

Niklas Salminen

# AUTOMATISOITUVAN AJONEUVOLIIKEN- TEEN JA JALANKULUN YHTEENSOVITTAMI- NEN

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Maaliskuu 2019

## TIIVISTELMÄ

**Niklas Salminen:** Automatisoituvan ajoneuvoliikenteen ja jalankulun yhteensovittaminen/ Coordination of automated vehicle traffic and pedestrian traffic

Tampereen yliopisto

Kandidaatintyö, 28 sivua

Maaliskuu 2019

Tietojohtamisen kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tietojohtaminen

Tarkastaja: TkT Pasi Hellsten

**Avainsanat:** autonominen ajoneuvo, jalankulkija, kommunikointi, turvallisuus

Liikenne automatisoituu ja autonomiset ajoneuvot yleistyvät teknologian kehityksen mukana. Autonomiset ajoneuvot tarjoavat ihmisille uudenlaisia mahdollisuuksia liikkua sekä auttavat yhteiskunnallisella tasolla. Ajoneuvojen kehitys on ollut kiinnostuksen kohteena autonvalmistajien joukossa ja vaihtelevia tapoja ajoneuvojen kulkuun itsenäisesti on esitetty. Tekniikat pohjautuvat kamera- ja sensoriteknologiaan kuin myös tietoliikenneteknologiaan. Kehityksen voidaan odottaa nopeutuvan, kun 5G tulee kaupalliseen käyttöön. Tässä tutkimuksessa koottiin yhteen teknisiä toimia, joilla ajoneuvot kykenevät liikkumaan sekä kommunikoimaan ympäristössään olevien muiden ajoneuvojen ja tienvarsiyksiköiden kanssa.

Jalankulkijoiden roolia liikenteessä lähdettiin tarkastelemaan ottamalla selvää heidän liikennekäyttäytymisestään. Jokainen jalankulkija on ainutlaatuinen ja hänen käyttäytymiseensä vaikuttaa monia tekijöitä eri tavoin. Omalla käyttäytymisellään jalankulkija voi tehdä omasta toiminnastaan turvallisempaa. Tutkimuksessa kerättiin liikennekäyttäytymisen lisäksi myös tilastolukuja eri alueiden välillä jalankulkijoiden kuolemista. Lapsia ja nuoria huomioitiin erillään muista ryhmistä heidän riskialttiutensa takia.

Lopuksi etsittiin ratkaisuja jalankulkijoiden ja ajoneuvojen väliseen kommunikointiin. Tuloksena oli kaksi tapaa kommunikoida. On näkyvien eleiden avulla toimivaa vuorovaikutusta tai teknisten laitteiden avulla toimivaa havainnointia. Näkyvien eleiden kohdalla oli monia variaatioita, mutta yhteistä yleismallia ei ole, vaan tutkimuksissa käytetyt tavat erosivat suurelta osin toisistaan. Teknisillä laitteilla tarkoitetaan esimerkiksi ajoneuvossa olevia kameroita ja sensoreita tai jalankulkijan mukana olevaa älylaitetta. Kameran ja sensorit ovat pääroolissa jalankulkijoiden havainnoinnissa, mutta tutkimusta tehdessä löydettiin myös ratkaisuja, joissa hyödynnetään jalankulkijan omia laitteita.

## ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopistolle tietojohdamisen koulutusohjelmassa keväällä 2019 uuden yliopistomuutoksen jälkeen. Aiheeksi valikoitui liikenteeseen liittyvä kokonaisuus oman mielenkiinnon kohdistuessa siihen suuntaan. Valinta perustui myös aiheen ajankohtaisuuteen ja merkityksellisyyteen.

Haluan kiittää kandidaatintyön ohjaajaa Pasi Hellsteniä antamistaan neuvoistaan ja palautteistaan kuin myös Markus Pöllästä hyvistä vinkeistä ja avusta. Myös muut työnteon aikana kommentteja ja kehitysehdotuksia antaneet henkilöt ovat olleet avuksi. Kiitokset myös työn etenemisessä ja viimeistelyssä mukana olleille henkilöille.

Tampereella, 12.3.2019

Niklas Salminen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Aiheen tausta .....	1
1.2	Tutkimusongelma ja rajaus .....	3
1.3	Tutkimuksen rakenne .....	4
2.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO .....	5
2.1	Tutkimusmenetelmät .....	5
2.2	Aineisto tutkimuksessa .....	6
3.	AUTONOMISET AJONEUVOT .....	7
3.1	Liikkuminen .....	8
3.2	Kommunikointi.....	10
4.	JALANKULKIJAT LIIKENTEESSÄ .....	12
4.1	Lapset ja nuoret .....	14
4.2	Eroavuuksia tilastoissa.....	15
5.	AUTONOMISET AJONEUVOT JA JALANKULKIJAT LIIKENTEESSÄ .....	18
5.1	Vuorovaikutus .....	18
5.2	Teknologia.....	20
6.	YHTEENVETO.....	22
6.1	Johtopäätökset .....	22
6.2	Tulosten arviointi.....	23
6.3	Jatkotutkimusten tarve .....	23
	LÄHTEET .....	24

## TERMIT JA KÄSITTEISTÖ

**Autonominen** tarkoittaa itsestään kulkeutuvaa tai ohjautuvaa. (Kielitoimisto)

**Jalankulkija** on kävelyteillä ja suojateillä kulkeva henkilö, joka kulkee joko kävellen, potkulaudalla, rullalaudalla, rullaluistimilla, pyörätuolilla tai rollaattorilla. (Liikenneturva)

**LiDAR** (Light Detection and Ranging) on laserpohjainen prosessi, joka havainnoi lähiympäristössään olevia kohteita. (Seif & Hu 2016)

**Täysin automatisoitunut ajoneuvo** (FAV) on tason 5 ajoneuvo, joka toimii itsenäisesti ohjelmiston ja laitteiston avulla, ihmisohjauksen sijasta, ja suorittaa kaikki turvallisuudelle kriittiset ajotoiminnot koko ajomatkalta. (Deb 2018)

**V2P** (Vehicle-to-Pedestrian) -kommunikointi on sateenkaaritermi, joka sisältää kommunikoinnin ajoneuvojen ja kaikkien haavoittuvaisten tienkäyttäjien kesken. (Sewalkar & Seitz 2019)

**V2V** (Vehicle-to-Vehicle) -kommunikointi on ajoneuvojen välistä kommunikointia, minkä tarkoitus on parantaa liikenteen turvallisuutta. (Tullsen et al. 2018)

**V2X** (Vehicle-to-Everything) -kommunikointi helpottaa tiedonjakoa ajoneuvon ja infrastruktuurin, jalankulkijoiden, muiden laitteiden tai minkä tahansa muun sellaisen yksikön välillä, joka voi vaikuttaa ajoneuvoon. (Bian et al. 2017)

**Älyliikenne** on liikennejärjestelmä, joka mahdollistaa parannellun turvallisuuden, korkeamman tuottavuuden ja tehokkuuden verkkoinfrastruktuurin avulla. (Yu et al. 2017)

**5G** on uuden sukupolven langattoman kommunikoinnin teknologia. Se tulee mahdollistamaan parannetun mobiililaajakaistan, massiivisen laitteiden välisen kommunikoinnin sekä äärimmäisen luotettavan ja vähäviiveisen kommunikoinnin. Näistä jälkimmäinen mahdollistaa yhdistyneet ajoneuvot, jotka reagoivat reaaliajassa estääkseen vahingot. (Vannithamby & Talwar 2016)

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Aiheen tausta

Automatisoituvien ajoneuvojen tarkoitus on tehdä ihmisten elämä helpommaksi. Kiinnostus autonomisiin ajoneuvoihin on kasvanut viime aikoina, ja varsinkin suuren kansan tietoisuuteen se on tullut Teslan, ja sen vahvan markkinoinnin, sekä uutistoimistojen julkaisujen myötä. Ajoneuvot ilman kuljettajaa tulevat muuttamaan liikennejärjestelmät täysin ja tarjoavat entistä enemmän palveluita ihmisten käytettäväksi. Vaikutukset ovat myös yhteiskunnallisella tasolla, kun ihmiset voivat käyttää ajamiseen menevän ajan työntekoon, tai kun liikenteestä syntyvät päästöt vähenevät ajoneuvojen ekologisemman ajamisen vuoksi.

Teknologian kehitys on johtanut monien koneiden automatisoitumiseen, mikä on johtanut niin uusien työpaikkojen syntyyn kuin häviämiseenkin. Tämä sama kehitys on ollut myös nähtävissä autoilun alalla, jossa pyrkimys on kehittää täysin automatisoituneita ajoneuvoja (FAV, fully autonomous vehicle). Automatisoituneita ajoneuvoja on jo olemassa erilaisissa työpisteissä, kuten satamissa, joissa nosturit kulkevat niille ennalta määrättyjä reittejä pitkin ja vievät merikontteja paikasta toiseen. Tässä työssä kuitenkin käsitellään liikennettä, joka tapahtuu kaupunkiympäristöissä, joissa jalankulkijoita ja ajoneuvoja on enemmän.

Ajoneuvojen automaattisen toiminnan takana on korkealle kehittynyt tietotekniikka, kuvion tunnistus sekä älykäs kontrolliteknologia (Jianfeng Z 2018). Teknologioiden kehityksen myötä myös liikennejärjestelmät muuttuvat. Yu et al. (2017) mukaan älykkäiden liikennejärjestelmien yhtenä mahdollistavana teknologiana on 5G yhdistettynä tekoälyalgoritmeihin. Yksi 5G:n keskeisimmistä autoalan tarkoituksista on autonomiset ajoneuvot, jotka ovat älyliikenteen tulevaisuus. (Yu et al. 2017)

Jotkut valmistajat ovat tuoneet autonomisia ajoneuvojaan kadulle testattavaksi tai jopa kuluttajille tarjolle, kuten Tesla. Tesla mainitsee omilla sivuillaan, että heillä on asennettuna jokaiseen Tesla-ajoneuvoon täydelliseen itsestään ajamiseen tarvittava laitteisto (Tesla n.d.). Tämä on johtanut joidenkin ihmisten huolimattomuuteen ajoneuvojen kanssa, kun on luotettu autopilottiin, mikä on johtanut tapaturmiin ajoneuvojen ja jalankulkijoiden kanssa. Näistä onnettomuuksista on voinut nähdä uutisia muutaman vuoden ajan ja ne ovatkin herättäneet keskustelua autonomisten ajoneuvojen turvallisuudesta. Googlen autonomisten ajoneuvojen onnettomuuksista tehdyn tutkimuksen (Teoh & Kidd 2017) mukaan Googlen ajoneuvot olivat, verrattuna ihmisajajiin, yliedustettuja poliisiraporteista saaduissa tilastoissa, joissa ajoneuvo oli peräänajon kohteena. Vastaa-

vasti Googlen ajoneuvot olivat aliedustettuja tilastoissa, joissa ajoneuvo oli peräänajajana. (Teoh & Kidd 2017) Tästä voidaan päätellä, että suurimmassa osassa autonomisten ajoneuvojen onnettomuuksissa ihmisajaja on ollut syyllinen tapahtumalle.

Tämän kirjallisuustutkimuksen aiheeseen liittyvä trendi, joka autoilun kehitykseen liittyy, on automatisoituvat ajoneuvot. Tällä hetkellä itseohjautuvien autojen kehitys on tasolla, jossa henkilön pitää olla valppaana ja valmiina reagoimaan tapahtumiin, kun auto on liikkeessä. Taulukosta 1 nähdään SAE:n (Society of Automotive Engineers) ehdotus eri automaation tasoille, eli tällä hetkellä ollaan tasolla 3. Kehittyneimmissä kaupallisessa käytössä olevissa ajoneuvoissa automaation taso on 2. Kyriakidis et al. (2014) tekemässä tutkimuksessa, 70 % vastaajista oli sitä mieltä, että autonomiset ajoneuvot saavuttavat 50 %:n markkinaosuuden vuoteen 2050 mennessä (König & Neumayr 2017 mukaan).

**Taulukko 1.** SAE:n ehdotetut tasot ajoneuvojen automaatiolle (Deb, 2018).

SAE tasot ajoneuvon automaatiolle

Kuvaus

<i>Taso 0</i>	Ei automaatiota	Ihminen tekee kaiken ohjauksen
<i>Taso 1</i>	Ajoapu	Ihminen suorittaa ajotoimintoja yhdellä aputoiminnolla joko ohjaukseen tai kiihdytykseen/hidastukseen liittyen.
<i>Taso 2</i>	Osittainen automaatio	Ihminen suorittaa ajotoimintoja yhden tai useamman aputoiminnon, molempien ohjauksen ja kiihdytyksen/hidastuksen, avulla.
<i>Taso 3</i>	Ehdollinen automaatio	Automaattiohjaus suorittaa sovittuja ohjauksia, mutta ihmisen pitää olla valmiina ottamaan ohjat omiin käsiinsä.
<i>Taso 4</i>	Korkea automaatio	Automaattiohjaus suorittaa ajotoimintoja, eikä ihmisen väliintulo ohjaukseen ole välttämätöntä. Toiminnot rajautuvat vain tiettyihin ympäristöihin ja olosuhteisiin.
<i>Taso 5</i>	Täysi automaatio	Automaattiohjaus suorittaa ajotoimintoja kaikissa mahdollisissa ympäristöissä ja olosuhteissa, joissa ihmiskuski toimii.

Jalankulkijat ovat suojattomimpia uhreja tieliikenneonnettomuuksissa (Haghigi et al. 2018). Ottaen huomioon viime aikoina tapahtuneet ihmisvahingot automatisoituneiden ajoneuvojen takia, automatisoituvien ajoneuvojen ja jalankulun yhteensovittaminen on tärkeä osa kansalaisten turvallisuutta. Maailman terveysjärjestö WHO:n mukaan (2018) 23 % kaikista tieliikenneonnettomuuksista johtuneista kuolemista on jalankulkijoita. Toimivien toimintojen ja hyvien infrastruktuurisien ratkaisujen kautta voidaan yhteensovitus tehdä turvallisiksi, mutta myös ekologiseksi, kun ajoneuvot automaattisesti toimivat vähäisimmän kulutuksen mukaan.

Autonomiselle ajoneuvolle ajaminen turvallisesti, tehokkaasti ja sulavasti jalankulkijoiden joukossa on erittäin tärkeä ominaisuus. Alueita, joissa tämä korostuu, ovat mm. lentokenttäterminaalit, ostoskeskukset tai sairaalakompleksit. Ajaakseen onnistuneesti väkijoukossa, autonomisen ajoneuvon täytyy ymmärtää jalankulkijoiden käyttäytymistä. Käyttäytyminen perustuu kahteen ominaisuuteen, tarkoitukseen ja vuorovaikutukseen, eli määränpäähän ja toimintaan muun ympäristön kanssa. Tarkan jalankulkijoiden liikemallin integroiminen suunnittelualgoritmiin mahdollistaa autonomisen ajamisen jalankulkijoiden joukossa, mutta ongelmana on ihmisten ainutlaatuisuus, jolloin jokaisen ihmisen käyttäytymismalli on erilainen. Syinä erilaiseen käyttäytymiseen ovat ikä, sukupuoli, alttius riskille jne. (Luo et al. 2018)

## 1.2 Tutkimusongelma ja rajaus

Tässä työssä tutkitaan, millä keinoilla automatisoituva ajoneuvoliikenne sovitetaan jalankulkijoiden kanssa yhteen. Tämä on tutkimuksen päätutkimuskysymyksenä. Työ jakautuu osiin, joissa tarkastellaan autonomisten ajoneuvojen toimintaa tarkemmin sekä jalankulkua ja sen infrastruktuuria. Työn eri osien on tarkoitus vastata alatutkimuskysymyksiin, jotka ovat:

- Miten autonomisten ajoneuvojen kommunikointi toimii?
- Mikä on jalankulkijan rooli liikenteessä ja miten hän toimii?
- Millaisia haasteita liittyy jalankulkijan ja ajoneuvon väliseen kommunikointiin?

Tutkimusongelmana on, miten autonomisten ajoneuvojen sekä ihmisten kommunikointi saadaan toimimaan liikenteessä. Autonomisten ajoneuvojen keskinäisen kommunikoinnin ratkaiseminen on kiinni tietoliikennetekniikassa, jolloin siihen voidaan vaikuttaa helposti erilaisilla teknologisilla ratkaisuilla. Ihmisten ja koneiden välisessä kommunikoinnissa voidaan käyttää puhetta ja erilaisia eleitä apuna. Liikenteessä olevien ajoneuvojen ja jalankulkijoiden välillä puheellinen kommunikointi on vaikeampaa ja liikkeiden analysoiminen voi tuottaa ajoneuvolle vaikeuksia ennustaa jalankulkijan liikkeitä.

Ongelma on lähtökohtaisesti rajattu tiheästi asuttuihin alueisiin, joissa liikenne ja jalankulku ovat vuorovaikutuksessa jatkuvasti. Tutkimuksissa ja teorioissa ei kuitenkaan oteta kantaa, millaisessa tilanteessa vuorovaikutuksen toimivuutta tarkastellaan. Ajo-



neuvojen testit suoritetaan suurimmalta osin suljetuilla alueilla, joiden ympäristö on ajoneuvolle optimaalinen. Autonomisten ajoneuvojen kohdalla toimintojen testaus ja validointi ovat haaste, jolle ratkaisuna ovat virtuaaliset kehittämismenetelmät ja välineet (Sippl et al. 2018). Tutkimuksessa ei oteta huomioon mahdollisia tietoturva-uhkia, joita aiheeseen liittyy, vaan keskitytään ajoneuvojen ja jalankulkijoiden vuorovaikutukseen keskenään.

### **1.3 Tutkimuksen rakenne**

Tämä työ tulee rakentumaan ensin autonomisten ajoneuvojen toimintaan, miten ne liikkuvat ja kommunikoivat liikenteessä. Tämän jälkeen tarkastellaan vuorostaan jalankulkijoiden toimintaa liikenteessä sekä tarkemmin erästä riskiryhmää ja eroavaisuuksia eri ominaisuuksien välillä. Näiden jälkeen laitetaan aiheet yhteen ja tarkastellaan vaihtoehtoja, miten autonomiset ajoneuvot ja jalankulkijat voidaan sovittaa toimimaan liikenteessä.

Lopuksi tehdään omat johtopäätökset aiheesta ja mietitään tutkimuksen onnistumista. Lisäksi tarkastellaan myös mahdollisia jatkotutkimusmahdollisuuksia.

## 2. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

### 2.1 Tutkimusmenetelmät

Tämän kandidaatintyön tutkimusmenetelmä on kirjallisuuskatsaus. Tutkimus toteutettiin etsimällä aiheeseen liittyviä tieteellisiä julkaisuja, joiden avulla aihetta käsiteltiin ja luotiin yhteneväinen kokonaisuus, joka syntyi vertailemalla eri lähteiden sisältöjä toisiinsa ja tekemällä johtopäätöksiä näiden avulla.

Tutkimusaineistoa etsittiin kirjaston palveluiden avulla. Käytössä olivat Andor, Scopus, SpringerLink, IEEE Xplore, sekä Web of Science. Näistä aineistoista etsittiin aiheeseen sopivia julkaisuja. Myös yliopiston henkilökunnalta saatuja artikkeleita käytettiin lähteinä. Lähteitä etsiessä on pyritty rajaamaan tuloksia niiden saatavuuden avulla sekä sillä perusteella, että tulokset ovat tieteellisiä ja vertaisarvioituja tekstejä. Pääasiallisena hakukoneena käytettiin Andoria.

Muutamia käytettyjä hakulausekkeita ja niiden tulosmääriä on esitelty alla taulukossa 2. Hakulausekkeet mukautuivat sitä mukaan, mitä tietoa lähti etsimään. Esitetyt tulokset ovat Andor-hakukoneen tuloksia ja ne ovat rajattuina, että kokoteksti on saatavilla ja ne ovat tieteellisiä ja vertaisarvioituja.

*Taulukko 2. Hakusanoja ja tulosten määrät Andor-hakukoneella.*

<b>5G AND "intelligent transport*" AND autonomous AND safety</b>	44
<b>intelligent transport systems AND pedestrian AND safety</b>	3 060
<b>pedestrian behaviour AND traffic AND safety AND finland</b>	941
<b>automated driving AND application</b>	55 534
<b>autonomous AND vehicular system</b>	6 502

Aineistoa kerättiin osuvien otsikoiden avulla, minkä jälkeen aineisojen tiivistelmät luettiin läpi ja karsittiin aiheeseen liittymättömät aineistot pois. Läpi päässeet aineistot silmäiltiin kokonaisuudessaan läpi ja karsittiin pois aineistot, joissa ei ollut paljon sisältöä työtä varten. Lopputa aineistoja käytiin uudestaan tarkasti läpi ja käytettiin tutkimuksessa apuna.

## 2.2 Aineisto tutkimuksessa

Ohessa esiteltyinä muutamat lähteet, joita tutkimuksessa käytettiin.

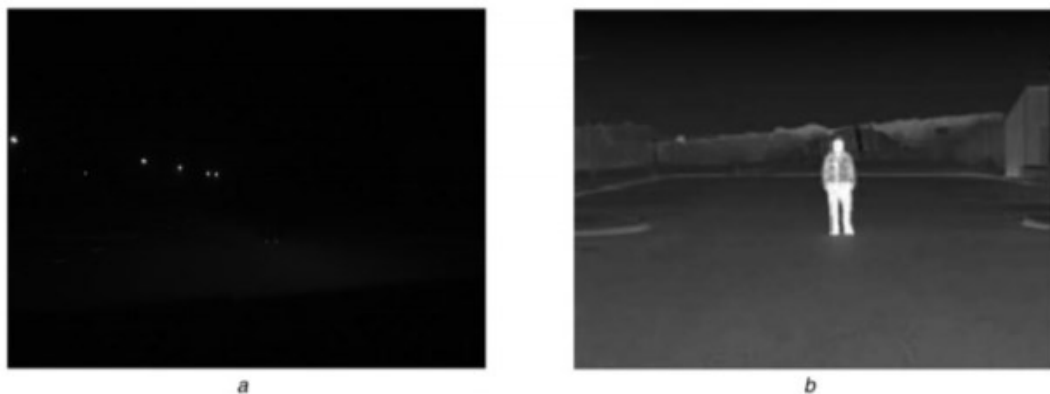
*Taulukko 3. Keskeisimpiä työssä käytettyjä lähteitä.*

Otsikko	Tekijä(t)	Sisältö
Autonomous Driving in the iCity—HD Maps as a Key Challenge of the Automotive Industry	Seif, H. & Hu, X. 2016	Käsittelee tärkeitä teknologioita automaattiselle ajamiselle tulevaisuudessa. Aiheina ajoneuvon sisäinen tietojenkäsittely ja datan hallinto, tienvarsi-infrastruktuuri, ja pilviratkaisut. Keskeisessä roolissa teräväpiirtokuvien rooli ympäristön kartoittamisessa.
Automated Vehicles and Pedestrian Safety: Exploring the Promise and Limits of Pedestrian Detection	Combs, T., Sandt, L., Clamann, M. & McDonald, N. 2019	Tutkimus eri teknologioiden tarkkuudesta jalankulkijoiden huomaamisessa.
Stereo regions-of-interest selection for pedestrian protection: A survey	Llorca, D., Sotelo, M., Hellín, A., Orellana, A., Gavilán, M., Daza, I. & Lorente, A. 2012	Katsaus stereopohjaisen kiinnostuksen alueen toimintaa jalankulkijoiden havainnoinnissa. Lisäksi käydään läpi 3D-kuvan mallinnusta ja ratkaisuja tien epätasaisuuden aiheuttamille haasteille.
Pedestrian Interaction with Vehicles: Roles of Explicit and Implicit Communication	Dey, D. & Terken, J. 2017	Tutkimus, jonka tarkoituksena on tunnistaa eleiden ja katsekontaktin tärkeys kuljettajien ja jalankulkijoiden välisessä kommunikoinnissa.
Autonomous Vehicles that Interact with Pedestrians: A Survey of Theory and Practice	Rasouli, A. & Tsotsos, J. K. 2018	Katsaus jalankulkijoiden vuorovaikutuksesta ajoneuvojen kanssa tällä hetkellä ja autonomisten ajoneuvojen kanssa. Tutkitaan käytännön ratkaisumalleja, joilla kommunikointi toimisi.

### 3. AUTONOMISET AJONEUVOT

Liikenneonnettomuudet ovat yksi johtavista syistä kuolemiin maailmanlaajuisesti. Ne ovat kaikissa ikäluokissa 11. yleisin syy kuolemaan. 5–29-vuotiaiden keskuudessa liikenneonnettomuudet ovat toiseksi yleisin syy, heti HIV:n tai AIDSin jälkeen. 30–44-vuotiailla vain HIV tai AIDS ja tuberkuloosi ovat liikenneonnettomuuksista johtuneiden kuolemien edellä. Yhteistoiminnallisilla turvalaitteilla, jotka perustuvat ajoneuvojen väliseen kommunikointiin, on potentiaalia vähentää radikaalisti liikenneonnettomuuksien määrää. (Alexander et al. 2011) Llorca et al. (2012) toteavat näköperustaisen, älykkäällä ajoneuvosovelluksilla toimivan, jalankulkijahavainnoinnin olevan hyvin tärkeä ja aktiivinen tutkimuskohde, koska se tuo oleellista hyötyä ajoneuvojen ja jalankulkijoiden välillä tapahtuvien onnettomuuksien vähentämiseen.

Yli puolet Euroopan liikenneonnettomuuksista tapahtuu pimeiden tuntien aikana, vaikka liikenne yöaikaan on harvimmillaan (Hurney et al. 2015). ADAS (Advanced Driver Assistant Systems) on kasvanut valtavasti autoalalla. Merkittävin kasvu on kuitenkin vasta tulossa, kun siirrytään entistä automatisoidumpaan suuntaan. Tällä hetkellä olevia kuljettajan apuvälineitä ovat esim. vakionopeudensäädin, pysäköinninavustin ja kais-tanpitoavustin. (Fickenscher et al. 2018) ADAS on kehitetty myös havaitsemaan jalankulkijoita. Siihen on aloitettu kehittämään infrapunateknologiaa, joka auttaisi havaitsemaan jalankulkijoita pimeydessä. (Hurney et al. 2015) Kuvassa 1 on esitettyä ero näkyvän spektrin avulla toimivan sensorin ja infrapunasensorin välillä.



*Kuva 1. A) näkyvän spektrin sensori ja b) infrapunasensori (Hurney et al. 2015 s. 825)*

Vertailemalla kuvan 1 kuvia toisiinsa, voidaan nähdä, kuinka paljon paremmin infrapunasensorilla varustettu kamera pärjää hämärissä olosuhteissa verrattuna normaaliin näkyvän valon spektrin alueella toimivaan kameraan.

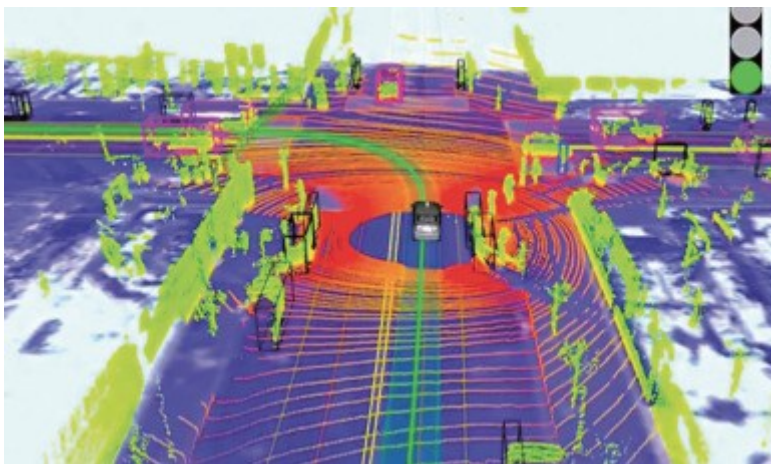
Eräs avainteknologia autonomiselle ajamiselle on reaaliaikainen teräväpiirtoinen kartta. Tämä teknologia kattaa kolme autonomisen ajamisen ongelmakohtaa (Seif & Hu 2016):

1. ajoneuvon kyky paikantaa sijaintinsa korkealla tarkkuudella verrattuna ympäristöönsä
2. ajoneuvon kyky ratkaista ongelma, joka liittyy tapahtumien, jotka tapahtuvat ajoneuvon sensoreiden kantaman ulkopuolella, tunnistamiseen ja niihin reagoimiseen
3. ajoneuvon kyky ajaa matkustajien ja muiden tienkäyttäjien toiveiden mukaan

Nykyajan karttapalveluilla, joita ajoneuvoissa on, ei voida toimia autonomisesti. Kartat ovat liian huonolaatuisia, ja niitä on käytetty lähinnä navigointitarkoituksiin. Lisäksi nykyiset karttapalvelut eivät tarjoa tarpeeksi reaaliaikaista tietoa ajoneuville, jotta se voisi huomioida muuta liikennettä ja ympärillä olevaa infrastruktuuria toimiakseen autonomisesti. (Seif & Hu 2016) Karttapalveluiden kehitys on selkeä kehityskohde autonomisten ajoneuvojen toiminnan toimivuudelle.

### 3.1 Liikkuminen

Täysin automatisoitu ajaminen vaatii älykkään hallintajärjestelmän, joka koostuu erityyppisiä tehokkaista sensoreista ja robottitekniikoista (Seif & Hu 2016). Bian et al. (2018) muistuttavat, että autonomisen ajajärjestelmän toiminta seuraa näitä askelia: kerää ympäröiviä signaaleja, ottaa kuvia ja/tai videoita ympäristöstä, ja laskee sen oikean liikeraidan. Robottiauto vaatii laajalta alalta sensoritekniikkaa, kuten kaikuluotainlaitteita, stereokameroita, lasereita, tutkia ja C2X (Car-to-Everything) -kommunikaatiota. Kaikilla teknologioilla on oma tarkoituksensa ja korvaavuus ihmisaisteista. Keskeisin aisti robottiautolle on LiDAR (Light detection and ranging), joka aistii lähiympäristössä olevia kohteita laserin avulla. (Seif & Hu 2016) Kuvassa 2 on esitelty LiDAR:n toimintaa.



*Kuva 2. LiDAR:n toiminta risteysalueella. (Seif & Hu 2016 s. 160)*

LiDAR-systeemin tärkeys tulee sen tarkkuudesta, jonka ylettyvyys on 100 m:iin saakka, ja kyvystä pyöriä 360°. LiDAR-systeemi antaa korkearesoluutioista kuvaa ajoneuvon ympäristöstä antamalla kaksi miljoonaa lukemaa per sekunti. (Seif & Hu 2016) LiDAR käyttää skannaavia lasereita mitataksaan etäisyyksiä kohteista, millä se rakentaa itselleen kolmiulotteisen kuvan, kuten kuvassa 2 näkyy. LiDAR-systeemi kykenee toimimaan vähäisessä valossa tai ilman valoa. LiDAR-systeemin ongelmana kuitenkin on sen luottamattomuus epäsuotuisalla kelillä tai kun tien pinta on märkä tai heijastava. LiDAR-systeemin toimintatehokkuuden potentiaali rajoittuu keskipitkiin ja pitkiin havaintoihin. (Combs et al. 2019) Kuten kuvasta 2 nähdään, niin LiDAR ei havainnoi lähiympäristöään. Combs et al. (2019) kertovat syynä olevan anturin sijoittelu ajoneuvon katolle, jolloin ajoneuvon kori estää havainnoinnin ajoneuvon lähiympäristöön. Yksi tekninen ratkaisu itsessään ei siis saa autonomisten ajoneuvojen toimintaa täydelliseksi, vaan tarvitaan myös muita teknisiä menetelmiä täydentämään sitä.

Toinen tärkeä ydinaisti robottiautolle on GPS (Global Positioning System), jonka avulla voidaan karkeasti paikantaa ajoneuvon sijainti (Seif & Hu 2016). Myös muitakin paikannusjärjestelmiä on olemassa kuten Galileo, GLONASS ja BeiDou. Seif & Hun (2016) mukaan paikannus on kuitenkin autonomiselle ajamiselle liian epätarkka, sillä itsessään GPS voi paikantaa signaalin parhaimmillaan viiden metrin sisään. ”Tunnustelijat”, eli tutka, kaikuluotain ja stereokamerat, havainnoivat ympäristöään, mikä tuo robottiautolle sen tarvitsemat tiedot ympäristöstään. Näiden kahden tekniikan fuusio mahdollistaa ajoneuvon paikantamisen 10 senttimetrin alueen sisään. Kun tähän yhdistetään V2V (Vehicle-to-Vehicle) -kommunikointi sekä V2I (Vehicle-to-Infrastructure) -kommunikointi, saa ajoneuvo tietoa yhden kilometrin alueelta. (Seif & Hu 2016) Myös Urmson et al. (2008) kertovat vuonna 2007 DARPA-kilpailun voittaneen ajoneuvon, nimeltään Boss, toimivan GPS:n sekä kaupallisesti saatavilla olevan paikannuksen ennustesysteemin ja selityksin varusteltujen tiemerkinntöjen mittausten yhteistyönä. Jo tuolloin oli LiDAR-systeemi käytössä ajoneuvossa (Urmson et al. 2008), joten uudesta innovaatiosta ei ole kyse. LiDAR:in merkitys ympäristön havainnoinnissa ollaan huomattu jo varhaisessa vaiheessa, mikä on johtanut tämän teknologian tehokkuuden kehittämiseen ja käyttöön autonomisissa ajoneuvoissa.

Lupaava strategia autonomiselle ajamiselle on samanaikaisen paikantamisen ja kartoittamisen (SLAM, Simultaneous Localisation and Mapping) soveltaminen. Tämän avulla saadaan koostettua teräväpiirtokuva ajoneuvon läheisyydestä muuhun ympäristöön, mikä auttaa saamaan tieto ajoneuvon tarkasta sijainnista sekä suhteesta muihin tienkäyttäjiin. SLAM-teknologian käytön vaatimuksen pullonkaulat tällä hetkellä ovat (Seif & Hu 2016):

- Datan kerääminen: Tunnin ajoaika tarkoittaa yhtä teratavua dataa.
- Datan prosessointi: Yhden teratavun prosessointi korkealla prosessointiteholla vaatii kaksi päivää aikaa, jotta saadaan hyödyllistä tietoa navigointiin.

- Datan välitys: Vaatimuksena on vähintään 2,2 Gt/s ja LTE (4G) sallii 100 Mt/s datan välityksen. Apuna tähän on 5G, joka mahdollistaa 5 Gt/s.
- Latenssiaika: Oikea-aikaiseen toimintaan tarvitaan alle 10ms latenssiaikaa, mikä vaatii tehokkaan tietojenkäsittelyn.

Liikkumiseen löytyy jo ratkaisuja, mutta rajoittavana tekijänä on kerätyn datan määrä, jota ei tämän hetkisin tietoliikenneteknologioilla voida kattaa. Mahdollistajana on 5G, kun se tulee kaupalliseen toimintaan 2020-luvun aikana.

### 3.2 Kommunikointi

Liikkuva ulkoradioympäristö sekä urbaani ympäristö ovat haasteellisia ajoneuvojen välisessä kommunikoinnissa (Alexander et al. 2011, Biddlestone et al. 2012). Haasteina ovat useat eri kulkureitit sekä monet näköesteet paikoissa, joissa V2V -kommunikointi olisi kaikkein hyödyllisin, kuten sokeat pisteet, rakennukset, ja muut esteet (Biddlestone et al. 2012). Myös Alexanderin et al. (2011) mielestä selkeästi kaikkein kriittisin tilanne on, kun ajoneuvot ovat törmäysvaarassa, mutta kuljettajat eivät näe toisiaan.

V2V -kommunikointi helpottaa tiedonjakoa ajoneuvojen välillä, mikä voi merkittävästi auttaa vähentämään sokean pisteen onnettomuuksia ja törmäyksiä sekä tuottaa varoituksia haastavista ajo-olosuhteista. V2I -verkosto mahdollistaa saumattoman yhteyden ajoneuvoille infrastruktuurin tai verkoston välillä, mikä on kommunikoinnin perustana ja helpottaa ajoneuvojen ad-hoc verkkoja (VANET, Vehicular Ad-hoc Network) (Seif & Hu 2016, Bian et al. 2018). V2P (Vehicle-to-Pedestrian) -kommunikointi toimittaa ilmoituksia jalankulkijoiden mobiililaitteille ja hälyttää heitä potentiaalisesta riskistä liikenneonnettomuuksille tien risteyksissä (Bian et al. 2018).

Autonomiset ajoneuvot ovat varustettuina monilla sensoreilla, jotka edesauttavat niiden kulkemista teitä pitkin ja tekevät suurimman osan työstä pitääkseen matkustajat turvassa. Nämä sensorit itsessään eivät kuitenkaan ole tarpeeksi päteviä pitääkseen yllä vakaita toimenpiteitä korkeissa nopeuksissa ja erittäin vähäisillä ajoneuvoväleillä. Varsinkin kuvan 3 tapaisissa ajoneuvojonoissa, kommunikointi ensimmäisen ajoneuvon ja takana olevien ajoneuvojen välillä on tärkeää, jotta vältetään ajoneuvojen oskillaation alkamiselta. (Lee et al. 2016) Ajoneuvojonojen hyötyihin lukeutuvat tien kapasiteetin sekä energiatehokkuuden paraneminen. Ajoneuvojonojen tehokkuutta parantamassa on VANET, johon lukeutuu V2V -kommunikointi, jonka avulla voidaan ehkäistä törmäysaaltojen syntyminen, kun jonon edessä tapahtuu hidastus tai onnettomuus. (Jia et al. 2014, Lee et al. 2016)



*Kuva 3. Esimerkki ajoneuvojonosta (Lee et al. 2016 s. 6)*

Autonomiset ajoneuvot ovat riippuvaisia ympärillään olevasta infrastruktuurista turvallisuuteen liittyvässä käytötarkoituksissa, kuten sensoreiden datan prosessoinnissa ja älyliikenteessä. Infrastruktuuriin kohdistuneen ison vahingon sattuessa ihmisen pitää olla valmis ottamaan ajotoimintoja haltuunsa. Vahingon tapahtumisen ja navigoinnin ohjauksen siirtämisen ihmiselle välillä on harmaa alue, jonka aikana ajoneuvon pitää selvittää ongelmat itse. Tätä auttamaan on olemassa joukkoistaminen (”crowdsourcing”), jossa ajoneuvo on yhteydessä muihin ajoneuvoihin, jotta se voi navigoida turvalisesti ennen kuin ihminen saa ohjat haltuunsa. (Lee et al. 2016) Joukkoistaminen on tehtävien ulkoistamista tai jakamista muiden resurssien kanssa, mikä tässä tapauksessa tarkoittaa ajoneuvoja (Wu et al. 2013).

Yleisön aistiminen, eli havainnon kerääminen, on keskeinen komponentti V2X (Vehicle-to-Everything) -verkostossa. Se laajentaa yksittäisen ajoneuvon rajoitetun horisontin myös alueisiin, jotka eivät ole ajoneuvolle näkyvillä. Tämä auttaa tuomaan turvallisuuskriittisiä autonomisia menetelmiä, kuten automaattisen törmäyksen välttämisen tai kais-tanvaihdon. (Bian et al. 2018) Joukkoistaminen ja yleisön aistiminen menevät käsi kädessä ja ovat toiminnaltaan samankaltaiset. Molemmissa kerätään tietoa muilta ajoneuvoilta, jotka ovat paikoissa, joihin toinen ajoneuvo ei näe. Näin ajoneuvon ennakointikyky paranee ja, huonon näköympäristön omaavissa risteyksissä, liikenneturvallisuus kohenee.



## 4. JALANKULKIJAT LIIKENTEESSÄ

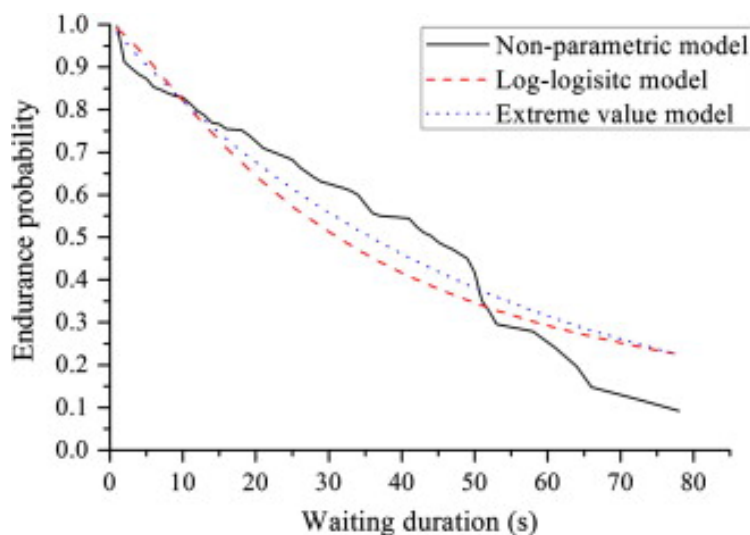
Yhä useampi ihminen kulkee jalan, joko kulkeakseen paikasta toiseen tai urheillakseen, mutta jalankulkijaonnettomuuksien verrannollista kasvua voidaan välttää (Nesoff et al. 2019). Usein ihmiset kuuntelevat musiikkia tai käyttävät puhelintaan kävellessään. Thompson et al. (2013) toteavat jalankulkijoiden toimivan varomattomammin häiriötekijän, kuten puhelimen, musiikin, ruoan tai toisen henkilön, vaikutuksen alaisena. Häiriötekijöiden lisäksi isona vaikuttajana jalankulkijoiden toiminnassa liikenteessä on heidän omat käyttäytymismallinsa.

Haghigin et al. (2018) tekemän tutkimuksen mukaan 13,5 % jalankulkijoista oli riskialtis käyttäytyminen tietä ylittäessä. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että kyseessä on tutkimus Thaimaasta, joka on Haghigin et al. (2018) mukaan kärkipaikalla maailmassa tieliikenneonnettomuuksien vakavuudessa. Jalankulkijoiden käyttäytyminen tietä ylittäessä on yksilöllistä (Zhuang & Wu 2011), joten tulokset voivat siis korreloitua keskenään ja jalankulkijoiden käyttäytyminen kehittyneemmissä maissa voi myös olla turvallisempaa. Holmin et al. (2018) mukaan jalankulkijoiden tieliikennekäyttäytymiseen olisi kannattavaa vaikuttaa jo pienestä pitäen oppilaitoksissa, joissa pienet lapset ovat kerääntyneinä. Nuoret ottavat vaikutteita muiden käyttäytymismalleista ja tärkeimpinä vaikuttajina nuorille ovat heidän omat vanhempansa. Nuorilla on suurempi todennäköisyys joutua onnettomuuteen kuin lapsilla, koska lapset kulkevat usein liikenteessä vanhempiensa tai opettajan kanssa, jolloin kulkeminenkin on riskittömämpää. (Holm et al. 2018) Etelä-Afrikan Kapkaupungissa tehdyn tutkimuksen mukaan yksin kulkevilla lapsilla on enemmän riskialttiimpaa käyttäytymistä liikenteessä, vaikka seurassa kulkevilla lapsilla on suurempi onnettomuusvakavuus jalankulkijaonnettomuuksissa (Koekemoer et al. 2017). Maiden käyttäytymiskulttuureilla on siis iso merkitys, kuinka turvallista jalankulkijoiden kulkeminen on.

59% prosenttia onnettomuuksista ajoneuvon ja jalankulkijan välillä on aiheutunut jalankulkijan virheen takia (Ulfarsson et al. 2010, Guo et al. 2012 mukaan). Kiinassa sama luku on 83,25% kaikista jalankulkijoiden ja ajoneuvojen välisistä liikenneonnettomuuksista (CRTASR 2005, Zhuang & Wu 2011 mukaan). Tästä päästään jälleen maiden väliin eroihin liikennekäyttäytymisessä. Guo et al. (2012) toteavat, että jalankulkijan virheen voidaan kuvitella olevan paha tapa tien ylityksessä. Tyypillisenä jalankulkijan virheenä voidaan pitää jalankulkijan piittaamattomuutta liikennemerkkejä tai tienylityskohtia kohtaan. Vaikuttavia tekijöitä jalankulkijan tienylityskäyttäytymiseen ovat mm. henkilökohtainen erityispiirre, liikenneolosuhteet ja ympäristön vaikutukset. (Guo et al. 2012) Li & Fernien (2010) tekemän tutkimuksen mukaan olosuhteiden vaikutukset olivat huolestuttavia. Lämpimillä keleillä 23 % jalankulkijoista totteli liikennemerkkejä,

kun taas kylmillä keleillä tottelevaisuus oli 10 %. Mikä on vielä huolestuttavampaa, 3% jalankulkijoista totteli liikennesääntöjä lumisateessa. (Li & Fernie 2010) Kyseinen tutkimus on tehty Torontossa vilkkaassa risteyksessä, jossa kadut ovat jaettuna kahteen puoleen, joten jalankulkijoiden täytyy ylittää tie kahdessa osassa. Li & Fernien (2010) tutkimuksen keskimääräinen aste tottelevaisuudelle oli 13 %, mikä eroaa paljon muista eri olosuhteissa tehdyistä tutkimuksista. Lake Buena Vistassa, tehdyn tutkimuksen mukaan tottelevaisuusaste oli 46,8 %, kun jalankulkijoilla oli yksi ylitys (Huang & Zegeer 2000, Li & Fernie 2010 mukaan). Peoriassa, tehdyssä samankaltaisessa tutkimuksessa, kuin Huang & Zegeer, tulos oli 71,1 % (Schattler et al. 2007, Li & Fernie 2010 mukaan). Näiden tutkimusten valossa voidaan todeta, että liikenneolosuhteet vaikuttavat jalankulkijoiden käyttäytymiseen. Paremmilla infrastruktuurisilla päätöksillä näihin voidaan vaikuttaa sekä ihmisten tietoisuuden lisäämisellä väärin ylittämistapojen vaarallisuudesta.

Jalankulkijat ovat perustelleet tien ylittämisen sääntöjenvastaisesti johtuvan ajallisista syistä, sekä tarpeesta kiirehtiä ja pysyä liikkeessä (Forsythe & Berge 1973, Sisiopiku & Akin 2003, Li & Fernie 2010 mukaan). Odotusajan vaikutusta jalankulkijan todennäköisyyteen rikkoa liikennesääntöjä ja tehdä vaarantava virhe, on tutkittu Guon et al. (2012) tutkimuksessa kolmella eri tavalla, joihin on määriteltynä omat kaavansa, ja joissa otetaan huomioon eri muuttujia olosuhteissa. Laskentatapojen samansuuntaisten tulosten takia, niiden eroja ei avata tarkemmin. Kuvassa 4 on esiteltyä tulokset tästä tutkimuksesta.



**Kuva 4.** Sietokyvyn todennäköisyys odotusajan funktiona (Guo et al. 2012 s. 972).

Kuten kuvasta 4 voidaan huomata, mitä pidempään jalankulkijan täytyy odottaa päätäkseen tien yli, sitä pienempi todennäköisyys on sille, että jalankulkija jaksaa odottaa tien ylitystä. Kuten työssä on todettu, jalankulkijoiden käyttäytyminen on yksilöllistä, mikä on myös otettu huomioon kuvan 1 tulosten kaavojen teossa.

Ihmisten tietämys liikennesäännöistä on myös osittain puutteellista (Nesoff et al. 2019), mikä johtaa myös riskitilanteisiin liikenteessä. Nesoffin et al. (2019) tehdyn tutkimuksen mukaan suurin osa liikenteenkäyttäjistä tiesi kuskien saavan sakot, jos eivät väistä jalankulkijaa, puolet tiesivät tien ylityksen olevan laitonta merkkeamattomasta kohdasta, ja vain 5 % tiesi, että jalankulkija ei ole aina etuoikeutettu liikenteessä. Tulokset ovat huolestuttavia. Ihmisillä voi olla väärentynyt kuva jalankulkijan oikeuksista, koska kuljettajat väistävät sakkojen uhalla jalankulkijoita, myös paikoissa, joissa ei välttämättä tarvitsisi, jolloin jalankulkijat kuvittelevat, että heillä on enemmän oikeuksia kuin todellisuudessa on. Kuten Nesoff et al. (2019) toteavat, tulokset viittaavat tarpeeseen lisäkoulutukselle jalankulkijoiden turvallisuuslakien koulutukselle.

#### 4.1 Lapset ja nuoret

Maailmanlaajuisesti 186 300 lasta kuolee vuosittain liikenneonnettomuuksissa, eli yli 500 lasta päivittäin (WHO 2015). Kuvassa 5 on esiteltyä alle 18-vuotiaiden neljä yleisintä kuolemaan johtanutta syytä.

Rank #	<5 years	5–9 years	10–14 years	<15–17 years
1	Preterm birth complications	Diarrhoeal diseases	HIV/AIDS	Road traffic injury
2	Lower respiratory infections	Lower respiratory infections	Diarrhoeal diseases	Self-harm
3	Birth asphyxia / trauma	Meningitis	Road traffic injury	Interpersonal violence
4	Diarrhoeal diseases	Road traffic injury	Lower respiratory infections	HIV/AIDS

**Kuva 5.** Neljä yleisintä syytä eri lasten ikäryhmien kuolemille maailmanlaajuisesti, vuonna 2012. Keltaisena korostettuna liikenneonnettomuudet. (WHO 2015 s. 5)

Jalankulkijoiden osuus lasten kuolemista liikenneonnettomuuksissa on 38 % (WHO 2015). Syytä lasten haavoittuvaisuudelle löytyy. Varsinkin alle 12-vuotiailla lapsilla on todettu olevan hankaluuksia hahmottaa liikenteen kulkusuuntia (MacGregor et al. 1999, Piaget 1969, Von Hofsten 1980, Von Hofsten 1983, Foot et al. 1999, Leden 1989, Leden 2006 mukaan). Myös WHO (2015) mainitsee, että lasten voi olla vaikeaa tulkita näkyjä ja ääniä, mikä voi vaikuttaa heidän arviointiinsa liittyen etäisyyteen, nopeuteen ja suuntaan. Lisäksi lasten pienen koon vuoksi heidän on vaikea nähdä ympäröivää liikennettä ja autoilijoiden nähdä heitä. Lapset ovat myös impulsiivisempia, eivätkä pysty keskittymään moneen haasteeseen samaan aikaan, mikä voi johtaa riskialttiisiin tilanteisiin ja törmäyksiin ajoneuvojen kanssa, jolloin lasten pehmeä pää tekee heidät myös alttiimmiksi vakaville päavammoille. (WHO 2015)

Piittaamattomuutta liikennekäyttäytymisessä voidaan nähdä myös paikoissa, joiden pitäisi olla lapsille turvallisia, kuten koulujen edustalla. Rothman et al. (2016) tarkasteli-

vat vaarallista opiskelijamatkustajan poisjättämistä ja lasten jalankulkukäyttäytymistä koulujen edustalla. Tulokset vaikuttivat huolestuttavilta, sillä yli 92 %:ssa kouluista oli vaarallista matkustajan poisjättämistä ja jalankulkukäyttäytymistä tai jompaa kumpaa. (Rothman et al. 2016) Lasten liikenneturvallisuus on siis liikenteenkäyttäjienkin ja lasten vanhempien asia. Suomessa useasti näkeekin taajama-alueilla ”Varokaa leikkiviä lapsia”-kylttejä tai kouluteillä varoituksia pienistä koululaisista alueella, minkä pitäisi johtaa autoilijan tarkkaavaisuuden terävöitymiseen.

Ikäryhmien riskialttiuden välillä on maakohtaisia eroja. Erot johtuvat oletettavasti kulttuuri- ja liikennekäyttäytymiseroista. Etelä-Afrikassa jalankulkijaonnettomuus on yleisin syy lasten kuolemaan, joka johtuu onnettomuudesta aiheutuneesta loukkaantumisesta. Noin 22 % kaikista kuolemaan johtaneista jalankulkijakuolemista on kohdistunut alle 15-vuotiaisiin lapsiin. (Van der Merwe and Dawes 2007, Road Traffic Management Corporation (RTMC) 2011, Koekemoer 2017 mukaan) Chong et al. (2018) tekemän tutkimuksen tuloksista selviää, että, Yhdysvalloissa vuosien 2006-2015 välillä, riskialttein ryhmä liikenneonnettomuudesta johtuvalle loukkaantumiselle ovat 15–19-vuotiaat.

Tutkimusten ja tulosten valossa voidaan sanoa lasten olevan erittäin riskialtis ryhmä liikenneonnettomuuksille, ja niistä johtuville kuolemille. Syitä löytyy monia, niin lapsista itsestään kuin myös muista liikenteenkäyttäjistä. Liikenneturvallisuuden parantaminen on kriittistä lasten osalta, koska kuten edellä on todettu, heidän havainnointikykynsä liikenteessä ei ole yhtä kehittynyt kuin aikuisen ihmisen, joten tämä pitää ottaa huomioon liikenteessä ajaessa ja infrastruktuuria rakentaessa.

## 4.2 Eroavuuksia tilastoissa

Sukupuolella on merkitystä riskialttiudessa. Diaz (2002) toteaa miesjalankulkijoilla olevan taipumus rikkoa liikennesääntöjä naisia useammin ja ylittää tie riskialttimmissa paikoissa (katso Guo et al. 2012). WHO:n (2015) mukaan poikien osuus kuolemista liikenneonnettomuuksissa on kaksi kertaa suurempi kuin tytöillä. Syyn arvellaan olevan poikien suurempi altistus liikenteelle sekä taipumus ottaa enemmän riskejä tyttöihin verrattuna, varsinkin nuorina. (WHO 2015) Muita arveltuja syitä ovat poikien erilainen sosialisoituminen kuin tytöillä sekä vanhempien vähäisempi rajoitus kokeiluille. Poikien sallitaan todennäköisemmin kulkea pidemmälle, ja he saavat todennäköisemmin leikkiä yksin. (Peden et al. 2008)

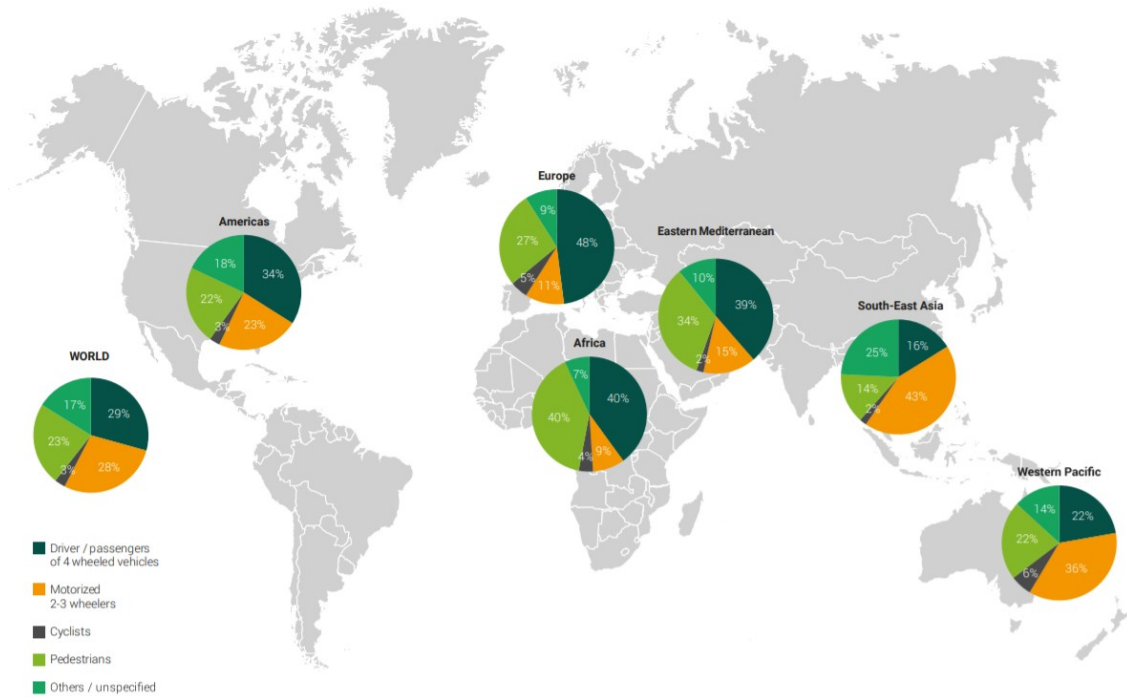
Maiden välillä on eroja. Taulukossa 4 on otettu esimerkkejä eri maiden tilastoista liikenneonnettomuuksista ja jalankulkijoiden osuudesta niistä.

**Taulukko 4.** Maiden välisiä eroavaisuuksia (WHO 2018 pp. 302-313).

<b>Maa</b>	<b>Arvioidut kuolemat liikenneonnettomuudesta</b>	<b>Jalankulkijoiden osuus (%)</b>	<b>Tulotaso</b>
<i>Brasilia</i>	41 007	18,1	Keskitaso
<i>Suomi</i>	260	10,7	Korkea
<i>Ruotsi</i>	278	15,6	Korkea
<i>Kongon demokraattinen tasavalta</i>	26 529	51,9	Matala
<i>Intia</i>	299 091	10,4	Keskitaso
<i>Yhdysvallat</i>	39 888	15,3	Korkea
<i>Japani</i>	5 224	35	Korkea
<i>Mali</i>	4 159	11,5	Matala

Huomionarvoista tilastoja tarkastellessa oli, että monilta matalan tuloluokan mailta puuttui prosentuaalisia tilastoja eri tekijöiden osuudesta kuolemista. Lisäksi, suurimassa osassa matalan tuloluokan maista, arvioidut kuolemat olivat huomattavasti erilaisia kuin raportoidut kuolemat. Taulukkoon valikoidut maat ovat valittuina mielenkiintoisien tilastojen takia. Esimerkiksi Intialla on valikoiduista maista pienin osuus jalankulkijoiden kuolemille, vaikka Intian liikenteestä lukeneena voi olettaa sen olevan vaarallinen jalankulkijalle.

Kuvassa 6 on esiteltyä eri maantieteellisillä alueilla olevia eroja. Vaaleanvihreä kohta on jalankulkijoiden osuus tienkäyttäjien kuolemista.



**Kuva 6.** Eri alueiden tienkäyttäjätyyppien prosentuaaliset osuudet kaikista liikennekuolemista (WHO 2018 s. 11).

Kuvan mahdollisen epäselvyyden vuoksi luetellaan jalankulkijoiden osuudet liikennekuolemista kaikilta alueilta. Maailman tilastoista tienkäyttäjien kuolemista 23% ovat jalankulkijoita, Amerikassa 22 %, Euroopassa 27 %, Afrikassa 40 %, Itäisellä Välimerellä 34 %, Kaakkois-Aasiassa 14 % ja Läntisellä Tyynellämerellä 22 % (WHO 2018). Kuvasta 6 voidaan havainnoida myös eri alueiden tyypillisiä liikkumismuotoja. Kehittyneillä ja rikkailla alueilla ajetaan, tai ollaan kyydissä, yleisimmin nelipyöräistä kulkuvälinettä. Kauko-Idässä kaksi- ja kolmepyöräisten suosio taas on merkittävä osa liikennettä. Afrikassa ihmiset kulkevat paljon jalan paikasta toiseen, mikä varmasti korreloi jalankulun osuuteen tienkäyttäjien kuolemista.

Jalankulkijan haavoittuvuutta liikenteessä ei voi kiistää. Jalankulkijaan kohdistuneen onnettomuuden sattuessa, todennäköisyys henkilövahingolle kasvaa. Kulkeminen jalan liikenteessä on aina riskialtista, mutta omalla käyttäytymisellä ja havainnoinnilla voi vaikuttaa siihen paljon. Eroavaisuudet riskialttiudessa johtuvat juuri omasta tekemisestä. Vakavammalla asenteella liikenteeseen ja tehokkaammalla liikennekoulutuksella saadaan vaikutettua ihmisten toimintaan jalankulkijoina.

## 5. AUTONOMISET AJONEUVOT JA JALANKULKIJAT LIIKENTEESSÄ

Liikenteessä on olemassa kaksi sääntöä, virallinen ja epävirallinen (Lurie 1987, Sucha et al. 2017 mukaan). Sucha et al. (2017) toteavat ongelmien syntyvän, kun tienkäyttäjät toimivat eri sääntöjen mukaan, jolloin toisen tienkäyttäjän toimien ennakoiminen oikein vähentyy. Autonomisten ajoneuvojen kohdalla asennoituminen liikennekäyttäytymiseen täytyy muuttua. Ilman kuljettajaa toimivilla ajoneuvoilla on tiedossa liikennesäännöt, mutta koneilta puuttuu tilannetaju, joten ne toimivat kuten ne on ohjelmoitu.

Suurin osa autonomisten ajoneuvojen ja ihmisten välisestä kommunikaatiosta koostuu visuaalisista havainnoista ajoneuvon ulkokuoressa tai heijastuksina tiellä (Risto et al. 2017), kuin myös teknologioista, kuten V2V ja V2P (Rasouli & Tsotsos 2018). V2P ratkaisuna Honda on ehdottanut käyttää jalankulkijan älypuhelinia lähettääkseen heidän olinpaikkansa ja saadakseen tietoa lähistöllä olevista ajoneuvoista. Näin ollen molemmat ovat tietoisia toistensa olinpaikasta ja, tarpeen tullen, voivat saada hälytyksen onnettomuuden ollessa uhkaava. (Rasouli & Tsotsos 2018) Vaikka älylaitteet ihmisillä yleistyvätkin, niin kaikilla niitä ei välttämättä ole, varsinkin vanhuksilla ja pienillä lapsilla, joten ei voida olettaa jokaisen jalankulkijan olevan kykenevä vastaanottamaan signaaleja ajoneuvoilta. Lisäksi jatkuva signaalien vastaanotto ajoneuvoilta voi kuluttaa laitteiden akkua, mikä aiheuttaa epämiellyttävää käyttökokemusta jalankulkijalle.

### 5.1 Vuorovaikutus

Risto et al. (2017) väittävät visuaalisen havainnoinnin tavan olevan riittämätön kommunikoinnin keino liikenteessä. Syynä ovat mahdollinen näkyvyyden heikkous ja välitön merkkien ymmärrettävyys. Parempi ratkaisu on liikkeiden avulla toteutuva kommunikointi, mikä koostuu eleistä, joiden tarkoitus saadaan selville huomioimalla tien geometrian, tiellä tapahtuvan toiminnan, ja kulttuurin konteksti. (Risto et al. 2017) Rasouli & Tsotsos (2018) ovat sitä mieltä, että teknologiat, joita on esitelty ratkaisuihin kommunikatio-ongelmille, kohtelevat ongelmaa kiinteänä dynaamisena kohteena, sosiaalisen olennon sijaan.

Näkyvien eleiden kohdalla Dey & Terken (2017) saivat tutkimuksessaan tulokseksi, että jalankulkijoille kääntäminen ajoneuvoa kohti on kaikkein yleisin keino varmistaa oma aikomus ylittää tie. Vain 2,7 % tutkituista jalankulkijoista ilmoittivat käden tai sormen nostamisella aikomuksestaan ylittää tie. 3 % tutkituista tekevät eleen hyväksyäkseen tai kiittääkseen ajoneuvon väistäessä. Näiden vastausten valossa Dey & Terken toteavat

tämän tavan olevan merkityksetön selkeiden eleiden kontekstissa. Toinen löydös oli, että manuaalisessa ajamisessa tapahtuva neuvottelu liikenteessä ei ole riippuvainen selkeästä kommunikoinnista liittyen ajoneuvon aikomuksiin. (Dey & Terken 2017) Jalankulkijoiden tekemisillä on siis suuri vaikutus ajoneuvon ja jalankulkijan väliseen toimintaan. Dey & Terken (2017) ovat eri mieltä eleiden tärkeydestä kommunikoinnissa liikenteessä kuin Risto et al. (2017). Dey & Terken (2017) väittävät, että näkyvät eleet eivät ole ajoneuvojen ja jalankulkijoiden välisessä kommunikoinnissa pakollisia tai kriittisesti tärkeitä tavallisissa liikennetilanteissa. Näkyvien eleiden puute ei siis tule olemaan esteenä autonomisille ajoneuvoille tulevaisuudessa (Dey & Terken 2017). Myös Rothenbücher et al. (2016) ovat sitä mieltä, että katsekontaktin luominen ja käsieleet eivät ole jatkossa luotettavia kommunikoinnin keinoja.

Rothenbücherin et al. (2016) mukaan hyväksyntä pysyy relevanttina osana kommunikointia. Voidaan olettaa, että jalankulkija tahtoo saada merkin hänen huomaamisestaan, mutta tutkimuksen mukaan ihmiset pystyivät toimimaan liikenteessä hyväksynnän merkin puuttuessaakin. Syynä epäillään olevan ihmisten tottumus kulkea ilman selkeää merkkiä, kuten pimeään aikaan tai muu tilanne, kun kuljettajaa ei ole näkyvissä. (Rothenbücher et al. 2016) Kuva 7 esittelee kaksi eri tapaa ajoneuville viestiä, että se on huomannut jalankulkijan ja jalankulkija voi ylittää tien.



**Kuva 7.** Esimerkkejä viestintätavoista. (Rasouli & Tsotsos 2018 s. 1, Winkless 2017)

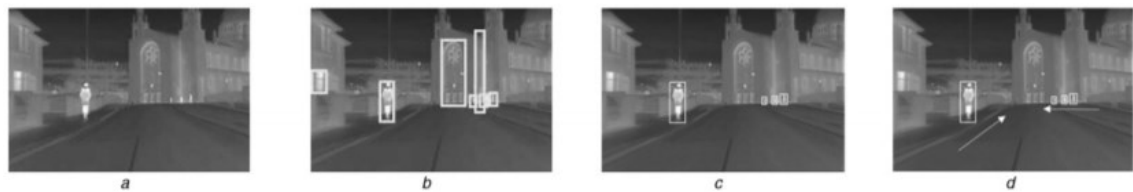
Deb et al. (2018) tekivät tutkimuksen hyödyntämällä virtuaalitodellisuutta (VR) tarkastellessaan erilaisia tapoja autonomisille ajoneuvoille näyttää, että ne ovat huomanneet jalankulkijan. Tutkimuksen valossa jalankulkijat suosivat tutkituista tavoista tuttua merkkiä, jota voi verrata jalankulkijamerkkiin (siluetti), selkeää tekstiä ("Braking") ja selkeää verbaalista viestiä. Suositelluin tapa oli verbaalinen viesti tai merkki, mutta kokonaisuudessaan lisätyt toiminnot, verbaaliset tai visuaaliset, autonomiseen ajoneuvoon lisäävät jalankulkijoiden vastaanottavuutta. (Deb et al. 2018) Autonvalmistajien pitäisi ottaa huomioon valmistaessaan ajoneuvoja, että kaikki jalankulkijat eivät ole kykeneviä vastaanottamaan visuaalisia tai verbaalisia merkkejä. Kyseessä voi olla sokeus, kuurous, musiikin kuunteleminen tai jokin muu rajoite. Näiden kahden tavan yhdistämisen tarkastelu mahdollistaa rajoitteiden huomioonottamisen ja antaa jalankulkijoille mahdollisuuden kommunikointiin ajoneuvon kanssa rajoitteista huolimatta.



## 5.2 Teknologia

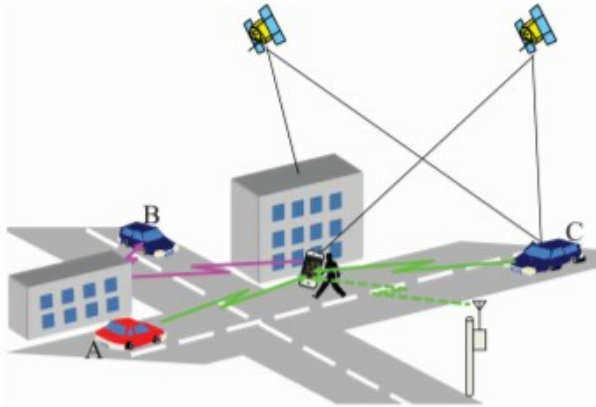
Aktiivisista sensoreista, kuten akustisista, tutka- ja laserpohjaisista havainnointivälineistä, on siirrytty enemmän passiivisempiin sensoreihin, ja erityisemmin optisiin sensoreihin. (Llorca et al. 2012) Yleisimpiä käytettyjä sensoreita autonomisten ajoneuvojen menetelmissä ovat näkyvän valon kamerat (VLC), LiDAR ja tutka (vaikka infrapunakuvantamista käytetään enimmäkseen kuljettajan apujärjestelmissä). Useat VLC:t ottavat kuvia, joita tietokoneet kokoavat ja analysoivat jalankulkijoista ja esineistä. VLC:t toimivat huonosti huonossa valaistuksessa sekä muuttuvissa sääolosuhteissa. LiDARin toiminta on kerrottu kohdassa 3.1. Tutka lähettää radioaaltoja huomatakseen esineitä ja määrittääkseen etäisyyksiä ja suhteellisia nopeuksia. Tutkan ongelmana on haastavuus erottaa jalankulkijoita, etenkin lapsia. Myös staattisten esineiden havaitseminen on haaste (kuten tielle astumista odottava jalankulkija). (Combs 2019).

Jalankulkijan havainnointijärjestelmät voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: kiinnostuksen alueet (ROI, Region of Interest), luokittelu ja seuranta (Llorca et al. 2012). Kuva 8 esittää toiminnan vaiheittain. Kiinnostuksen kohteiden valinta on kriittisin vaihe toiminnassa. Llorca et al. (2012) mukaan huomaamatta jääneiden jalankulkijoiden määrän täytyy olla nolla, koska luokittelu ja seuranta eivät kykene tunnistamaan aluksi huomaamatta jääneitä jalankulkijoita. Konenäön näkökulmasta jalankulkijan havainnointi on vaikeaa, koska variaatiot jalankulkijan ulkomuodossa sekä erilaiset olosuhteet tekevät ongelmasta haastavan. Tulevaisuuden kehityksen kannalta stereopohjaisen havainnoinnin ja optisen virtauksen fuusio vaikuttaa olevan merkityksellinen, varsinkin haastavammissa olosuhteissa, joissa jalankulkija ei ole selkeästi näkyvissä. (Llorca et al. 2012) Kameroiden kehityksen myötä ajoneuvoihin saadaan entistä tarkempia kameroita asennettua, mikä edesauttaa kehittämään havainnointijärjestelmiä paremmiksi.



**Kuva 8.** A) infrapunakuva, b) eristetyt ROI laatikot, c) luokittelu: jätetään jalankulkijoiden laatikot ja karsitaan muut pois ja d) seuranta, jossa laatikon sijainti ennakoidaan edellisten ruutujen perusteella (Hurney et al. 2015 s. 825).

Tang & Obana (2018) ehdottavat ratkaisuksi V2P -kommunikoinnille, että ajoneuvot toimivat eräänlaisina linkkeinä parantaakseen jalankulkijoiden paikannusta urbaaneissa kanjoneissa. Samoin kuten Rasouli & Tsotsosin (2018) mainitsemissa Hondan mallissa, ajoneuvot lähettävät tietoa sijainnistaan välttääkseen onnettomuudet. Ajoneuvojen käyttäminen linkkeinä auttaa selvittämään jalankulkijoiden paikantamiseen liittyvän ongelman, joka on satelliittivajaus. Kuva 9 on havainnointikuva ehdotetusta mallista, kun jalankulkijalla on vajaus satelliiteista.



**Kuva 9.** Ajoneuvojen (ja tienvarsiyksiköiden) käyttö helpottaa jalankulkijan paikantamisessa. (Tang & Obana 2018 s. 367)

Ajoneuvot A ja C ovat suorassa yhteydessä jalankulkijaan ja ajoneuvojen lähettämien signaalien avulla lasketaan hänen sijaintinsa, minkä jälkeen tieto lähetään muille ajoneuvoille (B) heijastumisen tai langattomien yhteyksien diffraktion avulla. Tienvarsiyksiköitä, joilla on samat kommunikaatioprotokollat, voidaan käyttää myös linkkeinä. (Tang & Obana 2018) Tienvarsiyksiköiden yleistystä voidaan odottaa, kun tietoliikenteetekniikka kehittyy ja V2X -kommunikointi mahdollistuu. Tämä mahdollistaa myös jalankulkijoiden turvallisuuden, ja kuten Sucha et al. (2017) toteavat, infrastruktuuri jalankulkijan risteyskohdissa pitää rakentaa siten, että jalankulkija voi tuntea turvallisuutta ja mukavuutta, kuin myös varmistaa jalankulkijan objektiivinen turvallisuus.

Jalankulkijoiden ja ajoneuvojen kyydissä olevien turvallisuus on tärkeintä autonomisissa ajoneuvoissa. Autonomisen ajoneuvon toiminnan luottamuksen kasvattamiseksi on myös ehdotettu ratkaisuja, jotka eivät lisää jalankulkijoiden turvallisuutta, vaan keskittyvät kyydissä olevien mukavuuteen, joten ne ovat huomionarvoisia. Lungaro et al. (2017) ovat sitä mieltä, että autonomisten ajoneuvojen ulkopuolisten ominaisuuksien lisäksi pitäisi myös olla ajoneuvon kyydissä olevia alajärjestelmiä. Nämä alajärjestelmät olisivat täysin omistettu ajoneuvon ajokäyttäytymisen ja päätöksen teon mukauttamiseksi ja optimoimiseksi. Ratkaisumalleiksi on ehdotettu katseen seuraamista ja LED-pohjaista havainnointia. Katseen seurannassa tarkoitus on löytää mielenkiintoisimmat analysoinnin kohteet, joita ajoneuvon kone priorisoi. Tarkoitus on ilmaista muut ajoneuvot ja jalankulkijat omilla väreillään joko heijastusnäyttöön tai yllä olevaan laitteeseen. LED-pohjaisessa tarkoituksena on laittaa LED-valot kojelaudalle, jossa värikoodilla ajoneuvo ilmoittaa huomanneensa ajoneuvon ja jalankulkijan. (Lungaro et al. 2017)

Erilaisia teknologisia ratkaisuja on tutkittu ajoneuvojen ulko- ja sisäpuoliseen toimintaan, sujuvan, turvallisen ja mukavan autonomisen ajamisen takaamiseksi. Jatkuva teknologian kehitys tietoliikenteessä sekä sensoriteknologiassa ovat ratkaisevassa roolissa, jotta kommunikointi ajoneuvojen sekä jalankulkijoiden kanssa saadaan sujuvaksi ja jalankulkijat sekä esineet tulevat huomatuksi.

## 6. YHTEENVETO

### 6.1 Johtopäätökset

Tutkimuksessa tarkasteltiin autonomisten ajoneuvojen ja jalankulkijoiden roolia ja toimintaa liikenteessä ja lopuksi vastattiin tutkimuksen aiheeseen. Autonomiset ajoneuvot tulevat muuttamaan liikennettä ja jatkuvan kehitystyön ansiosta autonomiset ajoneuvot yleistyvät ja tarjoavat ihmisille uusia palveluita. Jotta ajoneuvot saadaan käyttöön, täytyy infrastruktuuriin tehdä muutoksia. Tutkimuksessa selvisi, että autonomisten ajoneuvojen toimintaan liittyy monia teknisiä asioita, joiden kehitys ratkaisee autonomisten ajoneuvojen toimintaan liittyviä ongelmakohtia. Tärkeitä teknologioita ovat kamera- ja sensoriteknologiat, joilla havainnoidaan ympäristöä ja tunnistetaan jalankulkijoita ja esineitä. Uuden tietoliikenneteknologian, 5G:n, avulla ajoneuvot saadaan kytkettyä langattomaan verkostoon, jonka sisällä ajoneuvot voivat kommunikoida ympäristön kanssa.

Jalankulkijat ovat haavoittuvassa roolissa liikenteessä. Törmäyksen sattuessa jalankulkijalla ei ole suojaajaa ajoneuvoa vastaan. Tämän vuoksi liikennekäyttäytymistä täytyy muuttaa niin jalankulkijan kuin kuljettajan näkökulmasta. Jalankulkijalla on omavastuu myös seurata liikennesääntöjä, joiden noudattamisen on tarkoitus pitää heitä turvassa. Liikennekäyttäytymisestä löytyy eroja eri henkilöiden kesken ja erot voivat johtua monista tekijöistä, kuten iästä ja sukupuolesta. Tutkimuksessa löydettiin eri alueiden eroja jalankulkijoiden osuudesta liikenneonnettomuuksista johtuvista kuolemista, mikä kertoo myös maiden kulttuurin olevan keskeisenä tekijänä jalankulkijoiden turvallisuudessa.

Yhtä oikeaa ratkaisua ei ole olemassa autonomisten ajoneuvojen ja jalankulkijoiden yhteistyölle. Lukuisia tutkimuksia aiheesta on tehty ja niissä on esitelty eri tapoja, miten kommunikointi ajoneuvojen ja jalankulkijoiden kesken voisi toimia. Keskiössä on teknologia ja eri toimintatavat menevät kahteen kategoriaan: eleillä tai teknisten laitteiden avulla toimivaan vuorovaikutukseen. Näkyvillä eleillä toimiva vuorovaikutus keskittyy ajoneuvoissa olevaan teknologiaan, joka onnistuu lukemaan jalankulkijan eleitä ja analysoimaan aikomuksia. Ajoneuvo voi ilmaista turvallista kulkua jalankulkijalle joko edellä olevan vaiheen jälkeen tai jatkuvasti erilaisilla symboliratkaisuilla ajoneuvon ulkokuoressa. Teknisten laitteiden toiminta perustuu liikenneinfrastruktuurissa oleviin linkkeihin, jotka lähettävät tietoja ajoneuvoille ja mahdollisesti jalankulkijoille älylaitteisiin.

## 6.2 Tulosten arviointi

Tutkimuksessa pystyttiin vastaamaan asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Käytetty aineisto tutkimuksessa oli suurimmaksi osaksi tieteellisiä artikkeleita, jotka olivat myös ajankohtaisia ja tuoreita kirjoituksia. Näiden julkaisujen avulla pystyi tekemään tämän tutkimuksen ottamalla huomioon ajankohtaisia asioita. Autonomiset ajoneuvot ovat herättäneet kiinnostusta lähivuosien aikana paljon, mutta tutkimuksia aiheeseen liittyen on tehty jo kymmeniä vuosia sitten ja näiden tutkimusten tuloksia on käytetty myös myöhemmissä tutkimuksissa apuna, joten vanhojen artikkelien pätevyyttä ei tarvinnut epäillä, mutta ajankohtaisuuden kohdalla täytyi tarkastella kriittisesti. Aineistot tukivat toisiaan suureksi osaksi, eikä eriäviä mielipiteitä lähteiden kesken löytynyt kuin muutamia. Laajan aineiston käytön avulla pystyi tukemaan monia väitteitä ja rakentamaan luottamusta aineiston oikeellisuudelle. Myös virallisten tilastojen käyttö antoi tutkimusta tukevia lukuja, joita pystyi esittelemään. Näistä esimerkkinä WHO:n tilastot tieliikenneonnettomuuksista.

Tutkimuksen rajaus osoittautui riittäväksi. Aihe on laaja, joten tutkimuksen pituusrajat rajoittivat hieman aiheisiin perehtymistä enemmän, mutta aiheen osa-alueiden tärkeimmät sisällöt saatiin tuotua esille. Tutkimuksesta saa hyvän tiivistelmän tämän hetkisestä vaiheesta autonomisten ajoneuvojen ja jalankulkijoiden yhteensovittamiseen liittyvistä ratkaisuista ja ongelmista.

## 6.3 Jatkotutkimusten tarve

Tarvetta aiheeseen liittyville jatkotutkimuksille on. Ajoneuvojen itsenäisessä ajamisessa keskeistä on havainnoida ympäristöään, eli tietää, missä itse ja missä jalankulkijat tai esineet sijaitsevat. Aiheen ympärillä tehdään jatkuvasti kehitystä ja se on erittäin ajankohtainen, joten uusia tutkimustuloksia tulee jatkuvasti.

Rajauksen vuoksi tässä tutkimuksessa jätettiin pois ajoneuvojen tietoturvaohjelmat, joten jatkokehitys tälle työlle olisi ottaa myös huomioon tietoturvahyökkäysten rooli ja vaikutus jalankulkijoiden turvallisuuteen. Myös sosiaalisia näkökulmia ihmisten asennoitumisesta itseajaviin ajoneuvoihin voisi ottaa huomioon.

## LÄHTEET

Alexander, P., Haley, D. & Grant, A. 2011, Cooperative Intelligent Transport Systems: 5.9-GHz Field Trials, *Proceedings of the IEEE*, vol. 99(7), pp. 1213–1235.

Bian, K., Zhang, G. & Song, L. 2018, Toward Secure Crowd Sensing in Vehicle-to-Everything Networks, *IEEE Network*, vol. 32(2), pp. 126–131.

Biddlestone, S., Redmill, K., Miucic, R. & Ozguner, Ü., 2012, An Integrated 802.11p WAVE DSRC and Vehicle Traffic Simulator With Experimentally Validated Urban (LOS and NLOS) Propagation Models, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13(4), pp. 1792–1802.

Chong, S., Chiang, L., Allen, J.C., Fleegler, E.W. & Lee, L.K. 2018, Epidemiology of Pedestrian–Motor Vehicle Fatalities and Injuries, 2006–2015, *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 55(1), pp. 98–105.

Combs, T., Sandt, L., Clamann, M. & McDonald, N. 2019, Automated Vehicles and Pedestrian Safety: Exploring the Promise and Limits of Pedestrian Detection, *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 56(1), pp. 1–7.

Deb, S., Strawderman, L. & Carruth, D. 2018, Investigating pedestrian suggestions for external features on fully autonomous vehicles: A virtual reality experiment, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 59, pp. 135–149.

Dey, D. & Terken, J. 2017, Pedestrian Interaction with Vehicles: Roles of Explicit and Implicit Communication, ACM, New York, NY, USA, pp. 109–113.

Fickenscher, J., Schmidt, S., Hannig, F., Bouzouraa, E.M. & Teich, J. 2018, Path Planning for Highly Automated Driving on Embedded GPUs, *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 8(4)

Guo, H., Wang, W., Guo, W., Jiang, X. & Bubb, H. 2012, Reliability analysis of pedestrian safety crossing in urban traffic environment, *Safety Science*, vol. 50(4), pp. 968–973.

Haghighi, M., Sadeghi-Bazargani, H., Rezazadeh, M., Sheikhzadeh, R., & Bakhtari, F. (2018). PW 2332 Investigation of pedestrians' traffic safety behavior in tabriz. *Injury Prevention*, vol. 24.

Holm, A., Jaani, J., Eensoo, D. & Piksööt, J. 2018, Pedestrian behaviour of 6th grade Estonian students: Implications of social factors and accident-prevention education at

school, *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, vol. 52, pp. 112–119.

Hurney, P., Waldron, P., Morgan, F., Jones, E. & Glavin, M. 2015, Review of pedestrian detection techniques in automotive far-infrared video, *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 9(8), pp. 824–832.

Jia, D., Lu, K. & Wang, J., 2014, A Disturbance-Adaptive Design for VANET-Enabled Vehicle Platoon, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63(2), pp. 527–539.

Jianfeng, Z., Bodong, L., Qiuxia, C., (2018) The key technology toward the self-driving car, *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, vol. 6(1), pp. 2–20.

Kielitoimisto, Kielitoimiston sanakirja. Saatavissa (viitattu 11.3.2019): <https://www.kielitoimistonsanakirja.fi/netmot.exe?ListWord=autonominen&SearchWord=autonominen&page=results>

Koekemoer, K., Van Gesselien, M., Van Niekerk, A., Govender, R. & Van As, A. 2017, Child pedestrian safety knowledge, behaviour and road injury in Cape Town, South Africa, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 99, pp. 202–209.

König, M. & Neumayr, L. 2017, Users' resistance towards radical innovations: The case of the self-driving car, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 44, pp. 42–52.

Li, Y. & Fernie, G. 2010, Pedestrian behavior and safety on a two-stage crossing with a center refuge island and the effect of winter weather on pedestrian compliance rate, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 42(4), pp. 1156–1163.

Leden, L., Gårder, P. & Johansson, C. 2006, Safe pedestrian crossings for children and elderly, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 38(2), pp. 289–294.

Lee, E., Gerla, M., Pau, G., Lee, U. & Lim, J. 2016, Internet of Vehicles: From intelligent grid to autonomous cars and vehicular fogs, *International Journal of Distributed Sensor Networks*.

Liikenneturva, Ohjeita jalankulkijalle. Saatavissa (viitattu 2.2.2019): <https://www.liikenneturva.fi/fi/selkosuomi/ohjeita-jalankulkijalle>

Llorca, D., Sotelo, M., Hellín, A., Orellana, A., Gavilán, M., Daza, I. & Lorente, A. 2012, Stereo regions-of-interest selection for pedestrian protection: A survey, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 25, pp. 226–237.

Lungaro, P., Tollmar, K. & Beelen, T. 2017, Human-to-AI Interfaces for Enabling Future Onboard Experiences, ACM, pp. 94.

Luo, Y., Cai, P., Bera, A., Hsu, D., Lee, W. & Manocha, D. 2018, PORCA: Modeling and Planning for Autonomous Driving Among Many Pedestrians, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3(4), pp. 3418–3425. Saatavissa (viitattu 1.3.2019): <https://arxiv.org/abs/1805.11833>

Nesoff, E., Pollack Porter, K., Bailey, M. & Gielen, A. 2019, Knowledge and Beliefs About Pedestrian Safety in an Urban Community: Implications for Promoting Safe Walking, *Journal of Community Health*, vol. 44(1), pp. 103–111.

Peden, M., Oyegbite, K., Ozanne-Smith, J., Hyder, A., Branche, C., Rahman, F., Rivara, F., & Bartolomeos, K. 2008, World report on child injury prevention. Saatavissa (viitattu 5.3.2019): [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43851/9789241563574\\_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43851/9789241563574_eng.pdf?sequence=1)

Rasouli, A. & Tsotsos, J. K. 2018, Autonomous Vehicles that Interact with Pedestrians: A Survey of Theory and Practice.

Risto, M., Emmenegger, C., Vinkhuyzen, E., Cefkin, M., Hollan, J. 2017. Human-vehicle interfaces: the power of vehicle movement gestures in human road user coordination, *Proceedings of the Ninth international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*, 2017. University of Iowa, USA. pp. 186–192.

Rothenbücher, D., Li, J., Sirkin, D., Mok, B. & Ju, W. 2016, Ghost Driver: A Field Study Investigating the Interaction between Pedestrians and Driverless Vehicles, *25<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Columbia University, USA.

Rothman, L., Howard, A., Buliung, R., Richmond, S.A., Macarthur, C. & Macpherson, A. 2016, 72 Dangerous student passenger drop-off, pedestrian behaviours and the built environment near schools, *Injury Prevention*, vol. 22, pp. A28.

Seif, H. & Hu, X. 2016, Autonomous Driving in the iCity—HD Maps as a Key Challenge of the Automotive Industry, *Engineering*, vol. 2(2), pp. 159–162.

Sewalkar, P. & Seitz, J., 2019. Vehicle-to-Pedestrian Communication for Vulnerable Road Users: Survey, Design Considerations, and Challenges. *Sensors*, vol. 19(2), pp.358.

Sippl, C., Schwab, B., Kielar, P. & Djanatliev, A. 2018, Distributed Real-Time Traffic Simulation for Autonomous Vehicle Testing in Urban Environments, *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2562.

Sucha, M., Dostal, D. & Risser, R. 2017, Pedestrian-driver communication and decision strategies at marked crossings, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 102, pp. 41–50.

Tang, S. & Obana, S. 2018, Improving performance of pedestrian positioning by using vehicular communication signals, *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 12(5), pp. 366–374.

Teoh, E.R. & Kidd, D.G. 2017, Rage against the machine? Google's self-driving cars versus human drivers, *Journal of Safety Research*, vol. 63, pp. 57–60

Tesla, Autopilot-järjestelmä. Saatavissa (viitattu 1.2.2019): <https://www.tesla.com/autopilot>

Thompson, L., Rivara, F., Ayyagari, R. & Ebel, B. 2013, Impact of social and technological distraction on pedestrian crossing behaviour: an observational study, *Injury Prevention*, vol. 19(4), pp. 232.

Tullsen, M., Pike, L., Collins, N. & Tomb, A. 2018, Formal Verification of a Vehicle-to-Vehicle (V2V) Messaging System, *Computer Aided Verification*, eds. H. Chockler & G. Weissenbacher, Springer International Publishing, Cham, pp. 413.

Urmson, C., Anhalt, J., Bagnell, D., Baker, C., Bittner, R., Clark, M., Dolan, J., Duggins, D., Galatali, T., Geyer, C., Gittleman, M., Harbaugh, S., Hebert, M., Howard, T., Kolski, S., Kelly, A., Likhachev, M., McNaughton, M., Miller, N., Peterson, K., Pilnick, B., Rajkumar, R., Rybski, P., Salesky, B., Seo, Y., Singh, S., Snider, J., Stentz, A., Whittaker, W., Wolkowicki, Z., Zigar, J., Bae, H., Brown, T., Demitrish, D., Litkouhi, B., Nickolaou, J., Sadekar, V., Zhang, W., Struble, J., Taylor, M., Darms, M. & Ferguson, D. 2008, Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge, *Journal of Field Robotics*, vol. 25(8), pp. 425–466.

Vannithamby, R. & Talwar, S. 2016, Towards 5G: Requirements and Candidate Technologies, John Wiley & Sons, Incorporated, New York.

WHO 2015, Ten strategies for keeping children safe on the road, Saatavissa (viitattu 5.3.2019):

[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/162176/WHO\\_NMH\\_NVI\\_15.3\\_eng.pdf;jsessionid=2D6BC9F38CA8265686F7CCEDC1F5DC37?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/162176/WHO_NMH_NVI_15.3_eng.pdf;jsessionid=2D6BC9F38CA8265686F7CCEDC1F5DC37?sequence=1)

WHO 2018, Global status report on road safety, *World Health Organization*.

Winkless, L. 2017, Reading The Road: How Will Driverless Cars Talk To Pedestrians? Saatavissa (viitattu 8.3.2019): <https://www.forbes.com/sites/lauriewinkless/2017/01/04/reading-the-road-how-will-driverless-cars-talk-to-pedestrians/>



Wu, D., Zhang, Y., Bao, L. & Regan, A. 2013, Location-Based Crowdsourcing for Vehicular Communication in Hybrid Networks, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14(2), pp. 837–846.

Yu, H., Lee, H. & Jeon, H. 2017, What is 5G? Emerging 5G Mobile Services and Network Requirements, *Sustainability*, vol. 9(10), pp. 1848.

Zhuang, X. & Wu, C. 2011, Pedestrians' crossing behaviors and safety at unmarked roadway in China, *Accident analysis and prevention*, vol. 43(6), pp. 1927–1936.