



# ISEAUTO projekt ([iseauto.ttu.ee](http://iseauto.ttu.ee))

## Analüüs - Sensorikalahenduste valik

Koostas: Mairo Leier  
TTÜ 08.2017

### Analüüsi lähteülesanne

Tuua välja erinevates autonoomse sõiduki projektides kasutatud andurite lahendusi ning kirjeldada andurite tehnoloogiaid ja mudeleid, mida kaaluda võimaliku valikuna kasutamiseks isesõitva sõiduki projektis. Analüüsi tulemusi võrreldakse erinevate tehniliste parameetrite, hinna, kättesaadavuse ning kasutuskogemuste baasil.

### Ülevaade ja võrdlus

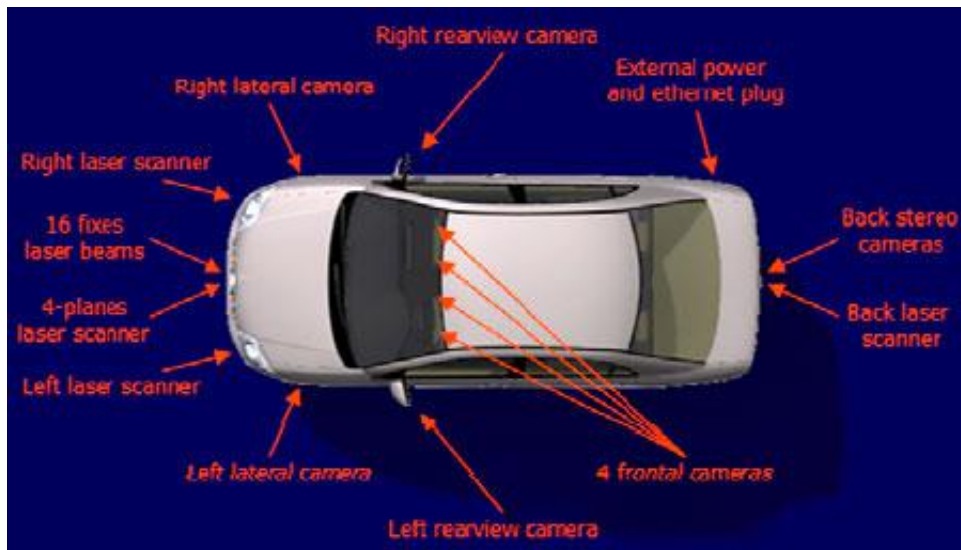
Järgnevalt on ära toodud mõned visuaalsed esitlused, kirjeldamaks sensorika paigutust autonoomsete autode küljes. Näidetelt on näha, et isejuhtiva auto orienteerumiseks keskkonnas on tarvis erinevate andurite kombinatsioone. Käesolev aruanne annab põgusa ülevaate saadaolevatest anduritest ja nende tööpõhimõtetest.

Illustratsioon Teslale paigutatud sensorite paiknemisest, kus on näha kaamerate, radarite ja ultraheli andurite vaateväljad [<https://www.tesla.com/autopilot>].



Joonis 1. Tesla autole paigutatud sensorite tööraadiused

Itaalias Parma ülikoolis asuva VisLab uurimisgrupi auto BRAiVE ning sellele külge monteeritud sensorika [<https://eu.ptgrey.com/case-study/id/10393>].



Joonis 2. VisLab uurimisgrupi auto BRAiVE külge monteeritud sensorika.

# Lidarid

## Tehnoloogia kokkuvõte

Lidar kasutab pöörlevaid laserite ja peeglite süsteeme, mis saadavad välja lühikesi valgusimpulsse tuvastamiseks lähedalasuvaid objekte. Tavaliselt on lidarites kasutusel 905 nm lainepikkusega laserid, pikema vahemaa jaoks kasutatakse 1550 nm lainepikkust. See lubab sensoril opereerida suuremal võimsusel ning samas jääda silma-kahjustusi tekitavatesse reeglite piiridesse.

Radarid näevad ca 150-200 meetri kaugusele, kuid neil pole piisavalt hea resolutsioon. Lidarid pakuvad oluliselt paremat resolutsiooni ja seda kuni ca 60-70 meetri kaugusele ja 30 meetri kaugusele otsese päikesevalguse käes.

Oryx'i koherentne optiline radar suudab tee peal tuvastada prahti kuni 60 meetri kauguselt, jalakäijaid 100 meetri kauguselt ja mootorrattaid kuni 150 meetri kauguselt, mis on oluliselt parem kui tavalised sensorid [<http://spectrum.ieee.org>].

Velodyne parim lidar suudab 10% peegeldusega tumedaid objekte tuvastada kuni 50 meetri kauguselt.

Luminar demonstreeris seadet, mis suudab sama objekti tuvastada 200 meetri kauguselt, kuna nende laserid kasutavad pikema lainepikkusega laserkiirt. Luminar kasutab samuti väiksemaid peegleid, mis suunavad kiired konkreetsetesse kohtadesse, mis lubab sensoril nõ sisse suumida konkreetset eset [<http://www.thedrive.com>].

### LIDAR'i eelised:

- Mõõtmiste tulemusena saadakse ümbritseva keskkonna punktipilv
- Lidari töö ei sõltu keskkonna valgustatusest ja seetõttu on tema tundlikkus suhteliselt sarnane päeval, öösel, pilvise või päikesepaistelise ilmaga, varjudes ja päikesevalguse käes.
- Robustne häirete vastu ning omab suuremat resolutsiooni kui radar.

### LIDAR'i puudused:

- Hetkel väga kallis. Kõrg-resolutsioonilisi lidareid toodetakse väikestes kogustes ning maksavad rohkem kui auto. Solid state lidarid toovad samas hinnad alla 1000 USD, kuid seni ei ole turul veel toimivaid lahendusi müügis.
- Resolutsioon on rahuldav. Parimad mudelid suudavad saada pildi, mille pikslite arv vertikaalis on 64. Horisontaalselt on pikslite arv suurem. Värskendussagedus on 10 Hz, mistõttu ei ole saadav info kasutatav auto kiirel liikumisel.
- Piiratud vahemaa. Tüüpiline lidar näeb hästi kuni 70 meetri kaugusele. 1550 nm lainepikkusega lidarid näevad kaugemale kuid on oluliselt kallimad.
- Lidaritel on liikuvad osad, et skanneerida ümbrust, mis mõjutavad seadme kasutamisega.
- Lidaritel on keeruline hakkama saada suure vihmaga, lumega, uduga. Sama probleem on ka teistel sensoritel, mille tehnoloogia baseerub valgusimpulssidel. Lidarid võivad vahel näha ka nähtamatuid objekte nagu auto heitgaasid.

- Lidarid tuleb paigaldada sõidukitele eenduvalt, et tagada võimalikult suur vaateväli. Eelistatud asukohaks on sõiduki katus ja nurgad, võimaldamaks maksimaalne nähtavus.

Allikas: [<http://www.templetons.com/brad/robocars/cameras-lasers.html>]

## Sensorika

Peamised lidarite tootjad on IBEO, SICK, Velodyne ja Qanergy. Neist kaks esimest toodavad ainult 2D lidareid ning teisted ka 3D lidareid. Qanergy tootevalikus on ainult üks 3D lidar M8-1, mille töökaugus 80% objektilt peegeldumise korral on kuni 200 meetrit. Võrreldes Velodyne odavaima VLP-16 lidariga on tal 8 kanalit (VLP-16 16 kanalit) ning vertikaalne töönurk 20 kraadi (VLP-16 30 kraadi). Sellest tingituna on ka täpsus 50 mm võrreldes VLP-16 30 mm. Märkimist väärib VLP-16 mõnevõrra väiksem töökaugus - kuni 100 meetrit võrreldes M8-1 150 meetriga. Hinna poolest jäävad mõlemad ühte klassi, VLP-16 7500 € ja M8-1 6100 €.

Kallimatel Velodyne mudelitel nagu HDL32-E ja HDL-64E on juba vastavalt 32 ja 64 kiirt, mis suurendab täpsuse 20 mm. Samas on neil natukene väiksem töökaugus, mis jääb 50 ja 70 meetrini maksimaalselt. Velodyne HDL-32 hind jääb 28000 € kanti ning HDL-64 75000 €. Muud parameetrid on ligilähedased võrreldes odavamate mudelitega.

Lidarite hinnad langevad pidevalt. Näiteks Qanergy 8-laseriga seade maksab ca 1000 USD. Lisaks lubavad nad 2018. aastal müüki ilmuva samade näitajatega solid state lidari hinda oluliselt madalamana. Valeo/IBEO lubab 4-laseriga lidari hinda ca 250 USD, millel on aga oluliselt piiratum vaateväli. Velodyne sõnul suudavad nad toota väga suurtes kogustes lidareid hinnaga ca 300 € [<http://www.templetons.com/brad/robocars/cameras-lasers.html>].

Peagi müügile saabuvad *solid state* lidarite valmistajad on hetkel Luminar, Qanergy, Innoluce ja Innoviz. Luminar'i mudeli tööraadius on 10% peegelduse korral üle 200 meetri, mis on kordades parem kui praegustel toodetel. Sensorid on töökindlamad ja vastupidavad ning tõenäoliselt edaspidi kasutatavad ka masstootmises isejuhtivate sõidukite juures.

## Tarkvara

IBEO ja Slamtek pakuvad kodulehel oma toodetele ka C++ SDK'd arenduseks. Hokuyo pakub samuti tarkvara.

Velodyne lidaritel on nende kodulehel väga põhjalik dokumentatsioon ja tarkvara [<http://velodynelidar.com/downloads.html>].

## Radarid

### Tehnoloogia kokkuvõte

Radarid võib jagada nende maksimaalse töökauguse järgi kolme põhigrupi:

- Lühimaa radar (SRR) 0,2-30 meetrit
- Keskmaa radar (MRR) 30-80 meetrit
- Kaugmaa radar (LRR) 80 kuni üle 200 meetri

Kaugmaa radar on *de facto* sensor, mis on kasutusel adaptiivse kiiruskontrolli poolt (ACC - *Adaptive Cruise Control*) ja kiirtee automaatse hädapidurdussüsteemi poolt (AEBS - *Automativ Emergency Braking System*).

Hetkel kasutusel olevad lahendused kasutavad ACC ja AEBS-i jaoks ainult LRR-i. LRR-i puudus on, et ta ei pruugi rakenduda konkreetsetes situatsioonides nagu kurvilisel teel õige sõiduki järgi distantsi paika seadmine. Lisaks ei pruugi ta suuta tuvastada kitsaid sõidukeid nagu mootorrattad. Nendest puudustest üle saamiseks saab radari kombineerida kaameratega, mis annavad lisainformatsiooni tuvastamise jaoks [<https://blog.nxp.com/automotive/radar-camera-and-lidar-for-autonomous-cars>].

Radaritel põhineva süsteemi saab peita auto kere sisse plastiku taha kuna nad kasutavad inforapuna või mikrolainetel töötavaid sensoreid. Need lained suudavad edukalt läbida plastikut. Enamkasutatud on radaril põhinevad süsteemid kuna erinevalt laseritel põhinevatest süsteemidest suudavad need jälgida keskkonda halbades ilmastikuoludes, lisaks on laseritel põhinevatel anduritel probleeme jälgida tumedat värvi sõidukeid. Radari eelis on, et ta mitte ainult ei suuda anda tagasisidet takistuse kauguse kohta vaid määrab ära ka takistuse kiiruse kasutades selleks Doppleri efekti. Enamus süsteeme on ühe radariga kuid mõned autotootjad kasutavad ka kahe radariga lahendusi, milles üks on SRR ja teine LRR radar.

## Sensorika

Radari peamine eesmärk on mõõta ümbritsevate liiklusvahendite kiirust ning koos inertsiaalanduritega hädapidurdada või muuta sõiduki liikumissuunda. Enamasti on kasutuses ees üks lähi- ja üks pikamaa radar. Radari eelis lidari ees on stabiilsem ja kergemalt töödeldav infovoog.

Continentali radari info: [http://www.sensor-test.de/ausstellerbereich/upload/mnpdf/en/Flyer\\_Industrial\\_Sensors.pdf](http://www.sensor-test.de/ausstellerbereich/upload/mnpdf/en/Flyer_Industrial_Sensors.pdf)

## Kaamerad

Kaamerate peamine eesmärk on tuvastada takistusi ja sõidukeid, tee piirjooni ning liiklusmärke ja anda reaajaline pildivoog sõiduki liikumisest operaatorile/huvilistele. Samuti on kogutav info kasutatamiseks, seadistamiseks ja hilisemaks analüüsiks.

Kaamerapõhised lahendused järgivad keskkonda sarnaselt inimesele. Üks või mitu kaamerat jälgivad stseeni ning tarkvara püüab teha seda, mida inimene teeb - luua 3D maailm 2D piltidest.

Kaamerate eelised:

- Kaamerad on väga odavad. Riistvara võib maksta alates mõnekümnest eurost ning neid saab paigaldada palju
- Kuna nähtava valguse kaamerad kasutavad peegeldunud valgust, siis nad võivad näha suvalise kauguse taha päevavalgel kui vaateväli on väike. Öösiti peavad kaamerad kasutama tehisvalgust.
- Nad näevad värve. Lidarid näevad halltoone infrapuna spektris.

- Neil pole liikuvaid osi. Suund-kaamerate puhul on võimalik saavutada väga suuri resolutsiooni kaugete objektide taha. Isegi odavad kaamerad on väga hea resolutsiooniga - kui lidar näeb kuni 64 rida, siis kaameral 3000.
- Tänu suurele resolutsioonile suudavad nad teoorias anda edasi infot, mida ei suuda edastada madalama resolutsiooniga lidar.
- Nad suudavad eristada valgusfoore, piduritulesid, suunatulesid ja teisi tehisvalguse objekte. Nad on ideaalsed lugemaks märke.

Kaamerate peamised puudused:

- Tehisnägemine ei ole tänapäeval kaugelki piisav, mis tagaks ohutu autosõidu kuna ei suuda tuvastada kõiki olulisi nüansse
- Valgustuse muutumise tingimustega toime tulemine. Objektide liikuvad varjud.
- Vajavad valgustust õõtingimustes ning kohtvalgus ei pruugi olla piisav
- Tehisnägemine vajab suurt arvutusvõimsust või spetsiaalseid kiipe [<http://www.templetons.com>].

Aeglase kiirustel (kuni 25 km/h) ja lühidistantsidel (<20 m) võib lidarid asendada kaameratega kuna puudub vajadus näha kaugemale [<http://www.templetons.com>]. Oluline on kaamerate juures kasutada lahendusi, millel on *Global Shutter*, sest vastasel korral pilt masinnägemislahenduste jaoks liiga "udune" ja moonutustega. *Global Shutteri* puhul loetakse pildi info ühel ja samal hetkel, mitte rida-rea haaval.



Joonis 3. Rolling shutter ja Global shutter kaamerate pildi võrdlus.

HDR (High Dynamic Range) kaamerad annavad võrreldes tavalistega suurema heleduse dünaamilise diapasooni. Nende eelis tuleb eelkõige välja olukordades, kus on väga ere valgus nagu keevitus, mis teeb keeruliseks objekti tuvastamise seal läheduses. Samuti on nende eelis läikivate pindade puhul, mis vajavad peegelduste tõttu suuremat dünaamilist diapasooni [<https://en.ids-imaging.com>]. Samuti on HDR kaameratel eelis näiteks pimedatest

tunnelitest päevavalguse kätte sõites. Sony HDR sensor suurendab diapasooni 120 dB-ni [<https://www.driverless.id>].

## Kokkuvõte projektist

Analüüsid teisi projekte jäi silma, et enamasti on kasutusel 1-2 stereokaamerat, aga alati vähemalt 1 stereokaamera igas projektis. Kas siis ainult taga keskel või nii taga kui ka ees. Kaamerate arv varieerub kahest 10-ni ning suuremalt jaolt kaetakse kaameratega ära kogu 360 kraadine vaateväli.

VTT Citroen C4 Marlin projektis on kasutusel ka HDR toega kaamera. Kaamera optika valiku visualiseerimiseks on abiks järgnev kalkulaator <https://www.theia.us.com/TheiaCalculator.php>

## Lühimaaandurid - ultraheliandurid

Ultraheli signaalideks loetakse signaale, mille sagedus jääb vahemikku 20 kHz kuni 200 kHz. Nende kasutamine on laialt levinud sh ka autode parkimisel. Samuti saab ultrahelilaineid suunata väga täpselt.

Ultraheli andurid suudavad objekte tuvastada alates 10 cm kauguselt kuni 6 meetrini. Kui esimesed ultraheli sensorid töötasid enamasti 40 kHz sagedusalas, siis uuemad juba 58 kHz ja 68 kHz juures, mis võimaldab objekte kaugemalt tuvastada [<http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/an-introduction-to-ultrasonic-sensors-for-vehicle-parking/24966/>].

## Tarkvara

Ultraheli andurid on annavad üldjuhul välja kolme tüüpisignaale:

- analoogväljund
- digitaalne impulss, kus impulsi pikkus on korrelatsioonis distantsiga
- UART liides

Kõige laialdasemate kommunikatsioonivõimalustega ja suuremate seadistusvõimalustega on Maxbotix'i toodetud (HR)XL-MaxSonar-WRx sensorid. Distantsi saab lugeda nii analoogliidese, digitaalse pulsilaiuse kui UART liidese kaudu. UART liidese puhul väljastavad nad ainult distantsi binaarkujul ja andmelehe järgi on see ühendusviis kõige täpsem. Samas peab iga sensori jaoks looma eraldi siini ja tarkvaralise UART toe vastuvõetud andmete interpreteerimiseks kuna üks mikrokontroller ei pruugi toetada üle 4-6 paralleelse riistvaralise UART liidese.

Ühilduvuse ja töökindluse tõstmiseks tuleks suhtlus anduritega viia CAN liidesele.

Üsna paljudes projektides pole otseselt välja toodud, kui suurt hulka andureid kasutatakse ning kuhu need on paigaldatud. Samuti pole ka silma jäänud, et keegi on otseselt loobunud nende kasutamisest mõne teise sensori kasuks, seega võib eeldada, et need on suures enamuses

projektide kasutuses. Standardina on kasutusel 12 andurit, neist 4 tk ees ja taga ning 1 tk auto igal küljel ees- ja tagapool. Arvestades andurite marginaalset maksumust, siis neid võiks kasutada pigem rohkem kui vähem. Kaardistamiseks täpsemalt sõiduki lähiümbruses olevaid takistusi.

## Kokkuvõte

Olenevalt projektist sõltub kasutatava sensorika tüüp oluliselt. Enamustes projektides on siiski kõik kolm peamist sensorit, lidar, radar ja kaamerad, esindatud, mis osaliselt dubleerivad ja täiendavad (*sensor fusion*) üksteise tööd. Olenevalt ilmastikuoludest võivad ühe või teise puudused kergemini esile tulla, mida näitab ka järgnev tabel [<http://on-demand.gputechconf.com>].

Tabel 1. Erinevate sensorite eelised erinevates olukordades.

	LiDAR	Radar	Video
Range	+++	+++	-
Range Rate	++	+++	-
Field of View	+++	++	+
Width & Height	+++	-	+
3D Shape	+++	-	-
Object Rec @ Long Range	+++	-	-
Accuracy	+++	-	+
Rain, Snow, Dust	++	+++	-
Fog	+	+++	-
Night time	+++	+++	-
Read Signs & See Color	+	-	+++

Arvestades Eesti ilmaolusid nagu vihm, udu ja lumi, siis on oluline kasutada kõiki kolme tüüpi sensoreid.

## Lingid

- Saksamaa Karlsruhe Tehnikaülikooli (KIT) poolt autonoomse sõiduki projekti käigus kogutud sensorandmete kogum avalikuks kasutamiseks: [http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/raw\\_data.php](http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/raw_data.php)
- Citymobil2 bussi probleemid GPSi ja olematute takistustega: <https://connect.innovateuk.org/web/intelligent-mobility/article-view/-/blogs/citymobil2-driverless-bus-project-demonstration-has-teething-issues-sul-lungomare->