



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO KAUKANEN TUTKAKOHTTEIDEN VERTAILU- JA VISUALISOINTITYÖKALU

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Apul.prof. Joni Kämäräinen
Ohjaaja: Marja Ruotsalainen
Jätetty tarkastettavaksi: 11.12.2017

TIIVISTELMÄ

MIKKO KAUMANEN: Tutkakohteiden vertailu- ja visualisointityökalu
Tampereen teknillinen yliopisto
Tekniikan kandidaatintyö, 23 sivua, 13 liitesivua
Joulukuu 2017
Tietotekniikan koulutusohjelma
Pääaine: Machine Learning
Tarkastaja: Apul.prof. Joni Kämäräinen
Ohjaaja: Marja Ruotsalainen
Avainsanat: automaattinen kohteentunnistus, tutka, tilastollinen etäisyys

Tutkat ovat pysytelleet pitkään visusti valtioiden viranomaiskäytössä. Kuitenkin kiihtyneesti kasvanut laskentateho, sekä tutkien pienentynyt koko ja halventunut hinta tuovat tutkia nyt myös siviilimarkkinoille. Laskentatehon kasvu on mahdollistanut myös hahmontunnistuksen yleistymisen. Hahmontunnistusta käytetään yleisesti kameroissa. Se perustuu usein valtavaan mittausaineistoon, jota hyödynnetään koneoppimismenetelmien opettamiseen.

Myös tutkien tuottamalla datalla voidaan erotella erilaisia kohteita toisistaan. Tutkien tapauksessa koneoppimismenetelmät eivät kuitenkaan vielä ole yleisesti käytössä johtuen tutkan tuottaman vasteen monimuotoisuudesta ja kattavan data-aineiston keräämisen työläydestä ja kustannuksista. Hahmontunnistus, josta puhutaan yleisesti tutkien tapauksessa automaattisena kohteentunnistamisena, voidaan toteuttaa vertaamalla mittauksia simuloiduista kohteista koottuun kohdekirjastoon.

Tässä työssä esitellään työkalu, joka vertailee tutkan mittauksia kohdekirjastosta löytyviin kappaleisiin ja tuottaa visualisointeja, joita ihmisen on helppo tulkita.

ALKUSANAT

Tämä työ merkitsee minulle 3,5 vuoden työn ja kasvamisen tulosta ja ensimmäisen merkittävän virstanpylvään saavuttamista diplomi-insinööriksi valmistumisen tiellä. Tekniikan kandidaatin tutkinto on myös ensimmäinen akateeminen tutkintoni, jolla tulee aina olemaan erityinen merkitys itselleni.

Tähän pisteeseen en olisi päätenyt, ellei ympärilläni olisi ollut sopivia henkilöitä. Tahdon kiittää ohjaajanani toiminutta Marja Ruotsalaista, sekä Signaalinkäsittelyn laboratorion tutkijoita Juha Jylhää, Minna Väilää ja Henna Perälää. Tarjositte juuri minulle mielenkiintoisen ja sopivan haastavan ongelman, ja autoitte minua, kun apua tarvitsin. Äärimmäisen iso kiitos kuuluu myös ystäväilleni Sähkökillassa. 3,5 vuoden aikana olette tukeneet minua tilanteesta riippumatta, mikä on ollut iso voimavara omalle jaksamiselle.

Seuraavana virstanpylväänä edessä siintää diplomi-insinöörin tutkinnon suorittaminen, johon on hyvä jatkaa kandidaatintutkinnosta saadun pohjan avulla.

Tampereella, 11. joulukuuta 2017

Mikko Kauhanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	1
2. Teoria	3
2.1 Tutka	4
2.1.1 Tutkayhtälö	6
2.1.2 Tutkapoikkipinta-ala	7
2.1.3 Tutkan resoluutio	7
2.2 Tutkasimulaatio	10
2.3 Kohteentunnistus	11
2.3.1 Tilastolliset etäisyydet	12
3. Vertailu- ja visualisointityökalu	14
3.1 Kohdekirjasto	14
3.2 Vertailu ja visualisointi	16
3.3 Tulosten analysointi	20
4. Yhteenveto	21
Lähteet	22
Liite A: Käytettyjen tilastollisten etäisyyksien MATLAB-toteutukset	24
Liite B: Lisävisualisaatioita	27

KUVAT

2.1	Mallipohjaisen automaattisen kohteentunnistusjärjestelmän toiminta	3
2.2	Mielikuvat tutkasta	4
2.3	Tutkan toiminta	5
2.4	Tutkatyyppien resoluutiot	8
2.5	SAR-kuva helikopterista ja lentokoneesta	10
2.6	Pallon 3D-malli	11
3.1	Mittaustilanne	15
3.2	Histogrammimatriisit	15
3.3	Golfin ja traktorin tilastolliset etäisyydet karteesisessa koordinaatistossa	16
3.4	Golfin ja traktorin tilastolliset etäisyydet polaarikoordinaatistossa	17
3.5	Autojen keskinäiset tilastolliset etäisyydet aluepiirroksina	18
3.6	Autojen keskinäiset tilastolliset etäisyydet normalisoituina aluepiirroksina	18

TAULUKOT

2.1 Tutkakategorioita	5
2.2 Tutkien käyttämät taajuusalueet	6
3.1 Kohdekirjaston kohteet	14
3.2 Kokonaisvaihteluetaisyyden (päälävistäjän yllä) ja Hellingerin etäisyyden (päälävistäjän alla) keskiarvot kirjaston kappaleiden välillä . . .	19
3.3 Bhattacharyyan (päälävistäjän alla) ja maansiirtoetaisyyksien (päälävistäjän yllä) keskiarvot kirjaston kappaleiden välillä	19

LYHENTEET JA MERKINNÄT

μD	mikro-Doppler -resoluutio (micro-Doppler resolution)
ATR	automaattinen kohteentunnistus (automatic target recognition)
EMD	maansiirtoetäisyys (earth mover's distance)
FMCW	taajuusmoduloitu kantaaltotutka (frequency modulated continuous wave radar)
PSR	valvontatutka (primary surveillance radar)
PCL	passiivinen tutka (passive coherent locator)
RCS	tutkapoikkipinta-ala (radar cross-section)
SAR	synteettisen apertuurin tutka (synthetic-aperture radar)
UAV	miehittämätön lentoalus (unmanned aerial vehicle)
ΔR	etäisyysresoluutio
λ	aallonpituus
θ	elevaatiokulma
σ	tutkapoikkipinta-ala
ϕ	atsimuuttikulma
B	kaistanleveys (bandwidth)
c	valonnopeus
d	tilastollinen etäisyys (statistical distance)
d_{ij}	etäisyys jakauman P pylvään p_i ja jakauman Q pylvään q_j välillä
F	vuokahden todennäköisyysjakauman välillä
f_{ij}	vuokahden todennäköisyysjakauman välillä
G	antennivahvistus
G_R	vastaanottoantennin antennivahvistus
G_T	lähetysantennin antennivahvistus
L	tutkahäviö
L_T	häviö lähettimen ja antennin välillä
L_R	häviö antennin ja vastaanottimen välillä
P_R	vastaanottoteho
P_T	lähetysteho
P	diskreetti todennäköisyysjakauma
p_i	jakauman P i:s pylväs
Q	diskreetti todennäköisyysjakauma
q_i	jakauman Q i:s pylväs
R	kohteen ja antennin välinen etäisyys
R_R	kohteen ja vastaanottoantennin välinen etäisyys

R_T	kohteen ja lähetysantennin välinen etäisyys
S_i	kohteelle tuleva tehotiheys
W	työ
w_{p_i}	jakauman P pylvään p_i paino
w_{q_j}	jakauman Q pylvään p_j paino
W_{bs}	tutkan suuntaan sironnut teho avaruuskulmayksikköä kohden

1. JOHDANTO

Ei ole kauaakaan, kun automaattinen hahmontunnistus tuntui saavuttamattomalta scifi-teknikalta. Pelkältä illuusiolta, jota näki ainoastaan suuren budjetin Hollywood-elokuvissa, kuten vuonna 1984 ilmestyneessä Arnold Schwarzeneggerin tähdittämässä Terminatorissa. Kyseisessä elokuvassa Schwarzeneggerin näyttelemä T-101 -kyborgi tunnistaa katseellaan esineitä nopeasti ja vaivatta, mitä voidaankin pitää hahmontunnistuksen tavoitteena. Sitten hahmontunnistus on muuttunut toteutuskelpoisemmaksi ja samalla hiipinyt osaksi arkipäivää, esimerkiksi valtavan suosion keränneen Snapchat-sovelluksen muodossa.

Tähän mennessä kohteen tunnistamiseen tähtäävä hahmontunnistus on keskittynyt kameroihin ja niillä otettaviin kuviin. Hahmontunnistusta voidaan kuitenkin hyödyntää muillakin sensoreilla kerättyyn dataan, kuten tutkaan. Tutka on yleisimmin tunnettu ilmaliikkeen ja sotilaskäyttökohteistaan, mutta hahmontunnistuksenkin mahdollistanut elektroniikan ja tietotekniikan pitkään jatkunut ja alati kiihtynyt kehitys on halventanut ja pienentänyt tutkia. Tämä vuorostaan on avannut oven tutkien hyödyntämiseen myös siviilitarkoituksissa. Kameraan verrattuna erityisen mielenkiintoisen tutkasta tekee hahmontunnistuksen kannalta kyky toimia kaikissa valaistusolosuhteissa ja lähes missä tahansa säätilassa.

Nykytuotoinen hahmontunnistus perustuu kehittyneisiin koneoppimismenetelmiin, jotka oppivat tunnistamisen käytettävät mallit niille syötetystä niin sanotusta opetusdatasta. Opetusdataa tarvitaan usein valtava määrä, menetelmästä ja sovel-luskohteesta riippuen datanäytteitä täytyy olla jopa kymmeniätuhansia. [13] Täl-laisen datamäärän tuottaminen kaikenlaisista esineistä on työlästä ja kallista, jol-loin koneoppimismenetelmien hyödyntäminen on rajoittunutta. [1] Fysikaaliseen mallinnukseen perustuvaa kohteentunnistusta kutsutaan mallipohjaiseksi kohteen-tunnistukseksi.

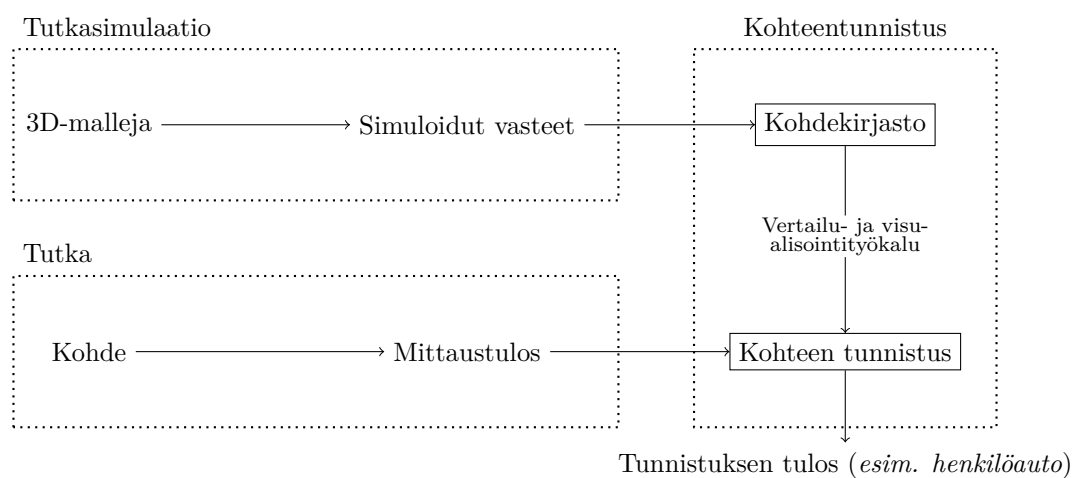
Tässä työssä esitellään vertailu- ja visualisointityökalu yllä mainitun kaltaisen malli-pohjaisen automaattisen kohteentunnistusjärjestelmän kohdekirjaston kehittämiseen. Työkalulla tuetaan kohdekirjaston kehittämistä ja laajentamista sekä tunnistusjär-jestelmän suorituskykyanalyysia. Kohteentunnistusjärjestelmän, ja sen olennaisina

osina toimivien tutkan ja tutkavastesimulaation teoriaan, ja toimintaperiaatteisiin perehdytään toisessa luvussa. Lisäksi toisessa luvussa esitellään työssä käytetyt tilastolliset etäisyydet, joita hyödynnetään työssä kehitetyssä vertailu- ja visualisointityökalussa. Kolmannessa luvussa tutustutaan työssä käytettävään kohdekirjastoon ja itse työkalun toimintaan, sekä analysoidaan työkalun toimintaa. Lopuksi luvussa 4 esitetään johtopäätökset ja yhteenveto työn sisällöstä.

2. TEORIA

Tutka on radioaaltosäteilyä hyödyntävä mittalaite, jota käytetään erinäisten kohteiden etäisyyden, korkeuden tai nopeuden määrittämiseen. Ensimmäiset kokeet tutkilla tehtiin 1900-luvun alussa, ja ensimmäinen laajamittainen tutkajärjestelmä *Chain Home* otettiin käyttöön Isossa-Britanniassa hieman ennen toista maailmansotaa. [6, s. 10-11]

Tutkalla voidaan myös tunnistaa kohteita sen antaman tutkavasteen perusteella, esimerkiksi mallipohjaisen automaattisen kohteentunnistusjärjestelmän avulla. Sen toiminta voidaan jakaa kolmeen osaan, jotka on esitetty kuvassa 2.1. Kuvassa on myös esitetty työssä esiteltävän työkalun summittainen sijainti kohteentunnistusjärjestelmän sisällä.



Kuva 2.1 Mallipohjaisen automaattisen kohteentunnistusjärjestelmän toiminta

Kohteentunnistusjärjestelmän ytimessä on tutkalta saadun mittaustuloksen vertaaminen tutkasimulaatiolla luodun kohdekirjaston sisältämiin kohteisiin. Vertailu etsii kirjastosta parhaan vastaavuuden mittaustulokselle, ja antaa sen tunnistuksen tuloksena, mikäli vastaavuus on riittävän suuri.

Järjestelmän osat on esitelty tässä luvussa omissa alaluvuissaan. Niissä käsitellään osien toiminta, sekä esitellään niihin liittyviä ilmiöitä ja ongelmia.

2.1 Tutka

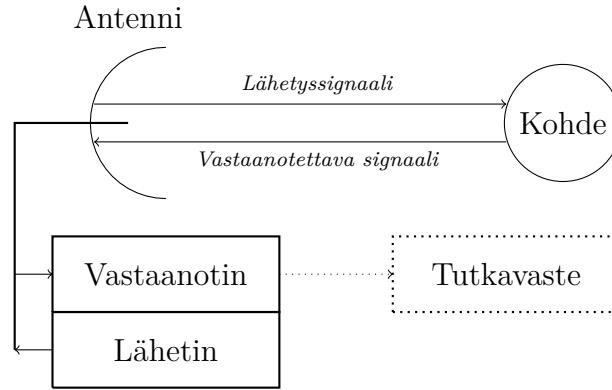
Monella ensimmäinen mielikuva tutkasta on kuvan 2.2 kaltainen: isolla pyöreällä ruudulla pyörii kirkas viiva, joka päivittää eri näköisiä ja kokosia läiskiä. Mielikuva on kuitenkin melko historiallinen. Eikä toki syyttä, sillä tutkat ovat olleet aina toisesta maailmansodasta lähtien valtioille kautta maailman yksiä tarkimmin vartioituja teknisiä järjestelmiä, eikä niiden nykytilasta kerrota eteenpäin.



Kuva 2.2 Mielikuvat tutkasta
[4], [3]

Tutkaa käytetään kuitenkin nykyään muuhunkin kuin ilmavalvontaan ja sotilaallisiin tarkoituksiin. Hieman lähempänä arkielämää tutkat ovat olleet esimerkiksi poliisien nopeustutkien ja meteorologien säätutkien muodossa. Siviilimarkkinoilla tutkat ovat käyneet tutuiksi esimerkiksi autojen automaattisten jarrutusjärjestelmien osana.

Tutkan yleinen toiminta on kuvattu kuvassa 2.3. Siinä on esitetty kaikista tutkista löytyvät peruskomponentit, eli lähetin, antenni ja vastaanotin. Lähetin muodostaa suuritehoisen signaalin, joka lähetetään antennilla. Kun lähetyssignaali osuu kohteeseen, siitä siroaa osa takaisin tutkaa päin. Antenni kerää palanneen signaalin, jonka vastaanotin tulkitsee ja muodostaa tutkavasteen. Tutkavasteen muoto ja sisältämä informaatio riippuvat tutkatyypistä. Esimerkiksi poliisin nopeustutkat antavat tutkavasteena kohteen nopeuden.



Kuva 2.3 Tutkan toiminta
[6, s.16]

Tutkat voidaan jakaa kategorioihin muun muassa lähetystavan, vasteen muodostumistavan ja antennien määrän mukaan, kuten taulukossa 2.1 esitellään.

Taulukko 2.1 Tutkakategorioita

Lähetystapa	Vasteen muotoutumistapa	Antennien määrä
pulssi	fyysinen	yksipaikkatutka
jatkuva	tiedustelu ja vastaus	kaksipaikkatutka
		monipaikkatutka

Lähetystapoja on kaksi: pulssi- ja kantoaalto- lähetys. Pulssitutkat lähettävät signaalinsa pulsseina, ja kantoaalto- tutkat lähettävät säteilyä jatkuvasti.

Tutkavaste muodostuu joko fyysisesti signaalin sirotessa kohteen pinnasta, kuten yllä olevassa kuvassa 2.3, tai vastauksena tutkan lähettämään tiedusteluun. Siroavaa säteilyä keräävä tutka on ensiötutka, ja tiedustelun vastauksia ”kuunteleva” tutka on toisiotutka. Tässä työssä keskitytään ensiötutkan tuottamaan tutkavasteeseen.

Jos tutkan lähettävä ja vastaanottava antenni ovat samat, kyseessä on yksipaikkatutka. Kaksipaikkatutkalla antennia on kaksi, joista toinen on lähettävä ja toinen on vastaanottava. Monipaikkatutkalla antennia on enemmän kuin kaksi, ja niistä useampi voi olla lähettävä, vastaanottava tai lähettävä ja vastaanottava.

Taulukko 2.2 Tutkien käyttämät taajuusalueet

Alueen tunnus	Taajuusalue	Aallonpituus
HF	3 - 30 MHz	10 - 100 m
VHF	30 - 300 MHz	1 - 10 m
UHF	0,3 - 3 GHz	0,3 - 1 m
L	1 - 2 GHz	15 - 30 cm
S	2 - 4 GHz	7,5 - 15 cm
C	4 - 8 GHz	3,75 - 7,5 cm
X	8 - 12 GHz	2,5 - 3,75 cm
K_u	12 - 18 GHz	1,67 - 2,5 cm
K	18 - 27 GHz	1,11 - 1,67 cm
K_a	27 - 40 GHz	0,75 - 1,11 cm
V	40 - 75 GHz	4,0 - 7,5 mm
W	75 - 110 GHz	2,7 - 4,0 mm
mm	110 - 300 GHz	1,0 - 2,7 mm

Lisäksi tutkat jaotellaan taajuusalueisiin niiden käyttämien taajuuksien mukaan. Taajuusalueiden jaossa käytetään usein IEEE:n jaottelua, joka on esitelty taulukossa 2.2. Eri taajuuksilla on omat ominaisuutensa muun muassa ilmakehässä vaimenemisessa, joten eri taajuusalueiden tutkilla on myös omat käyttökohteensa.

2.1.1 Tutkayhtälö

Tutkaa mallinnetaan tutkayhtälöllä,

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_T^2 R_R^2 L_T L_R}, \quad [14, s.9] \quad (2.1)$$

missä P_R on vastaanottoteho, P_T on lähetysteho, G_T on lähetysantennin antennivahvistus, G_R on vastaanottoantennin antennivahvistus, λ on tutkan käyttämä aallonpituus, σ on tutkakoikkipinta-ala, R_T on etäisyys lähetysantennilta kohteeseen, R_R on etäisyys vastaanottoantennilta kohteeseen, L_T on signaalihäviö lähettimessä ja L_R on signaalihäviö vastaanottimessa. Tutkayhtälö antaa yhteyden lähetetyn ja vastaanotetun signaalin voimakkuuksien välille.

Yksipaikkatutkan tapauksessa yhtälö esitetään usein myös yksinkertaisemmassa muodossa

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L}, \quad (2.2)$$

jossa antennivahvistukset yhdistetään yhdeksi antennivahvistukseksi G , etäisyydet

antenneilta kohteeseen etäisyydeksi R ja tutkahäviöt yhdeksi häviöksi L , koska yksipaikkatutkalla antenni on lähetettäessä ja vastaanottaessa sama. Tällöin myös antennivahvistus, antennin ja kohteen välinen etäisyys ja tutkan sisäiset häviöt ovat samat.

2.1.2 Tutkapoikkipinta-ala

Tutkapoikkipinta-ala σ (*engl. radar cross-section, RCS*) on se pinta-ala, kuinka isoksi kaiken säteilyn täysin heijastavaksi esineeksi tutkan näkemä kohde kuvautuu. Tutkapoikkipinta-alan muodostumisen taustalla on monimutkainen sähkömagneettinen prosessi. Kuten muutkin sähkömagneettiset aallot, myös tutkan lähettämät radioaallot heijastuvat, taittuvat, taipuvat ja siroavat.

Sironta on näistä prosesseista tutkan toiminnalle tärkein, sillä paluusignaalit muodostuvat pääosin siroamalla. Sironnassa osa kohteelle saapuneesta säteilystä absorboituu pinnan materiaaliin. Materiaalin atomit virittyvät tällöin korkeampaan energiatilaan, josta purkautuessaan atomit lähettävät ympärisäteilevästi saman taajuista säteilyä kuin absorboitunut säteily. [7, s.37-40]

Koska siroavaan säteilyyn vaikuttaa olennaisesti pinnan muodot ja materiaalit, myös tutkapoikkipinta-alaan vaikuttavat kohteen tutkan suuntainen projektiopinta-ala, kohteen pinnan muodot ja pinnan materiaalit. Tutkapoikkipinta-ala voidaan laskea kaavalla

$$\sigma = 4\pi \frac{W_{bs}}{S_i}, \quad [6, s.62] \quad (2.3)$$

missä W_{bs} on tutkan suuntaan sironnut teho avaruuskulmayksikköä kohden, ja S_i on kohteelle tuleva tehotiheys.

Sähkömagneettiset aallot siroavat monesta kohteen eri kohdasta, jotka muodostavat summautuessaan paluusignaalin. Sirontaa aiheuttaa kohteissa esimerkiksi reunat ja terävät kärjet. [6, s. 70] Tutkapoikkipinta-alaa voidaan sironnan monimutkaisuudesta johtuen pitää satunnaismuuttujana, jolloin sitä voidaan mallintaa todennäköisyysjakaumilla.

2.1.3 Tutkan resoluutio

Tutkan resoluutio kohteen vasteessa, eli erottelukyky voidaan jakaa kahteen osaan: spatiaaliseen ja mikro-Doppler -resoluutioon (*engl. micro-Doppler, $\mu\mathbf{D}$*). Spatiaalinen resoluutio kertoo kuinka lähekkäin kaksi kohdetta voivat vielä olla, että tutka

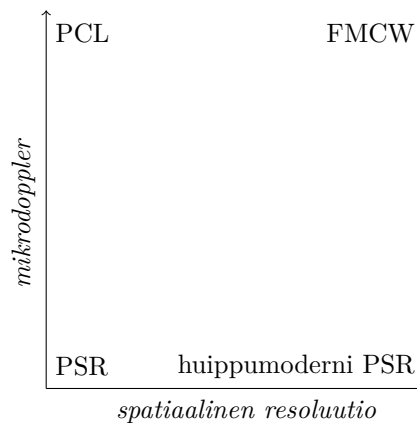
tulkitsen ne erilleen. Vastaavasti μD -resoluutio kertoo tutkan kyvystä kohteen pinnan värähtelyjen ja suunnan muutosten määrittämiseen Doppler-ilmion avulla.

Spatiaalinen resoluutio voidaan edelleen jakaa kolmeen osaan, atsimuutti-, elevaatio- ja etäisyysresoluutioihin. Etäisyysresoluutioon vaikuttaa ennen kaikkea tutkan käyttämä kaistanleveys B . Etäisyysresoluutiota voidaan mitata esimerkiksi pienimpänä kahden kohteen välisen etäisyyden muutoksena ΔR , jonka tutka kykenee erottamaan. ΔR saadaan

$$\Delta R = \frac{c}{2B}, [14, s.13] \quad (2.4)$$

missä c on valonnopeus. Huomattavaa on, että etäisyysresoluutio ei riipu tutkan ja kohteen välisestä etäisyydestä, vaan etäisyysresoluutio on kaikilla mittausetäisyyksillä sama.

Atsimuutti- ja elevaatioresoluutiot, eli suunta- ja korkeuskulman tarkkuudet riippuvat tutkan keilan muodosta. Mitä pienempi keila on, sitä suurempiin kulmatarkkuuksiin päästään. Atsimuuttiresoluutio riippuu keilan leveydestä ja elevaatioresoluutio riippuu keilan korkeudesta.



Kuva 2.4 Tutkatyyppien resoluutiot

Korkeaan μD -resoluutioon vaikuttaa etenkin se, kuinka usein tutka saa vastetta kohteesta. Kohteen mekaanisten värähtelyjen ja rotaatioiden mittaaminen vaatii tiheää päivitystaajuutta. Kantoaalto-utukat ovat siksi erittäin tarkkoja μD -resoluutiossa, sillä niiden jatkuva lähetys takaa jatkuvat päivitykset. Sen sijaan perinteisillä pulssitutkilla ei ole juurikaan μD -resoluutiota, sillä niiden päivitystaajuus ei riitä kuin kohteen nopeuden mittaamiseen.

Korkeampi resoluutio antaa yksityiskohtaisemman tutkavasteen kohteesta, mikä helpottaa tunnistustehtävää. Hintana tarkempi resoluutio vaatii suurempaa laskentatehoa ja tallennustilaa. Kohteentunnistusjärjestelmän tapauksessa laskentatehon

ja tarpeeksi hyvän resoluution välillä täytyy lopulta päätyä kompromissiin, jotta reaaliaikaisen järjestelmän vaatimukset saavutetaan.

Tutkatyyppien välillä on suuria eroja resoluutiossa johtuen niiden hyvin erilaisista käyttökohteista. Kuvassa 2.4 esitellään eri tutkatyyppien resoluutio-ominaisuuksia. Esimerkiksi pulssitutkina toteutetut valvontatutkat (*engl. primary surveillance radar, PSR*) eivät voi olla hirvittävän tarkkoja spatiaaliselta resoluutioltaan, sillä niiden kantamat ovat satoja kilometrejä maanpinnan suuntaisesti ja kymmeniä kilometrejä korkeussuunnassa. [3] Näin iso avaruus on jaettava melko isoihin osiin, jotta niiden tuottamaa dataa voitaisiin käsitellä reaaliajassa. Spatiaalisen resoluution kasvattamista voidaan kuitenkin pitää valvontatutkien kehitymissuuntana.

Resoluution toisesta ääripäästä löytyy taajuusmoduloitu kantoaaltotutka (*engl. frequency modulated continuous wave radar, FMCW*), jota käytetään usein lentokoneissa korkeusmittarina ja nykyään myös lyhen kantaman siviilisovelluksissa, kuten juuri autoissa. Taajuusmoduloitu kantoaaltotutka toimii muuten vastaavasti kuin kantoaaltotutka, mutta se saavuttaa korkean μD -resoluution lisäksi korkean spatiaalisen resoluution moduloimalla lähettämäänsä kantoaaltoa. Vastaavasti tavanomaiset kantoaaltotutkat, kuten passiiviset tutkat, joista esimerkkinä kuvassa on **PCL** (*engl. passive coherent locator*), eivät kykene määrittämään kohteiden sijaintia kovin tarkasti.

Tutkien resoluutio on viety äärimmilleen kuvantavissa tutkissa. Ne vaativat erityisen mittalaitteiston, ja paljon laskentaa, mutta vastavuoroisesti ne tuottavat lähes valokuvamaisia tutkavasteita. Yksi yleisimmistä kuvantavista tutkista on synteettisen apertuurin tutka **SAR** (*engl. synthetic-aperture radar*).

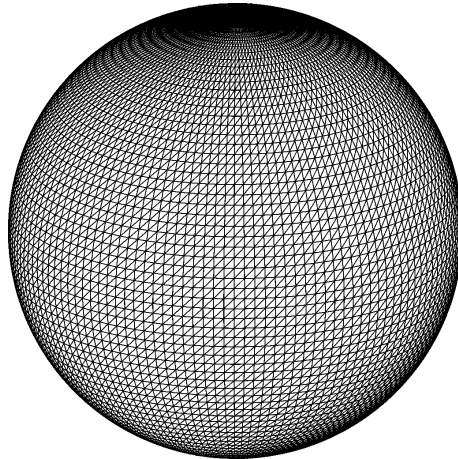


Kuva 2.5 SAR-kuva helikopterista ja lentokoneesta
[12]

Kuvassa 2.5 on Yhdysvaltain energiaministeriön alaisen Sandia National Laboratoriesin ottama SAR-kuva helikopterista ja lentokoneesta. Kuvasta voi nähdä hyvinkin yksityiskohtaisia asioita, kuten pensaita.

2.2 Tutkasimulaatio

Tutkavastetta simuloidaan sovelluksilla, joissa hyödynnetään tietoa tutkapaikkipinta-alan muodostumisesta. Sovelluksiin syötetään kohdekirjastoon lisättävän kohteen 3D-malli, jolle määritetään tutkapaikkipinta-ala suunnan funktiona. Tässä työssä käytetyn kohdekirjaston kappaleiden simuloinnissa tutkasäteilyä mallinnetaan säteenjäljityksen avulla. Sillä mallinnetaan tutkasäteilyn sirontaa kohteen pinnalla ja saadaan arvio kohteen tietyn suunnan heijastavuudesta.



Kuva 2.6 Pallon 3D-malli

Simulaatiot eivät tietenkään ole täydellisiä. Ensinnäkään 3D-mallit eivät kykene esittämään kuin suoria pintoja tarkasti. Kaikki työssä käytetyt 3D-mallit mallinnetaan kolmioimalla varsinaisten kappaleiden pinnat. Tällöin kaarevien pintojen muodot muuttuvat todellisista. Kolmioinnin näkee hyvin pallon 3D-mallia esittävässä kuvassa 2.6.

Simulaation tuloksen saa tarpeeksi luotettavaksi tarkalla mallilla, mutta tarkassa mallissa täytyy myös olla paljon kolmioita. Kolmioiden määrän kasvaessa simulaation ajoaika kasvaa, jolloin laskenta-ajan ja simulaation tarkkuuden välillä pitää löytää sopiva kompromissi. [9, 10] Toisaalta automaattisen kohteentunnistuksen sovelluksissa kirjastoitavat kohteet on tarve simuloida vain lisättäessä ne kirjastoon. Näin ollen useiden päivien tai viikkojenkin mittainen laskenta-aika voi olla hyväksyttävissä.

Toisekseen simulaatiossa pitäisi pystyä määrittämään pinnan materiaalien ominaisuudet tarkasti. Tämä lisää simulaation kompleksisuutta, jonka myötä myöskin materiaalien ominaisuuksissa täytyy tyytyä kompromissiin ajoajan ja tarkkuuden välillä. Materiaalien määrittäminen 3D-mallien kaikille kolmioille on lisäksi työlästä, eikä täydellistä materiaalitietoa ole käytännössä mahdollista saada.

2.3 Kohteentunnistus

Useissa tunnistusongelmissa hyvin keskeisessä roolissa on todennäköisyysjakaumien vertailu, jota voidaan tehdä esimerkiksi tilastollisen etäisyyden menetelmien avulla. Vertailu suoritetaan testaamalla mittausta vuorollaan kaikkiin kohdekirjaston kohteisiin, joista tunnistustulokseksi valitaan tilastollisesti lähinnä mittausta oleva.

Mikäli mittauksen etäisyys kaikkiin kirjastoituihin kohteisiin ylittää valitun kynnyksarvon, voidaan kohde luokitella tuntemattomaksi. Tilastollisilla etäisyyksillä suoritettavalla vertailulla on roolinsa myös kohdekirjaston laajentamisessa ja sen rakenteen suunnittelussa, simuloitujen vasteiden laadun varmistamisessa sekä kohteentunnistuksen suorituskykyanalyysissä.

2.3.1 Tilastolliset etäisyydet

Tilastollinen etäisyys on mitta siitä, kuinka kaukana kaksi satunnaislukua tai kaksi todennäköisyysjakaumaa ovat toisistaan. Tilastollisen etäisyyden laskemiseen on monta erilaista menetelmää, joilla on kaikilla omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Tässä työssä käytetään neljää menetelmää: kokonaisvaihteluetäisyyttä (*engl. total variation distance*, **TVD**), Hellingerin etäisyyttä, Bhattacharyyan etäisyyttä ja maansiirtoetäisyyttä (*engl. earth mover's distance*, **EMD**).

Kokonaisvaihteluetäisyys d_{kok} lasketaan

$$d_{kok}(P, Q) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k |p_i - q_i|, \quad [2] \quad (2.5)$$

missä P ja Q ovat diskreettejä todennäköisyysjakaumia, p_i ja q_i näiden jakaumien pylväitä (*engl. bin*) ja k on pylväiden kokonaismäärä. Kokonaisvaihteluetäisyyttä kutsutaan toisinaan myös yksinkertaisesti *tilastolliseksi etäisyydeksi*. Kokonaisvaihteluetäisyys kuuluu niin sanottujen f -divergenssien joukkoon. Se saa arvoja väliltä $[0, 1]$.

Myös Ernst Hellingerin vuonna 1909 kehittämä Hellingerin etäisyys d_{hel} ,

$$d_{hel}(P, Q) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^k (\sqrt{p_i} - \sqrt{q_i})^2}, \quad [2] \quad (2.6)$$

on f -divergenssi. Samaan tapaan kuin kokonaisvaihteluetäisyys, Hellingerin etäisyys saa arvoja väliltä $[0, 1]$.

Bhattacharyyan etäisyys d_{bhat} ,

$$d_{bhat}(P, Q) = -\ln \left(\sum_{i=1}^k \sqrt{p_i q_i} \right), \quad [5] \quad (2.7)$$

on Anil Kumar Bhattacharyyan 1930-luvulla kehittämä tilastollinen etäisyys. Bhattacharyyan etäisyys saa arvoja väliltä $[0, \infty)$. Bhattacharyyan kertoimella $BC =$

$\sum_{i=1}^k \sqrt{p_i q_i}$ on yhteys Hellingerin etäisyyteen $d_{hel}(P, Q) = \sqrt{1 - BC(P, Q)}$.

Maansiirtoetäisyys tarjoaa edellisistä hieman erilaisen lähestymistavan tilastollisen etäisyyden selvittämiseen. Taustalla on ajatus maansiirtäjistä, jonka tehtävänä on muokata kahdesta hiekkakasasta samanlaiset. Maansiirtoetäisyys on pienin määrä työtä, jolla hiekkakasojen samankaltaistaminen onnistuu.

Kyseessä on siis optimointiongelma, jossa pyritään löytämään sellainen vuo $F = [f_{ij}]$, missä f_{ij} on vuo p_i ja q_j välillä, joka minimoi työn W

$$W = (P, Q, F) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k d_{ij} f_{ij}, \quad [11] \quad (2.8)$$

missä d_{ij} on etäisyys pylväiden p_i ja q_j välillä, sekä noudattaa ehtoja

$$\begin{aligned} f_{ij} &\geq 0, & 1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq k, \\ \sum_{j=1}^k f_{ij} &\leq w_{p_i}, & 1 \leq i \leq k, \\ \sum_{i=1}^k f_{ij} &\leq w_{q_j}, & 1 \leq j \leq k, \\ \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k f_{ij} &= \min\left(\sum_{i=1}^k w_{p_i}, \sum_{j=1}^k w_{q_j}\right), & [11] \end{aligned}$$

missä w_{p_i} on pylvään p_i paino ja w_{q_j} on pylvään q_j paino. Kun tällainen vuo F on löydetty, maansiirtoetäisyys d_{emd} saadaan

$$d_{emd}(P, Q) = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k d_{ij} f_{ij}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k f_{ij}}, \quad [11] \quad (2.9)$$

ja se saa arvoja väliltä $[0, k - 1]$, jolloin se voidaan normalisoida välille $[0, 1]$ kertomalla $\frac{1}{k-1}$. Tässä työssä käytetään maansiirtoetäisyyttä vain normalisoituna.

Maansiirtoetäisyys on muita tässä työssä käytettyjä tilastollisia etäisyyksiä huomattavasti monimutkaisempi. Siksi myös maansiirtoetäisyyden laskennallinen kompleksisuus on muita tilastollisia etäisyyksiä suurempi, jopa yli $O(N^3)$, missä N on vertailtavien histogrammien pylväiden määrä. [8] Automaattisen kohteentunnistusjärjestelmän käytössä maansiirtoetäisyys voi tuottaa siis vaikeuksia reaaliaikaisuudessa, ellei käytä edistyneempiä algoritmeja, jollaisen esimerkiksi Ling ja Okada esittelevät artikkelissaan [8].

3. VERTAILU- JA VISUALISOINTITYÖKALU

Pinnan muodot ja materiaalit sekä sironta muuntavat sinänsä helposti ymmärrettävän projektiopinta-alan tutkapoikkipinta-alaksi niin, ettei ihminen sitä intuitiivisesti enää kykene päättämään. Vertailu- ja visualisointityökalun tarkoituksena on auttaa ihmistä ymmärtämään erilaisten visualisaatioiden avulla, mistä erot kohdekirjaston kohteiden ja mitattujen tutkapoikkipinta-alojen välillä löytyvät ja kuinka suuria ne ovat. Lisäksi työkalulla voidaan tuottaa tietoa kohdekirjaston mallinnettujen kohteiden keskinäisistä eroista kohteentunnistuksen suorituskyvyn arviointia varten.

3.1 Kohdekirjasto

Tässä työssä käytetyn kohdekirjaston ovat muodostaneet Tampereen teknillisen yliopiston Signaalinkäsittelyn laboratorion tutkijat Henna Perälä ja Minna Väilä. Kirjasto koostuu viidestä mittauksesta ja kymmenestä simuloinnista. Kohdekirjaston kappaleet on lueteltu taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1 Kohdekirjaston kohteet

Mittaukset	Simuloinnit	
Toyota Corolla	VW Golf	salmiakki
Ford Focus	helikopteri	UAV
VW Golf pakettiauto	matkustajakone	kuutio
traktori	pienkone	pallo
	potkurikone	sylinteri

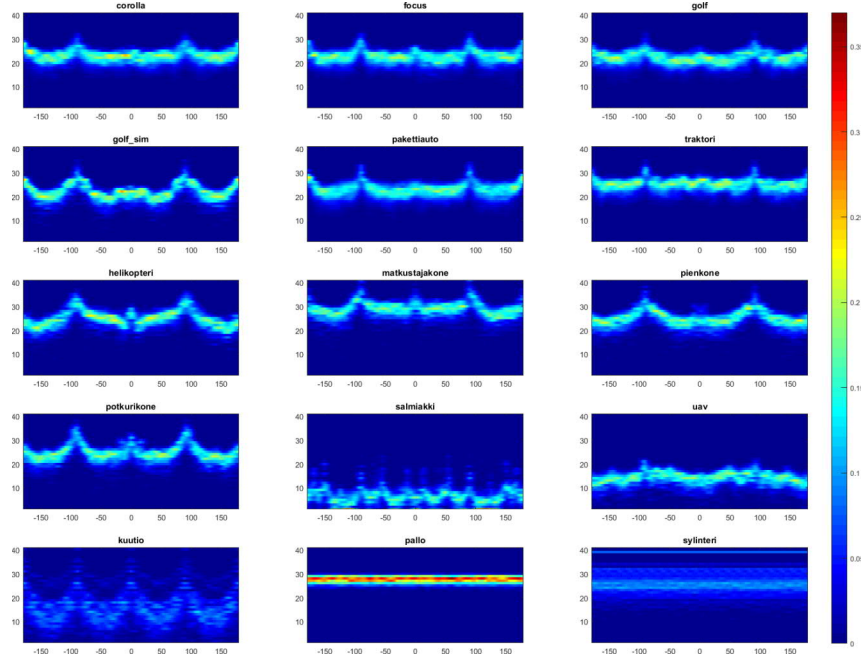
Simuloinnit on suoritettu luvussa 2.2 esiteltyyn tapaan, eli ne sisältävät tiettyjä epäideaalisuuksia ja muita todellisuudesta poikkeavia tekijöitä, jotka lopulta vaikuttavat myös vertailun tuloksiin. Kirjastoon on kerätty ilmailun yleiskohteita, kuten matkustajakone ja helikopteri. Ilmailun piiristä kirjastoon on sisällytetty myös häivelentokonetta mallintava vinoneliön muotoinen ”salmiakki”, sekä miehittämätön ilma-alus eli UAV (*engl. unmanned aerial vehicle*). Lisäksi kirjastosta löytyy peruskappaleita, joita voidaan käyttää eräänlaisina vertailukohtina ja havainnollistavina esimerkkeinä niiden yksinkertaisten muotojen vuoksi.

Mittausasetelma on esitetty kuvassa 3.1. Mittaukset on suoritettu siten, että kohteet on ensin asetettu kääntöpöydälle. Seuraavaksi kääntöpöytää on käännetty atsimuuttisuunnassa ϕ ympäri, ja kohteen tutkapoikkipinta-alaa on mitattu jatkuvasti paikallaan pysyneellä tutkalla.



Kuva 3.1 Mittaustilanne

Yhden kohteen mittaukset toistettiin useamman korkeuskulman suhteen, ja kaikki näin saadut kohteen tutkapoikkipinta-alat koostettiin yhteen histogrammimatriisiin. Matriisit ovat kooltaan 41×360 . Yhteen sarakkeeseen on tallennettuna 41 pylvään histogrammina yhden atsimuuttisuunnan tutkapoikkipinta-alojen esiintymistodennäköisyydet kaikkien mitattujen korkeuskulmien yli. Tutkapoikkipinta-ala on suurempi korkeamman järjestysluvun pylväissä. Atsimuutti ϕ vaihtelee -180 asteesta 179 asteeseen siten, että kohteen keula on asetettu nollian asteen kohdalle.



Kuva 3.2 Histogrammimatriisit

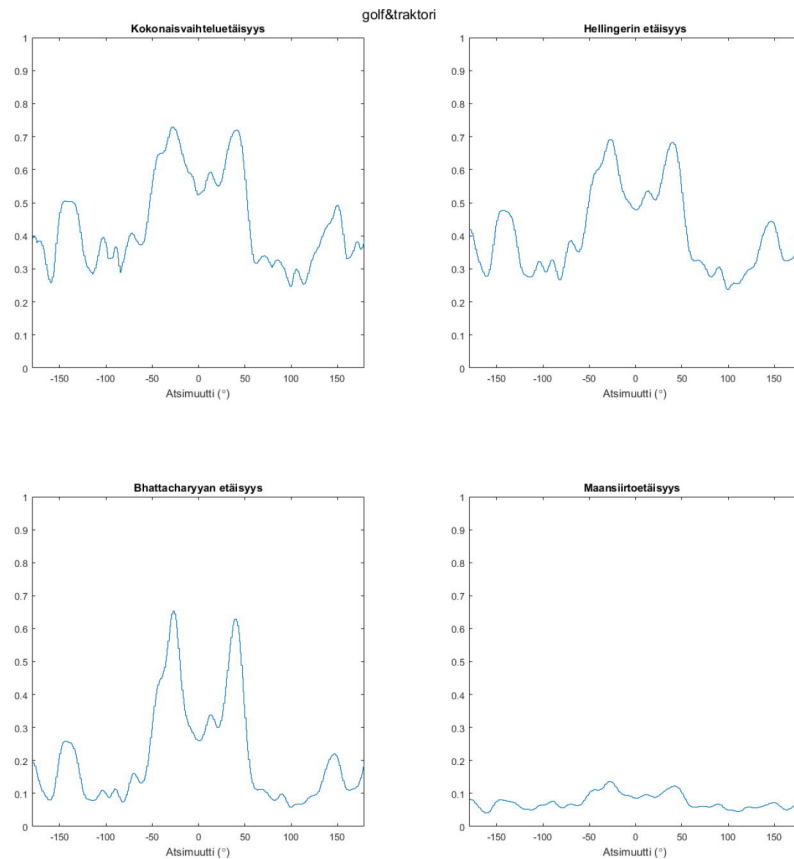
Simuloitujen kappaleiden vasteet on simuloitu vastaavilla parametreilla kuin varsinaisessa mittauksessa. Kaikkien kappaleiden histogrammimatriisit esitetään ku-

vassa 3.2. Kuvassa vaaka-akselilla on atsimuuttikulma ϕ , pystyakselilla on tutkapaikkipinta-ala σ ja värillä kuvataan esiintymistodennäköisyyttä.

3.2 Vertailu ja visualisointi

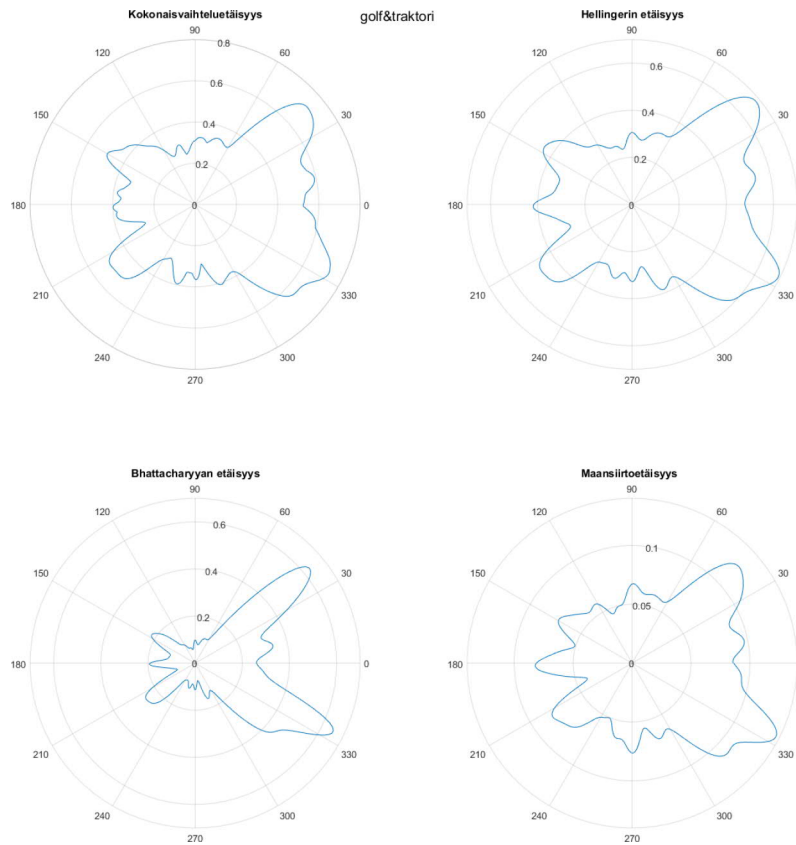
Tutkapaikkipinta-alojen vertailu saadaan ulkoistettua algoritmeille, antamalla mitaamalla ja simuloimalla saadut histogrammimatriisit luvussa 2.3.1 esitettyjen tilastollisten etäisyyksien käsiteltäviksi. Näiltä saatuja tuloksia voidaan vuorostaan visualisoida monin eri tavoin, hyödyntäen esimerkiksi MATLAB -kirjastoja. Käytettyjen tilastollisten etäisyyksien MATLAB -toteutukset esitellään liitteessä A.

Tässä alaluvussa esitellään visualisoinnit suppeasti työn luettavuuden parantamiseksi. Esimerkkejä on kerätty enemmälti liitteeseen B.



Kuva 3.3 Golfin ja traktorin tilastolliset etäisyydet karteesisessa koordinaatistossa

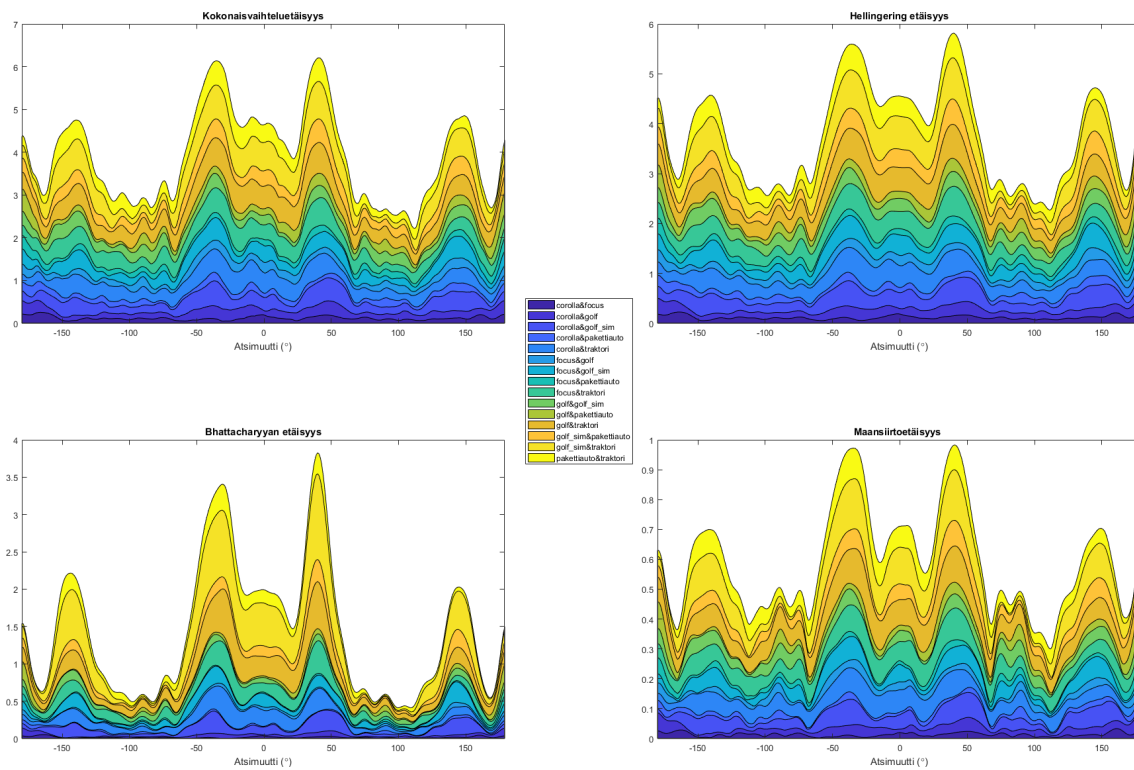
Yksinkertaisin visualisaatio vertailun tuloksille on piirtää tilastolliset etäisyydet atsimuuttisuunnan ϕ funktiona, kuten kuvassa 3.3. Tässä kaikki etäisyydet on piirretty samalle asteikolle nolasta yhteen. Näin voidaan arvioida tilastollisten etäisyyksien suhteellisia suuruuksia toisiinsa nähden.



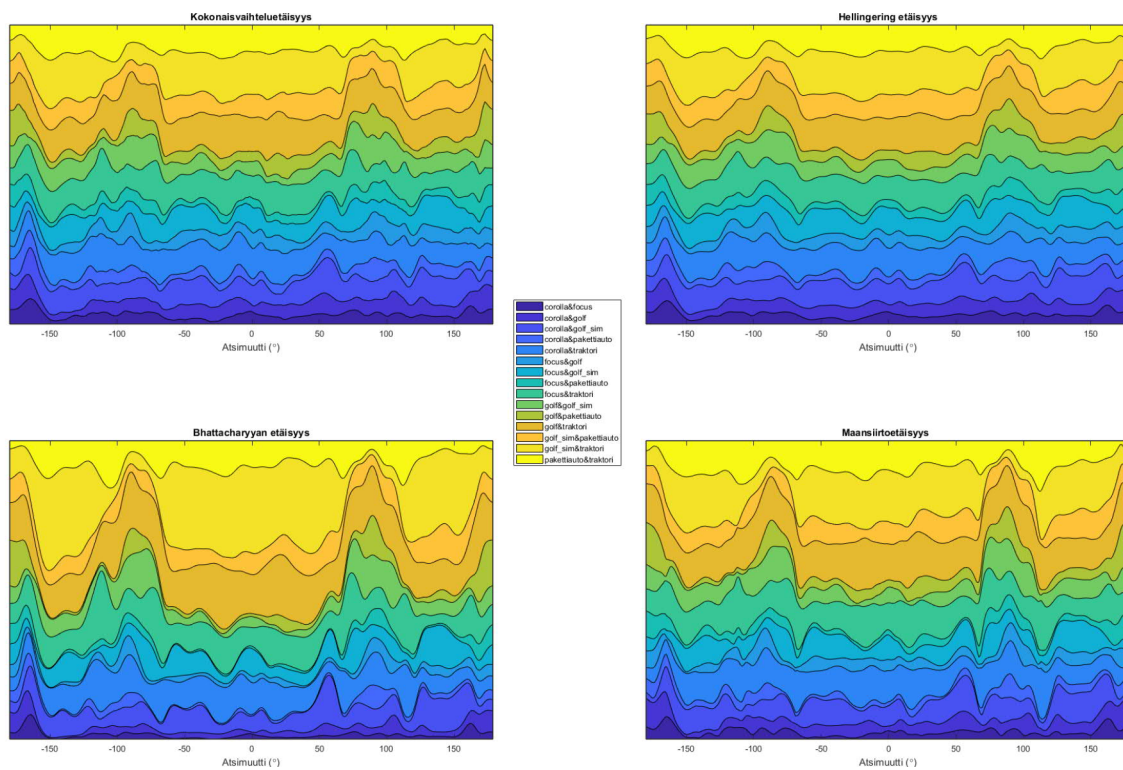
Kuva 3.4 Golfin ja traktorin tilastolliset etäisyydet polaarikoordinaatistossa

Havainnollistavamman tuloksen saa piirtämällä saman käyrän polaarikoordinaatistoon, jossa atsimuuttisuunta on esitetty intuitiivisesti, kuten kuvassa 3.4. Tässä kuvassa MATLAB:n on annettu säätää asteikon yläraja kullekin etäisyydelle sopivaksi, jolloin myös esimerkiksi maansiirtoetäisyyden muodot paljastuvat paremmin. Muodoista voidaan päätellä esimerkiksi, että Golf ja traktori eroavat toisistaan eniten kaikilla käytetyillä menetelmillä noin 45° keulan vasemmalta ja oikealta puolelta.

Aluekaaviot mahdollistavat useamman kappaleen ristiinvertailun esittämisen yhtäaikaaisesti. Aluekaaviot piirretään toistensa päälle pinoten, mikä korostaa atsimuuttisuuntia, joissa on kohteiden välillä paljon eroja, kuten kuvasta 3.5 voidaan huomata. Aluepiirrokset voidaan myös normalisoida tasakorkuiseksi, jolloin piirros näyttää atsimuuttisuunnittain, minkä kohteiden välillä on suhteellisesti suurimpia eroja. Kuvan 3.5 normalisoitu versio on esitetty kuvassa 3.6. Aluekaavioita on esitelty laajemmin liitteen B kuvissa B.7 – 12.



Kuva 3.5 Autojen keskinäiset tilastolliset etäisyydet aluepiirroksina



Kuva 3.6 Autojen keskinäiset tilastolliset etäisyydet normalisoituna aluepiirroksina

Tilastollisten etäisyyksien eroja voidaan tarkastella esimerkiksi vertailemalla kaikkia kohdekirjaston kappaleita keskenään ja keskiarvottamalla atsimuuttisuunnan yli saadut tilastolliset etäisyydet. Taulukoihin 3.2 ja 3.3 on kerätty tällä tavalla saadut keskiarvot.

Taulukko 3.2 Kokonaisvaihteluetaisyyden (päälävistäjän yllä) ja Hellingerin etäisyyden (päälävistäjän alla) keskiarvot kirjaston kappaleiden välillä

corolla	0	0,1191	0,1788	0,2937	0,1263	0,3407	0,3934	0,7298	0,3475	0,2875	0,9482	0,8929	0,6946	0,7866	0,4663
focus	0,1162	0	0,1586	0,2761	0,1261	0,3641	0,3844	0,7340	0,3536	0,2923	0,9396	0,8732	0,6628	0,7959	0,4717
golf	0,1652	0,1483	0	0,2293	0,1789	0,4398	0,4427	0,7784	0,4147	0,3626	0,9359	0,8516	0,6525	0,8424	0,5207
golf_sim	0,2888	0,2750	0,2290	0	0,2789	0,4835	0,4932	0,8026	0,4919	0,4243	0,9294	0,8183	0,6397	0,8252	0,5753
pakettiauto	0,1248	0,1261	0,1745	0,2801	0	0,3283	0,3848	0,6984	0,3426	0,2803	0,9424	0,8743	0,6650	0,7679	0,4469
traktori	0,3228	0,3395	0,4082	0,4616	0,3019	0	0,2968	0,5299	0,2911	0,2704	0,9684	0,9499	0,7465	0,5602	0,3412
helikopteri	0,3746	0,3666	0,4154	0,4740	0,3631	0,2787	0	0,5539	0,2046	0,2289	0,9562	0,9395	0,7391	0,6405	0,4206
matkustajakone	0,6874	0,6937	0,7379	0,7593	0,6637	0,5013	0,5153	0	0,5382	0,5759	0,9857	0,9844	0,8289	0,4533	0,4310
pienkone	0,3394	0,3445	0,3955	0,4730	0,3346	0,2803	0,2019	0,5070	0	0,2123	0,9605	0,9418	0,7416	0,6349	0,4072
potkurikone	0,2847	0,2871	0,3471	0,4136	0,2762	0,2611	0,2313	0,5349	0,2181	0	0,9551	0,9279	0,7243	0,6854	0,4102
salmiikki	0,9303	0,9189	0,9112	0,9044	0,9215	0,9602	0,9515	0,9863	0,9566	0,9500	0	0,7324	0,6503	0,9985	0,9499
UAV	0,8476	0,8250	0,8032	0,7776	0,8280	0,9163	0,9126	0,9725	0,9137	0,8946	0,6606	0	0,4432	0,9995	0,9154
kuutio	0,6375	0,6108	0,6003	0,6010	0,6111	0,6861	0,6858	0,7765	0,6905	0,6740	0,5997	0,4452	0	0,8952	0,7043
pallo	0,7544	0,7678	0,8165	0,8161	0,7432	0,5410	0,6154	0,4638	0,6150	0,6540	0,9989	0,9994	0,8455	0	0,6069
syylinteri	0,4811	0,4844	0,5222	0,5676	0,4661	0,3842	0,4378	0,4242	0,4310	0,4328	0,9466	0,8767	0,6612	0,5831	0

Taulukot ovat jaettu niin, että taulukon päälävistäjän ylle on kerätty eri tilastollisen etäisyyden tulokset kuin päälävistäjän alle. Taulukossa 3.2 yllä on kokonaisvaihteluetaisyyden ja alla Hellingerin etäisyyden keskiarvot. Vastaavasti taulukossa 3.3 on yllä Bhattacharyyan etäisyyden ja alla maansiirtoetaisyyden keskiarvot.

Taulukko 3.3 Bhattacharyyan (päälävistäjän alla) ja maansiirtoetaisyyksien (päälävistäjän yllä) keskiarvot kirjaston kappaleiden välillä

corolla	0	0,0152	0,0311	0,1034	0,0173	0,1270	0,1761	0,6795	0,1494	0,1103	2,2252	1,3554	0,5520	0,9786	0,2783
focus	0,0131	0	0,0243	0,0926	0,0181	0,1396	0,1774	0,6954	0,1583	0,1117	2,0647	1,1994	0,4945	1,0277	0,2836
golf	0,0237	0,0193	0	0,0582	0,0379	0,2118	0,2406	0,8404	0,2101	0,1632	1,9593	1,1134	0,4662	1,3002	0,3392
golf_sim	0,0427	0,0383	0,0332	0	0,0948	0,3457	0,3246	0,9852	0,2854	0,2285	2,0635	1,0984	0,4561	1,8349	0,4449
pakettiauto	0,0139	0,0157	0,0254	0,0399	0	0,1144	0,1670	0,6278	0,1461	0,0983	2,0932	1,2435	0,4891	0,9251	0,2607
traktori	0,0526	0,0599	0,0752	0,0824	0,0537	0	0,0965	0,3050	0,0934	0,0779	2,8724	1,9207	0,6697	0,3613	0,1635
helikopteri	0,0660	0,0668	0,0774	0,0861	0,0670	0,0464	0	0,3598	0,0449	0,0634	2,8943	1,8886	0,6825	0,6043	0,2260
matkustajakone	0,1488	0,1562	0,1715	0,1786	0,1492	0,0964	0,1017	0	0,3645	0,3877	4,0455	3,1151	0,9729	0,2821	0,2093
pienkone	0,0589	0,0613	0,0731	0,0843	0,0609	0,0461	0,0246	0,0995	0	0,0560	2,9777	1,9109	0,6858	0,5596	0,2120
potkurikone	0,0498	0,0511	0,0650	0,0730	0,0512	0,0423	0,0315	0,1080	0,0294	0	2,8724	1,7400	0,6292	0,6475	0,2186
salmiikki	0,3942	0,3867	0,3714	0,3643	0,3937	0,4466	0,4413	0,5429	0,4436	0,4350	0	0,6629	0,5050	12,1559	2,5293
UAV	0,2248	0,2174	0,2021	0,1950	0,2244	0,2773	0,2720	0,3736	0,2743	0,2657	0,1712	0	0,2391	17,0707	1,5022
kuutio	0,1874	0,1791	0,1692	0,1634	0,1841	0,2315	0,2290	0,3206	0,2302	0,2189	0,2231	0,1008	0	1,2921	0,6183
pallo	0,1237	0,1317	0,1462	0,1551	0,1265	0,0754	0,0939	0,0534	0,0911	0,1006	0,5171	0,3477	0,3043	0	0,4157
syylinteri	0,1074	0,1140	0,1283	0,1395	0,1094	0,0688	0,0906	0,0815	0,0872	0,0911	0,4984	0,3291	0,2760	0,0892	0

Värillä on merkitty taulukoissa 3.2 ja 3.3 luvun suhteellista suuruutta verrattuna samalla tilastollisella etäisyydellä laskettuun keskiarvoon. Väreistä vihreä kuvaa pientä, keltainen lähellä keskiarvoa olevaa ja punainen suurta arvoa. Tuloksista

voidaan huomata, että erityisesti UAV ja salmiakki aiheuttavat suuria eroja riskiinvertailuissa. Kirjaston autot saavat pienimpiä keskiarvoja, etenkin Corolla ja Focus.

3.3 Tulosten analysointi

Visualisaatiot tuovat hyvin esiin eri tilastollisten etäisyyksien ominaisuuksia. Ne näyttävät samansuuntaisia tuloksia, etenkin tavanomaisissa tapauksissa, kuten autojen keskinäisissä vertailuissa. Näitä on esitelty liitteen B kuvissa B.1 ja B.2. Kuvista voidaan huomata, että suurimpien tilastollisten etäisyyksien piikit osuvat samoihin kohtiin menetelmästä riippumatta.

Suurin ero tavanomaisissa tapauksissa eri menetelmien välille tulee niillä laskettujen tilastollisten etäisyyksien suuruuteen. Kokonaisvaihtelu- ja Hellingerin etäisyys saavat toisiinsa verrattuna suurin piirtein saman suuruisia arvoja. Maansiirtoetäisyys voi saada arvoja nollan ja yhden väliltä, mutta usein sillä lasketut tilastolliset etäisyydet ovat lukuarvallisesti kovin pieniä. Bhattacharyyan etäisyys saa arvoja hyvin vaihtelevasti, välillä alittaen jopa maansiirtoetäisyyden, mutta usein sillä saadut arvot ylittävät moninkertaisesti muilla menetelmillä saadut, vastaavat piikit. Suuret vaihtelut Bhattacharyyan etäisyydellä laskettuissa tilastollisissa etäisyyksissä johtuvat ennen kaikkea menetelmän arvojoukosta $[0, \infty)$. Tämä tekee myös Bhattacharyyan etäisyydellä laskettujen tilastollisten etäisyyksien suuruuden suhteellisesta arvioinnista mahdotonta, koska lukuarvoja täytyisi verrata äärettömään. Muilla menetelmillä ei ole tätä ongelmaa, sillä ne saavat arvonsa aina väliltä $[0,1]$.

Erityislaatuiset tapaukset – kuten kun verrataan mitä tahansa kirjaston kohdetta pienen tutkapoikkipinta-alan salmiakkiin – aiheuttavat kokonaisvaihtelu- ja Hellingerin etäisyyksille vaikeuksia, minkä voi nähdä liitteen B kuvissa B.4 – 6. Vaikka verratessa suuren tutkapoikkipinta-alan kohdetta pieneen tilastollisen etäisyyden kuuluukin olla iso, kokonaisvaihtelu- ja Hellingerin etäisyys eivät pysty esittämään näitä vertailutilanteita todenmukaisesti. Ne saavat melko helposti maksimiarvonsa 1. Tämä johtuu näiden kahden menetelmän laskentatavasta: siinä lasketaan vähennyslaskulla todennäköisyysjakaumien päällekkäisyyttä. Näin mahdollistuu esimerkiksi tilanne, jossa kahdella limittäin jakautuneella todennäköisyysjakaumalla voi olla silmämääräisesti hyvin samanlainen muoto, mutta päällekkäisyyden puuttuessa kokonaisvaihtelu- ja Hellingerin etäisyys tulkitsevat jakaumien olevan täysin erit. Bhattacharyyan ja maansiirtoetäisyydet onnistuvat esittämään myös toisistaan tilastollisesti kauempana olevien kohteiden tutkapoikkipinta-alojen eroja hyvin.

4. YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin tutkakohteiden vertailua ja vertailutulosten visualisointia automaattisen kohteentunnistuksen ja siihen liittyvän kohdekirjaston kehittämisen tarpeisiin. Kohteiden tutkapoikkipinta-alasta koostettuja histogrammeja vertailtiin eri tilastollisen etäisyyden laskentamenetelmiä käyttäen. Työssä tarkasteltavia menetelmiä olivat kokonaisvaihteluetäisyys, Hellingerin etäisyys, Bhattacharyyan etäisyys ja maansiirtoetäisyys. Saatuja etäisyyksiä visualisoitiin usein eri tavoin.

Automaattisen kohteentunnistuksen toimintaan löydettiin hyvin soveltuva tilastollinen etäisyyden laskentamenetelmä: maansiirtoetäisyys. Se pärjää työhön valituista tilastollisista etäisyyksistä kaikenlaisissa analyysitilanteissa parhaiten. Sen ilmaisuvoima on riittävä tilanteesta riippumatta toisin kuin kokonaisvaihtelu- ja Hellingerin etäisyydellä, eikä se kärsi Bhattacharyyan etäisyyden suuresta vaihtelusta tai suhteettomuudesta.

Kokonaisuutena esiteltyä vertailu- ja visualisointityökalua voi pitää onnistuneena, koska se auttaa näkemään eroja tutkapoikkipinta-alojen välillä tarkastelusuunnan huomioiden. Vertailu- ja visualisointityökalu tukee kohdekirjaston laajentamista ja sen rakenteen suunnittelua. Toisaalta kun verrataan kohdekirjastoon simuloitua kohdetta ja vastaavaa mittausta, voidaan arvioida mallinnetun tutkavasteen paikansäilyvyyttä. Lisäksi työkalun tuottamaa tietoa on mahdollista hyödyntää kohteentunnistusjärjestelmän suorituskykyanalyysissä, kun arvioidaan, minkä kohteiden erotteluun tunnustusjärjestelmän tulisi kyetä mistäkin suunnasta.

LÄHTEET

- [1] Khalid El-Darymli, Eric W. Gill, Peter McGuire, Desmond Power, ja Cecilia Moloney. Automatic Target Recognition in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-Art Review. *IEEE Access*, 2016.
- [2] Alison L. Gibbs ja Francis Edward Su. On Choosing and Bounding Probability Metrics. *International Statistical Review*, 2002.
- [3] Ilmavoimat. Ilmavalvontatutkat. <http://ilmavoimat.fi/ilmavalvontatutkat>. Viitattu: 24.11.2017.
- [4] Ilmavoimat. Kuvankaappaus videosta Hae ilmatilanteenvalvojaksi. https://www.youtube.com/watch?v=7L1nCaT_OMI. Viitattu: 24.11.2017.
- [5] Thomas Kailath. The Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 1967.
- [6] Olli Klemola ja Arto Lehto. *Tutkatekniikka*. Otatieto, toinen laitos, 1999.
- [7] Jyri Kosola ja Tero Solante. *Digitaalinen taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2000.
- [8] Haibin Ling ja Kazunori Okada. An Efficient Earth Mover's Distance Algorithm for Robust Histogram Comparison. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007.
- [9] Henna Perälä, Minna Väilä, ja Juha Jylhä. M-SPURT - On Target characterization for fast monostatic RCS simulation. *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. Lähetetty tarkastettavaksi.
- [10] Henna Perälä, Minna Väilä, Juha Jylhä, ja Ari Visa. ESPRESS - On Efficient Bistatic Characterization of Radar Targets. *2015 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2015.
- [11] Yossi Rubner, Carlo Tomasi, ja Leonidas J. Guibas. The Earth Mover's Distance as a Metric for Image Retrieval. *International Journal of Computer Vision*, 2000.
- [12] Sandia National Laboratories, Airborne ISR. Ka-kaistan SAR-kuva helikopterista ja lentokoneesta Albuquerqueassa. <http://www.sandia.gov/radar/imagery/index.html>. Viitattu: 25.11.2017.

- [13] scikit-learn. "Cheat-sheet" -kaaviokuva koneoppimismenetelmän valintaan. http://scikit-learn.org/stable/tutorial/machine_learning_map/index.html. Viitattu: 24.11.2017.
- [14] Richard G. Wiley. *ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals*. Artech House, ensimmäinen laitos, 2006.

LIITE A: KÄYTETTYJEN TILASTOLLISTEN ETÄISYYKSIEN MATLAB-TOTEUTUKSET

Tässä liitteessä on esiteltyä MATLAB-toteutukset Mikko Kauhasen kandidaatintyössä *Tutkakohteiden vertailu- ja visualisointityökalu* käytetyistä tilastollisista etäisyyksistä. Ohjelmat 1, 2 ja 3 ovat Mikko Kauhasen toteuttamia. Ohjelma 4 on Tampereen teknillisen yliopiston Signaalinkäsittelyn laboratorion tutkijan Henna Perälän toteuttama.

Kaikkia tässä liitteessä esiteltyjä ohjelmia kutsutaan antamalla niille parametrina kaksi diskreettiä todennäköisyysjakaumaa, joiden tulee sisältää sama määrä pylviäitä. Ohjelmat palauttavat tuloksena kyseisellä tilastollisen etäisyyden menetelmällä lasketun tilastollisen etäisyyden.

```

1 function [distance] = totalVariationDistance(P,Q)
    % TOTALVARIATIONDISTANCE Total variation distance.
3     %
    % totalVariationDistance(P,Q) is the total variation distance between
5     % two discrete probability distributions P and Q.
    %
7     % Mikko Kauhanen
    % mikko.kauhanen@student.tut.fi
9
    distance = sum(abs(P-Q))/2;
11 end

```

Ohjelma 1 Kokonaisvaihteluetaisyys MATLAB:lla toteutettuna.

```

1 function [distance] = hellinger(P,Q)
    % HELLINGER Hellinger distance.
3     %
    % hellinger(P,Q) is the Hellinger distance between two discrete
5     % probability distributions P and Q.
    %
7     % Mikko Kauhanen
    % mikko.kauhanen@student.tut.fi
9
    distance = sqrt(sum((sqrt(P) - sqrt(Q)).^2)) / sqrt(2);
11 end

```

Ohjelma 2 Hellingerin etäisyys MATLAB:lla toteutettuna.


```
1 function [distance] = bhattacharyya(P,Q)
    % BHATTACHARYYA Bhattacharyya distance.
3    %
    % bhattacharyya(P,Q) is the Bhattacharyya distance between two discrete
5    % probability distributions P and Q.
    %
7    % Mikko Kauhanen
    % mikko.kauhanen@student.tut.fi
9
    bhattacharyya_coefficient = sum(sqrt(P.*Q));
11
    distance = -log(bhattacharyya_coefficient);
13 end
```

Ohjelma 3 Bhattacharyyan etäisyys MATLAB:lla toteutettuna.

```

1 % The function calculates the earth mover's distance between two
  % histograms.
3 %
  % [s] = emd(s1,s2)
5 %
  % input:
7 % s1 = {The first (set of) histogram(s). The histogram bins should be the
  %       first dimension, but the dimensionality of the variable is not
9 %       otherwise limited (HxIx... double)}
  % s2 = {The second (set of) histogram(s). The histogram bins should be
11 %       the first dimension, but the dimensionality of the variable is
  %       not otherwise limited. This input may be left empty, in which
13 %       case s1 is compared with itself in all possible combinations.}
  %
15 % output:
  % s = {The earth mover's distance between the input histograms.
17 %       (1xIx... double)}
  %
19 % Last modified: 24.11.2017
  %
21 % Henna Perälä - Tampere University of Technology
  % henna.perala@tut.fi
23
  function [s] = emd(s1,s2)
25 if any(isnan(s1(:))) || (exist('s2','var') && any(isnan(s2(:))))
    error('Matrices cannot contain NaNs.');
```

27 **end**

```

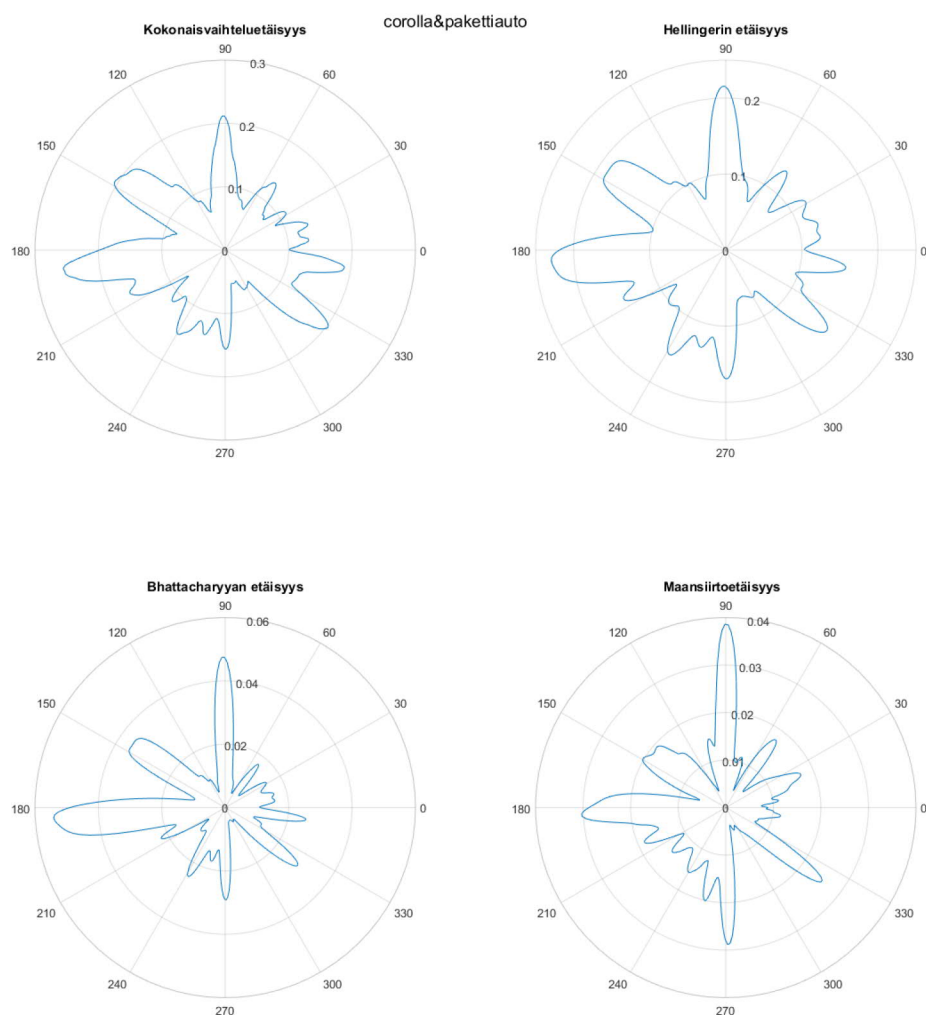
29 if ~exist('s2','var') || isempty(s2)
    ss = size(s1);
31    s1 = repmat(s1,[ones(size(ss)) ss(end)]);
    s2 = permute(s1,[1:length(ss)-1 length(ss)+1 length(ss)]);
33    s = sum(abs(cumsum(s1)-cumsum(s2)));
  else
35    s = sum(abs(cumsum(s1)-cumsum(s2)));
  end
37    s = s / (size(s1,1)-1);
  end
```

Ohjelma 4 Maansiirtoetäisyys MATLAB:lla toteutettuna.

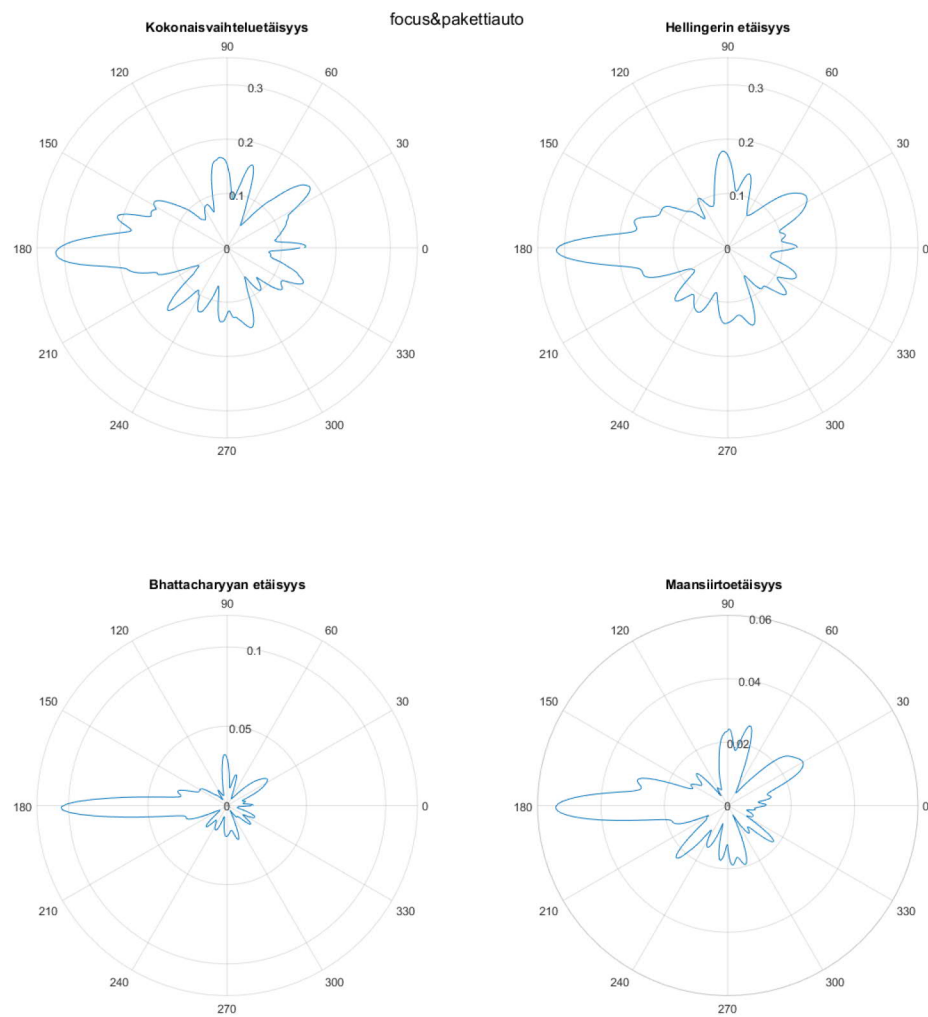
LIITE B: LISÄVISUALISAATIOITA

Tähän liitteeseen on kerätty lisää Mikko Kauhasen kandidaatintyössä *Tutkakohteiden vertailu- ja visualisointityökalu* esitellyn vertailu- ja visualisointityökalun visuaalisiaatioita siltä osin, kuin niitä ei ole esitetty itse työssä. Liitteen kuviin on valittu mielenkiintoisimpia tapauksia kohdekirjaston kaikista ristiinvertailuista ja niiden visualisaatioista.

Kuvissa B.1 ja B.2 nähdään työssä käytettyjen tilastollisen etäisyyden menetelmien samansuuntaiset tulokset tavanomaisissa vertailutapauksissa.

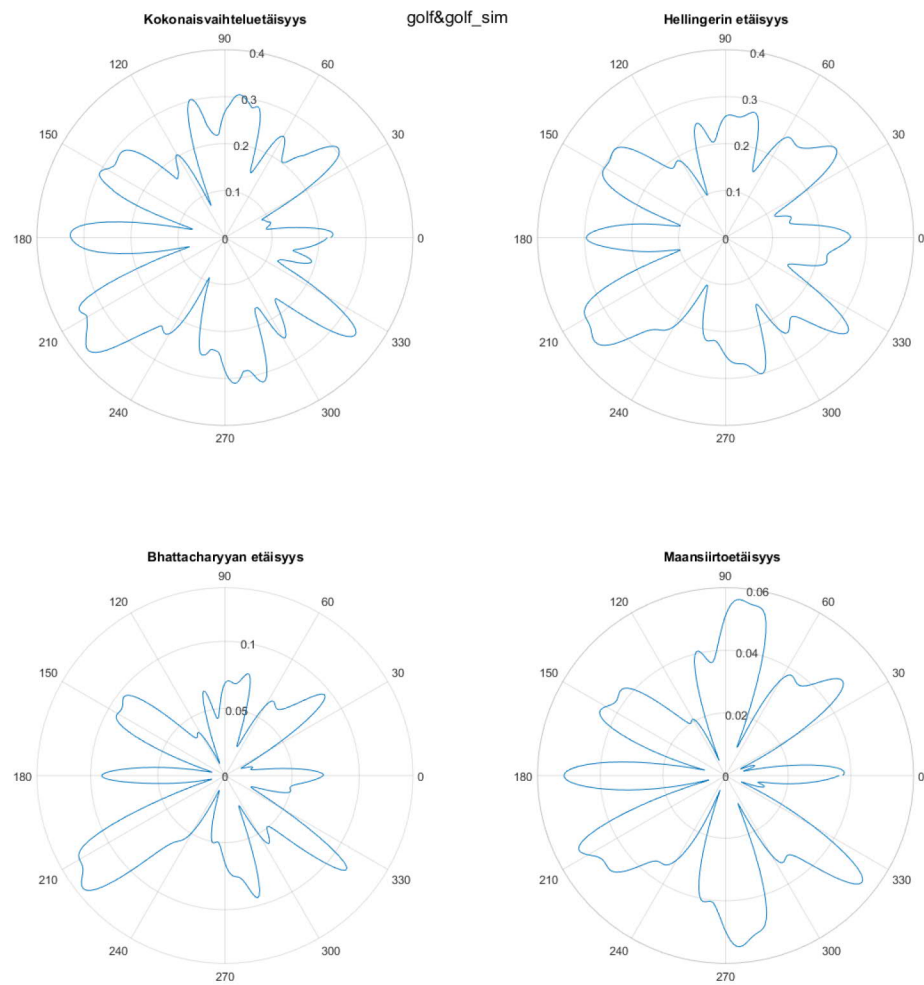


Kuva B.1 Corollan ja pakettiauton tilastollinen etäisyys polaarikoordinaatistossa



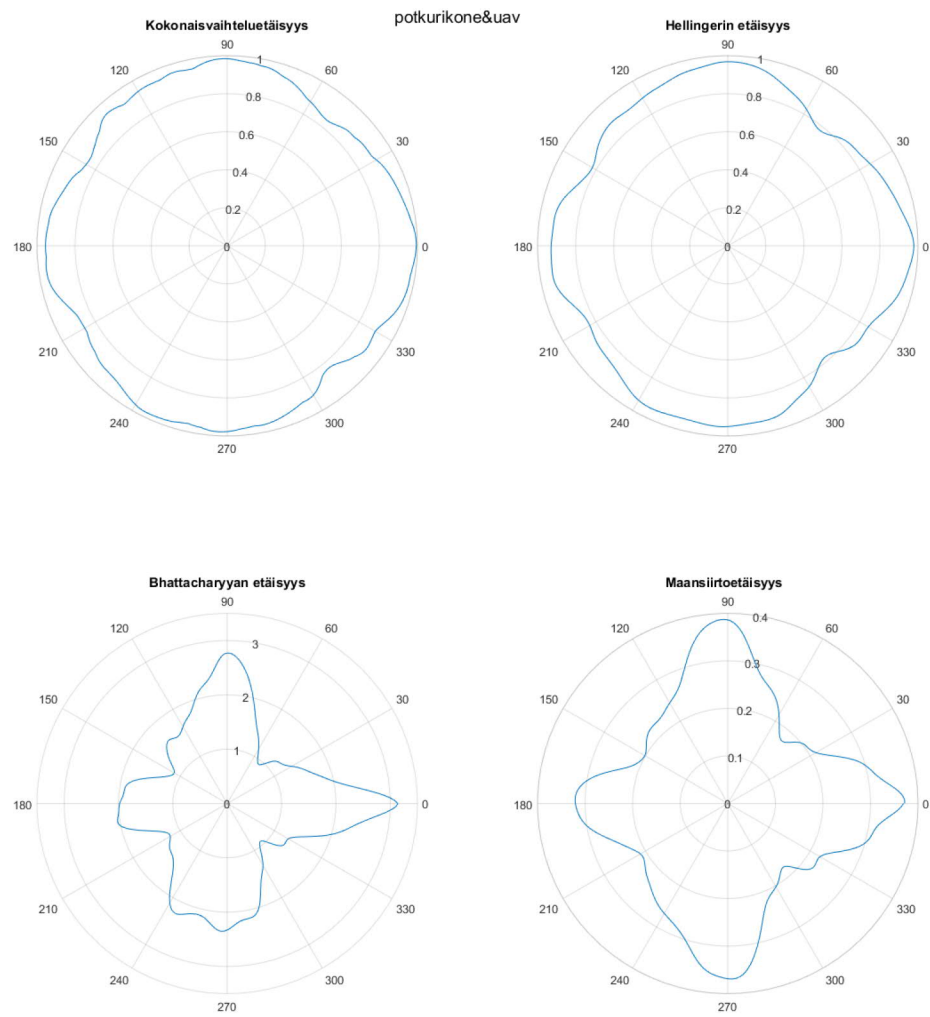
Kuva B.2 Focuksen ja pakettiauton tilastollinen etäisyys polaarikoordinaatistossa

Kuvassa B.3 on suoritettu vertailu Golfin ja siitä tehdyn simulaation välillä. Syn-
tyvät erot johtuvat tutkavastesimulaation epätäydellisyyksistä.

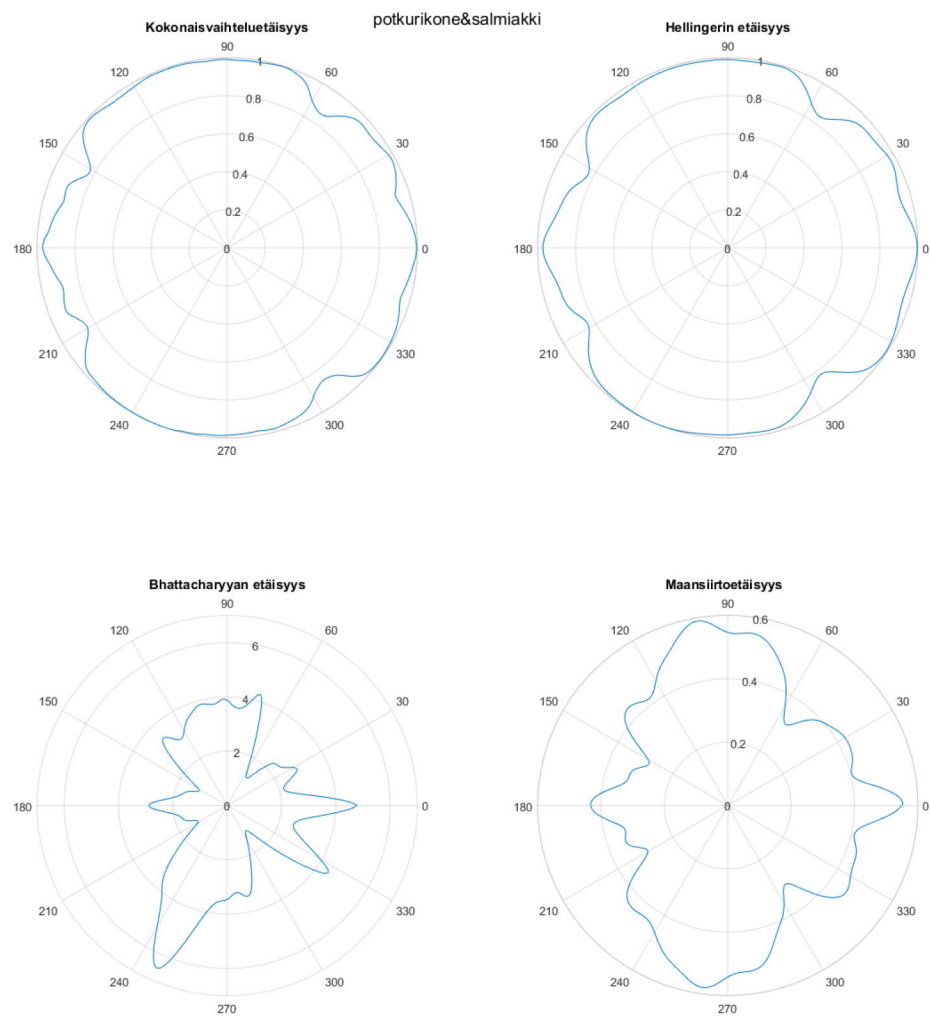


Kuva B.3 Golfin ja simuloitun Golfin tilastollinen etaisyys polaarikoordinaatistossa

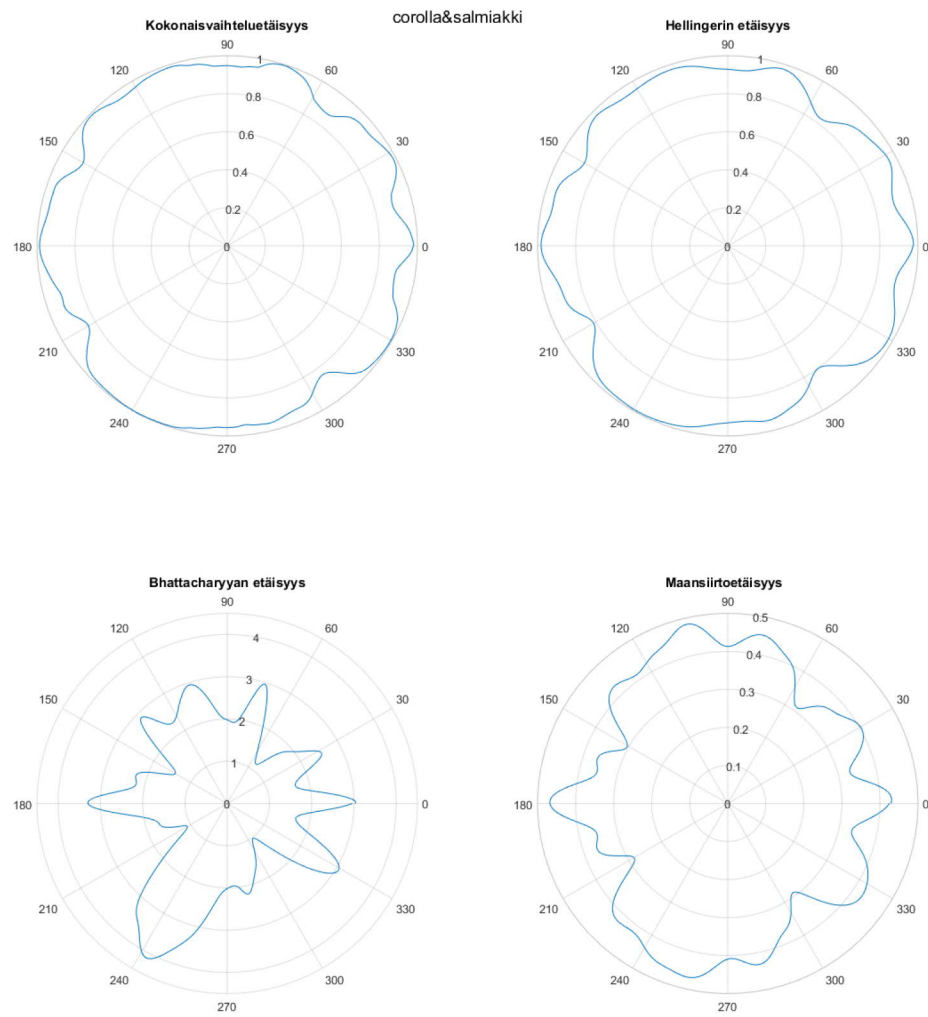
Kuvissa B.4 – 6 voidaan nähdä kokonaisvaihtelu- ja Hellingerin etäisyyksien ongelmallisuudet kun histogrammeilla ei ole suurta päällekkäisyyttä.



Kuva B.4 Potkurikoneen ja UAV:n tilastollinen etäisyys polaarikoordinaatistossa

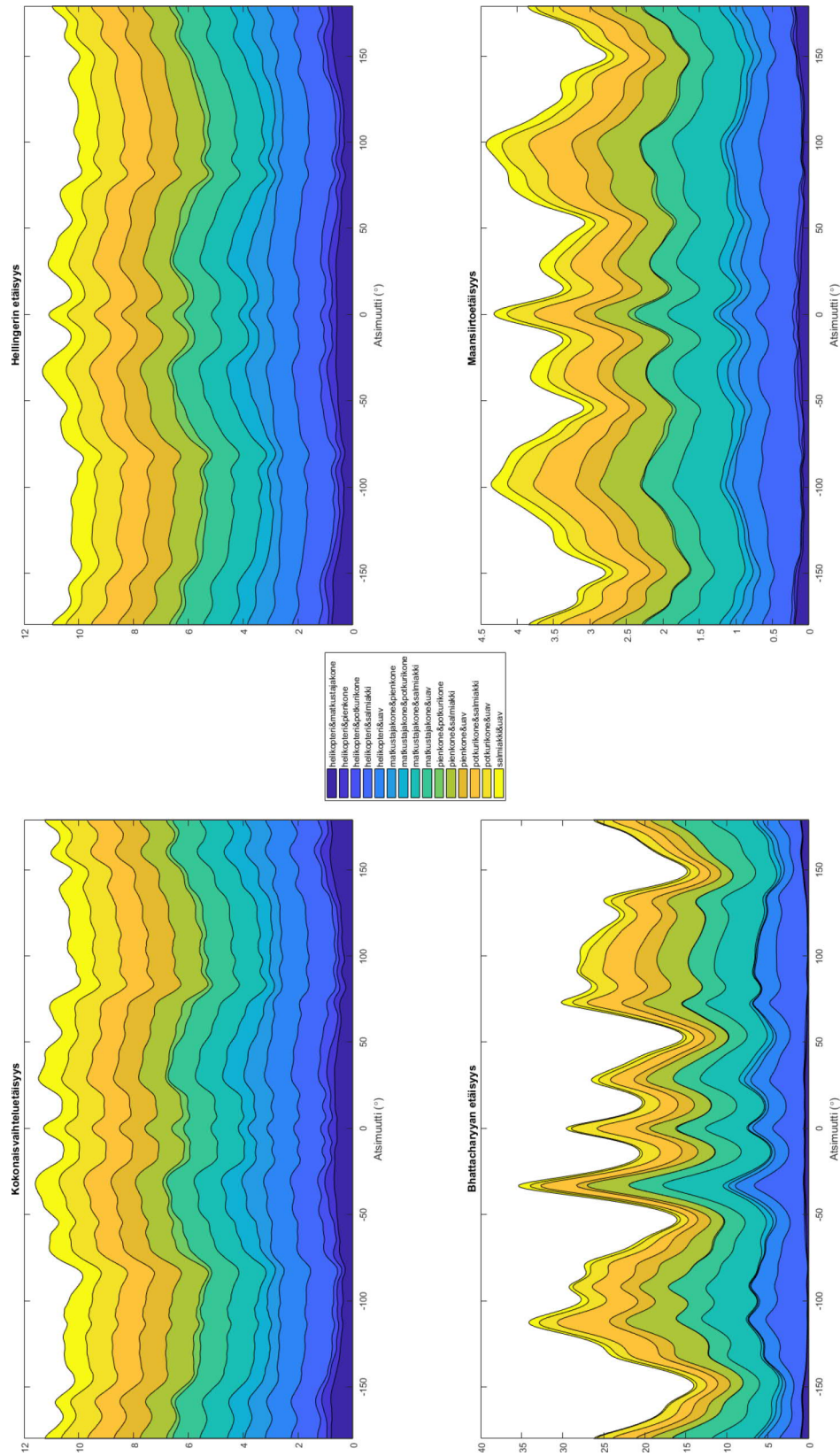


Kuva B.5 Potkurikoneen ja salmiakin tilastollinen etäisyys polaarikoordinaatistossa

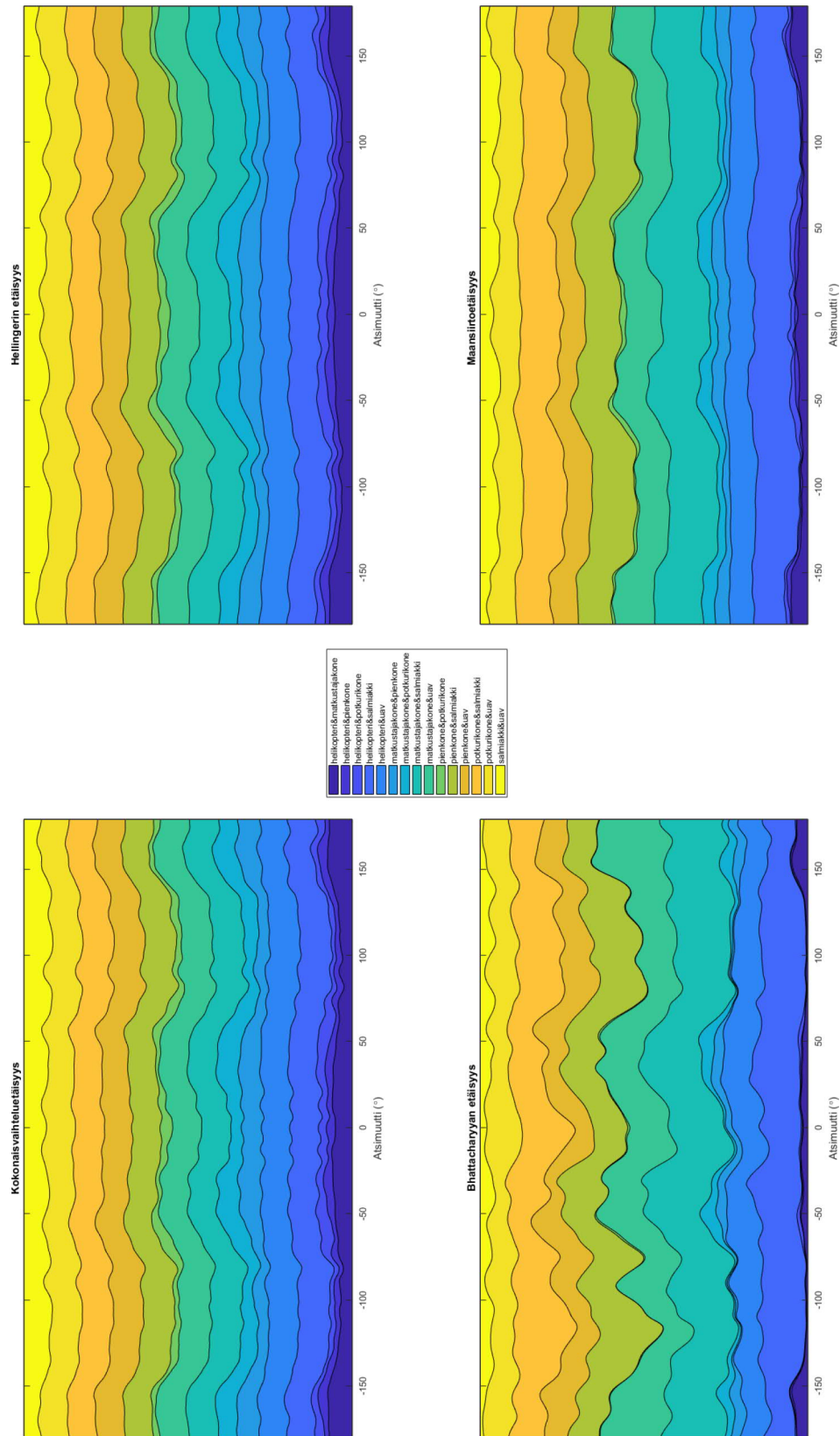


Kuva B.6 Corollan ja salmiakin tilastollinen etäisyys polaarikoordinaatistossa

Kuvissa B.7 ja B.8 on esitetty ilma-alusten ristiinvertailusta saatu aluekaavio.

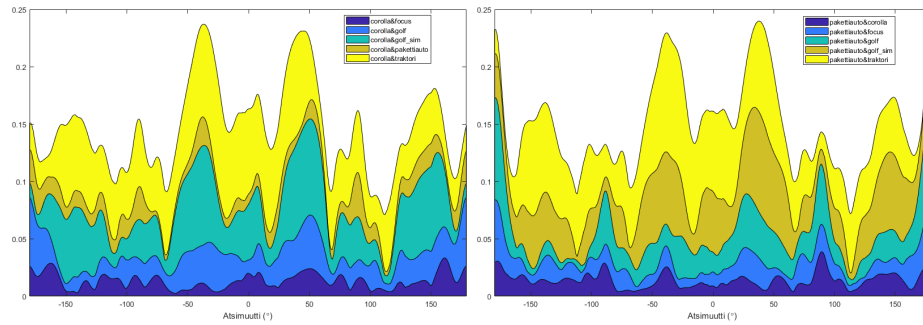


Kuva B.7 Ilma-alusten keskinäiset tilastolliset etäisyydet aluekaavioina

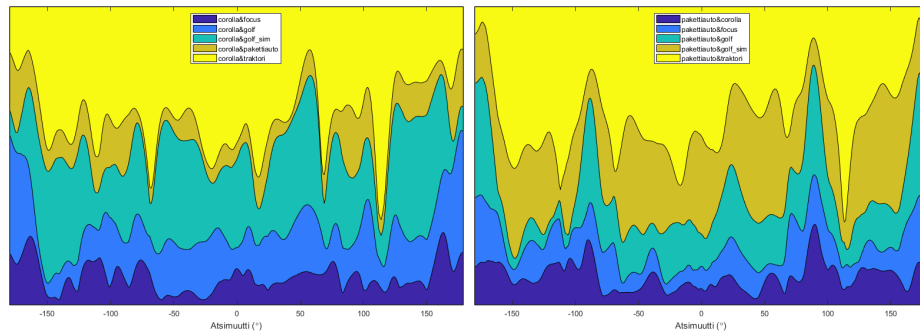


Kuva B.8 Ilma-olusten keskinäiset tilastolliset etäisyydet normalisoituna aluekaaviona

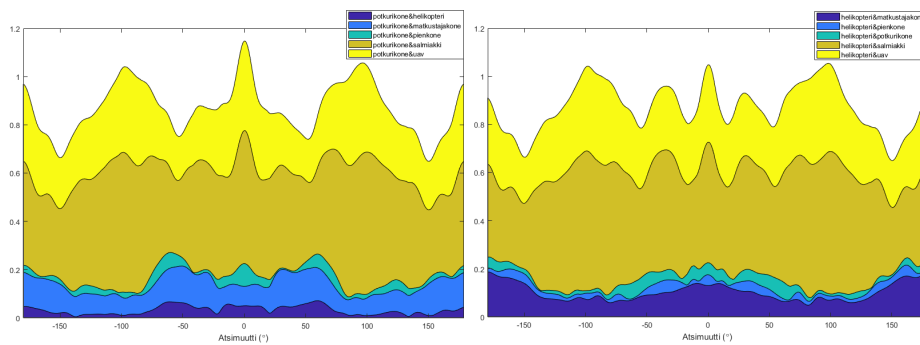
Aluekaavioita voidaan piirtää myös yksittäisten kohteiden ja vertailujoukon välille. Kuvat B.9 - B.12 on piirretty näin.



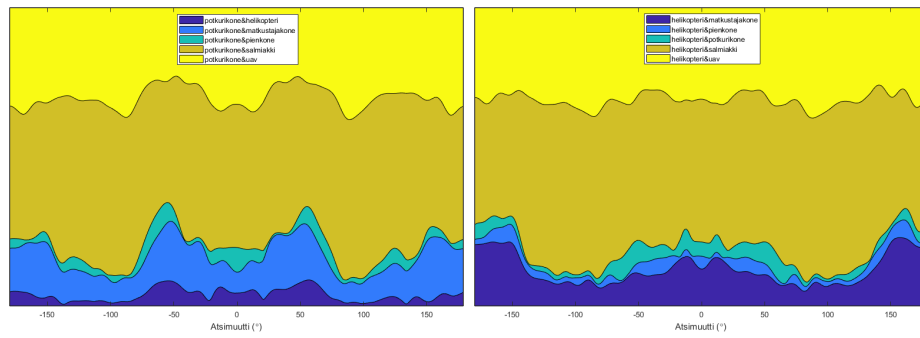
Kuva B.9 Corollan ja muiden autojen, sekä pakettiauton ja muiden autojen väliset maansiirtoetäisyydellä lasketut tilastolliset etäisyydet aluekaavioina



Kuva B.10 Corollan ja muiden autojen, sekä pakettiauton ja muiden autojen väliset maansiirtoetäisyydellä lasketut tilastolliset etäisyydet normalisoituina aluekaavioina



Kuva B.11 Potkurikoneen ja muiden ilma-alusten, sekä helikopterin ja muiden ilma-alusten väliset maansiirtoetäisyydellä lasketut tilastolliset etäisyydet aluekaavioina



Kuva B.12 Potkurikoneen ja muiden ilma-alusten, sekä helikopterin ja muiden ilma-alusten väliset maansiirtoetäisyydellä lasketut tilastolliset etäisyydet normalisoituina aluekaavioina