



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Thomas Kokkonen

Talviolosuhteiden vaikutus autonomisten ajoneuvojen sensoreihin

Vertailututkimus eri sensoriteknologioista

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Automaatio ja tietotekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Thomas Kokkonen		
Tutkielman nimi:	Talviolosuhteiden vaikutus autonomisten ajoneuvojen sensoreihin: Vertailututkimus eri sensoriteknologioista		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Oppiaine:	Automaatio ja tietotekniikka		
Työn ohjaaja:	Janne Koljonen		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	34

TIIVISTELMÄ:

Autonomisten ajoneuvojen teknologinen kehitys on ottanut suuria kehitysaskelleita, mutta erityisesti talviolosuhteiden tuottamien haasteiden tarkastelu ajoneuvojen sensorijärjestelmien kannalta on jäänyt vähäiseksi. Tässä kandidaatintutkielmassa perehdytään kolmeen keskeiseen sensoryyppiin, joita ovat LiDAR-, RADAR- ja kamerasensori. Tutkielmassa tarkastellaan, miten lumi, vesi, jää, huuire, pimeys, heijastukset ja sumu vaikuttavat sensorien suorituskykyyn. Tutkimus on kirjallisuuskatsaus, jossa kootaan yhteen aiempien tutkimusten teoreettisia ja kokeellisia tuloksia sensorien vahvuuksista ja heikkouksista näissä olosuhteissa.

Tutkielma tuo ilmi yksittäisten sensorien rajoituksia talviolosuhteissa. Näitä ovat esimerkiksi kameroiden alttius näkyvyyttä häiritseville tekijöille, kuten pimeydelle ja lumisateelle tai LiDARin haastavia olosuhteita, esimerkkinä sumu ja sade tai RADAR-sensorien kyvykyys talviolosuhteissa, mutta niiden puutteellinen tiedon tuottaminen. Tutkielmassa nostetaan ratkaisuksi sensorifuusio, joka tarkoittaa eri sensorien datan yhdistämistä. Fuusio tarjoaa tehokkaan tavan kompensoida yksittäisten sensorien heikkouksia ja näin lisätä toimintavarmuutta. Tutkielma toteaa tehokkaan ja sääolosuhteisiin sopeutuvan sensorifuusiojärjestelmän mahdollistavan luotettavan havainnointijärjestelmän autonomisille ajoneuvoille, mutta tämän saavuttamiseksi on tarvetta teknologian kehitykselle ja laajemmille jatkotutkimuksille.

AVAINSANAT: Autonominen ajoneuvo, sensoriteknologia, LiDAR, RADAR, kamera, sensorifuusio, talviolosuhteet

Sisälllys

1	Johdanto	5
1.1	Tausta	6
1.2	Tavoitteet ja rajaus	7
1.3	Tutkielman rakenne	8
2	Autonomisten ajoneuvojen sensoriteknologiat	9
2.1	LiDAR	11
2.2	RADAR	14
2.3	Kamerat	17
2.4	Sensorifuusio	18
3	Talviolosuhteiden vaikutukset sensoreihin	22
3.1	Lumisateen, jään ja huurteen vaikutukset sensoreihin	22
3.2	Valo-olosuhteiden (pimeys, heijastukset, sumu) vaikutukset	24
4	Analyysi ja johtopäätökset	26
4.1	Eri sensoriteknologioiden vertailu talviolosuhteissa	26
4.2	Sensorifuusion merkitys havaintokyvyn parantamisessa	27
4.3	Aiempiin tutkimuksiin perustuvat keskeiset havainnot	29
5	Yhteenveto	31
	Lähteet	32

Kuvat

Kuva 1. Autonomian tasot (mukaelma lähteestä Parekh ja muut, 2022, s. 9).	9
Kuva 2. Autonomisen ajojärjestelmän neljä pääosaa (mukaelma lähteestä Kocić ja muut, 2019, s. 1).	11
Kuva 3. LiDAR toimintaperiaate (mukaelma lähteestä Gomez ja muut, 2023, s. 4).	13
Kuva 4. Autonominen ajoneuvo useammalla sensorilla (mukaelma lähteestä Yeong ja muut, 2021, s. 6).	19

Taulukot

Taulukko 1. Sensoreiden ja sensorifuusion teknisten ominaisuuksien vertailu (mukaelma lähteestä Yeong ja muut, 2021, s. 23).	27
---	----

Lyhenteet

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems, Kuljettajan avustinjärjestelmät
FoV	Field of View, Näkökenttä
GNSS	Global Navigation Satellite System, Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
LiDAR	Light Detection and Ranging, Valotutka
MIMO	Multiple Input Multiple Output, Useita lähetys- ja vastaanottoantenneja
RADAR	Radio Detection and Ranging, Tutka
SAE	Society of Automotive Engineers,
ToF	Time of Flight, Pulssin lentoaika

1 Johdanto

Autonomiset ajoneuvot, tunnetaan myös nimellä itse ajavat ajoneuvot, ovat olleet jo pitkään paljon puhuttu ja uutisoitu aihe. Ajoneuvoteknologia on kasvattanut suosioitaan ja autonomisesta ajamisesta on noussut ajankohtainen keskustelunaihe (Parekh ja muut, 2022, s. 1). Nopea teknologinen kehitys ja kilpailu alalla ovat nostattaneet autonomisten ajoneuvojen kiinnostusta. Nykyään on jo kehitetty autonomisia ajoneuvoja, kuten Tesla, jotka kykenevät kehittyneen avustinjärjestelmänsä avulla suoriutumaan monista ajotehtävistä omatoimisesti. Nämä ajoneuvot eivät kuitenkaan kykene vielä täysin itsenäiseen ajamiseen, mutta pienessä mittakaavassa oikeiden olosuhteiden vallitessa tähän pystyviä autonomisia ajoneuvoja on jo kehitetty.

Tässä tutkielmassa keskitytään talviolosuhteiden vaikutuksiin autonomisille ajoneuvoille, jotka kykenevät ajamiseen ilman ihmistä. Tässä työssä talviolosuhteet tarkoittavat haastavia olosuhteita, kuten lunta, jäätä, huurretta, sumua, pimeyttä ja heijastuksia. Haastavat sääolosuhteet voivat huomattavasti vaikuttaa autonomisen ajoneuvon navigointisensoreihin (Yeong ja muut, 2021, s. 2). Talviolosuhteiden luomat vaativat olosuhteet pidentävät ihmisen reaktioaikaa ja heikentää auton hallittavuutta. Tällaisten olosuhteiden vallitessa automaattisten ajoneuvojen osalta ennakoivan liikennedatan merkitys kasvaa huomattavasti, mutta olosuhteiden luomassa ympäristössä datan saatavuus havaintoihin perustuvien sensoreiden kautta voi heiketä. Tämä tuo esiin kysymyksen autonomisten ajoneuvojen kyvystä pärjätä talvisissa olosuhteissa.

Itse ajavien ajoneuvojen päätöksenteko perustuu sensorien tuottamaan dataan. Sensorit havainnoivat ympäristöä, minkä perusteella itse ajavat ajoneuvot pyrkivät omatoimiseen turvalliseen ajamiseen. Sensorien keräämä tieto on monimuotoista ja koostuu eri tietotyypeistä, jotka yhdistetään muodostamaan perustan ajoneuvojen päätöksenteolle (Ignatious ja muut, 2022, s. 736). Tällä tarkoitetaan sitä, että eri sensorit keräävät ympäristöstään monimuotoista dataa, jonka perusteella autonominen ajoneuvo tekee päätökset. Tällaisia sensoreita ovat LiDAR, RADAR ja kamera. Näiden

sensoreiden muodostamaa monimuotoista datankeruuta kutsutaan sensorifuusioksi, mitä käsitellään myöhemmin tässä tutkielmassa. Ilman sensorien tuottamaa monipuolista dataa, autonomiset ajoneuvot eivät kykenisi toimimaan liikenteessä etenkin haastavissa olosuhteissa.

1.1 Tausta

Viime vuosina on tapahtunut merkittävää edistystä autonomisten ajoneuvojen kehityksessä erityisesti AI- eli tekoälyteknologian ansiosta. Merkittäviä kehityskohteita on ollut AI-algoritmien kehittyminen edistyneiden sensorien ja koneoppimisen ansiosta, edge computing eli reunalaskenta, redundanttiset järjestelmät ja tiukat varmistusmekanismit (Garikapat & Shetiyan, 2024, s. 2). Nämä kehitykset ovat mahdollistaneet tarkemman havainnoinnin ja päätöksenteon, nopeamman ja itsenäisemmän toiminnan sekä parantuneen turvallisuuden ja luotettavuuden. Muita merkittäviä muutoksia ovat kehittyneet konenäkö, nopeutunut testausprosessi ja verkottuneet ajoneuvot, mitkä ovat mahdollistajia turvallisemmalle ajamiselle.

Autonomiset ajoneuvot havainnoivat ympäristöään erilaisten sensorien kautta. Tällaisia sensoreita ovat muun muassa kamerat, RADAR, LiDAR ja GNSS- eli satelliittipaikannusjärjestelmät (Parekh ja muut, 2022, s. 7). Jokaisella sensorilla on oma kriittinen tehtävänsä ympäristön havaitsemisessa ja datan tuottamisessa niin, että ajoneuvo kykenee tarkkaan paikannukseen, esteiden tunnistamiseen ja turvalliseen ajamiseen.

Sääolosuhteet ovat suuri liikenne onnettomuuksien aiheuttaja. Useissa G7-maissa on käynnissä pilottihankkeita, joilla tavoitellaan autonomisten ajoneuvojen käyttöönottoa (Mohammed ja muut, 2020, s. 5). ADAS- eli kuljettajan avustinteknologiaa hyödynnetään jo laajalti massatuotannossa olevissa ajoneuvoissa. Ajotoimintoja on testattu menestyksekkäästi, mutta ovat vielä toimimattomia vaihtelevissa olosuhteissa (Mohammed ja muut, 2020, s. 5). Sääolosuhteet, kuten lumi, sade ja sumu, aiheuttavat vuosittain noin neljäsosan Yhdysvaltojen liikenneonnettomuuksista (Mohammed ja

muut, 2020, s. 1). Tästä syystä on erityisen tärkeää tiedostaa nämä riskit ja rakentaa haastavissa olosuhteissa pärjääviä havaintojärjestelmiä. Kun ongelmakohtat saadaan ratkaistua näissä ankarissa olosuhteissa, pystyvät autonomiset ajoneuvot kohtaamaan paremmin haastavia olosuhteita myös muualla maailmassa.

1.2 Tavoitteet ja raja

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten talviolosuhteet vaikuttavat autonomisten ajoneuvojen eri sensoriteknologioihin, tässä tapauksessa LiDAR-, RADAR- ja kamerajärjestelmiin. Tutkielmassa tarkastellaan, miten lumi, jää, valaistus ja muut talviolosuhteet haastavat eri sensorien toimintaa ja kuinka suuri vaikutus niillä on ajoneuvon havainnointikykyyn. Tutkielmassa selvitetään myös sensorifuusion merkitystä näissä haastavissa sääolosuhteissa. Huolimatta sääolosuhteiden keskeisestä vaikutuksesta havaintojärjestelmien toimintakykyyn, jää niiden huomio vähäiseksi ADAS-järjestelmiä käsittelevissä katsauksissa, joissa pääpainona on järjestelmien ja algoritmien suorituskyvyssä (Mohammed ja muut 2020, s. 2). Vaihtelevat sääolosuhteet muodostavat yhä ratkaisemattoman haasteen autonomisille ajoneuvoille, vähäisen huomion takia (Mohammed ja muut 2020, s. 2).

Tutkielman keskittyy autonomisten ajoneuvojen olennaisiin sensoriteknologioihin ja selvittää miten talviolosuhteet, kuten lumi, jää, huurre ja valaistus vaikuttavat kunkin sensorin suorituskykyyn ja toimintaan. Painotuksena tutkimuksessa on keskittyä eri sensoriteknologioiden vahvuuksiin ja heikkouksiin sekä näiden ominaisuuksien vertaaminen keskenään. Tutkimus keskittyy käsittelemään korkeimman luokan autonomisia ajoneuvoja, jotka kykenevät omatoimiseen ajamiseen ilman ihmisen apua. Tästä lisää luvussa 2. Lisäksi analysoidaan jo julkaistujen tutkimusten päätelmiä sensorifuusion käytöstä yksittäisten sensorien puutteiden kompensoinnissa.

Tutkielma ei käsittele autonomisten ajoneuvojen infrastruktuuria, sääntelyä tai turvallisuuden liittyviä eettisiä ongelmakohtia. Tarkastelu keskittyy kolmeen keskeiseen sensorityyppiin: kamera-, LiDAR- ja tutkajärjestelmiin. Tutkimuksen ulkopuolelle jää

myös teknologioiden yksityiskohtaisempi tekninen tarkastelu. Ne jäävät epäolennaiseksi tiedoksi tämän tutkielman osalta, koska tutkielman laajuus on rajallinen ja rajauksen on oltava selkeä. Tekstissä ei tuoda esille teknisiä kehitysratkaisuja, vaan keskitytään olemassa olevien teknologioiden analysoimiseen. Rajauksen tarkoituksena on pitää tutkielma tarpeeksi tiiviinä, jotta siinä on mahdollisuus syventyä tarkastelemaan oleellisimpia asioita.

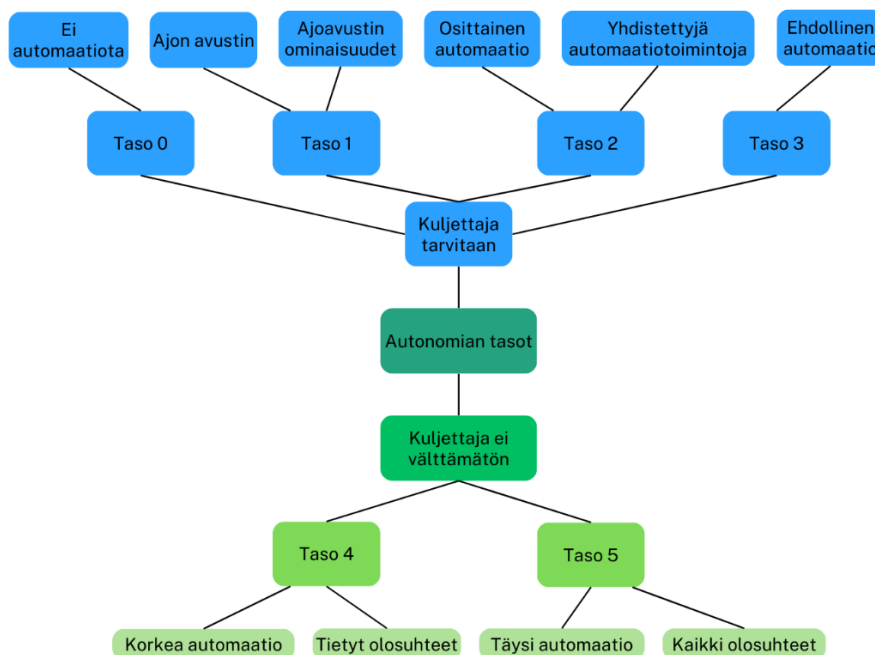
1.3 Tutkielman rakenne

Tutkielmassa on viisi päälukua, jotka johdattavat lukijaa loogisesti tutkimuksen aiheeseen ja johtopäätöksiin. Ensimmäinen luku käsittelee tutkimuksen taustaa, tavoitteita ja rajausta. Toisessa luvussa pohjustetaan tietoa sensoriteknologioiden toiminnasta ja niiden vahvuuksista ja heikkouksista sekä sensorifuusiosta. Tästä edetään lukuun 3 analysoimaan talviolosuhteiden haastavia olosuhteita ja niiden suoranaisia vaikutuksia sensoriteknologioihin. Viimeisissä luvuissa tehdään tarkemmat analyysit sensorien toimivuudesta, mahdollisista ratkaisuista sääolosuhteiden aiheuttamiin ongelmiin (luku 4) ja kootaan tutkielman keskeisimmät havainnot ja johtopäätökset (luku 5).

Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, jossa sensoriteknologioiden vertailu perustuu aiempien tutkimusten analysointiin. Sensoriteknologioiden vertailussa analysoimme yksittäisten sensorien toimintakykyä keskeisten talviolosuhteiden vallitessa, kuten lumi, jää ja pimeys. Tekstissä käydään läpi myös sensorifuusion potentiaalia toimia yksittäisten puutteellisesti toimivien sensorien ratkaisuna ongelmaan. Vertailu toteutetaan analyysinä, missä vertaillaan teknologioiden vahvuuksia ja heikkouksia ja pyritään löytämään toimivimpia sensorifuusioratkaisuja, jotta autonominen ajaminen olisi mahdollista myös haastavissa olosuhteissa.

2 Autonomisten ajoneuvojen sensoriteknologiat

Autonomiset ajoneuvot ovat jo nykypäivää, mutta suurimmilta osin ne tarvitsevat vielä ihmisen avustusta. Ajoneuvojen autonomian taso voidaan määrittää SAE J3016 -standardin avulla. Kuvasta 1 voi nähdä, että SAE asteikolla taso 0 tarkoittaa, ettei ajoneuvossa ole ollenkaan autonomiaa. Taso 5 on taas ääripää, mikä tarkoittaa täyttä automaatiota. Nykyajan ajoneuvoissa hyödynnetään SAE-asteikon 2–3-tason ADAS-teknologiaa, jotka automatisoivat ajotoimintoja kuskin avustukseksi ja onnettomuuksien vähentämiseksi (Mohammed ja muut, 2020, s. 1). Kuvassa 1 on esitetty, että tasojen 0, 1, 2 ja 3 omaavat ajoneuvot ovat riippuvaisia ihmisestä. Tasot tuottavat ajoa tukevia ominaisuuksia. Tasoilla 4 ja 5 ajoneuvojen on kyettävä omatoimiseen ajamiseen ilman ihmisen avustusta. Tässä kirjoittelmassa keskitymme SAE tasojen 4 ja 5 ajoneuvoihin ja ratkaisuihin, sekä tarvittaviin kykyihin, jotta ne pystyisivät toimimaan talviolosuhteissa.



Kuva 1. Autonomian tasot (mukaelma lähteestä Parekh ja muut, 2022, s. 9).

Autonomisissa ajoneuvoissa hyödynnetään useita eri sensoreita mahdollistamaan itsenäinen ja turvallinen toiminta. Näistä keskeisimpiin teknologioihin kuuluu LiDAR (Light Detection and Ranging), jolla mitataan etäisyyksiä ja tuotetaan kolmiulotteista

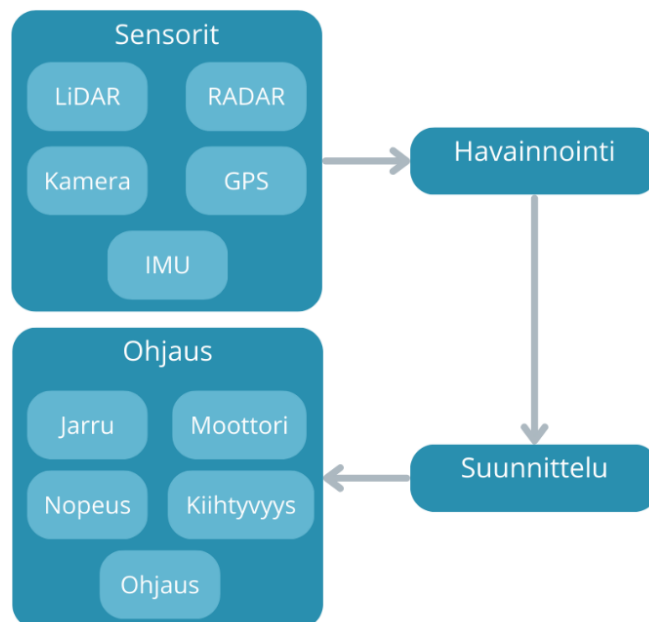
kuvaa ympäristöstä valonsäteiden avulla. Toinen tärkeä sensori on RADAR eli tutka. Sen toiminta perustuu radiotaajuuksiin ja se on erityisen tärkeä huonon sään vallitessa. Kameran tehtävä on tuottaa visuaalista tietoa, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi liikennevalojen lukemiseen. Autonomisissa ajoneuvoissa sijainnin määrittämiseen hyödynnetään GNSS-järjestelmää, sekä IMU-sensoria, joka seuraa ajoneuvon kiihtyvyyttä ja kulmanopeuksia.

Sensorit voidaan jaotella toiminnallisten roolien mukaisella erottelulla proprioseptisiin ja eksteroseptisiin sensoreihin (Yeong ja muut, 2021, s. 5). Proprioseptiset sensorit mittaavat ajoneuvon omaa tilaa, esimerkiksi mittaamalla kiihtyvyyttä ja kulmanopeutta, hyödyntäen IMU- ja GNSS- järjestelmiä, kun taas eksteroseptiset sensorit tuottavat tietoa ajoneuvon ulkopuolisista tekijöistä, esimerkiksi etäisyyksien tai valon mittauksella, käyttäen LiDAR-, RADAR- ja kamerajärjestelmiä. Tämä tutkimus keskittyy kyseisiin eksteroseptisiin sensoreihin, niiden keskeisen aseman johdosta haastavissa talviolosuhteissa. Sensorit voidaan myös jaotella passiivisiin ja aktiivisiin niiden toiminnan mukaan (Yeong ja muut, 2021, s. 5). Esimerkiksi kamerat toimivat passiivisesti, kun taas LiDAR ja RADAR toimivat aktiivisesti lähettämällä signaalia ympäristön havaitsemiseksi.

Autonomisten ajoneuvojen on kyettävä toimimaan vaihtelevissa olosuhteissa. Yksittäinen sensori ei pysty tuottamaan tarpeeksi tietoa niin, että autonominen ajoneuvo pystyisi toimimaan vaihtelevissa olosuhteissa turvallisesti. Kuten Zhuang ja muut kirjoittavat (2023), on haastavaa luottaa yksittäisen sensorin tuottamaan tietoon paikannusjärjestelmänä sen puutteiden vuoksi. Hyödyntäen useampia erityyppisiä sensoreita ajoneuvossa, voidaan täyttää yksittäisten sensorien vajavaisuuksia.

Sensorit tuottavat ajoneuville tietoa ympäristöstä, jotta sen on mahdollista liikkua luotettavasti. Eri sensoreilla on erilaiset tehtävät tuottaa tietyn tyyppistä dataa, jota autonominen ajoneuvo hyödyntää. Sensorit tuottavat dataa käyttämällä eri teknologioita mahdollistaakseen monipuolisen käsityksen ympäristöstä. Tärkeimmät

teknologiat ovat LiDAR, RADAR, konenäkö, GNSS ja inertiamittausjärjestelmät. (Wang ja muut, 2023, s. 2124).



Kuva 2. Autonominen ajojärjestelmän neljä pääosaa (mukaelma lähteestä Kocić ja muut, 2019, s. 1).

Autonominen ajojärjestelmä voidaan luokitella neljään osa-alueeseen kuvan 2 mukaan.

1. Sensoreihin, joita ajoneuvo käyttää ympäristön havainnointiin ja tiedon keräämiseen.
2. Havainnointiin, jossa sensorien keräämä data yhdistetään ja muokataan käyttökelpoiseksi informaatioksi.
3. Suunnitteluun, missä havainnointilohkon tuottaman informaation perusteella suunnitellaan ajoneuvon käyttäytymistä ja reitin suunnittelua.
4. Ohjausmoduuliin, joka vastaa suunnitellun reitin noudattamisesta lähettämällä ohjaukskäskyjä.

2.1 LiDAR

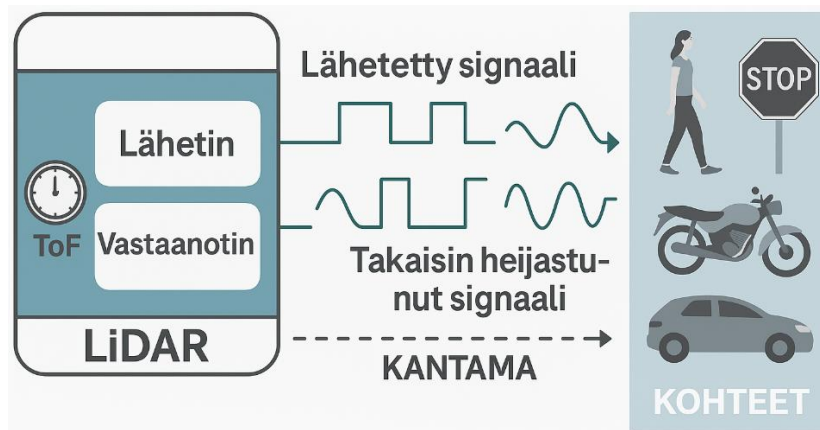
LiDAR-sensoreiden käyttö autoteollisuudessa on suhteellisen uutta, mutta se on jo saanut paljon huomiota autovalmistajilta (Roriz ja muut, 2021, s. 6283). LiDAR tulee

sanoista light detection and ranging, suomeksi valon havaitseminen ja etäisyyden mittaaminen. Nykyinen LiDAR-teknologia perustuu etäisyyden mittaamiseen kohteeseen valopulssin kulkuajan avulla (Roriz ja muut, 2021, s. 6282). Valopulssit määrittävät siis etäisyyden kohteeseen, eli johonkin heijastavaan pintaan, josta valo heijastuu takaisin sensorille. Ajoneuvon tietokone laskee valon kulkeman ajan ja määrittää kohteen ja sensorin välisen etäisyyden. LiDARista on tulossa tärkein sovellus autonomisissa ajoneuvoissa, koska se kykenee tuottamaan reaaliaikaista 3D-tietoa ajoneuvon ympäristöstä jopa 300 metrin etäisyydeltä (Gomes ja muut, 2023, s. 3). Se hyödyntää kohteiden havaitsemisessa aktiivista valaistusta. Sensori itse lähettää valoa ja vastaanottaa siitä heijastuvan signaalin, eikä ole riippuvainen ympäristöstä tulevasta valosta.

LiDAR-teknologialla on keskeinen rooli autonomisessa ajamisessa. Sen kyky luoda reaaliaikaista ja tarkkaa 3D-kuvaa ajoneuvon ympäristöstä on keskeisessä roolissa ajoneuvojen kehityksessä. LiDARin toiminnan periaate on nähtävissä kuvasta 3. Lähettä lähettää lasersignaalin, joka heijastuu kohteesta signaalina vastaanottimelle. Etäisyys kohteeseen R lasketaan kaavan 1 mukaan

$$R = \frac{1}{2}c\tau, \quad (1)$$

missä c on valonnopeus ja τ lasersignaalin edestakainen viive. Viivettä nimitetään myös termillä Time of Flight (ToF), suomeksi lentoajan mittaaminen (Roriz ja muut, 2021, s. 6283). Viive voidaan määrittää moduloimalla lähetetyn valon ominaisuuksia, kuten taajuutta, vaihetta ja intensiteettiä (Roriz ja muut, 2021, s. 6283). Viiveen määrittäminen edellyttää tarkkaa ajan mittaamista, sekä vastaanottimelta modulaatiokuvion tunnistamista. ToF-arvon laskeminen on olennaista, koska ajoneuvon ympäristön 3D-pistepilven muodostaminen vaatii sitä jokaiselle erilliselle pisteelle (Roriz ja muut, 2021, s. 6283).



Kuva 3. LiDAR toimintaperiaate (mukaelma lähteestä Gomez ja muut, 2023, s. 4).

LiDAR-järjestelmän tärkeimpiin toimintaa mittaaviin tekijöihin kuuluvat havaintoetäisyys, lähetysteho, aallonpituus, näkökenttä, tarkkuus, osumatarkkuus, erotuskyky, pulssi-, skannaus- ja kuvataajuus. Havaintoetäisyys riippuu vahvasti lähetystehosta, mutta myös ulkoiset tekijät kuten, valaistus ja kohteen heijastavuus voivat vaikuttaa. Lähetysteho puolestaan vaikuttaa kantamaan ja kohinansietoon. On kuitenkin otettava huomioon silmäturvallisuusmääräykset, joiden myötä teholle on rajoituksia. Autonomiset ajoneuvot käyttävät yleisesti aallonpituuksia 905 nm ja 1550 nm. Näistä 905 nm aallonpituus on edullisempi ratkaisu, mutta se kohtaa ongelmia silmäturvallisuusmääräysten kanssa. Aallonpituuksista 1550 nm on kalliimpi ja herkempi sään vaikutuksille, mutta mahdollistaa suuremmat lähetystehot ja pidemmän kantaman, pitäen kiinni silmäturvallisuudesta. LiDARin näkökenttä (FoV) tarkoittaa suuntaa, mihin signaaleja on mahdollista lähettää. Jotta 3D kuvan tuottamiseksi, on joko oltava sensori, jolla on mahdollista pyöriä ja näin kattaa koko ympäristö tai olla useampia sensoreita, joilla saadaan sama lopputulos. Tarkkuudella tarkoitetaan tulosten yhdenmukaisuutta. Osumatarkkuus taas vertaa arvoa ja todellista sijaintia, ja erotuskyvyllä tarkastellaan kykyä erotella kohteita toisistaan. Pulssi-, skannaus- ja kuvataajuudella kuvataan LiDARin nopeutta ja tarkkuutta tuottaa 3D-kuvaa toimintaympäristöstä. (Roriz ja muut, 2022, s. 6284).

LiDARin hyväksi ominaisuuksiksi luokitellaan sen tuottama reaaliaikainen ja tarkka 3D-kuva toimintaympäristöstä, minkä ansiosta sillä on mahdollista määrittää etäisyyksiä ja muotoja yksityiskohtaisesti. Sen aktiivinen valaistus mahdollistaa ympäristön hahmottamisen myös pimeällä ja sen kyky havaita kohteita kaukaa tekee siitä erityisen hyödyllisen sensorin autonomiselle ajoneuvolle. (Roriz ja muut, 2022, s. 6283).

Teknologian vahvuuksien rinnalla on myös haittapuolia. LiDARin haittapuolia on sen korkean monimutkaisuuden ja korkeat kustannukset (Autocrypt, 2021). Sensorin mahdollistaman tarkan 3D-mallin mallintaminen vaatii merkittäviä laskentatehoja. Tämä altistaa sensorin myös järjestelmähäiriöille ja ohjelmistovirheille. Korkeat kustannukset ovatkin peräisin tarvittavista laskentatehoista ja ohjelmiston monimutkaisuudesta. LiDAR on myös altis sääolosuhteiden vaikutuksille, jotka laskevat sen suorituskykyä huomattavasti (Gomes ja muut, 2023, s. 3). Esimerkiksi rankkasateen heikentävän teknologian suorituskykyä, koska valo absorboituu vahvasti veteen.

2.2 RADAR

RADAR tulee sanoista Radio Detection And Ranging eli suomeksi radion avulla toteutettua havaitsemista ja etäisyyden mittaamista. Se on tutka, joka lähettää radiotaajuuista signaalia ja vastaanottaa takaisin heijastuneen signaalin, jonka avulla mittaa etäisyyksiä ja liikkumista. Autonomisessa ajoneuvossa sen tehtävänä on havaita ympäristössä olevia kohteita. Näitä on esimerkiksi esteet, jalankulkijat ja ajoneuvot. Se on olennainen osa useita ajoavustinjärjestelmiä, kuten mukautuvaa vakionopeudensäädintä, kuolleen kulman valvontaa ja törmäyksen ehkäisyjärjestelmiä (Kocić ja muut, 2018, s. 2). Sensoriteknologioista tutka on vakiintunein ja luotettavin (Roriz ja muut, 2022, s. 6283). Sitä on jo pitkään kehitetty laivojen ja lentokoneiden järjestelmänä, missä sen luotettavuus erilaisissa sää- ja valaistusolosuhteissa on todistettu (Roriz ja muut, 2022, s. 6283). Teknologialla on kyky havaita kohteen nopeus (hyödyntäen Doppler-ilmiötä), etäisyys ja kulma (Roriz ja muut, 2022, s. 6283). RADAR käyttää LiDARin tapaan aktiivista valaistusta, mikä mahdollistaa sen toimintaa erilaisissa valaistusolosuhteissa.

Tutkan toiminta voidaan yksinkertaistaa kahteen pääosaan. Lähettimeen ja vastaanottimeen, jossa lähetin lähettää radioaaltoja kohdistettuun suuntaan. Radioaaltojen kohdatessa jokin merkittävä este, heijastuvat ne vastaanottimelle. Vastaanotin kerää heijastuneen aallot ja analysoi niitä saadakseen tietoa kohteen sijainnista, liikkeen nopeudesta ja suunnasta. Ajoneuvotutkat toimivat taajuusalueilla 24, 60, 77 ja 79 GHz (Yeong ja muut, 2021, s. 11). Korkeimmat taajuusalueet, erityisesti 77–79 GHz, parantavat tarkkuutta etäisyyden, kulman ja nopeuden mittaukseen, kun taas 24 GHz tutka kykenee tuottamaan heikompaa resoluutiota ja ovat siksi väistävää mallia (Yeong ja muut, 2021, s. 11). Tutka voidaan jakaa kantaman mukaan, pitkän-, keski-, lyhyen- ja erittäin lyhyen kantaman tutkiin (Keysight, 2024). Kantamien suuretessa näkökenttä kapenee, kun taas kantamien lyhentyessä näkökenttä laajenee. Kantama alueet vaihtelevat alle 15 m – 250 m (Keysight, 2024). Tutkat ryhmitellään kolmeen eri luokkaan niiden käyttötarkoituksen mukaan (Yeong ja muut, 2021, s. 12).

1. Lyhyen kantaman tutka (SRR), joita käytetään pysäköintiavustukseen ja lähitörmäyksen ehkäisyyn.
2. Keskikantaman tutka (MRR), joka keskittyy kuolleenkulman ja sivutörmäyksen estämiseen.
3. Pitkän kantaman tutka (LRR), jota käytetään mukautuvan vakionopeudensäätimen ja esteiden ennakoivan tunnistuksen toteuttamiseen.

Doppler-ilmiö tarjoaa luotettavan tavan mallintaa kohteen nopeutta. Doppler-ilmiö perustuu liikkuvan kohteen aiheuttamaan taajuuden muutokseen heijastuneessa signaalissa (Yeong ja muut, 2021, s. 11). Lähestyvä kohde aiheuttaa taajuuden kohoamisen, kun taas loittoneva taajuuden laskemisen (Yeong ja muut, 2021, s. 11). Tätä taajuussiirtymää käytetään kohteen nopeuden mittaamiseen. Hyödyntämällä useita sensoreita eri puolelle ajoneuvoa, pystytään toteuttamaan MIMO tekniikkaa, jossa käytetään useita lähetys- ja vastaanottoantenneja. Näin pystytään tunnistamaan kohteen suunta ja kulma tarkasti. MIMO-järjestelmissä käyttävät ortogonaalisia

aaltomuotoja, mikä mahdollistaa paremman kulmaresoluution ja 4D-pistepilven tuottamisen (Giuffrida ja muut, 2023, s. 247). Tällä tekniikalla tutka voi tarkasti arvioida kohteen ominaisuuksia, mistä on tullut nouseva tarkastelun kohde tutkateknologiassa.

Tutkajärjestelmät ovat keskeisimpiä havaintojärjestelmiä autonomisissa ajoneuvoissa niiden kyvyn ansiosta kyetä havainnoimaan ympäristöä sää- ja valaistusolosuhteista riippumatta (Yeong ja muut, 2021, s. 12). Ajoneuvon tutka käyttää sähkömagneettisen spektrin radioaaltoja, mikä mahdollistaa monipuoliset vahvuudet liikenteen havainnointiin. Sen hyödyntämät pidemmät aallonpituudet luovat edellytykset toimia huonossa säässä (Gomes ja muut, 2023, s. 3). Tutkalla on jo vakiintunut ja teknologisesti kehittynyt asema liikkuvien kohteiden havaitsemisessa, esimerkiksi lentokoneiden havaitsemisessa. Sillä voidaan luoda monipuolinen 360 asteen ympäristönhavainnointijärjestelmä sijoittamalla sensoreita ympäri ajoneuvoa, mikä vahvistaa sen kykyä havaita liikkuvia kohteita ja esteitä. Tutka mahdollistaa useita tärkeitä ominaisuuksia, kuten kohteen etäisyyden, kulman ja suhteellisen nopeuden mittauksen tarkasti. Merkittävää on sen kyky suoriutua näistä tehtävistä vaihtelevista olosuhteista huolimatta, tehden siitä luotettavan ja sopeutuvan teknologian ajoneuvon havainnointiin.

Ajoneuvojen tutkat ovat keskeinen osa autonomiaa tavoittelevissa järjestelmissä, mutta ne ovat myös alttiita puutteellisille ominaisuuksille. Tutkasensorin käyttö kohteiden tunnistukseen ei ole ihanteellinen ratkaisu sen heikomman resoluution ja erotuskyvyn takia (Yeong ja muut, 2021, s. 13). Näin ollen tutkasensori ei kykene itsenään suorittamaan kohteiden visuaalista tunnistamista. Lisäksi tutkalla on taipumusta antaa virheellisiä havaintoja (Udacity, 2021). Esimerkiksi 79 GHz:n tutkasensorin saattavat tuottaa virheellisiä havaintoja lyhyellä etäisyydellä tai paikallaan olevista kohteista, joka voi johtaa väärin turvallisuusratkaisuihin (Yeong ja muut, 2021, s. 11).

2.3 Kamerate

Kamerate ovat suosittuja teknologioita ympäristön havaitsemisessa. Ne ovat tärkeä osa autonomista ajoneuvoa, koska ne kykenevät tunnistamaan värejä ja yksityiskohtia. Konkreettisesti nämä voi siis tarkoittaa liikennemerkkejä ja kaistaviivoja. Kamerate ovat yleistyneet, koska ne mahdollistavat tarkimman ratkaisun tuottaa visuaalinen kuva ajoneuvon ympäristöstä (Roriz ja muut, 2022, s. 6283). Yleisesti autonomisissa ajoneuvoissa kameroita sijoitetaan ympäri ajoneuvoa, jolloin on mahdollista tallentaa kattava kuva ympäristöstä ja tukea kohteiden tunnistusta sekä ehkäistä törmäyksiä. Kameran toiminnan voi yksinkertaistaa ympäristöstä saapuvaan valoon, joka ohjautuu linssin läpi kuvakennolle, missä valo muuttuu visuaaliseksi informaatioksi eli kuvaksi (Yeong ja muut, 2021, s. 6). Kuvan luomiseksi käytetään siis passiivisia valon tunnistimia. Kamerate kykenevät havaitsemaan niin paikallaolevia kuin liikkuvia kohteita näköpiiristään. Autonomisissa ajoneuvoissa voidaan käyttää monokulaarisia, binokulaarisia tai molemmat yhdistäviä kamerajärjestelmiä. Autonomiset ajoneuvot käyttävät myös lämpöinfrapunakameroita osana useamman sensortechnologian yhdistelmiä.

Monokulaariset kamerate toimivat yksittäisellä kameralla eli yksittäinen kuvasensori, kun taas binokulaarisessa järjestelmässä on kaksi kuvasensoria (Yeong ja muut, 2021, s. 6). Monokulaarinen järjestelmä ei sisällä sisäänrakennettua syvyystietoa, mikä tekee niiden syvyyshavainnoista puutteellisia (Yeong ja muut, 2021, s. 6). Binokulaarinen järjestelmä toiselta nimeltä stereojärjestelmä, jäljittelee eläinten syvyyshavaintoa käyttämällä kahta eri kamerasensoria luodakseen kuvakulman välistä eroavaisuutta eli dispariteettia, tuottaakseen syvyystietoa (Yeong ja muut, 2021, s. 6). Lämpöinfrapunakamera havaitsee kohteen lämpösäteilyn eli ei perustu näkyvään valoon. Se kykenee toimimaan luotettavasti tilanteissa, joissa näkyvyys on rajallista ja vaihtelevat kontrastit haastavat näkyvyyttä (Choi ja muut, 2021, s. 361). Tällaisiksi olosuhteiksi he luettelevat pimeyden, kirkkauden, sumun ja savun.

Modernit kamerajärjestelmät ovat tärkeä osa autonomisten ajoneuvojen ympäristön havainnointijärjestelmää. Suurin etu muihin sensoriteknologioihin on kameroiden kyky nähdä visuaalisia yksityiskohtia. Kamerat ovat kevytrakenteisia, edullisia ja helposti asennettavia (Harun ja muut, 2022, s. 5). Lisäksi ne tarvitsevat alhaisen virrankulutuksen, mutta tuottavat korkealaatuista ja värikästä kuvaa. Kameran kyvyt mahdollistavat tehokkaan ympäristön tulkinnan erityisesti visuaalisten tunnisteiden havaitsemiseksi.

Kamerateeniikassa on myös rajoitteita. Erilaiset ympäristöolosuhteet, kuten pimeys, kirkkaus, vesisade, lumisade ja sumu heikentävät sen tuottamaa kuvanlaatua ja havainnointikykyä merkittävästi (Yeong ja muut, 2021, s. 8). Kamerajärjestelmällä toteutettu syvyyshavainnointi on monimutkaista ja vaatii stereonäköä tai tehokkaita ohjelmistoja (Yeong ja muut, 2021, s. 8). Lisäksi kameroiden tuottama visuaalinen data vaatii paljon laskentatehoa (Yeong ja muut, 2021, s. 8). Näistä syistä kamera ei yksistään pysty mahdollistamaan autonomisen ajoneuvon täyttä automaatiota, vaan se tarvitsee rinnalle muita kehittyneitä sensoriteknologioita.

2.4 Sensorifuusio

Sensorifuusiolla on ratkaiseva rooli autonomisten ajoneuvojen kehityksessä, minkä vaikutuksesta se kuuluu nopeinten kehittyviin osa-alueisiin ajoneuvoteknologiassa. Autonominen ajaminen edellyttää nykyisin yhdistelmän useita sensoreita (Roriz ja muut, 2022, s. 6283). LiDAR, RADAR ja kamerat ovat yleisimmät teknologiat, joihin autonomisten ajoneuvojen havainnointijärjestelmät tukeutuvat ympäristön ja esteiden havainnoinnissa (Roriz ja muut, 2022, s. 6283). Yhtä oikeaa ratkaisua havaintojärjestelmän kattamiseksi ei ole keksitty, joten autonvalmistajat käyttävät useiden eri teknologioiden yhdistelmiä, jotta ajoneuvot suoriutuisivat niille tarkoitetuista tehtävistä. Millään yksittäisellä sensorilla ei ole suorituskykyä toimia itsenäisesti monipuolisissa olosuhteissa (Roriz ja muut, 2022, s. 6283). Sensorifuusiolla tarkoitetaan useiden sensoreiden tuottaman datan yhdistämistä yhdeksi tarkaksi kokonaisuudeksi, mikä mahdollistaa ympäristön tarkan mallinnuksen ja ajoneuvon turvallisen navigoinnin (Mohammed ja muut, 2020, s. 21–22). Sensorifuusio koostuu

sensorifuusiota toteuttaessa on olennaista. Joissain ympäristöolosuhteissa eri sensoritekniikat saattavat tuottaa päällekkäistä dataa ja toiset taas täydentävää dataa (Mohammed ja muut, 2020, s. 21). Ympäristöolosuhteiden vaikutus sensoreiden suorituskykyyn on siis kriittinen osa-alue sensorifuusion kehitystä. Kuvassa 4 on esitetty ajoneuvo, joka hyödyntää useita eri sensoritekniikoita kattavan ympäristönhavaitsemisen saavuttamiseksi. Ajoneuvossa on käytetty pitkänkantaman tutkaa, lyhyen/keskipitkän kantaman tutkaa, kameraa ja LiDARia. Näillä tekniikoilla ajoneuvolle on mahdollistettu useita ominaisuuksia, jotka mahdollistavat ajoneuvon itsenäistä toimintaa.

Autonomisten ajoneuvojen algoritmiraikatut perustuvat tilastollisiin menetelmiin. Esimerkkejä näistä menetelmistä on Partikkelin- ja Kalmansuodatin menetelmät, joiden avulla sensoreiden tuottama data yhdistetään. Tällä mahdollistetaan tilanne tarkkuutta ja kohteiden seuranta. Koneoppimista ja syväoppimista hyödynnetään ympäristön hahmottamisessa ja objektien tunnistuksessa, esimerkiksi yhdistämällä LiDAR- ja kameradataa. Tässä hyödynnetään tukivektorikoneita (SVM). Epävarmuuden käsittelyssä sovelletaan fuzzy-logiikkaa (Fuzzy Logic) ja todistusteoriaa (Evidence Theory), jotka parantavat sensoridatan integrointia haastavissa tilanteissa. Sensorifuusio ratkaisuissa hyödynnetään usein monia algoritmeja luotettavimman ratkaisun saavuttamiseksi. (Mohammed ja muut, 2022, s. 2–5).

Sensorifuusio parantaa autonomisen ajamisen luotettavuutta paikkaamalla yksittäisten sensorien puutteita useampien sensorien tuottaman tiedon avulla. Sen avulla voidaan tuottaa yksityiskohtaisempaa tietoa kohteiden sijainnista, liikkeistä ja tyypeistä. Näin on mahdollista reagoida muiden tienkäyttäjien aikeisiin. Sensorien yhdistäminen parantaa myös järjestelmän toimintavarmuutta erityisesti vaihtelevissa liikenne- ja sääolosuhteissa. Oikein toteutetulla fuusiolla voidaan tehostaa datankäsittelyä. (Wang ja muut, 2019, s. 2862–2863).

Vaikka sensorifuusio mahdollistaa autonomisten ajoneuvojen edistyksellisen toiminnan, liittyy sen käyttöön vielä merkittäviä teknisiä haasteita. Fuusio tuottaa valtavan määrän dataa, mikä vaatii suuria laskentatehoja ja aiheuttaa järjestelmän kuormittumista (Yeong ja muut, 2021, s. 28). Datan laadun on oltava korkea, sillä heikkolaatuinen data voi aiheuttaa vääristyneitä havaintoja (Yeong ja muut, 2021, s. 28). Haastavuus kerätä dataa kaikista mahdollisista skenaarioista erilaisista ympäristöistä ja olosuhteista sekä yritysten haluttomuudesta tiedon jakamiseen, mikä hidastaa tehokasta tiedon keruuta. Muiksi teknisiksi haasteiksi luettelevat mittausvirheet, datan virheellisyys, ylikouluttamisen ja haasteet datan yhteensopivuuden kanssa. Syväoppimismalleihin perustuvien järjestelmien vaikeaselkoisuus vaikeuttaa toiminnallisen turvallisuuden arviointia (Yeong ja muut, 2021, s. 28). Vaikeat sääolosuhteet, kuten lumi- ja rankkasade, haastavat fuusiossa hyödynnettyjen sensorien toimintaa, minkä vuoksi mahdollisuus manuaaliseen käyttöön ottoon on oltava mahdollista (Yeong ja muut, 2021, s. 28).

3 Talviolosuhteiden vaikutukset sensoreihin

Talviolosuhteet ovat sensorijärjestelmien kannalta suorituskykyä heikentäviä tekijöitä erityisesti kylmyyden, jään, lumen ja valaistusolosuhteiden vaikutuksesta. Nämä lukeutuvat sensoriteknologian suurimpiin haasteisiin autonomisen ajamisen kehityksessä (Maanmittauslaitos). Näiden olosuhteiden seurauksena vasteajat kasvavat, reaaliaikainen mittausdata tarkkuus heikkenee ja luotettavuus laskee. Autonomista ajamista haastaa myös olosuhteiden vaikutus muihin tienkäyttäjiin, joiden toiminta näissä olosuhteissa on entistä arvaamattomampaa (Yeong ja muut, 2021, s. 2). Vaihtelevat talviolosuhteet luovat epävakaita olosuhteita, jossa näkyvyys heikkenee ja ajokäyttäytyminen muuttuu. Tämä asettaa lisähaasteita autonomisen ajamisen päätöksenteolle ja ennakoitavuudelle sekä kasvattavat onnettomuuksien riskiä. Tällaisten olosuhteiden vallitessa sensorien tuottaman datan virheettömyys ja laatu korostuu, jotta on mahdollista vastaanottaa reaaliaikaista dataa muiden tienkäyttäjien liikkeistä. Autonomisten ajoneuvojen luotettava toiminta talviolosuhteissa edellyttää ymmärrystä olosuhteiden vaikutuksista sensoreihin ja kyvykkäitä sensorifuusioita, joilla mahdollistetaan ajoneuvon paras mahdollinen suorituskyky.

3.1 Lumisateen, jään ja huurteen vaikutukset sensoreihin

Talviolosuhteiden fyysisiin vaikutuksiin lukeutuvat esimerkiksi lumisade, jää ja huurre. Nämä tekijät vaikuttavat sensoriteknologioihin eri tavoin riippuen teknologiasta. Fyysiset vaikutukset heikentävät sensorien, erityisesti kameran ja LiDARin, suorituskykyä näkyvyyden heikkenemisen, kuvan resoluution alenemisen, suorituskyvyn laskemisen ja linssien jäätyksen kautta.

Lumisateen, jään ja huurteen vaikutukset kameroihin ja LiDAR-järjestelmiin osoittautuvat näkyvyyden huononemisenä ja havaintodatan vääristymillä. Kameroiden kuvalaatu kärsii huomattavasti, jos lumisade ja huurre peittää linssin, mikä johtaa sumeaan kuvan tuottamiseen (Yeong ja muut, 2021, s. 8). Lumi ja huurre vaikuttavat vahvasti kameroiden toimintaan (Mohammed ja muut, 2020, s. 19).

Lumisimulaattoreiden vähäisyyden vuoksi tutkimuksia lumen vaikutuksista on vain niukasti (Mohammed ja muut, 2020, s. 19). Ajoneuvon ulkopuolelle asennettujen kameroiden linssit voi peittyä jäätyneen kosteuden alle ja huurteet ja vesipisarot voivat häiritä kameran toimintaa (Mohammed ja muut, 2020, s. 19). Myös sisäpuolelle asennetut kamerat kokevat lumisateen haasteen, mikä vaikeuttaa kuvan käsittelyä ja aiheuttaa tunnistusongelmia (Mohammed ja muut, 2020, s. 19). Nämä tekijät haastavat kohteentunnistusta, ympäristön havainnointia ja luokittelualgoritmin luotettavuutta. Erityisesti talviolosuhteissa kameroiden tuottaman kuvadata edellyttää huomattavaa määrää laskentatehoa, mikä voi olla ongelmallista reaaliaikaisen tiedon tuottamiselle.

Fyysiset vaikutukset aiheuttavat LiDAR-järjestelmään ongelmia lasersignaalin etenemisessä ja takaisinheijastumisessa. Tästä syystä pistepilvestä tulee harvempi ja ympäristön mallinnuksen tarkkuus kärsii. Haastavat olosuhteet, kuten lumi ja sumu, laskevat LiDARin suorituskykyä peräti 25 % (Yeong ja muut, 2021, s. 8). Lumihiutaaleet kuormittavat LiDAR järjestelmän optista vastaanotinta ja synnyttävät merkittäviä virhesignaaleja (Mohammed ja muut, 2020, s. 14). Näiden perustelujen pohjalta on tärkeää sisällyttää järjestelmiin mahdollisia lisäratkaisuja, joilla minimoida fyysisiä vaikutuksia.

Tutkien suorituskyky fyysisten vaikutusten vallitessa on huomattavasti luotettavampi teknologia. Niiden käyttämät mikroaallot eivät ole alttiita lumen ja huurteen vaikutuksille (Yeong ja muut, 2021, s. 11). Toisaalta rankkasade ja märkä lumi heikentävät tutkan kantamaa jopa 45–50 % (Mohammed ja muut, 2020, s. 14). Vaikutukset korostuvat alhaisilla taajuuksilla, mikä voi aiheuttaa vääriä havaintoja (Mohammed ja muut, 2020, s. 14). Lumen vesipitoisuus korreloi signaalin vaimenemista (Mohammed ja muut, 2020, s. 14). Vaikka tutkat eivät kykene tuottamaan yhtä laadukasta kuvaa ympäristöstä kuin kamera ja LiDAR, on sen toimintakyvyn varmuus haastavissa olosuhteissa tärkeää teknologia autonomisten ajoneuvojen kehityksessä. Tutkien pinnat ovat kuitenkin alttiita huurteen kertymiselle, mikä voi aiheuttaa vaimennusta ja heijastumista väärään suuntaan.

3.2 Valo-olosuhteiden (pimeys, heijastukset, sumu) vaikutukset

Kameroiden suorituskyky autonomisissa ajoneuvoissa on olennaisesti yhteydessä valo-olosuhteisiin. Heijastukset, pimeys ja sumu heikentävät huomattavasti kameran kykyä tuottaa tarkkaa kuvadataa (Mehra ja muut, 2021, s. 4256). Voimakkaat heijastukset ja kirkkaat heijastukset häiritsevät kameran toimintaa sokaisemalla näkyvyyden. Pimeällä kamerat ympäristössä ei ole luonnonvaloa, jolloin ne ovat riippuvaisia pääosin ajovaloista. Ajovalojen valaistus ja heijastuvat liikennemerkkit tukevat kameroiden havainnointia pimeällä, mutta valon puutteellisuus johtaa kuvanlaadun ja kontrastin laskuun (Wang ja muut, 2020, s. 2851). Vaikutukset haastavat kohteiden tunnistusta ja seuranta. Sumuisissa olosuhteissa ilman pienhiukkaset hajottavat valoa (Mohammed ja muut 2020, s. 18), mikä aiheuttaa näkymän sumentumista ja kuvanlaadun heikkenemistä. Heikkeneminen vaikuttaa negatiivisesti erityisesti näköperusteisiin toimintoihin esimerkiksi kohteiden tunnistukseen ja segmentointiin. Näissä olosuhteissa ainoastaan kamerasensoreita käyttävät järjestelmät olisivat epäluotettavia.

LiDAR on aktiivinen sensori, joka kykenee toimimaan niin yöllä kuin päivällä, sen lähettämien ja vastaanottamien lasersäteiden avulla (Wang ja muut, 2020, s. 2852). Sensori ei ole riippuvainen näkyvästä valosta, joten sen on mahdollista toimia myös pimeällä. Haastavat valo-olosuhteet, kuten sumu ja voimakkaat heijastukset, heikentävät LiDARin tarkkuutta. Erityisesti sumu laskee LiDARin suorituskykyä, koska ilmassa leijuvat pienet hiukkaset johtavat signaalin sirontaan ja vaimenemiseen (Wang ja muut, 2022, s. 2852). Tämä aiheuttaa signaali-kohinasuhteen alenemaa ja havaintoetäisyyden lyhentymistä jopa 25 % (Mohammed ja muut, 2020, s. 14). Tiheässä sumussa ihmishavainto pystytään toteamaan vain 13 metrin päästä (Zhang ja muut, 2022, s. 149). Sumu aiheuttaa myös takaisinsirontaa, mikä johtaa vääristymiin pistepilvessä (Mohammed ja muut, 2020, s. 14). Voimakas valaistus ja heijastuvat pinnat ovat myös ongelmallisia LiDAR sensoreille ja aiheuttaa suorituskyvyn laskua (Mohammed ja muut, 2020, s. 14). Vaikutus on suuri erityisesti pyörivissä LiDAReissa (Zhang ja muut, 2022, s. 149). Vaikutukset ovat lievempiä verraten sumuun, mutta aiheuttavat riskiä havaintovirheille.

Tutkasensortechnologia on luotettava teknologia haastavissa valo- ja sääolosuhteissa. Tutkien sähkömagneettiset aallot eivät ole herkkiä näille olosuhteille, minkä vuoksi ne kykenevät toimimaan sumussa, kirkkaalla ja pimeässä (Yeong ja muut, 2021, s. 11). Millimetriaaltotutka on autonomisissa ajoneuvoissa yleisesti käytetty tutkatyyppi, joka kestää hyvin vaihtelevissa sääolosuhteissa (Wang ja muut, 2022, s. 2849). Tutkien tuottama alhainen resoluutio rajoittaa ajoneuvoille tärkeää tarkempaa havaitsemista (Yeong ja muut, 2021, s. 11). Tutkan kapea näkökenttä jättää tilaa katvealuille, mitä esiintyy erityisesti kaarteissa, mikä taas altistaa törmäyksille (Mohammed ja muut, 2020, s. 6). Vaikka tutka on tehokas sensortechnologia myös vaihtelevissa sääolosuhteissa, on se altis olosuhteiden aiheuttamille signaalihäiriöille (Mohammed ja muut, 2020, s. 6).

4 Analyysi ja johtopäätökset

Tässä luvussa suoritetaan analyysia ja annetaan johtopäätöksiä tutkielmassa annetun tiedon pohjalta ja muihin tutkimuksiin viitaten. Alkuun vertaillaan edellisessä luvussa käytyjä sää- ja valaistusolosuhteiden vaikutuksia sensoreihin. Tästä edetään analysoimaan sensorifuusion etuja havaintokyvyn parantamisessa. Luvun lopussa tarkoituksena kartoittaa sensoriteknologian nykytilannetta ja luoda kokonaiskuvaa oikeanlaisista kehityssuunnista.

4.1 Eri sensoriteknologioiden vertailu talviolosuhteissa

Sensoriteknologioita tarkastellessa talviolosuhteissa, nousee esiin useita eroavaisuuksia teknologioiden välillä. Vertailluista teknologioista tutka (RADAR) osoittautui parhaaksi vaihtoehdoksi säänkestävyydeltään sen pitkän aallonpituuden ansiosta (Vargas ja muut, 2021, s. 18). Tutka mahdollistaa toiminnan useissa talviolosuhteissa, kuten sumussa sekä vesi- ja lumisateessa, mikroaaltotaajuuden partikkelien läpäisykyvyn ansiosta. LiDAR-teknologialla pystytään tarjoamaan tarkkaa kolmiulotteista kuvaa ympäristöstä, mutta sen toiminta on altis säävaihteluille, erityisesti lumelle ja sateelle, jotka heikentävät sen suorituskykyä, aiheuttavat virheellisiä havaintoja ja signaalin vaimenemista (Vargas ja muut, 2021, s. 17). LiDARissa käytetyllä aallonpituudella on vaikutuksia havaintokykyyn. Suurempi aallonpituus 1550 nm mahdollistaa suuremman lähetystehon, mutta sen suorituskyky laskee lumen ja veden vaikutuksesta verraten pienempään 905 nm aallonpituuteen (Zhang ja muut, 2023, s. 168). Lähteistä ilmenee, että 905 nm:n LiDAR kykeni havaitsemaan kaksi kertaa pidemmän havaintomatkan kuin 1550 nm LiDAR 25 mm/h sateessa (Wojtanowski ja muut, 2014). Kameratekniikat tuottavat monipuolista visuaalista kuvaa ympäristöstä, mutta niiden toimintavarmuus laskee suhteellisesti eniten talviolosuhteiden vaikutuksesta (Vargas ja muut, 2021, s. 18). Minkään sensorin tuottaman datan perusteella autonominen ajoneuvo ei pystyisi toimimaan talviolosuhteissa, vaan tarvitsevat avukseen kattavan havaintojärjestelmän. Näistä syistä luotettavan sensorijärjestelmän luominen vaatii sensorifuusiota, jossa täydennetään yksittäisten sensorien puutteita.

Taulukossa 1 vertaillaan sensorien erilaisia kyvykkyyksiä keskenään. Taulukossa - symboli tarkoittaa, ettei sensori suoriudu hyvin tällä osa-alueella. Symboli ~ tarkoittaa, että sensori toimii kohtuullisesti kyseisellä osa-alueella ja symboli + tarkoittaa sensorin kykyä toimia kyseisellä osa-alueella.

Taulukko 1. Sensoreiden ja sensorifuusion teknisten ominaisuuksien vertailu (mukaelma lähteestä Yeong ja muut, 2021, s. 23).

Tekijät	Kamera	LiDAR	Tutka	Fuusio
Kantama	~	~	+	+
Resoluutio	+	~	-	+
Etäisyyden tarkkuus	~	+	+	+
Nopeus	~	-	+	+
Värien havainnointi	+	-	-	+
Objektien tunnistus	~	+	+	+
Objektien luokittelu	+	~	-	+
Kaistan tunnistus	+	-	-	+
Esteen reunojen tunnistus	+	+	-	+
Valaistusolosuhteet	-	+	+	+
Sääolosuhteet	-	~	+	+

Taulukosta 1 käy ilmi tutkan kyvykkyydet monilla osa-alueilla, verrattuna kameraan ja LiDARIin. Sensorifuusion avulla kyettäisiin suoriutumaan jokaisesta osa-alueesta, mutta taulukko ei ota huomioon kaikkia tekijöitä. Taulukosta saa kuitenkin selkeän kuvan miten yksittäisten sensorien puutteellisuuksia on mahdollista paikata fuusion avulla.

4.2 Sensorifuusion merkitys havaintokyvyn parantamisessa

Havaintojärjestelmien suorituskyky ei pysty toimimaan yksittäisten sensorien varassa, koska talviolosuhteet laskevat niiden luotettavuutta. Sensorifuusiota käyttäen on mahdollista täydentää useiden eri sensorien avulla yksittäisten puutteita, jolloin ympäristön havainnointikyky paranee myös talviolosuhteissa (Yeong ja muut, 2021, s.

23). Esimerkki fuusioratkaisuna lähteessä esitetään kameran, LiDARin ja tutkan tietojen yhdistäminen, joka luo edellytykset tarkkaan kohteiden tunnistamiseen ja liikkeen seurantaan (Mohammed ja muut, 2020, s. 23). Taulukosta 1 nähdään, miten fuusioratkaisua hyödyntäen järjestelmä saa käyttöönsä useita osa-alueita. On otettava kuitenkin huomioon, että fuusio ei poista kokonaan yksittäisten sensorien ongelmia, vaan täydentää eri sensoreiden vahvuuksilla toisten heikkouksia.

Aiemmat tutkimukset osoittavat saman fuusioratkaisun suoriutumista lumi-, sade- ja yö olosuhteissa. Fuusioratkaisu suoriutui 99 % tarkkuudella kohteen seurannasta, mutta luokittelutarkkuus laski 74 % tarkkuuteen (Mohammed ja muut, 2020, s. 23). Tämä osoittaa tärkeyden löytää oikeanlaisia fuusioyhdistelmiä, jotka kykenevät toimimaan varmasti kaikissa olosuhteissa. Talviolosuhteiden näkökulmasta Mohammed ja muut (2020, s. 22) kertovat FIR-lämpökameroiden, tutkien ja omasta tutkimuksestani ulkopuolelle jäävästä ultraäänisensorien fuusiosta, jolla luokittelutarkkuutta voisi vahvistaa. Näissä olosuhteissa havainnoinnin parantamiseksi olisi tärkeää testata erilaisia fuusioyhdistelmiä, jotka hyödyntävät lämpökameroita, tutkia ja muita mahdollisia sääolosuhteisiin sopeutuvia sensoriratkaisuja. Toimivien järjestelmien on pystyttävä tunnistamaan ympäristöolosuhteet ja mukauttamaan sensoridatan luotettavuutta tilanteen mukaan (Yeong ja muut, 2021, s. 23).

Sensorifuusio ei ole vielä tarpeeksi kehittynyt ratkaisemaan kaikkia talviolosuhteiden aiheuttamia haasteita ja toimimaan integroidusti muun liikenteen kanssa. Näiksi haasteiksi nousee erityisesti vaikeasti havaittavat kohteet, kuten tien epätasaisuudet, hitaasti liikkuvat jalankulkijat ja eläimet (Mohammed ja muut, 2020, s. 25). Visuaalisiin havaintoihin perustuvien toimintojen kyvyttömyys toimia, esimerkiksi kaistanvaihdossa talviolosuhteissa, korostaa teknologian kehityksen tarpeen (Vargas ja muut, 2021, s. 17). Haasteista huolimatta sensorifuusiolla on keskeinen rooli autonomisten ajoneuvojen havaintojärjestelmän kehittämisessä, jotta olisi mahdollista saavuttaa SAE-tason 4 ja 5 luokan ajoneuvoja. Autonomisen ajoneuvojen SAE-tason 4 on jo saavuttanut Waymo,

jonka ajoneuvojärjestelmä on operoinut yli 20 miljoonaa mailia julkisilla teillä Yhdysvalloissa (Waymo, 2020). Se toimii esimerkkinä sensorifuusion kehitykselle.

4.3 Aiempiin tutkimuksiin perustuvat keskeiset havainnot

Aiempien tutkimuksien pohjalta on mahdollista tunnistaa useita kehityskohteita, joilla autonominen ajaminen voitaisiin tehdä mahdolliseksi. Talviolosuhteissa suoriutumiseksi alla on koottuna näiden tutkimusten pohjalta vaihteita, mitkä edistävät autonomista ajamista.

1. Sensorifuusio ja korkealaatuinen data:

Sensorifuusiolla on mahdollista saada ympäristöstä monipuolisempaa ja luotettavampaa dataa, jonka avulla täydentää yksittäisten sensorien heikkouksia (Yeong ja muut, 2021, s. 28). Talviolosuhteet haastavat sensoreita eri tavoilla, mutta tuomalla autonomiseen ajoneuvoon useita sensorijärjestelmiä ja yhdistämällä niiden kyvykkyksiä pystytään suoriutumaan haastavammissa olosuhteissa. Oikeanlaisten fuusioratkaisujen löytäminen haastaviin olosuhteisiin on olennaista. Esimerkiksi tutkan ja infrapunasensorien säänkestävyyden ja kameran tarkan visuaalisen kuvantamisen yhdistelmällä sensorijärjestelmän luotettavuus kasvaa (Wang ja muut, 2022, s. 2848). Datan synkronoinnilla yhteiseen aikakoordinaatistoon luodaan korkealaatuista ja reaaliaikaista dataa, jonka merkitys on suuri (Wang ja muut, 2020).

2. Älykkäät algoritmit ja syväoppiminen:

Talviolosuhteissa erilaisilla älykkäillä algoritmeilla on mahdollista parantaa näkyvyyttä huonoissa olosuhteissa. Esimerkkeinä dehazing- ja objektientunnistusalgoritmit (Mehran ja muut, 2021, s. 4256). Syväoppimismenetelmillä voi kouluttaa järjestelmää tunnistamaan esteitä haastavissakin tilanteissa (Mehran ja muut, 2021, s. 4256). Vahvistusoppimisella voi kehittää jatkuvasti järjestelmiä reagoimaan erilaisiin tilanteisiin (Yeong ja muut, 2021, s. 29).

3. Laadukas koulutusdata

Toimiminen erilaisissa olosuhteissa vaatii laadukasta ja kattavaa koulutusdataa, jonka avulla kehittää järjestelmien kykyä reagoida haastavissa talviolosuhteissa. Datan tulee kattaa monipuolisesti tilanteita eri valaistus- ja sääolosuhteista, jotta järjestelmien toiminta on mahdollisimman turvallista. (Yeong ja muut, 2021, s. 27–28).

4. Riskienhallinta

Riskienhallinnan tunnistamisessa on olennaista tunnistaa ja tiedottaa vaaratilanteista ajoissa, jotta ihmisellä on mahdollisuus puuttua tilanteeseen (Yeong ja muut, 2021, s. 29). Näin voidaan reagoida sensorivirheisiin.

5 Yhteenveto

Tässä kandidaatintutkielmassa tavoitteena oli analysoida talviolosuhteiden vaikutusta autonomisen ajoneuvon sensoriteknologioihin. Yksi autonomisen ajamisen keskeisimpiä tavoitteita on minimoida inhimillisiä virheitä ja näin vähentää liikenneonnettomuuksia. Tarkastelun kohteena oli yleisimmin käytetyt sensorit, LiDAR, tutka ja kamera. Tutkielmassa analysoitiin erityisesti SAE-tason 4–5 ajoneuvoja ja pohdittiin niiden nykyistä tilannetta. Kirjallisuuskatsausta suoritettiin aiempien kokeellisten ja teoreettisten tutkimuksen pohjalta, ja näin kuvattiin sensorien tämänhetkisiä vahvuuksia ja heikkouksia.

Yksittäisten sensorien suorituskyky todettiin puutteelliseksi havainnointijärjestelmäksi suoriutumaan SAE 4-5 luokan tasolla ilman ihmisen väliintuloa talviolosuhteissa. Ongelmiksi nousi lumen, jään, huurteen, pimeyden, heijastusten ja sumun aiheuttamat haasteet. Kameroiden visuaalinen suorituskyky kärsii huomattavasti näkyvyyden heiketessä ja heijastusten vaikutuksesta. Sumu ja sade puolestaan vaimentavat LiDARin signaalia. RADAR todettiin tutkimuksessa sensoreista säänkestävimmäksi teknologiaksi, mutta sen resoluution ja kohteen luokittelun kyvyttömyys vaatii toimiakseen muita ratkaisuja. Tästä nousi ilmi tarve sensorifuusiolle, useiden eri sensoreiden datan yhdistämiselle. Fuusion avulla pystytään paikkaamaan yksittäisten sensorien havaintojen puutteita ja tuottamaan tarkempaa havaintokykyä.

Sensorifuusion avulla on mahdollista tuottaa paranneltua kokonaiskuvaa ajoneuvon ympäristöstä, korvaamalla yksittäisten sensorien heikkouksia toisen vahvuuksilla. Oikeanlaisten fuusioratkaisujen luominen talviolosuhteiden osalta osoittautui tärkeäksi jatkotutkimuskohteeksi, jotta löydetään mahdollisimman edistyneitä ja luotettavia ratkaisuja kaikkiin olosuhteisiin. Sensorifuusion rooli autonomisen ajamisen mahdollistajana talviolosuhteissa on tutkielman keskeisiä havaintoja. Fuusion kehittäminen edellyttää laajempia jatkotutkimuksia algoritmien ja kattavan testauksen osalta.

Lähteet

- Campbell, S., O'Mahony, N., Krpalcova, L., Riordan, D., Walsh, J. & Murphy, A. (2018). Sensor Technology in Autonomous Vehicles : A review. *Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, 1-4. [10.1109/ISSC.2018.8585340](https://doi.org/10.1109/ISSC.2018.8585340)
- Choi, J. D. & Kim, Y. M. (2021). A Sensor Fusion System with Thermal Infrared Camera and LiDAR for Autonomous Vehicles: Its Calibration and Application, *Twelfth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 361-365. [10.1109/ICUFN49451.2021.9528609](https://doi.org/10.1109/ICUFN49451.2021.9528609)
- Garikapati, D. & Shetiya, S. S. (2024). Autonomous Vehicles: Evolution of Artificial Intelligence and the Current Industry Landscape. *Big Data and Cognitive Computing*, 8(4), 42. <https://doi.org/10.3390/bdcc8040042>
- Giuffrida, L., Masera, G. & Martina, M. (2023). A Survey of Automotive Radar and Lidar Signal Processing and Architectures. *Chips*, 2(4), 243-261. <https://doi.org/10.3390/chips2040015>
- Gomes, T., Matias, D., Campos, A., Cunha, L. & Roriz, R. (2023). A Survey on Ground Segmentation Methods for Automotive LiDAR Sensors. *Sensors*, 23(2), 601. <https://doi.org/10.3390/s23020601>
- Harun, M. H., Abdullah, S. S., Aras, M. S. M. & Bahar, M. B. (2022). Sensor Fusion Technology for Unmanned Autonomous Vehicles (UAV): A Review of Methods and Applications, *IEEE 9th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)*, 1-8. [10.1109/USYS56283.2022.10072667](https://doi.org/10.1109/USYS56283.2022.10072667)
- Ignatious, H. A., El-Sayed, H. & Khan, M. (2022). An overview of sensors in Autonomous Vehicles. *Procedia Computer Science*, 198, 736-741. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.315>
- Jahromi, B. S., Tulabandhula, T. & Cetin, S. (2019). Real-Time Hybrid Multi-Sensor Fusion Framework for Perception in Autonomous Vehicles. *Sensors*, 19(20), 4357. <https://doi.org/10.3390/s19204357>

- Keysight Technologies. (2023, 11. tammikuuta). How automotive radars are advancing safety features. *Keysight Blogs*. Noudettu 25.4.2025. osoitteesta <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/educ/2023/automotive-radar>
- Kocić, J., Jovičić, N. & Drndarević, V. (2018). Sensors and Sensor Fusion in Autonomous Vehicles, *Telecommunications Forum (TELFOR)*, 420-425. [10.1109/TELFOR.2018.8612054](https://doi.org/10.1109/TELFOR.2018.8612054)
- Maanmittauslaitos. (n.d.). *Autonominen ajaminen*. Noudettu 18.5.2025. osoitteesta <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/autonominen-ajaminen>
- Mehra, A., Mandal, M., Narang, P & Chamola, V. (2021). ReViewNet: A Fast and Resource Optimized Network for Enabling Safe Autonomous Driving in Hazy Weather Conditions, in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(7), 4256-4266. [10.1109/TITS.2020.3013099](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3013099)
- Mohammed, A. S., Amamou, A., Ayevide, F. K., Kelouwani, S., Agbossou, K. & Zioui, N. (2020). The Perception System of Intelligent Ground Vehicles in All Weather Conditions: A Systematic Literature Review. *Sensors*, 20(22), 6532. <https://doi.org/10.3390/s20226532>
- Parekh, D., Poddar, N., Rajpurkar, A., Chahal, M., Kumar, N., Joshi, G. P. & Cho, W. (2022). A Review on Autonomous Vehicles: Progress, Methods and Challenges. *Electronics*, 11(14), 2162. <https://doi.org/10.3390/electronics11142162>
- Roriz, R., Cabral, J. & Gomes, T. (2022), Automotive LiDAR Technology: A Survey, in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 6282-6297. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3086804>
- Udacity. (2021, 3. maaliskuuta). How Self-driving Cars Work: Sensor Systems. Noudettu 22.4.2025. osoitteesta <https://www.udacity.com/blog/2021/03/how-self-driving-cars-work-sensor-systems.html>
- Vargas, J., Alsweiss, S., Toker, O., Razdan, R. & Santos, J. (2021). An Overview of Autonomous Vehicles Sensors and Their Vulnerability to Weather Conditions. *Sensors*, 21(16), 5397. <https://doi.org/10.3390/s21165397>

- Wang, Y., Mao, Q67., Zhu, H. Deng, J., Zhang, Y., Ji, J., Li, H, & Zhang, Y. (2023) Multi-Modal 3D Object Detection in Autonomous Driving: A Survey. *Int J Comput Vision*, 131, 2122–2152. <https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1007/s11263-023-01784-z>
- Wang, Z., Wu, Y. & Niu, Q. (2020). Multi-Sensor Fusion in Automated Driving: A Survey, *IEEE Access*, 8, 2847-2868. [10.1109/ACCESS.2019.2962554](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962554)
- Wiggers, K. (2020). Waymo’s Autonomous Cars Have Driven 20 Million Miles on Public Roads, *VentureBeat*, Noudettu 15.5.2025 osoitteesta <https://venturebeat.com/2020/01/06/waymos-autonomous-cars-have-driven-20-million-miles-on-public-roads/>
- Wojtanowski, J., Zygmunt, M., Kaszczuk, M., Mierczyk, Z. & Muzal, M. (2014). Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders’ performance deterioration due to adverse environmental conditions. *Opto-Electronics Review*. 22(3), 183-190. <https://doi.org/10.2478/s11772-014-0190-2>
- 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. <https://doi.org/10.3390/s21062140>
- Zhang, Y., Carballo, A., Yang, H. & Takeda, K. (2023). Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 196, 146-177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.12.021>
- Zhuang, Y., Sun, X., Li, Y., Huai, J., Hua, L., Yang, X., Cao, X., Zhang, P., Cao, Y., Qi, L., Yang, J., El-Bendary, N., El-Sheimy, N., Thompson, J. & Chen, R. (2023). Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion*, 95, 62-90. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.01.025>