deeren automatisoitu traktori pystyy suoriutumaan tehtävistä täysin ilman kuljettajaa vain stereokameroiden avulla yksinkertaisemman työympäristön ansiosta.

## 4 SENSORIFUUSIO

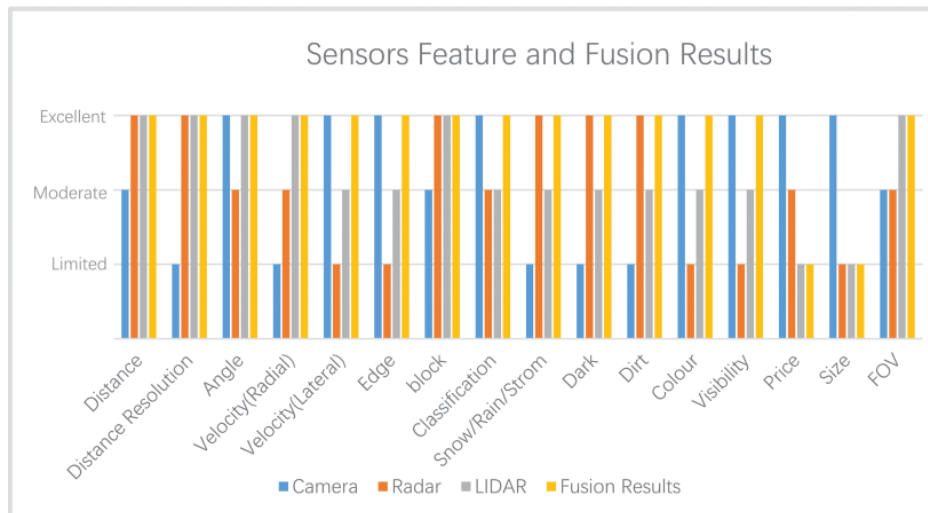
Tässä kappaleessa käydään läpi sensorifuusiota, sen hyötyjä, tavoitteita, sekä ajoneuvoteollisuuden yleisimpiä ympäristön havaitsemiseen hyödynnettyjä sensorifuusioita.

### 4.1 CL, RC ja RCL sensorifuusiot

Sensorifuusio tai datafuusio on prosessi, jossa yhdistää eri sensorien keräämää dataa. Fuusiossa yhdistetään kahden tai useamman sensorin keräämä data siten, että yhdistetty tieto on varmempaa, kuin mihin yksittäinen sensori pystyisi. (Rosique ym. 2019.) Ajoneuvoteollisuudessa yksinkertainen esimerkki sensorifuusiosta on kamera ja tutkan yhdistelmä. Kamera imitoi ihmisen näköä, ja havaitsee oleellisia asioita, kuten värejä, mutta etäisyystiedon keräys onnistuu helpommin esimerkiksi tutkan avulla. (Kocić ym. 2018.)

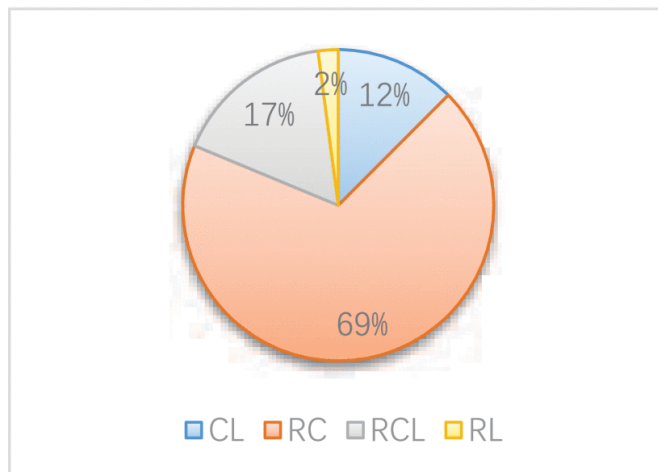
Sensorifuusiota voidaan hyödyntää yllä mainitun esimerkin mukaisesti toisiaan täydentävissä sensoreissa, jossa eri dataa saadaan eri sensoreilta. Sensorifuusiota voidaan myös käyttää samaa dataa keräävien sensorien kanssa, jotta mitattu tulos on varmempi. Esimerkiksi lidarin ja tutkan keräämää etäisyystietoa yhdistämällä saadaan tieto kahdennettua, eli varmennettua kahdesta lähteestä, jolloin mitattu tulos on tarkempi ja luotettavampi. (Kocić ym. 2018.) Wang ym. (2020) kuviossa 5 on esitetty sensorifuusion tehokkuus. Sensorifuusio on kuviossa esitetty keltaisella värillä ja voidaan nähdä, että se saavuttaa kaikissa osalualueissa parhaan tuloksen, hintaa ja kokoa lukuun ottamatta.





KUVIO 5. Sensorifuusion edut (Wang ym. 2020)

Vuonna 2021 tehdyn tutkimuksen (Yeong ym. 2021) mukaan tällä hetkellä yleisimmät kolme käytössä olevaa sensorifuusiota esteiden havaitsemiseen ovat camera-lidar (CL), radar-camera (RC), sekä radar-camera-lidar (RCL). Kuvaiossa 6 on esitettynä (Wang, Wu & Niu 2020) tekemän tutkimuksen tulokset yleisimpien sensorifuusioiden jakaumasta. Kuten kuvaajasta voidaan nähdä, tutkimus osoitti, että tutka ja kamera oli yleisin käytetty yhdistelmä ajoneuvoteollisuudessa tutkimuksen aikaan.



KUVIO 6. Yleisimmät sensorifuusiot ympäristön skannaamiseen (Wang, Wu and Niu, 2020)

RC fuusio mahdollistaa erinomaisen resoluution kameran ansiosta ja kerää samalla tarkkaa etäisyystietoa ympäröivistä esineistä tutkan avulla. Esimerkiksi

Tesla hyödynsi RC sensorifuusiota yhdistettynä muiden sensorien, kuten ultraäänisensorien kanssa autojen ympäristön tarkkailuun. (Yeong ym. 2021.)

Samankaltaisesti, CL fuusiolla saadaan kuva- ja etäisyystietoa ympäristöstä kameran ja lidarin avulla (Wang ym. 2020). RCL sensorifuusiolla saavutetaan parempi resoluutio suuremmalla kantamalla lidarin pistepilven sekä syvyyskartan avulla. Lidarin lisäys kasvattaa redundanssia ja parantaa siten turvallisuutta. Esimerkiksi Googlen Waymo ja ranskalainen Navya hyödyntävät RCL sensorifuusiota ympäristön havainnointiin itseohjautuvissa autoissaan. (Yeong ym. 2021.)

## 5 POHDINTA

Työn tavoitteena oli tarjota kattava katsaus saatavilla oleviin sensoreihin ja yleisimpiin sensorifuusioihin, sekä arvioida niiden soveltuvuutta Avant pienkuormaajan automatisointiin. Tässä luvussa käydään läpi kaikki aiemmin mainitut sensorit ja sensorifuusiot ja pyritään arvioimaan niiden soveltuvuutta Avant projektiin.

Sensorien yleisimmät vahvuudet ja heikkoudet esitellään Rosiquen ym. (2019) taulukossa 1. Rosique arvostelee sensorien ominaisuudet asteikolla 0–3, selkeyttääkseen arviointia. Arvioinnissa arvo 0 tarkoittaa ominaisuuden puuttumista ja 3 tarkoittaa korkeinta tulosta. Rosiquen (2019) mukaan täydellinen sensori saa parhaan arvosanan kaikissa osa-alueissa. Tämä tarkoittaa arvosanaa 3 seuraavissa: näkökenttä, kantama, tarkkuus, kuvataajuus, resoluutio, sekä värien havaitseminen ja arvosanaa 0 sään vaikutuksessa, huollossa, näkyvydessä, sekä hinnassa. Taulukossa yksi mainittujen ominaisuuksien lisäksi sensoria hankkiessa on hyvä huomioida myös sensorien IP-luokitus ja käyttölämpötila.

Taulukko 1. Sensorien pisteytys (Rosique ym. 2019) Muokattu

	Ultraääni	Tutka	3D LiDAR		Kamera		
			Pyörivä	Kiinteä	VIS	IR	ToF
FoV	1	2	3	2	3	3	2
Kantama	1	3	3	3	2	3	2
Tarkkuus	1	2	3	3	3	2	2
FPS	2	2	2	2	2	3	3
Resoluutio	1	1	2	2	3	1	1
Värien havaitseminen	0	0	1	2	3	1	1
Koko	1	1	2	1	1	1	1
Sään vaikutus	1	1	2	2	3	1	3
Huolto	2	1	2	1	2	2	2
Näkyvyys	2	1	3	2	2	2	2
Hinta	1	2	3	1	1	3	2

Kuormaajan hitaan huippunopeuden takia siinä käytettävien sensorien kantaman ei tarvitse olla kovinkaan suuri verrattuna liikenteessä ajavien ajoneuvojen sensoreihin, joiden käyttönopeuden ylittävät 100 kilometrin tuntinopeuden. Hitaan

nopeuden takia asioiden havaitseminen pitkillä etäisyyksillä ei ole välttämätöntä. Tästä syystä pitkien kantamien sensorit, kuten infrapunakamera ja tutka eivät ole yhtä oleellisia projektille. Vaikka molemmat sensorit tarjoavatkin etuja lyhyilläkin kantamilla, on niiden kustannukset turhan suuria pitkän kantaman takia.

Hitaissa nopeuksissa ultraäänisensorit sen sijaan voivat olla hyvä ratkaisu. Ultraäänisensorien toiminta on ajoneuvoteollisuudessa usein rajoitettu hitaisiin nopeuksiin, kuten parkkeerauksiin, mutta tässä projektissa, nopeuksien ollessa aina alhaisia, voisi ultraäänisensoreista olla suuri apu hyvin lähellä olevien esteiden havaitsemiseksi. Ultraäänisensorit ovat myös kaikista edullisimpia sensoreita, joten niiden implementointi voi olla hyvä idea pelkästään redundanssinkin lisäämiseksi.

Ajoneuvoteollisuudessa kameroita hyödynnetään lähes kaikissa kuljettajaa avustavissa ominaisuuksissa. Yleisesti ajoneuvovalmistajien kanta tuntuu olevan se, että kameroiden hyödyntäminen automatisoiduissa autoissa on lähes pakollista, mutta niiden toimintaa täytyy tukea muilla havaitsevilla sensoreilla, jotta niistä saadaan suurin hyöty irti. Tämä on nähtävissä kuvioista 6, jonka mukaan vain kaksi prosenttia nykypäivän sensorifuusioista ei hyödynnä kameraa. Tässäkin projektissa kameroiden hyödyntäminen on varmasti lähes välttämätöntä, etenkin jos kuormaajan on kyettävä tunnistamaan merkkejä työmaalla.

Projektia miettiessä minkä tahansa sensorien hyödyntäminen voisi olla perusteltua, mutta mielestäni mono tai stereo kameroiden ja kiinteiden lidarien fuusiolla saavutetaan hyvä tulos kattavan näkökentän ja ominaisuuksien puolesta järkevään hintaan. Kiinteän lidarin kantama on tutkan tavoin suuri, mutta se on edullisempi kuin tutka. Tutkan hyödyntäminen projektissa voi kuitenkin olla välttämätöntä, mikäli kuormaajaa aiotaan käyttää huonoissa olosuhteissa, kuten lumisaateella. Ultraäänisensorien lisääminen voi olla järkevää redundanssin lisäämiseksi, mutta sensorin soveltuvuus riippuu työympäristöstä, sillä sensori on altis väärille positiivisille meluisassa ympäristössä. Projektin lopullisesta budjetista riippuen kiinteiden lidarien korvaaminen pyörivällä lidarilla on mahdollista, mutta tässä tilanteessa on huomioitava sensorien sijoittelu kuormaajassa. Pyörivä lidar

on lähes pakollista sijoittaa ajoneuvon katolle, mutta tämä voi johtaa katvealueisiin ajoneuvon välittömässä läheisyydessä. Katvealueita on silloin vahdittava esimerkiksi kameroiden ja ultraäänisensorien avulla.

CL ja RCL sensorifuusiot ovat todettu toimiviksi sensorifuusioiksi, mutta pohdittavaksi jää, voiko projektin toteuttaa John Deeren traktorin tavoin pelkkiä kameroita hyödyntämällä. Pelkkiä kameroita hyödyntämällä kohdataan sama ongelma kuin CL fuusion kanssa, joka on sään vaikutus sensorien toimintaan. Työkoneen käyttäminen pimeässä voidaan oletettavasti mahdollistaa tehokkaan valaistuksen avulla, mutta valoisalla säällä suora auringonvalo voi sokaista kamerat. Tehokas valaistus voi myös aiheuttaa voimakkaita ei-toivottuja heijastuksia, jotka voivat häiritä toimintaa.

## LÄHTEET

Abuelsamid, S. 2020. Velodyne's \$500 Velarray Solid-State Lidar Goes Into Production In 2021. Forbes. Viitattu 21.11.2022. <https://www.forbes.com/sites/samuelsamid/2020/11/13/velodyne-announces-500-velarray-h800-lidar-production-in-2021/>

Debral, S., Kamath, S., Appia, V., Mody, M., Zhang, B. & Batur, U. 2014. Trends in camera based Automotive Driver Assistance Systems (ADAS). <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2014.6908613>.

Deere. 2022. John Deere Reveals Fully Autonomous Tractor at CES 2022. Viitattu 17.10.2022. <https://www.deere.com/en/news/all-news/autonomous-tractor-reveal/>

GlobeNewswire. 2014. Velodyne Announces \$7,999. GlobeNewswire News Room. Viitattu 21.11.2022. <https://www.geowebnews.com/news/vol12no37-velodyne-announces-puck-lidar-sensor>

GlobeNewswire. 2018. Velodyne cuts VLP-16 lidar price to \$4k. GlobeNewswire News Room. Viitattu 21.11.2022. <https://www.geowebnews.com/news/velodyne-cuts-vlp-16-lidar-price-4k>

GlobeNewswire. 2022. LIDAR Market Size is projected to reach USD 6.93 Billion by 2030, growing at a CAGR of 19.27%: Straits Research. GlobeNewswire News Room. Viitattu 11.11.2022. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/09/14/2516327/0/en/LIDAR-Market-Size-is-projected-to-reach-USD-6-93-Billion-by-2030-growing-at-a-CAGR-of-19-27-Straits-Research.html>

Jeyachandran, S. 2020. Introducing the 5th-generation Waymo Driver: Informed by experience, designed for scale, engineered to tackle more environments. Waypoint – The official Waymo blog. Viitattu 17.10.2022. <https://blog.waymo.com/2020/03/introducing-5th-generation-waymo-driver.html>

Kocić, J., Jovičić, N. & Drndarević, V. 2018 Sensors and Sensor Fusion in Autonomous Vehicles. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2018.8612054>.

Korosec, K. 2021. All the tech crammed into the 2022 Mercedes-Benz EQS. TechCrunch. Viitattu 25.10.2022. <https://techcrunch.com/2021/04/15/all-the-tech-crammed-into-the-2022-mercedes-benz-eqs/>

Patole, S.M., Torlak, M., Wang, D. & Ali, M. 2017 Automotive radars: A review of signal processing techniques. <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914>.

Rosique, F., Navarro, P.J., Fernández, C. & Padilla, A. 2019 A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research. <https://doi.org/10.3390/s19030648>.

Royo, S. & Ballesta-Garcia, M. 2019. An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles. <https://doi.org/10.3390/app9194093>.

SAE International 2021. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SAE. Viitattu 18.10.2022 [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_202104/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/)

Scimeca, D. 2020 Velodyne releases Velabit LiDAR sensor at low price point, Vision Systems Design. Vision-systems. Viitattu 21.11.2022. Available at: <https://www.vision-systems.com/cameras-accessories/article/14169507/velabit-sensor-released-by-velodyne>

Shuttleworth, J. 2019. SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update. SAE. Viitattu 28.10.2022. <https://www.sae.org/site/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>

Steinbaeck, J., Steger, C., Holweg, G. & Druml, N. 2017 Next generation radar sensors in automotive sensor fusion systems. <https://doi.org/10.1109/SDF.2017.8126389>.

Synopsys. n.d. What is an Autonomous Car. Viitattu 21.10.2022. <https://www.synopsys.com/automotive/what-is-autonomous-car.html>

Tesla 2021. Tesla Vision Update: Replacing Ultrasonic Sensors with Tesla Vision (2021). Viitattu 17.10.2022 <https://www.tesla.com/support/transitioning-tesla-vision>

Tesla n.d. Model 3 Owner's Manual: About Autopilot. Tesla. Viitattu 17.10.2022. [https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en\\_jo/GUID-EDA77281-42DC-4618-98A9-CC62378E0EC2.html](https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_jo/GUID-EDA77281-42DC-4618-98A9-CC62378E0EC2.html)

Tiusanen, R., Malm, T. & Ronkainen, A. 2020 An overview of current safety requirements for autonomous machines – review of standards. <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0074>.

Yeong, D.J., Velasco-Hernandez, G., Barry, J. & Walsh, J. 2021. Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review. <https://doi.org/10.3390/s21062140>.

Yu, X. & Marinov, M. 2020. A Study on Recent Developments and Issues with Obstacle Detection Systems for Automated Vehicles. <https://doi.org/10.3390/su12083281>.

Wang, Z., Wu, Y. & Niu, Q. 2020 Multi-Sensor Fusion in Automated Driving: A Survey. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962554>.

Wolff, C. 2018. Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar (FMCW Radar). Radartutorial. Viitattu 15.9.2022. <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html>

Xu, W., Yen, C., Jia, W., Ji, X. & Liu, J. 2018. Analyzing and Enhancing the Security of Ultrasonic Sensors for Autonomous Vehicles. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2867917>.

## LIITTEET

### Liite 1. Einstein T-79

<https://ainstein.ai/vehicle-radar/short-range-wideband-high-resolution-automotive-radar-sensor/>

## Specifications

**Table 1**

Frequency Range	76 ~ 77 GHz
Power Consumption	4.5 W
Quiescent Current	< 1 mA
Radar Operating Voltage	12 ~ 24 V DC
Operating Temperature	-40° ~ 85° C
Protection Rafting	IP67
Detection Range	0.5 ~ 80 m
Range Accuracy	0.4 m
Range Resolution	0.78 m
Maximum Detection Velocity	±200 km/h
Velocity Accuracy	0.13 m/s
Velocity Resolution	0.4 m/s
Field of View (Azimuth)	±60°
Field of View (Elevation)	±4°
Angle Accuracy	0.4°
Update Rate	20Hz
Maximum Tracked Targets	64
Output Date Interface	CAN



## Liite 2. 24GHz Millimeter-Wave Obstacle Avoidance Radar

[https://www.foxtechfpv.com/24ghz-millimeter-wave-obstacle-avoidance-radar.html#yt\\_tab\\_products1](https://www.foxtechfpv.com/24ghz-millimeter-wave-obstacle-avoidance-radar.html#yt_tab_products1)

Parameter	Condition	Minimum value	Typical value	Maximum value	Unit
<b>Radar performance</b>					
Working frequency		24.00		24.20	GHz
Transmitting power			23		dBm
Modulation Mode		FMCW			
Detection Angle	horizontal (-6dB)		28		deg
	pitch (-6dB)		18		deg
<b>Target detection performance</b>					
Detecting precision			±0.02		m
Detecting Range	@0 dBsm wall	0.5		100	m
	@0 dBsm metal pole	0.5		30	m
<b>Target character</b>					
Tracking object			1		pcs
Range resolution			0.75		m
Target update rate			50		Hz
<b>Other character</b>					
Working voltage		5	-	12	VDC
power consumption			<2		W
storing temperature		-45		80	℃
Working temperature		-25		60	℃
Starting time			0.2		S
Output port		115200bps@Uart			
Weight	Including cable	120			g
Size		130×70×14.5			mm
Waterproof grade		IPv67			

## Liite 3. Bosch ultraäänisensori

<https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/ultrasonic-sensor/>



## TECHNICAL CHARACTERISTICS

Min. range	15 cm (Ø 7.5 cm standard pole)
Max. range	5.5 m (Ø 7.5 cm standard pole)
Object presence detection	3 – 15 cm
Detection zone	± 70° @ 35 dB horizontal field of view
Opening angles	± 35° @ 35 dB vertical field of view
Safety level	up to ASIL-B
Frequency	Frequency modulation
Membrane diameter	15.5 mm
Housing diameter	23 mm
Dimensions	44 mm (length) x 26 mm (width)
Weight	~ 14 g
Operating temperature	- 40° to + 85° C
Current consumption	≤ 500 mA (transmit mode) 7 mA (receive mode)
Protection class	IP64K

#### Liite 4. Stereolabs ZED 2i Stereo Camera

[https://store.stereolabs.com/products/zed-2i?\\_gl=1\\*yuwnwa\\*\\_ga\\*MTE1OTE1ODU5My4xNjY4NTEwODk5\\*\\_ga\\_LQLT-WBS792\\*MTY2ODUxMDg5OC4xLjAuMTY2ODUxMDg5OC42MC4wLjA.&\\_ga=2.95861983.2138212290.1668510899-1159158593.1668510899](https://store.stereolabs.com/products/zed-2i?_gl=1*yuwnwa*_ga*MTE1OTE1ODU5My4xNjY4NTEwODk5*_ga_LQLT-WBS792*MTY2ODUxMDg5OC4xLjAuMTY2ODUxMDg5OC42MC4wLjA.&_ga=2.95861983.2138212290.1668510899-1159158593.1668510899)

**Designed for challenging environments**

**IP66-rated Stereo Camera**

**USB Type-C connector**

Features:

- Neural Depth Sensing
- Spatial Object Detection
- Built-in Next-Gen IMU, Gyro, Barometer & Magnetometer
- 120° Wide-Angle FOV
- All-Aluminium Frame with Thermal Control
- Cable: 1.5m USB Type-C Cable Included  
(Optional : 0.3m, 3m, 5m, 10m cables also available)

## Liite 5. Marshall Electronics CV503 Mini Full HD Camera

[https://www.thomann.de/fi/marshall\\_electronics\\_cv503\\_mini\\_full\\_hd\\_camera.htm](https://www.thomann.de/fi/marshall_electronics_cv503_mini_full_hd_camera.htm)

### Mini Camera

- o 3G / HD SDI output
- o 2.5 Megapixel (1/2.86") sensor (4:2:2 colour)
- o Removable M12 lens mount (includes standard 3.6 mm lens (72° H, AOV))
- o Full HD resolutions: 1920 x 1080p, 1920 x 1080i, and 1280 x 720p
- o Frame rates: 60, 59.94, 50, 30, 29.97, 25, 24, 23.98 fps
- o Control remotely via RS485 (Visca) or OSD menu joystick
- o Wide range of image settings including colour (red/blue), white balance, gain control, black level, white clip, exposure, gamma and more
- o Compatible with the Marshall RCP control unit CV-RCP-V2
- o Power consumption: 12 V DC / 250 mA
- o Dimensions (L x W x H): 55 x 44 x 47 mm
- o 12 V power adapter included

**30** 30 päivän palautusoikeus

**3** 3 vuoden Thomann-takuu

## Liite 6. Velodyne Puck

<https://velodynelidar.com/products/puck/>



## Liite 7. DFRobot DFR0445

<https://www.digikey.fi/fi/products/detail/dfrobot/DFR0445/7597160>

## Specification

SLAMTEC

## Measurement Performance

- For Model A2M7/A2M8 Only

Item	Unit	Min	Typical	Max	Comments
Distance Range	Meter(m)	0.15	-	8	Based on white objects with 70% reflectivity
Angular Range	Degree	-	0-360	-	-
Distance Resolution	mm	-	<0.5 <1% of the distance	-	<1.5 meters All distance range*
Angular Resolution	Degree	0.45	0.9	1.35	10Hz scan rate
Sample Duration	Millisecond(ms)	-	0.25	-	-
Sample Frequency	Hz	2000	4000	4100	
Scan Rate	Hz	5	10	15	The rate is for a round of scan. The typical value is measured when RPLIDAR takes 400 samples per scan

*Figure 2-1 RPLIDAR Performance*

Note: the triangulation range system resolution changes along with distance.

## Liite 8. Velodyne Lidar Velarray M1600

<https://velodynelidar.com/products/velarray-m1600/>

## Velarray M1600

Precise Near-Field Vision for Autonomy



## Velarray M1600™

Specifications <sup>1</sup>		(Subject to change)				
<b>Sensor</b>	• Max Detection Distance	30m @ 10% reflectivity				
	• Min Detection Distance	0.1m				
	• Frame Rate <sup>2</sup>	10 Hz, 12.5 Hz, 20 Hz, 25 Hz				
	• Horizontal FOV (H x V)	120° x 32°				
	• Horizontal Angular Resolution	0.20°				
	• Scanning Characteristics	Frame Rate	10 Hz	12.5 Hz	20 Hz	25 Hz
		Lines	160	128	80	64
		Vertical Resolution <sup>3</sup>	0.2°	0.25°	0.4°	0.5°
	• Output Return Type	Last or Strongest Return				
	• Output Data	Distance with calibrated reflectivity				
	• Range Resolution	4 mm				
	• Range Accuracy <sup>4</sup>	From - 50° to + 50°	+/- 5cm			
		Rest of the FoV	+/- 10cm			
<b>Laser</b>	• Wavelength	905 nm				
	• Laser Safety Compliance	Class 1 IEC60825-1:2014				
<b>Mechanical/ Electrical/ Operational</b>	• Weight	≤ 1000 g				
	• Power Consumption <sup>5</sup>	15 W Typical Conditions				
	• Voltage Range	9V to 16V				
	• Connectors	1x Ethernet Connector (Aptiv)				
		1x Power Connector (Amphenol)				
	• Mounting Points	4 x M6 on rear surface				
	• Environmental Protection	IP67				
	• Operating Temperature <sup>6</sup>	-40°C to 85°C				
• Durability	ISO 16750 / Automotive-grade Validation					
• EMC/EMI	EN 55032 Emission, EN 55035 Immunity					
<b>Output</b>	• Communication Protocol	IEEE 802.3bp 1000BASE-T1, UDP				
	• Support PTP	IEEE 802.1AS (gPTP)				

63-9745 Rev-A

## Liite 9. Velodyne Lidar Velabit

<https://velodynelidar.com/products/velabit/>

- ✓ Expanded, simultaneously achievable horizontal (90°) and vertical (70°) field of view
- ✓ Delivers high-resolution for customer perception needs with configurable and dynamic field of view
- ✓ Small form factor for sleek, embeddable design: lightweight (125g) and compact (2.4" x 2.4" x 1.38") with integrated processing for a wide range of solutions
- ✓ Range of up to 100 meters
- ✓ Low power consumption (3-6W) maximizes battery life and vehicle range
- ✓ Proven Class 1 eye-safe 903 nanometer technology
- ✓ Bottom connector with cable length options
- ✓ Built to easily scale: multiple manufacturing sources available for qualified production projects