

Passiivisen UHF RFID:n potentiaali reaaliaikaisessa henkilöpaikannusjärjestelmässä beach volley -kentällä

Matias Moilanen

Opinnäytetyö
Marraskuu 2020
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), Tietotekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t) Moilanen, Matias	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Marraskuu 2020
	Sivumäärä 57 + 9	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Passiivisen UHF RFID:n potentiaali reaaliaikaisessa henkilöpaikannusjärjestelmässä beach volley -kentällä		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), tietotekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Mieskolainen, Matti		
Toimeksiantaja(t) Moilanen, Matias		
Tiivistelmä <p>Elämme ajassa, jossa informaation määrä ja merkitys kasvaa valtavalla nopeudella. Data-analytiikka kehittyy ja kerätyn datan arvo kasvaa jatkuvasti. Myös tiedonkeruumenetelmät ja -tekniikat edistyvät, joten niiden luomia uusia mahdollisuuksia voitaisiin hyödyntää entistä laajemmin valmennuksen ja pelitaktisen analyysin tukena palloilulajeissa.</p> <p>Tavoitteena oli tutkia passiivisen UHF RFID:n potentiaalia reaaliaikaisessa henkilöpaikannuksessa beach volley -kentän puoliskoaa vastaavalla alueella. Tätä varten toteutettiin kohdullisen laajat mittaukset JAMK:in pääkampuksen liikuntasalissa käyttäen ToP Tunniste Oy:n lainaamaa neljän antennin RFID-laitteistoa. Mittauksissa kerättyä dataa käsiteltiin Microsoft Excel-työkaluohjelmalla havainnollisempaan ja tulkittavampaan muotoon. Sitten kehitettiin kolme erilaista laskentatapaa, joilla antennien mittaamien etäisyyksien pohjalta saadaan arvioitua kohteen sijainti mitta-alueella. Näitä laskentatapoja vertailtiin toisiinsa staattisten tunnetuissa pisteissä olevien kohteiden paikantamisessa ja sovellettiin myös liikkuvan kohteen paikantamiseen.</p> <p>Mittaustuloksista oli selvästi havaittavissa valitun tekniikan ja metodien riittämättömyys erityisesti liikkuvan kohteen paikannukseen. Staattistenkin kohteiden paikantamisessa ilmeni epätarkkuutta ja paikoin suuriakin hajontoja. Neljällä tunnisteella varustettua staattista kohdehenkilöä paikannettaessa saavutettiin pienimmillään n. 2,56 metrin poikkeamakeskiarvo todellisesta sijainnista. Pelkkiä tunnisteita paikannettaessa päästiin n. 1,6 metrin poikkeamakeskiarvoon, mutta sekin on 6 m * 6 m mitta-alueella merkittävän suuri virhe.</p> <p>Passiivinen UHF RFID ei tulosten perusteella ollut ainakaan tutkimushetkellä vielä valmis pelaajien reaaliaikaiseen paikantamiseen beach volley -kentällä. Toivottavasti tulevaisuudessa tekniikan kehitys mahdollistaa tämänkin käyttötarkoituksen.</p>		
Avainsanat (asiasanat) RFID, RTLS, Paikantaminen, RSSI, Beach volley		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Moilanen, Matias	Type of publication Bachelor's thesis	Date November 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 57 + 9	Permission for web publication: x
Title of publication The potential of a passive UHF RFID in a real-time localization system on a beach volleyball court		
Degree programme Engineer (University of applied sciences), Information and Communication Technology		
Supervisor(s) Mieskolainen, Matti		
Assigned by Moilanen, Matias		
Abstract <p>We live in an era, where the amount of information and its significance is growing on a huge pace. Data analysis evolves and the value of gathered data is increasing all the time. The methods and technologies we use to gather the information are also improving and enabling more use cases, like supporting the coaching and tactical analysis in ball games.</p> <p>The objective was to study the potential of UHF RFID based real-time localization system when locating individuals in an area comparable to a half of a beach volleyball court. To do that, quite many measurements were done in the JAMK main campus gym using 4-antenna RFID-system lent by ToP Tunniste Oy. The data gathered in the measurements was processed in Microsoft Excel to achieve more illustrative form. Then, three different ways of approximating the position of the target based on the distance estimates from the antennas were developed. These three means were compared against each other in localizing static targets in known locations and later applied to locate a moving target.</p> <p>From the results it is easy to point out the insufficiency of the chosen technology and methods when it comes to localization of a target, especially when it is moving. Even locating the static targets was proven inaccurate and the deviation was very large at times. When locating an individual with 4 tags as a static target, the best result was 2,56 meters of average deviation from the actual location. With a floating target of 4 tags the best result was 1,6 meters of average deviation, but that is a very notable too in a 6 m * 6 m area of measurement.</p> <p>According to the results UHF RFID, at the time of the study took place was not ready for real-time localization of the players on a beach volleyball court. Hopefully, technical advancements in the future will make this use case possible too.</p>		
Keywords/tags (subjects) RFID, RTLS, Localization, RSSI, Beach volleyball		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

Lyhenteitä ja termejä	5
Johdanto.....	6
1 Tutkimuksen lähtökohdat	7
1.1 Aihe ja ongelma	7
1.2 Motivaatio ja tavoitteet	7
1.3 Suunnitelma ja menetelmät.....	8
2 RFID	9
2.1 RFID-järjestelmän perusteet, ominaisuudet ja toiminta.....	9
2.2 Passiivinen RFID.....	10
2.3 Aktiivinen ja puolipassiivinen RFID.....	11
2.4 Taajuusalueet	11
2.5 Antennit.....	12
3 RFID ja RTLS.....	13
3.1 RFID paikannusjärjestelmissä	13
3.2 Received Signal Strength Indication (RSSI) ja dBm.....	15
3.3 Time of Arrival (ToA)	15
3.4 Phase of arrival (PoA)	16
3.5 Vyöhykepohjainen paikantaminen.....	16
3.6 Vertailuarvoihin perustuva paikantaminen ja tulosten skaalaus.....	17
4 Valittu toteutustapa ja mittaustilanne	17
4.1 Mittauspaikka	18
4.2 Laitteisto ja asetukset.....	22
4.3 Mittaustilanteen kulku	27
5 Tulokset	29
5.1 Datan tulkinta ja jalostaminen	29
5.2 Etäisyysarvojen laskeminen	32
5.3 Sijainnin laskeminen.....	35
5.3.1 Sijainnin määrittämisen laskentatapa 1	35

	2
5.3.2 Sijainnin määrittämisen laskentatapa 2	38
5.3.3 Sijainnin määrittämisen laskentatapa 3	42
5.3.4 Laskentatapojen vertailu ja virhearviot.....	45
5.3.5 Laskutapojen soveltaminen liikkuvan kohteen paikantamiseen ...	49
6 Tulosanalyysi ja johtopäätökset.....	50
7 Pohdinta.....	52
Lähteet	55
Liitteet.....	58
Liite 1. Mittausohjelmiston asetukset.	58
Liite 2. Näyte mittausdatasta.....	62
Liite 3. Lasketut & todelliset etäisyydet, sekä poikkeamat metreinä.	63
Liite 4. Lasketut ja todelliset sijainnit kolmella eri tavalla laskettuna, sekä koordinaattiarvojen virheet metreinä.	65

Kuviot

Kuvio 1. Mittausalue ylhäältä kuvattuna.....	19
Kuvio 2. Mittausalue ruudukoiseen sekä teline, johon tunnisteet kiinnitettin. ..	20
Kuvio 3. Tunnisteet ripustettiin naruihin, antennien kanssa samalle korkeudelle.	21
Kuvio 4. Tunnisteet olivat kiinnitettynä kohdehenkilön paidan ulkopintaan.	21
Kuvio 5. FEIG Electronic ID ISC.LRU1002-EU.....	23
Kuvio 6. BELDEN VENLO HOLLAND 2018 50 OHM LOW LOSS H155 PVC.....	24
Kuvio 7. FEIG Electronic ISC.ANT.U270/270-EU RFID Antenna UHF - takaa kuvattuna.....	24

Kuvio 8. FEIG Electronic ISC.ANT.U270/270-EU RFID Antenna UHF - edestä kuvattuna.....	25
Kuvio 9. Tunnistevaihtoehdot. Mittauksissa käytettiin näistä oikeanpuoleista. .	26
Kuvio 10. Ohjelmiston asetukset.....	27
Kuvio 11. Mittausten 2 ja 3 (Taulukko 2) data graafisina esityksinä. Aktiivinen antenni on merkitty sinisellä. Arvot ovat desibelimilliwatteja (dBm) ja koordinaatiston numerot ovat metrejä (m).	31
Kuvio 12. Mitattujen etäisyysarvojen ja todellisten etäisyyksien erotusten keskiarvo antennikohtaisesti (m).	33
Kuvio 13. Etäisyysarvion keskipoikkeama mittauspisteissä, Mittaus 2.	34
Kuvio 14. Etäisyysarvion keskipoikkeama mittauspisteissä, Mittaus 3.	34
Kuvio 15. Sijainnin määrittämisen tapa 1 havainnollistettuna.....	36
Kuvio 16. Mittauksen 2 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 1.....	37
Kuvio 17. Mittauksen 3 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 1.....	38
Kuvio 18. Sijainnin määrittämisen tapa 2 havainnollistettuna.....	39
Kuvio 19. Mittauksen 2 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 2 (skaalattu).	41
Kuvio 20. Mittauksen 3 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 2 (skaalattu).	42
Kuvio 21. Sijainnin määrittämisen tapa 3 havainnollistettuna.....	43
Kuvio 22. Mittauksen 2 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 3 (skaalattu).	44
Kuvio 23. Mittauksen 3 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 3 (skaalattu).	45
Kuvio 24. Mittauksista 2 ja 3 laskutapaa 1 käyttäen saatujen sijaintitietojen virheet koordinaatistossa (m).....	46
Kuvio 25. Mittauksista 2 ja 3 laskentatapaa 2 käyttäen saatujen sijaintitietojen virheet koordinaatistossa (m).....	47
Kuvio 26. Mittauksista 2 ja 3 laskentatapaa 3 käyttäen saatujen sijaintitietojen virheet koordinaatistossa (m).....	48
Kuvio 27. Mittauksessa 5 liikuttu reitti (sininen) ja kolme laskettua reittiä piirrettynä.	50
Kuvio 28. Niin sanottu "best case scenario".....	51

Taulukot

Taulukko 1. ToP Tunniste Oy:n lainaama mittauslaitteisto.....	22
Taulukko 2. Mittaukset toteutusjärjestyksessä.....	28
Taulukko 3. Mittauksessa 1 parhaan tunnistemallin signaalinvoimakkuusarvot.	30
Taulukko 4. Eri laskentatapojen tulosten keskihajonta.....	48
Taulukko 5. Mittausten 2 ja 3 etäisyysarvioiden keskimääräinen hajonta suhteessa todellisiin etäisyyksiin.....	50

Lyhenteitä ja termejä

AOA	Angle of Arrival
EPC	Electronic Product Code
FIVB	Fédération Internationale de Volleyball, Kansainvälinen lentopalloliitto
Gen 2	EPCglobal UHF Class 1 Gen 2
HF	High Frequency
ISO	International Organization for Standardization
LF	Low Frequency
NFC	Near Field Communication
PoA	Phase of arrival
RFID	Radio Frequency Identification
RSP	Received Signal Power
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTLS	Real-Time Localization System
ToA	Time of Arrival
UHF	Ultra High Frequency

Johdanto

Elämme ajassa ja yhteiskunnassa, jossa informaation määrä ja merkitys kasvaa valtavalla nopeudella. Data-analytiikka kehittyy ja kerätyn datan arvo kasvaa jatkuvasti. Arkinen ympäristömme on täynnä antureita ja algoritmeja, jotka keräävät tietoa liikkeistämme, kirjoituksestamme ja puheestamme. Monesti tuntuu, että jokaista liiketämme seurataan. Tätä tietoa hyödynnetään moniin tarkoituksiin, joista päällimmäisenä usein muistamme mainita markkinoinnin tehostamisen. (Watson 2014). Se onkin erittäin hyvä esimerkki toimivasta ja pitkälle kehittyneestä data-analytiikan sovellutuksesta.

Vaikka useimmat sovellutukset liittyvät yritystoiminnan tehostamiseen ja optimointiin, voidaan samoja tekniikoita hyödyntää myös tavallisen ihmisen arjessa tai esimerkiksi huippu-urheilijan valmennuksessa. Älykodeissa laitteet keräävät informaatiota tavoistamme ja liikkeistämme, ja oppivat siten toimimaan kanssamme saumattomammin ja tehokkaammin. Niin myös urheilijan suorituksia voidaan analysoida ja vertailla toisiinsa täysin objektiivisesti, ilman inhimillistä virhettä. Näin tulkinta helpottuu ja kehityskohteita on helpompaa löytää.

Mahdollisia yksittäisiä käyttötarkoituksia ja sovellutuksia näille tekniikoille on lukemattomia ja tekniikoiden kehittyessä määrä kasvaa entisestään. Niistä suurelle massalle tuottoisimmat ja hyödyllisimmät on totta kai ensimmäisenä jalostettu käyttöön.

Tässä opinnäytetyössä keskityn yhteen, pienempään sovellutukseen. Tutkimukseni aiheena on passiivisen UHF RFID:n eli Ultra High Frequency Radio-frequency identificationin soveltuvuus pelaajien paikantamiseen ja liikeratojen analysointiin beach volleyball -kentällä. Tavoitteena on löytää mahdollisimman toimiva RFID-toteutus tähän tarkoitukseen teorian ja tutkimukseen sisältyvien mittausten avulla. RFID:n kantomatka on kasvanut viime vuosina huomattavasti tunnisteen ja antennien kehittyessä

(RFID-Lab Finland 2018). Siksi uskon, että on ajankohtaista tutkia, mihin RFID:n potentiaali nykypäivänä riittää. Toivottavasti tutkimukseni tulokset helpottavat ja edistävät RFID-tekniikan käyttöönottoa urheilun parissa.

1 Tutkimuksen lähtökohdat

1.1 Aihe ja ongelma

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää passiivisen UHF RFID:n soveltuvuus reaaliaikapaikannusjärjestelmään, jonka tehtävänä on seurata pelaajien liikkumista beach volley -kenttää vastaavalla alueella. Olemassa olevan teorian ja asiantuntija-avun pohjalta selitetään mitä taajuusalueita, laitteistoa ja tekniikoita tässä sovellutuksessa on järkevintä hyödyntää. Valintaa tehdessä on huomioitava myös laitteiston vaikutus pelaajien keskittymiseen ja liikkumiseen, eli laitteiston tulisi olla mahdollisimman huomaamaton.

Tutkimuskysymykset

- Kuinka hyvin passiivinen RFID soveltuu pelaajien reaaliaikaiseen paikantamiseen beach volley -kentällä?
- Mitä paikannusmetodeja, laitteita ja tekniikoita tässä tapauksessa olisi järkevää käyttää ottaen huomioon laitteiston hankinta-, asennus- ja käyttökustannukset, sekä järjestelmän huomaamattomuus urheilijan näkökulmasta?

1.2 Motivaatio ja tavoitteet

Keksin opinnäytetyön aiheen itse, kun pohdin beach volleyta pelatessani mahdollisia keinoja kerätä dataa omasta pelitavasta, liikkumisesta ja sijoittumisesta kentällä ja

analysoida tätä dataa pelitaktisesta näkökulmasta. Motivaation tutkimukselle tuo siis minun ja muiden lajia harrastavien tarve laitteistolle, jonka avulla tätä dataa voitaisiin kerätä. Mikäli tekniikka osoittautuu toimivaksi, näen mahdolliseksi, että RFID-järjestelmiä asennettaisiin esimerkiksi beach volley -halleihin keräämään sijaintidataa. Hallin käyttäjät voisivat saada pelivuoron jälkeen mukaansa analyysin omasta liikkumisesta. Uskon, että tämä voisi olla erittäin hyödyllistä tai vähintäänkin mielenkiintoista tietoa monelle lajia harrastavalle ja jopa amatikseen pelaaville.

Jokseenkin samaan pyrkivää laitteistoa on aiemmin kokeiltu esimerkiksi FIVB World Tourin osakilpailuissa Wienissä ja Hampurissa vuonna 2017 (KINEXON at Swatch Beach Volleyball Majors Series 2017). Tavoitteeni eroaa tästä siinä, että urheilijan tarpeet ja sovellettavuus harrastekäyttöön ovat tärkeitä prioriteetteja, vaikka ominaisuuksia jouduttaisiinkin niiden saavuttamiseksi karsimaan.

1.3 Suunnitelma ja menetelmät

Suunnitelmana on valittuja tekniikoita ja laitteita käyttäen tuottaa määrällinen tapaustutkimus, jossa mitataan passiivisen RFID:n kantomatkan ja paikannustarkkuuden riittävyttä urheilijoiden paikantamiseksi beach volley -kentällä (Tapaustutkimus 2015). Passiivista RFID:tä ei yleensä käytetä tunnistaiden paikantamiseen, vaan lähinnä varashälytymiin, inventaariojärjestelmiin ja kulunseurantaan (Ray 2018). Siksi sijainnin määrittämiseen käytettävät tekniikat ja algoritmit täytyy valita erikseen ja mahdollisesti jopa luoda osittain itse (Wu 2012). Mittausdatan analysointiin ja tulkitaan kuluneekin suurin osa ajasta. Tarkoitus ei kuitenkaan ole toteuttaa valmista tuotetta. Raakadatan käsittelyyn ja laskuihin ei myöskään luoda erillistä työkalua, vaan data käsitellään Excel-taulukossa. Tuotteistus on mahdollista toteuttaa myöhemmin, mikäli tekniikan potentiaali todetaan riittäväksi.

2 RFID

Radio-frequency identification eli RFID on informaation etätallentamiseen ja etälu-
kuun kehitetty radiotaajuuksia käyttävä teknologia, joka monipuolisten ominaisuuksien
takia on hiljalleen korvaamassa perinteisiä viivakoodeja. Se on laajasti käytössä
esimerkiksi henkilöpapereissa, varashälyttimissä, kulunhallintajärjestelmissä,
bussikorteissa, teollisissa automaatiojärjestelmissä ja erilaisissa inventaariojärjestel-
missä. (RFID-Lab Finland 2018; What is RFID? | the beginner's guide to RFID systems
N.d.)

RFID-standardeja ovat määrittäneet erikseen sekä International Organization for
Standardization (ISO), että Electronics Product Code Global Incorporated (EPCglobal).
ISO 18000-sarja sisältää RFID ilmarajapintaa koskevat määritykset kullakin taajuus-
alueella eri puolilla maailmaa. (RFID Standards: ISO, IEC, EPCglobal N.d.)

2.1 RFID-järjestelmän perusteet, ominaisuudet ja toiminta

Yksinkertainen RFID-järjestelmä sisältää lukijan, tunnisteen eli tagin sekä antennit lu-
kijassa ja tunnisteessa. Tunnieste voi olla joko aktiivinen, puolipassiivinen tai passiivi-
nen. Lukija kommunikoi tunnisteiden kanssa antennien kautta kaksisuuntaisesti yh-
den tai useamman antennin kautta. (RFID basics - RFID regulations 2020). Laajalle
alalle hajautettu yksittäinen RFID-järjestelmä voi myös sisältää useita lukijoita, jotka
kommunikovat keskenään. RFID-lukija nimensä mukaisesti lukee tunnisteita, mutta
se voi myös kirjoittaa niihin informaatiota. Esimerkiksi RFID-tunnisteella varustettuun
kuormalavaan voidaan tallentaa tieto siitä, milloin, missä ja millä lukijalla se on vii-
meisimmäksi havaittu, tai kuinka monta yksikköä tavaraa siitä on jo purettu. (Garfin-
kel 2005.)

Passiivinen ja puolipassiivinen tunnistelähtävät signaalia vain vastatessaan lukijan signaaliin. Aktiivinen tunnistelähtää signaalia itsenäisesti, ennalta määrättyin väliajoin. Tästä syystä aktiivisessa tunnistelähtee on aina oma virtalähde. Passiivisen UHF RFID -tunnisteen toimintaenergia indusoituu antennin avulla lukijan lähettämästä signaalista, eikä se tarvitse omaa virtalähdettä. Tästä käytetään termiä takaisinsironta. Lähietäisyydellä toimivat passiiviset LF ja HF RFID -tekniikat hyödyntävät antennin luomaa sähkömagneettista kenttää, ja indusoivat tästä tarvitsemansa energian. (Wu 2012; RFID-tunnistelähtee N.d.)

Puolipassiivinen tunnistelähtee on näiden kahden välimuoto. Siinä on oma virtalähde, mutta sen energiaa hyödynnetään yleensä vain tunnisteen oman sensorin ja mikropiirin toimintaan. Vastausignaalin lähettämiseen käytetään myös puolipassiivisissa tunnistelähteissä takaisinsirontaa. Puolipassiivinen ja aktiivinen tunnistelähtee voivat sisältää myös erilaisia sensoreita, joiden mittaamia arvoja ne välittävät lukijalle. (Garfinkel 2005.)

2.2 Passiivinen RFID

Passiivisesta tunnistelähteestä luetaan monesti vain ID-koodi, mutta sovellutuksen mukaan lukutapahtuman yhteydessä voidaan kirjata ylös myös muuta informaatiota. Esimerkiksi vastausignaalin voimakkuus, vastauksen saapumisaika, vastausignaalin vaihekulma ja tunnistelähteeeseen aiemmin tallennettu data voivat olla tarpeen tietyissä käyttökohteissa. (RFID-tunnistelähtee N.d.)

Passiivinen RFID on hyvä valinta kulunseurannassa, inventaariojärjestelmissä, varashälyttimissä tai muissa käyttötarkoituksissa, joissa tunnisteen yksikkökustannus tai koko on oleellista. Yhden passiivitunnisteen hinta voi alimmillaan olla vain joitakin senttejä (Thrasher 2013; What is RFID? | The Beginner's Guide to RFID Systems N.d.).

Passiivitunnisteiden eduksi on laskettava myös se, että niitä ei teoriassa tarvitse vaihtaa tai ladata koskaan, koska ne indusoivat käyttämänsä energian saapuvasta signaalista. (RFID-tunnisteet N.d.)

2.3 Aktiivinen ja puolipassiivinen RFID

Aktiiviset ja puolipassiiviset tunnisteet mahdollistavat paljon sellaisia käyttötarkoituksia, joihin passiivitunnisteet eivät kykene. Tunnisteissa voi olla esimerkiksi lämpötilakiihtyvyy- tai kosteusantureita. Monipuolisempien ominaisuuksiensa ja sisäisen virtalähteen takia aktiiviset ja puolipassiiviset tunnisteet ovat kuitenkin myös kalliimpia ja suurempia. Hinnat vaihtelevat parista eurosta useaan kymmeneen euroon kappaleelta (What is RFID? | The Beginner's Guide to RFID Systems N.d.). Toisaalta oma virtalähde mahdollistaa merkittävästi suuremman toimintasäteen ja potentiaalisesti tarkemman paikantamisen. (RFID-tunnisteet N.d.)

2.4 Taajuusalueet

Radioaallot jaetaan taajuuden mukaan pienempiin kategorioihin, eli taajuusalueisiin. RFID:n tapauksessa käytössä on tyypillisesti kolme eri taajuusaluetta, LF (low Frequency), HF (High Frequency) ja UHF (Ultra-high Frequency). Jokaisella taajuusalueella on huomattavat heikkoudet ja vahvuudet. Useimpiin käyttökohteisiin soveltuukin yksi taajuusalue selvästi muita paremmin. (High Frequency (HF) RFID Tags & Systems 2018.)

LF RFID:lle on varattu taajuuskaista väliltä 125 kHz–134 kHz ja sen aallonpituus on noin 2400 metriä. Massiivisen aallonpituuden takia se läpäisee hyvin tiheitä massoja, jopa vettä ja metalleja. Kantomatka on kuitenkin vaatimaton, jääden parhaimmillaankin selvästi alle metriin. LF RFID soveltuu hyvin karjan ja muiden eläinten seurantaan

sekä kulunhallintaan, koska matalataajuuksinen signaali kykenee läpäisemään eläimen tai ihmisen kehon. (A Guide to RFID Types and How They Are Used N.d.)

Keskimmäisen taajuusalueen, eli HF RFID:n tyypillinen taajuuskaista on väliltä 1.75 MHz–13.56 MHz ja aallonpituus noin 22 metriä. Tämän taajuuden signaali läpäisee kohtalaisesti massaa. Esimerkiksi vesi ja tiheät metallit kuitenkin tuottavat haasteita. Kantomatka vaihtelee muutamista senttimetreistä joihinkin metreihin. Yleisimmät käyttökohteet ovat passit, kulkukortit ja erinäiset NFC-toteutukset, kuten lähimaksukortit. (A Guide to RFID Types and How They Are Used N.d.; High Frequency (HF) RFID Tags & Systems 2018.)

UHF RFID käyttää useimmiten 860–960 MHz kaistaa, mutta joskus myös 433 MHz ja 2.4 GHz taajuudet ovat käytettävissä. Aallonpituus on keskimäärin noin 33 senttimetriä ja tyypillinen lukuetaisyys 3–10 metriä, mutta parhaimmillaan passiivisiakin tunnisteita voidaan lukea jopa 30 metrin päästä. Lyhyen aallonpituuden takia UHF-taajuudella toimiva RFID-signaali on hyvin herkkä häiriöille, eikä se läpäise tiheitä massoja juuri ollenkaan. Myös tasaisten pintojen aiheuttamat heijastumat haittaavat luentaa. Käyttökohteita tällä taajuusalueella on valtavasti, esimerkiksi inventaariokäytössä ja kestävyysurheilun ajanotossa. Passiivisten UHF-tunnisteiden hinta onkin suurten tuotantomäärien myötä laskenut jopa alle 10 sentin kappaleelta. (A Guide to RFID Types and How They Are Used N.d.)

2.5 Antennit

Yksi oleellinen osa RFID-järjestelmää on antenni tai antennit. Lukijan ja tunnisteen välinen kommunikointi kumpaankin suuntaan tapahtuu antennin välityksellä. Joissakin lukijoissa on integroituna kiinteä antenni, mutta monesti antennit kytketään koaksiaalikaapelilla lukijaan, jolloin ne voidaan myös sijoittaa vapaammin. Antennit voivat olla polarisoituja vaaka- tai pystysuuntaan tai pyöreäkeilaisia. Pyöreäkeilainen

antenni pystyy lukemaan tunnisteiden eri asennoissa. Polarisoidut antennit on suunniteltu käyttöön, jossa tunniste on aina samassa asennossa suhteessa antenniin. Antennin polarisaation lisäksi täytyy myös huomioida säteilykulma. Pyöreäkeilaisille antenneille yleinen kulma on 65° , mutta se voi myös vaihdella paljonkin eri tuotteiden välillä. (Finkenzeller 2010, 331–338; Karmakar 2010.)

Antennin hinnat liikkuvat 50–300 € välillä, mutta myös kalliimpia erityiskäyttöön suunnattuja antenneja on. Merkittävä antennin hintaan vaikuttava tekijä on IP-luokitus ja yleinen kestävyys. Ulkokäyttöön tarkoitettujen antennien täytyy kestää kylmää, lämpöä, UV-säteilyä, kosteutta ja mahdollisesti käyttötarkoituksen vaatiessa myös iskuja. (Karmakar 2010.)

3 RFID ja RTLS

3.1 RFID paikannusjärjestelmissä

RFID:llä toteutettu reaaliaikainen paikannusjärjestelmä (RTLS) voi hyödyntää useita eri tekniikoita tunnisteiden sijainnin ja liikkeiden määrittämiseen. Ratkaisut rajautuvat karkeasti kahtia vyöhyketasolla paikantaviin järjestelmiin ja signaalien perusteella laskennallisen sijainnin määrittäviin useita ja/tai liikkuvia antenneja sisältäviin järjestelmiin. Jos tavoitteena on seurata kohteen siirtymistä alueelta toiselle, on vyöhykepohjainen ratkaisu järkevin edullisen hintansa ja luotettavuutensa takia. Korkeampaa tarkkuutta vaativissa sovellutuksissa taas on järkevämpää sijoittaa antennit seurattavan alueen ympärille tai keskustaan, ja vastausignaalista mitattavien arvojen perusteella laskea tunnisteiden sijainti. Näitä arvoja ovat vastausignaalin voimakkuus (Received Signal Strength Indicator, RSSI), vastausignaalin saapumisaika (Time

of Arrival, ToA), vastaussignaalin vaihekulma (Phase of arrival, PoA) sekä vastaussignaalin saapumiskulma (Angle of Arrival, AoA). (Brchan, Zhao, Wu, Williams & Perez 2012.)

Vyöhykepohjainen paikannusjärjestelmä toimii hyvin etenkin seinillä rajatuissa tiloissa, sillä antennit voidaan sijoittaa optimaalisesti kulkuväylille, kuten oviaukkojen läheisyyteen. Näin pienilläkin lähetystehoilla päästään kaikki kulkureitit kattavaan kantamaan. Avoimissakin tiloissa vyöhykepohjainen järjestelmä tarjoaa kohtalaisen tarkkuuden ja helpon asennuksen. Tarkkuus määräytyy vyöhykepohjaisessa järjestelmässä aina lähinnä osin vyöhykkeiden koon mukaan, joka taas on suoraan verrannollinen antennien lukumäärään. (Ma, Wang, Pei, Zhang, Zhang & Yu 2018)

Kun paikannusalue on avoin ja haluttu paikannustarkkuus suuri, laskennallinen paikantaminen on potentiaalinen vaihtoehto. RSSI, AOA ja TOA-data saadaan erotettua signaalista useimmilla RFID-lukijoilla, eikä erillisiä laitteistohankintoja yleensä tarvita. Sijaintia laskevan algoritmin rakentaminen onkin sitten työläämpää ja haastavampaa, sekä sijaintiriippuvaista. Mitä enemmän dataa algoritmi pystyy hyödyntämään, sitä tarkempaan paikannukseen se kykenee. Yksinkertaiset, esimerkiksi pelkkää RSSI:tä käyttävät järjestelmät ovat epätarkempia ja selvästi herkempiä heijastumille sekä luontavälille osuville signaalin suoraa kulkua estäville tiheille massoille. Tästä syystä ihmisiä paikannettaessa onkin usein järkevää sijoittaa tunnisteita eri puolille kehon massaa. Näin voidaan ottaa huomioon vain sen hetken paras RSSI-arvo, joka saadaan yleensä antennipuoleisesta tunnisteesta, jota kehon massa ei häiritse. (Brchan ym. 2012.)

Eri paikannustekniikoita yhdistämällä on mahdollista saavuttaa huomattavasti tarkempi ja luotettavampi tulos, kuin millään yksittäisellä tekniikalla. Se edellyttää kuitenkin työlästä testausta ja algoritmien optimointia. (Ma ym. 2018; Wu 2012).

3.2 Received Signal Strength Indication (RSSI) ja dBm

RSSI:llä ja dBm-arvolla viitataan usein samaan asiaan, vaikka merkitykseltään nämä eroavatkin jonkin verran. Kummankin tehtävänä on ilmaista signaalin voimakkuutta, mutta hieman eri tarvin. RSSI on suhteellinen indeksi, joka ilmoitetaan eri yhteyksissä erilaisilla skaaloilla. Standardi IEEE802.11 määrittää, että RSSI voidaan ilmoittaa skaalalla 0–255 ja että laitevalmistajat voivat halutessaan myös määrittellä omat skaalansa, jonka takia eri yhteyksissä ilmoitetut RSSI-lukemat eivät ole aina vertailukelpoisia sellaisenaan. RSSI:llä viitataan silti usein signaalin milliwatteihin suhteutettuun desibeliarvoon (dBm), joka on absoluuttinen suure. Received Signal Power, eli ”saapuvan signaalin teho” on RSSI:tä korrektimpi viittaus tähän arvoon. (Understanding RSSI N.d.).

Mitattua signaalitehoa voidaan hyödyntää RFID-paikannusjärjestelmissä määrittämään tunnisteen etäisyyttä antennista. Mitä vahvempana tunnisteen lähettämä vastausignaali tulee takaisin antennille, sitä lähempänä tunniste todennäköisesti on. Jos tunniste on useamman antennin kantaman sisällä, voidaan tunniste paikantaa tarkemmin, vähintään kahdella tai jopa kolmella ulottuvuusakselilla. Antennien määrän lisääminen kasvattaa paikannustarkkuutta. On kuitenkin muistettava antennien polarisaation, tunnisteen asennon ja antennien suuntauksen vaikutus vastausignaalin tehoon. Näistä aiheutuvat poikkeamat on huomioitava sijaintia laskevassa algoritmissa. (Ma ym. 2018)

3.3 Time of Arrival (ToA)

Time of Arrival tarkoittaa aikaa, joka kuluu radiosignaalin kulkiessa signaalin lähteestä vastaanottimeen. Näiden välinen etäisyys voidaan laskea, kun kuluneen ajan

lisäksi tiedetään signaalin nopeus ilmarajapinnassa. Tämä edellyttää kuitenkin, että lähetys- ja vastaanotinpäädyissä on hyvin tarkat, keskenään synkronoidut kellot, joka tekee tästä tekniikasta hankalan ja kalliin toteuttaa. (Wu 2012)

3.4 Phase of arrival (PoA)

PoA tarkoittaa signaalin vaihekulman vaihtelun hyödyntämistä paikantamiseen. Kukin vaihekulma toistuu kahdesti aallonpituudessa, joten etäisyyttä ei suoraan voida laskea yhden PoA:n avulla, mutta tätä voidaan hyödyntää muiden metodien lisäksi sijaintitiedon tarkentamiseen. Useamman antennin PoA:lla voitaisiin teoriassa saada laskennallinen sijainti, mutta käytännössä heijastumien, kaapeleiden ja antennien aiheuttaman vaihemuutoksen takia tämä on haastavaa. PoA on kuitenkin erittäin hyvä lisä muiden paikannusmetodien tueksi ja tarkennukseksi. (Ma ym. 2018; Wu 2012).

3.5 Vyöhykepohjainen paikantaminen

Vyöhykepohjaisessa järjestelmässä antennija on ainakin yhtä monta kuin vyöhykkeitä. Antennit sijoitetaan tai suunnataan niin, että jokaisen antennin kantama vastaa yhtä vyöhykettä, tai vaihtoehtoisesti antenneilla rajataan vyöhykkeet niitä yhdistävien pisteiden kohdalta, kuten oviaukoista. (Wu 2012). Avoimen tilan yläpuolelle sijoitettu kapeakeilaisista antennista muodostettu matriisi on yksi tapa vyöhykepikantamiseen. Siinä paikannuksen tarkkuus määräytyy täysin matriisin tiheyden mukaan. Antennimatriisin on oltava kuitenkin maltillisella korkeudella, joka rajoittaa tekniikan soveltamista esimerkiksi korkeissa teollisuus- ja urheiluhalleissa. (Pyrrö 2019).

3.6 Vertailuarvoihin perustuva paikantaminen ja tulosten skaalaus

Vertailuarvoihin pohjautuvaa paikantamista (fingerprinting) voidaan hyödyntää tunnisteen sijainnin määrittämiseen, jos mittausalue on riittävän staattinen ja referenssiarvot päästään mittaamaan etukäteen. Koska RFID-paikantaminen on niin altista heijastumille ja signaalin kulkua estäville objekteille, vertailuarvojen avulla voidaan korjata heijastumien aiheuttamaa virhettä, ja saada pelkkiin signaaliarvoihin perustuva laskennallinen järjestelmä tarkempia tuloksia. Tämä voi olla myös hyvin kustannustehokasta, jos järjestelmää käytetään pitkään ilman että vertailuarvomittauksia tarvitsee uusia. (Yu, Wang & Wu 2020).

Algoritmien avulla lasketut referenssimittauksen sijaintikoordinaatit voidaan skaalata täyttämään koko mittausalue tasaisesti, jolloin saadaan skaalauskerroimet. Niitä voidaan soveltaa jatkossa tehtäviin etäisyysmittauksiin, että saadaan minimoitua mittausympäristön heijastumista ja muista pysyvistä tekijöistä aiheutuvat virheet. (Yu, Wang & Wu 2020).

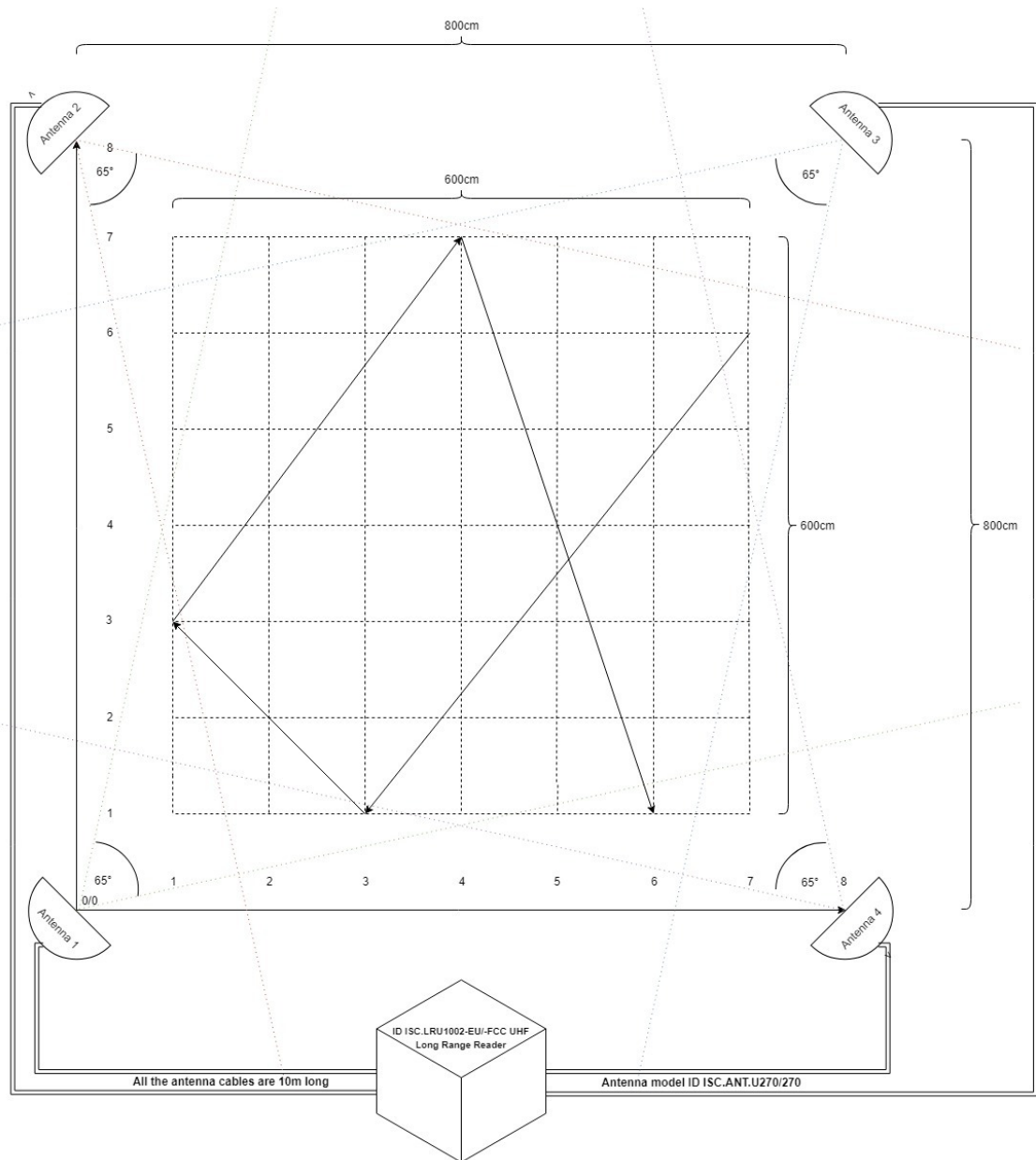
4 Valittu toteutustapa ja mittaustilanne

Tutkittavaksi tekniikaksi valittiin passiivinen UHF RFID, koska passiivitunnisteet sopivat helppoutensa ja kokonsa puolesta parhaiten haluttuun käyttöön, eivätkä häiritsisi paikannettavia pelaajia. Lisäksi UHF-RFID:n viime vuosina parantunut standardien mukainen kantomatka antoi toiveita tekniikan soveltuvuudesta näinkin pitkille etäisyyksille. (Liukko 2017, Ray 2018)

4.1 Mittauspaikka

Tutkimus toteutettiin rakentamalla kuvion 1 mukainen beach volley -kentän puolisko vastaava mittausalue Jyväskylän Ammattikorkeakoulun liikuntasaliin. Antennit aseteltiin neliön kulmiin siten, että vierekkäisten antennien etäisyys toisistaan oli 8 metriä. Kaikki antennit suunnattiin kohti neliön keskipistettä ja niiden keskipiste asetettiin 76 cm korkeuteen lattiasta. Lukija sijoitettiin parin metrin päähän mittausalu-

eesta. Antennit kytkettiin lukijaan neljällä samanlaisella koaksiaalikaapelilla. Mittausalue oli kooltaan 6 m * 6 m ja se on merkitty kuvion 1 koordinaatistoon välille (1,1) – (7,7) katkoviivaruudukolla.



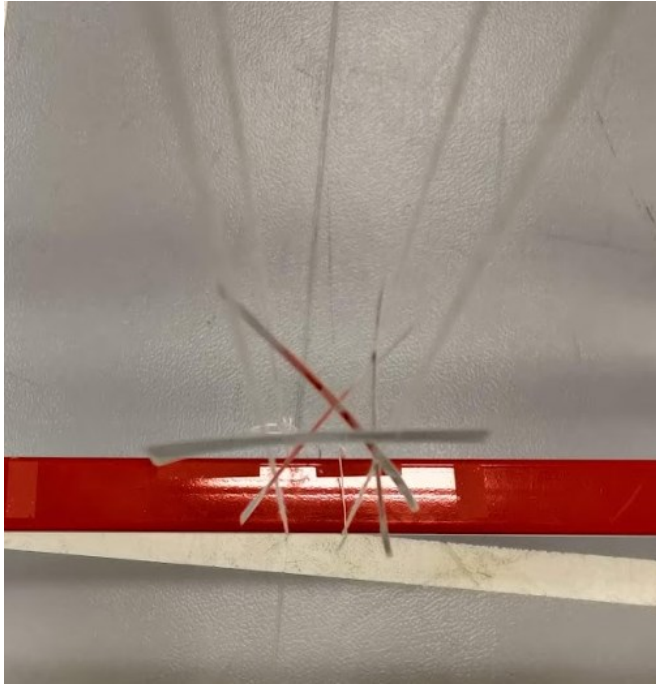
Kuvio 1. Mittausalue ylhäältä kuvattuna.

Mittausalueelle merkittiin teipillä kuvioissa 1 ja 2 näkyvä 6 m * 6 m ruudukko, jossa

yksi ruutu oli neliömetrin kokoinen, sekä kuviossa 1 nuolella merkitty reitti. Osassa mittauksista paikannettava kohde liikkui tätä reittiä pitkin. Mittausten aikana tunnistet olivat joko narujen avulla kuvion 3 mukaisesti ripustettuna kuviossa 2 näkyvään punaiseen telineeseen, tai kiinni kohdehenkilön paidan ulkopinnassa kuvion 4 osoittamalla tavalla.



Kuvio 2. Mittausalue ruudukoinen sekä teline, johon tunnistet kiinnitettiin.



Kuvio 3. Tunnisteet ripustettiin naruihin, antennien kanssa samalle korkeudelle.



Kuvio 4. Tunnisteet olivat kiinnitettynä kohdehenkilön paidan ulkopintaan.

4.2 Laitteisto ja asetukset

Mittauslaitteiston toimitti mittausten ajaksi lainaan ToP Tunniste Oy. Valitsimme laitteet yhdessä ToP Tunnisteen myyntipäällikön Janne Pyrrön kanssa. Laitteet ovat erittäin laadukkaita ja suorituskykyisiä, mutta eivät aivan kaikilta ominaisuuksiltaan vastaa aivan alan terävintä kärkeä, koska mittausten kannalta ero ei olisi ollut merkityksellinen. (Pyrrö 2019). Valittu laitteisto on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. ToP Tunniste Oy:n lainaama mittauslaitteisto.

Tuote	Kuvaus	Määrä
RFID-lukija	ID ISC.LRU1002-EU UHF Long Range Reader s/n: 6743308	1kpl
Virtalähde	RFID-lukijan virtalähde (24 VDC) ID NET.24V-B Power Supply Unit, s/n 6676359 sisältää 5 m verkkojohdon	1kpl
Tarvikkeet	USB-kaapeli (mini-A) 1,8 m	1kpl
Tarvikkeet	RJ45-kaapeli 1,5 m	1kpl
Antenni	ID ISC.ANT.U270/270, UHF Long Range Antenna circular 65° 270x270x57mm (SMA-liitin) s/n: 6443997, 6443991, 6443998, 6443992	4kpl
Antennikaapeli	Antennikaapeli 10 m UHF-antennikaapeli (SMA-SMA, "MCE")	4kpl

RFID-laitteistossa keskeisessä osassa on lukija, jonka takia valitsimme mittauksiin laadukkaan, saksalaisen FEIG Electronicin valmistaman ID ISC.LRU1002-EU -mallin. Tästä

kuvion 5 laitteesta löytyy neljä antenniliitäntää, RJ45-verkkoliitäntä sekä mini-USB-liitäntä tietokonetta varten.



Kuvio 5. FEIG Electronic ID ISC.LRU1002-EU.

Lukijaan kytkettiin kymmenmetrisillä koaksiaalikaapeleilla (kuvio 5) kiinni neljä antennia (kuviot 7 ja 8). Antenneiksi valitsimme 4 kappaletta 270 mm * 270 mm * 57 mm kokoisia pyöreällä 65° keilalla säteileviä FEIG Electronicin ISC.ANT.U270/270-EU-malleja.



Kuvio 6. BELDEN VENLO HOLLAND 2018 50 OHM LOW LOSS H155 PVC

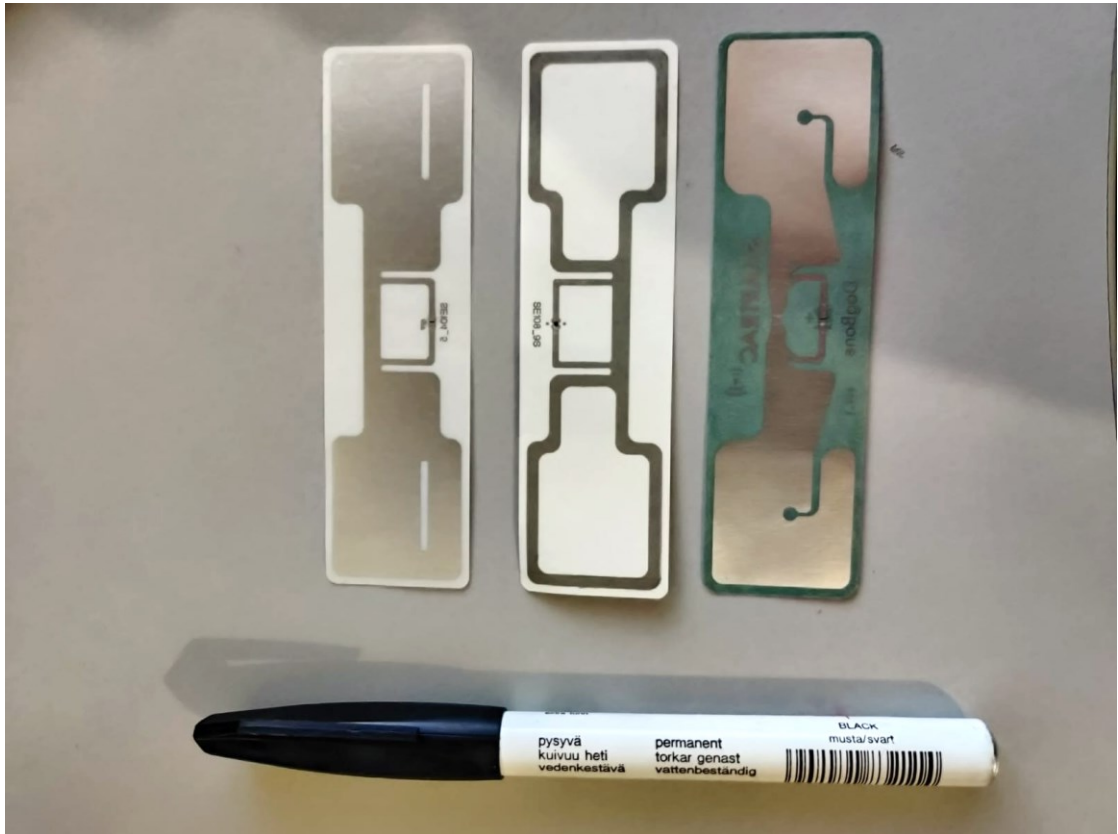


Kuvio 7. FEIG Electronic ISC.ANT.U270/270-EU RFID Antenna UHF - takaa kuvattuna.



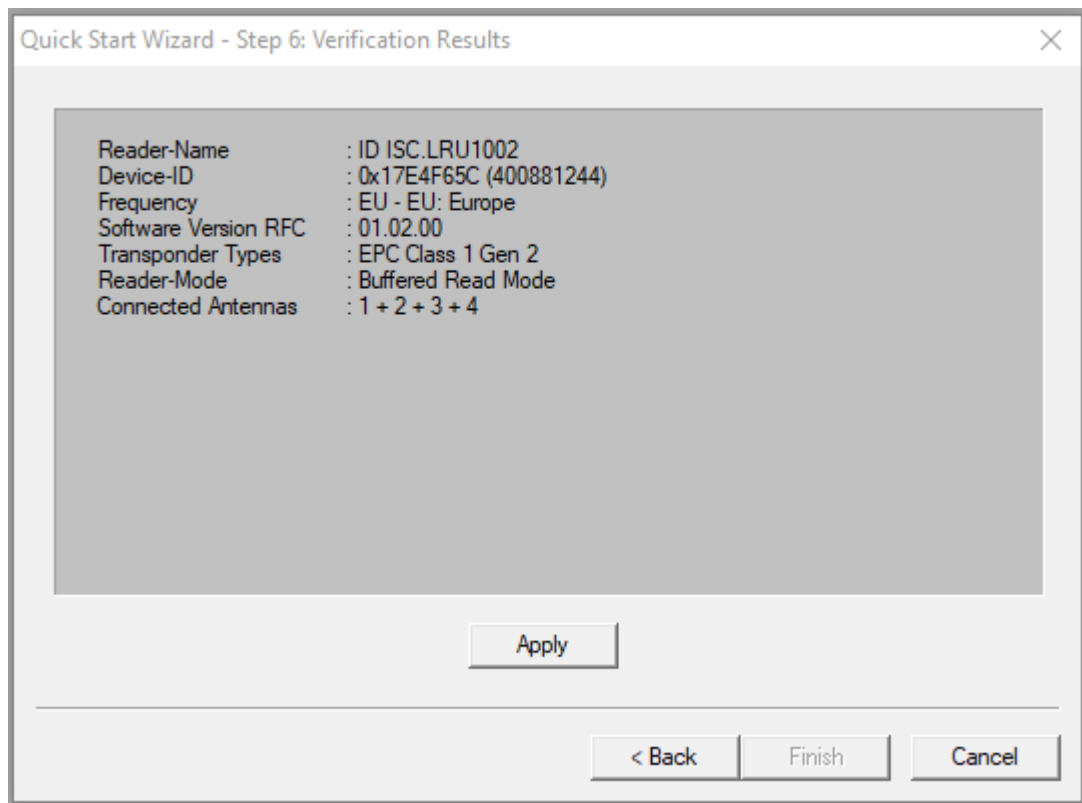
Kuvio 8. FEIG Electronic ISC.ANT.U270/270-EU RFID Antenna UHF - edestä kuvattuna.

Tunnisteiksi mittauksiin mittauksiin oli saatu ToP Tunnisteelta kolme UHF Class 1 Gen 2 mallivaihtoehtoa. Niistä valittiin käyttöön SMARTRAC DogBone 425_1 -malli, koska testimittauksissa se antoi vahvemman vastaussignaalin kuin kaksi muuta vaihtoehtoa. Kaikki kolme kuviossa 9 kuvattua tunnistemallia ovat 27 mm * 97 mm kokoisia paperinohuita tarroja. Siru näkyy tunnisteiden keskiosassa pienenä tummana pisteenä.



Kuvio 9. Tunnistevaihtoehdot. Mittauksissa käytettiin näistä oikeanpuoleista.

Mittauslaitteistoon kytkettiin tietokone, jossa oli asennettuna Windows 10 -käyttöjärjestelmä ja ID ISOStart -mittausohjelmiston versio 1.02.00. Mittaukset tehtiin Buffered Read Modea käyttäen (Kuvio 10). Kaikki loput ohjelmistoasetukset on kuvattu liitteessä 1.



Kuvio 10. Ohjelmiston asetukset.

4.3 Mittaustilanteen kulku

Kun mittauslaitteisto ja tila oli saatu valmisteltua, tehtiin kuusi mittaus taulukon 2 mukaisessa järjestyksessä. Ensimmäisessä mittauksessa käytettiin vain yhtä antennia suurimmalla Euroopassa sallitulla lähetysteholla (2 W) ja kolmea erilaista tunnistetta, joista parhaiten suoriutunut tunnistetyyppi SMARTRAC DogBone 425_1 valittiin käyttöön muihin mittauksiin. Mittauksissa 2–6 käytettiin kaikkia neljää antennia suurimmalla sallitulla teholla ja lukukertojen välinen minimiaika asetettiin mahdollisimman lyhyeksi. Näin kaikki antennit pystyivät lukemaan kaikkia neljää tunnistetta niin monta kertaa, kuin mittauksen keston aikana ehtivät. Mittausohjelmisto ID ISOStart antoi tallentaa mittausdatan .csv-muotoisena tiedostona. Näitä tiedostoja tallennettiin mittauksista yhteensä 104 kappaletta.

Datan käsittelytavat ja algoritmit päätettiin vasta myöhemmin, jonka takia mittauksissa pyrittiin keräämään vähintäänkin riittävä määrä dataa. Suuresta datamäärästä pystyi myöhemmin sitten karsimaan pois sen osan, jota ei voitu hyödyntää tutkimuksessa. Tämän takia mittaukset olivat melko laajat, monivaiheiset ja pitkäkestoiset.

Taulukko 2. Mittaukset toteutusjärjestyksessä.

Mittaus	Kuvaus	Kesto (s) Kpl-määrä	Tavoite
1.	Kolme erilaista tunnistetta asetettiin metrin päähän antennista, keskelle antennin säteilykeilaa.	10 s	Tavoitteena oli löytää tunnistetyyppi, jonka vastaussignaali on voimakkain, sekä määrittää RSSI:n referenssiarvo yhdessä metrissä.
2.	Neljä tunnistetta kiinnitettiin kuvion 3 osoittamalla tavalla telineeseen. Mitattiin arvot kaikkia antenneja käyttäen jokaisessa koordinaatiston 1 m * 1 m ruudun risteyskohdassa välillä (1,1) – (7:7)	7 s 7 * 7 = 49 kpl	Tavoitteena oli selvittää, kuinka tarkasti tunnetuissa pisteissä olevat tunnistet pystytään paikantamaan ideaaleissa sisätilaolosuhteissa.
3.	Neljä tunnistetta kiinnitettiin 90-kiloisen kohdehenkilön paidan ulkopintaan. Yksi vatsaan, yksi selkään, yksi kumpaankin kylkeen. Mitattiin arvot kaikkia antenneja käyttäen jokaisessa koordinaatiston 1 m * 1 m ruudun risteyskohdassa välillä (1,1) – (7:7) kohdehenkilön pyörähtäen maltillisella nopeudella vertikaaliakselinsa ympäri.	7 s 7 * 7 = 49 kpl	Tavoitteena oli selvittää kuinka paljon kehon tiheä massa vaikuttaa signaalivoihin, ja siten paikannustarkkuuteen, verrattaessa mittaukseen 2.

4.	Neljä tunnistetta kiinnitettiin kuvion 3 osoittamalla tavalla telineeseen. Telineitä liikutettiin nuolella kuvioon 1 merkittyä reittiä tavallista kävelyvauhtia.	17 s * 2 kpl	Tavoitteena oli selvittää, kuinka liike vaikuttaa tunnisteen paikannustarkkuuteen, verrattuna staattiseen mittaukseen 2.
5.	Neljä tunnistetta kiinnitettiin 90-kiloisen kohdehenkilön paidan ulkopintaan. Yksi vatsaan, yksi selkään, yksi kumpaankin kylkeen. Kohdehenkilö käveli kuvioon 1 nuolella merkityn reitin tavallista kävelyvauhtia.	19 s * 2 kpl	Tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon kehon tiheä massa vaikuttaa signaaliarvoihin ja siten paikannustarkkuuteen liikemittauksessa, verraten mittaukseen 4.
6.	Neljä tunnistetta kiinnitettiin 90-kiloisen kohdehenkilön paidan ulkopintaan. Yksi vatsaan, yksi selkään, yksi kumpaankin kylkeen. Kohdehenkilö juoksi kuvioon 1 nuolella merkityn reitin reipasta juoksuvauhtia.	10 s	Tavoitteena oli selvittää kohdehenkilön liikenopeuden vaikutus paikannustarkkuuteen verraten mittaukseen 5.

5 Tulokset

5.1 Datan tulkinta ja jalostaminen

Datan käsittelyyn käytettiin tässä työssä vain Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmaa. Ensin kaikki data mittausta 1 lukuun ottamatta poimittiin yhteen taulukkoon useasta .csv-tiedostosta Excelin taulukonluontityökalulla. Tästä yli 11 000-rivisestä taulukosta on näyte liitteessä 2. Ennen kuin taulukon arvoja pystyttiin hyödyntämään, niistä täytyi tehdä eri muotoisia havainnollistavia taulukoita, graafisia esityksiä

ja virhearvioita, joiden perusteella päätettiin millä keinoin tunnistneiden sijaintia lähdetään määrittämään.

Testausohjelmisto ilmoitti signaalin voimakkuuden desibelimilliwatteina (dBm), erikseen jokaiselta lukukerralta. Dataa alettiin jalostaa ensin mittausten 2 ja 3 (katso taulukko 2) osalta hallittavampaan ja hyödynnettävämpään muotoon. Tätä varten tarvittiin mittauksessa 1 yhden metrin etäisyydellä antennista mitattu signaalivoimakkuuden referenssiarvo, jota kutsutaan nimellä ”mitattu teho”. Mitatun tehon arvoksi määriteltiin paras mittauksessa 1 saatu arvo, - 51 dBm (taulukko 3).

Taulukko 3. Mittauksessa 1 parhaan tunnistemallin signaalivoimakkuusarvot.

	RSSI (dBm)
Keskiarvo	-51,425
MAX	-51
MIN	-55

Seuraavaksi otettiin käsittelyyn kaikki muu mittausdata, joka oli liitteen 2 mukaisessa muodossa. Jokaisen antennin mittaamista arvoista valittiin paras, eli voimakkain mitattu signaali. Tämä tehtiin jokaisen mittauksen kohdalla erikseen. Nämä arvot siirrettiin uuteen taulukkoon, josta kasattiin kuviossa 10 esitettävä graafinen muoto. Pystyakselilla vasemmassa laidassa on merkitty mittauksia 2 ja 3 (taulukko 2) koskevat rivit ja kulmassa sinisellä merkittynä kyseisen taulukon arvot mitannut antenni. Reunoissa juoksevat luvut 1–7 merkitsevät mittausalueen koordinaatteja. Jokaisessa koordinaatiston pisteessä on siis kaksi arvoa jokaista antennia kohden, yksi mittauksesta 2 ja toinen mittauksesta 3.

5.2 Etäisyysarvojen laskeminen

Desibelimilliwattien perusteella antennin ja tunnisteen välisen etäisyyden voi laskea kaavalla (1),

$$D = 10^{\left(\frac{(\text{Mitattu teho} - \text{RSSI})}{(10 * N)}\right)} \quad (1)$$

jossa

D = Etäisyys (m)

Mitattu teho = Mittauksessa 1 saatu 1 m etäisyydeltä mitattu signaalivoimakkuuden referenssiarvo (dBm)

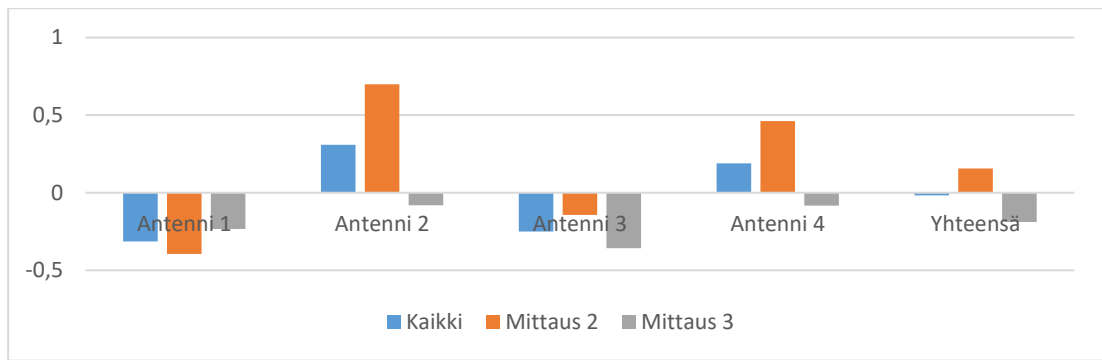
RSSI = Mittauksessa saatu RSSI-arvo (dBm)

N = vakio väliltä 2—4, joka riippuu ulkoisista tekijöistä, kuten mittausympäristössä vaikuttavista heijastumista. (Olyazadeh 2012; Omer & Tian 2018).

Vakion N arvo määritellään siten, että mittausten perusteella arvioitu etäisyys poikkeaisi mahdollisimman vähän todellisesta etäisyydestä. Tätä varten luotiin Exceliin taulukko, joka laskee poikkeamien keskiarvon, vakiolle N asetetun arvon mukaisesti. Kuten taulukosta 3 ja kuvioista 12 käy ilmi, poikkeaman minimoiva N:n arvo olisi erisuuri mittauksen 2 ja mittauksen 3 arvoilla. Päätettiin kuitenkin jatkaa yhtenäisellä arvolla N = 2,79, jolloin mittausten 2 ja 3 kaikki arvot huomioiden lasketun etäisyyden keskimääräinen poikkeama todellisesta etäisyydestä on -0,01665 m eli alle 2 cm (Taulukko 3 ja kuvio 12). (Olyazadeh 2012).

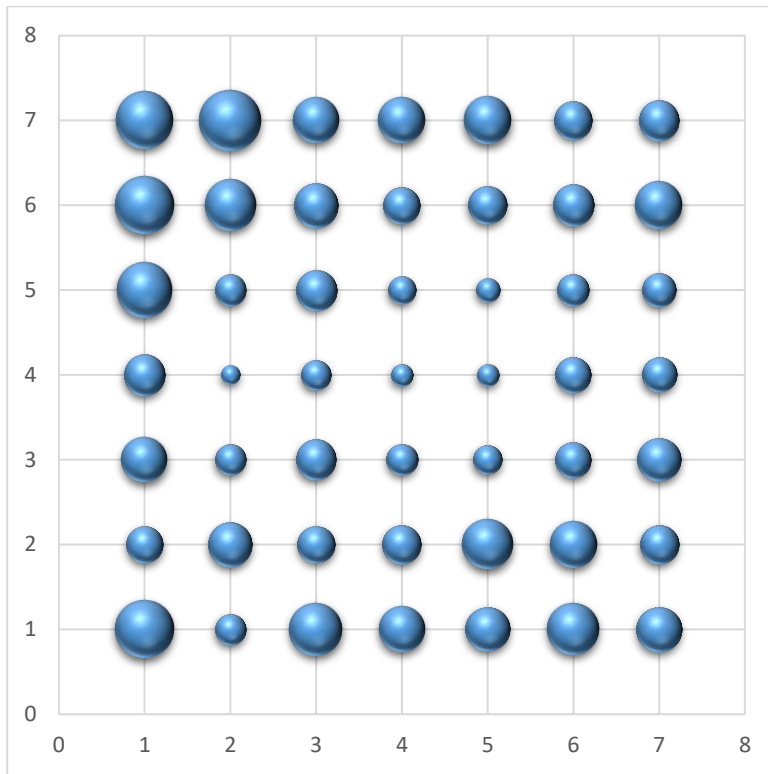
Taulukko 3. Mitattujen etäisyyksien poikkeamien keskiarvot (m).

Keskiarvo	Antenni 1	Antenni 2	Antenni 3	Antenni 4	Yhteensä
Kaikki	-0,313513057	0,308237908	-0,250760158	0,189419826	-0,01665
Mittaus 2	-0,393755366	0,698182045	-0,143320473	0,461359358	0,155616
Mittaus 3	-0,233270749	-0,081706229	-0,358199843	-0,082519707	-0,188924

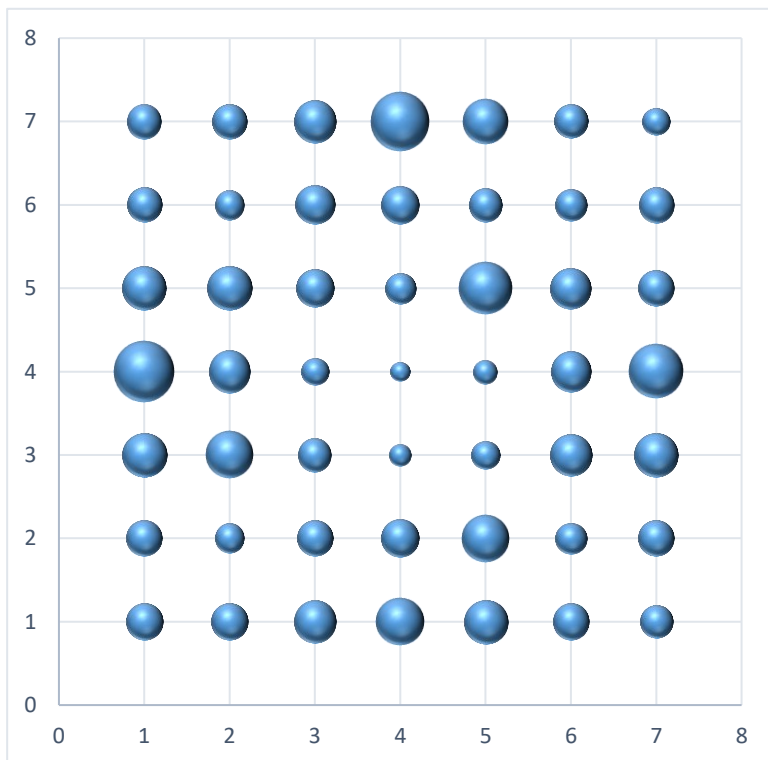


Kuvio 12. Mitattujen etäisyysarvojen ja todellisten etäisyyksien erotusten keskiarvo antennikohtaisesti (m).

Kun N:n arvo oli määritelty ja etäisyydet laskettu, laskettiin etäisyysarvojen absoluuttisten keskiarvojen summa kaikilla antenneilla kussakin mittauspisteessä ja luotiin niitä havainnollistavat kuviot 13 ja 14. Mittauksessa 2 etäisyysarvot keskellä aluetta ovat hyvinkin tarkkoja, mutta laidoilla ja etenkin kulmissa virhe kasvaa selvästi. Hieman yllättäen mittauksessa 3 alueen kulmista saadut arvot ovat mittauksessa 2 selvästi tarkempia. Mittausalueen ulkosivujen keskellä virhe on suurempi mittauksessa 3 kuin mittauksessa 2, mutta keskusta on melko tarkka myös mittauksessa 3. Kaikkien mittauspisteiden lasketut etäisyydet antenneista, sekä näiden virheet löytyvät liitteestä 3.



Kuvio 13. Etäisyysarvion keskipoikkeama mittauspisteissä, Mittaus 2.



Kuvio 14. Etäisyysarvion keskipoikkeama mittauspisteissä, Mittaus 3.

5.3 Sijainnin laskeminen

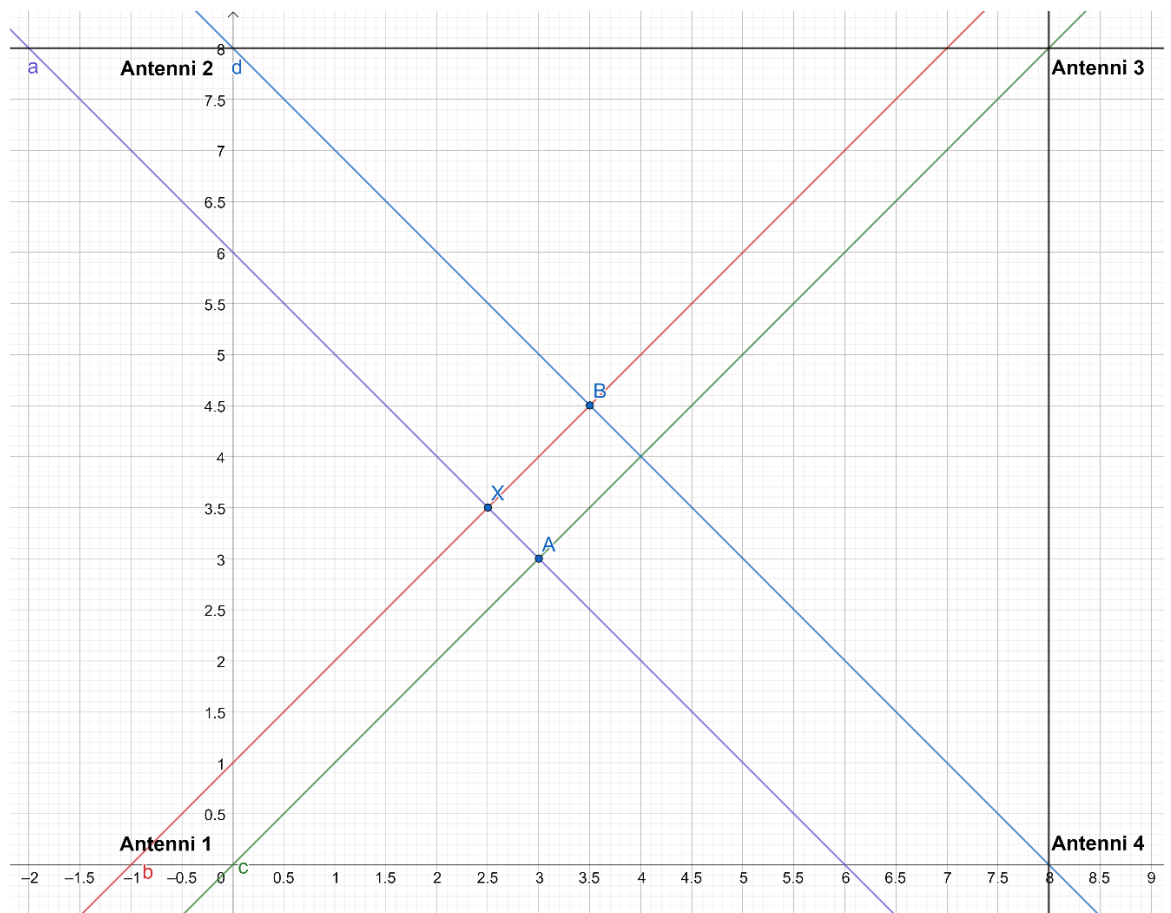
Kohteen sijainnin määrittämiseen tämän tutkimuksen mittauslaitteistolla voisi RSSI:n pohjalta laskettujen etäisyysarvojen lisäksi käyttää myös PoA:ta eli signaalin vaihekulmaa, sekä vertailuarvoihin pohjautuvaa skaalausta (Liukko 2017). Kokonaiskuva etäisyysarvojen poikkeamista oli kuitenkin niin epätarkka, että RSSI:llä saatua sijaintitietoa olisi ollut turhaa yrittää tarkentaa PoA:ta hyödyntäen. Koska sama vaihekulma toistuu kahdesti aallonpituudessa (33 cm), tämä tekniikka olisi hyödyksi vasta kun paikannus on onnistuttu tekemään vähintään puolikkaan aallonpituuden tarkkuudella. (Friedewald & Lange 2016; Ma ym. 2018; Shi Y., Shi, W., Liu & Xiao 2020). Tästä lähtien keskityttiin siis selvittämään miten tarkka sijainti RSSI:n pohjalta saadaan määritettyä, ja voidaanko sitä mahdollisesti tarkentaa vertailuarvoja ja skaalausta hyödyntäen.

5.3.1 Sijainnin määrittämisen laskentatapa 1

Ensimmäinen keino, jolla lähdettiin määrittämään paikannettavan tunnisteen sijaintia, esitetään kuviossa 15. Vastakkaisten antennien 1 ja 3 arvioituja etäisyyksiä d_1 ja d_3 (liite 3) verrataan ja määritetään lävistäjälle c piste A , jonka etäisyys origoon on $d_1/(d_3+d_1)$ kerrottuna janan $(0, 0) - (8, 8)$ pituudella neliöjuuri $((8^2) * 2)$. Määritetään kaavassa (2) esitetty suoran yhtälö a , joka on normaali lävistäjälle c , leikaten sen pisteessä A . Määritetään sitten kaavaa (3) käyttäen antennien 2 ja 4 väliselle lävistäjälle d normaali b , joka leikkaa lävistäjän d pisteessä B . Lopuksi lasketaan suorien a ja b leikkauspisteen X koordinaatit, jotka pyrkivät arvioimaan tunnisteen sijaintia.

$$a(x) = -x + \sqrt{\left(\left(\frac{d_1}{d_1+d_3}\right) * \sqrt{8^2 * 2}\right)^2 * 2} \quad (2)$$

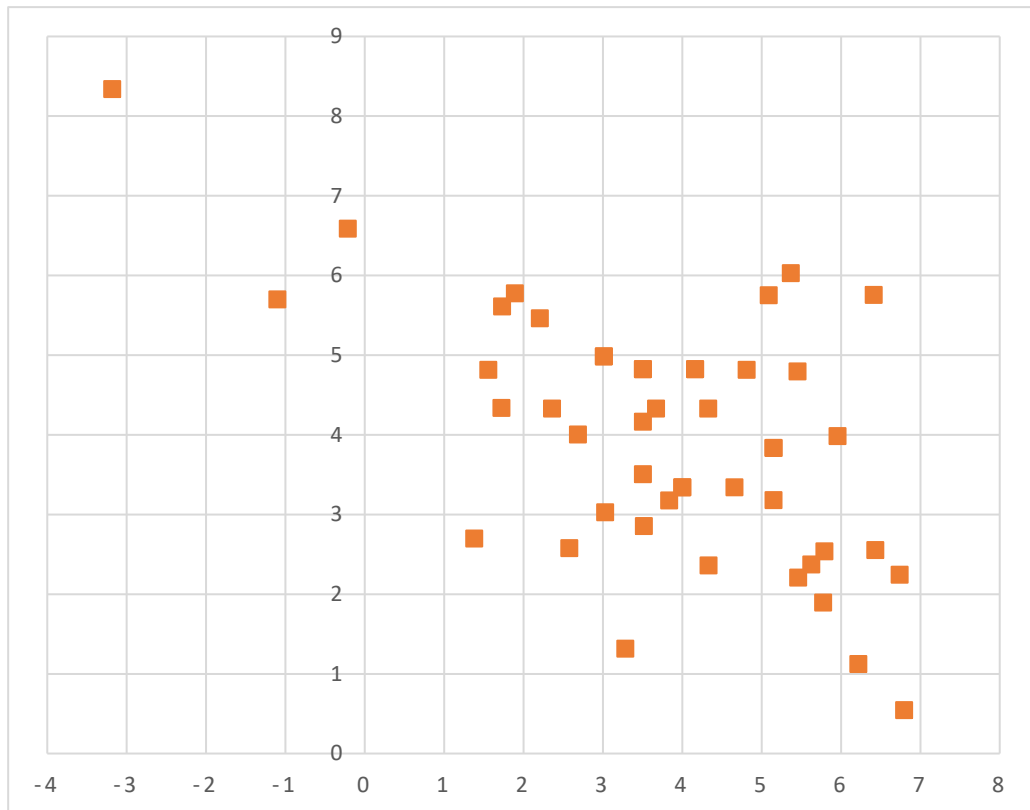
$$b(x) = x + 8 - \sqrt{\left(\left(\frac{d2}{d2+d4}\right) * \sqrt{8^2 * 2}\right)^2 * 2} \quad (3)$$



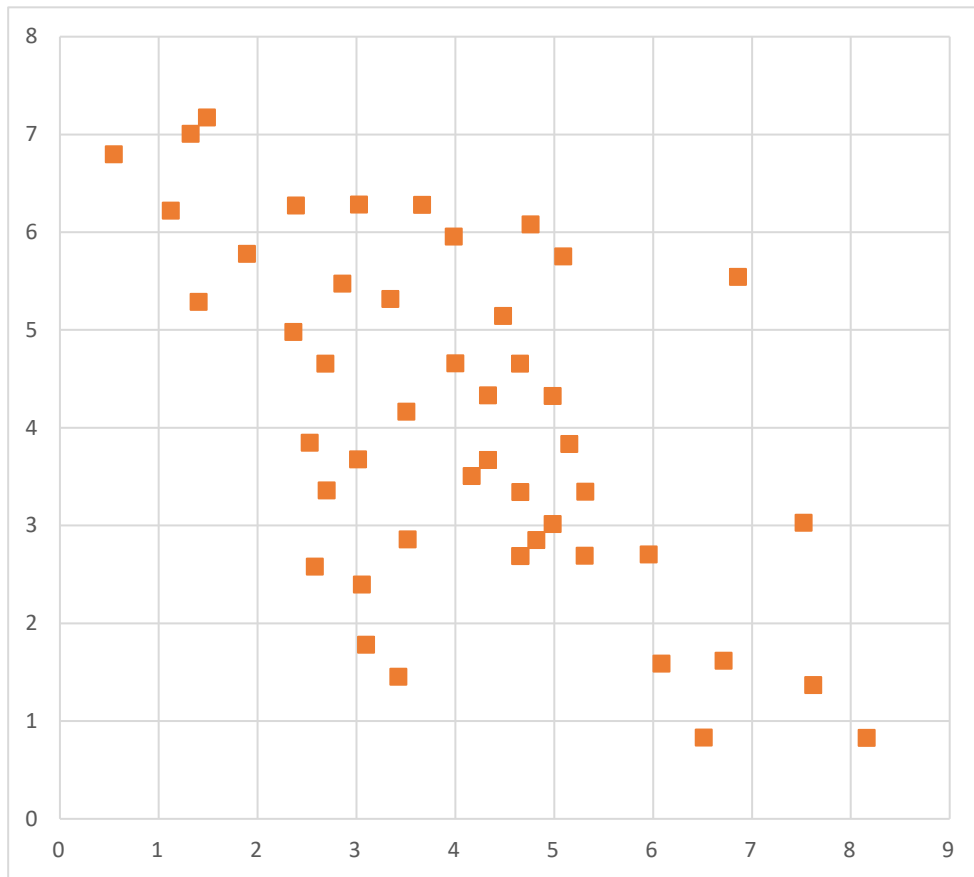
Kuvio 15. Sijainnin määrittämisen tapa 1 havainnollistettuna.

Kuvioissa 16 ja 17 esitetään tulosjoukot, jotka saatiin käyttämällä sijainnin määrittämiseen tapaa 1. Kokonaishajonta on kohtalainen, mutta joukosta löytyy muutama suuri

poikkeama selvästi mittausalueen ulkopuolelta. Tulosityoukko näyttää myös vääristyneen viistosuunnassa molemmissa mittauksissa.



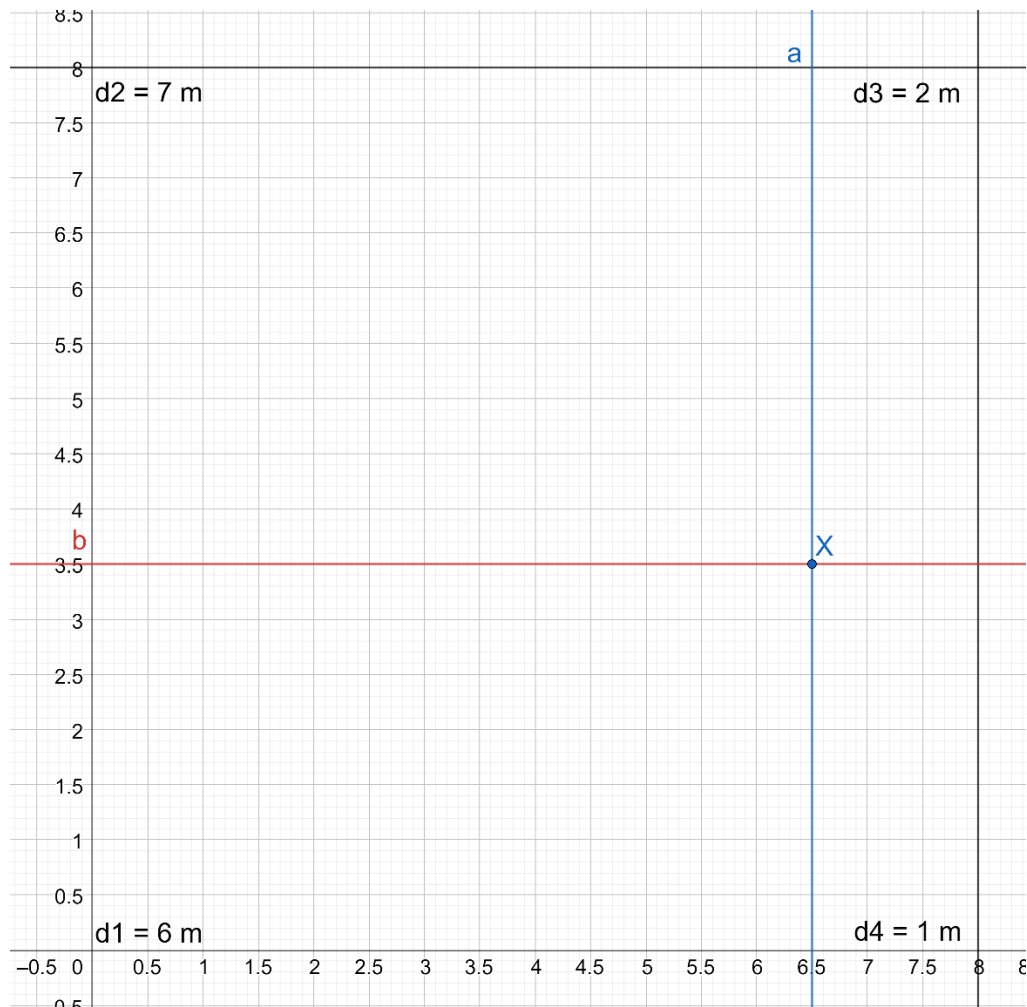
Kuvio 16. Mittauksen 2 tulosityoukko käyttäen laskutapaa 1.



Kuvio 17. Mittauksen 3 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 1.

5.3.2 Sijainnin määrittämisen laskentatapa 2

Toinen paikannustapa esitetään kuviossa 18. Kaikkien vierekkäisten antennien etäisyysarviot summataan yhteen ja piirretään suorat a ja b vastakkaisten sivujen etäisyysarvojen suhteen mukaan paikalleen. Jos esimerkiksi antennien 1 ja 2 arvioidut etäisyydet tunnisteesta ovat 6 m ja 7 m (summa 13 m) ja antennien 4 ja 3 etäisyysarviot 1 m ja 2 m (summa 3 m), jaetaan koordinaatisto pystysuunnassa suoralla a kohdalta. Suoran a etäisyys y-akselista on silloin $13 \text{ m} / (13 \text{ m} + 3 \text{ m}) * 8 \text{ m} = 6,5 \text{ m}$. Suoran b sijainti lasketaan samoin. $7 \text{ m} / (7 \text{ m} + 9 \text{ m}) * 8 \text{ m} = 3,5 \text{ m}$. Nämä suorat leikkaavat pisteessä X, jonka koordinaatit ovat karkea arvio tunnisteiden sijainnista.



Kuvio 18. Sijainnin määrittämisen tapa 2 havainnollistettuna.

Koska tällä mittaustavalla on heikkoutena arvioida sijainti liian lähelle mittausalueen keskustaa, täytyy tulokset vielä skaalata peittämään koko mittausalue. Skaalaausta varten tarvitaan kattava otanta mittausrvoja koko mittausalueelta. Tässä tutkimuksessa siihen käytetään arvojoukkoja mittauksista 2 ja 3. Ensin jokaisesta x-koordinaattiarvosta etsitään tulosjoukon pienin (X_{\min}) ja suurin (X_{\max}) arvo. Tämän jälkeen skaalataan arvot käyttämällä kaavaa (4),

$$XS = \left(\frac{(X - X_{\min})}{((X_{\max} - X_{\min}) * (A - B))} \right) + B \quad (4)$$

jossa

X_S = Skaalattu koordinaatti

X = Skaalattava koordinaatti

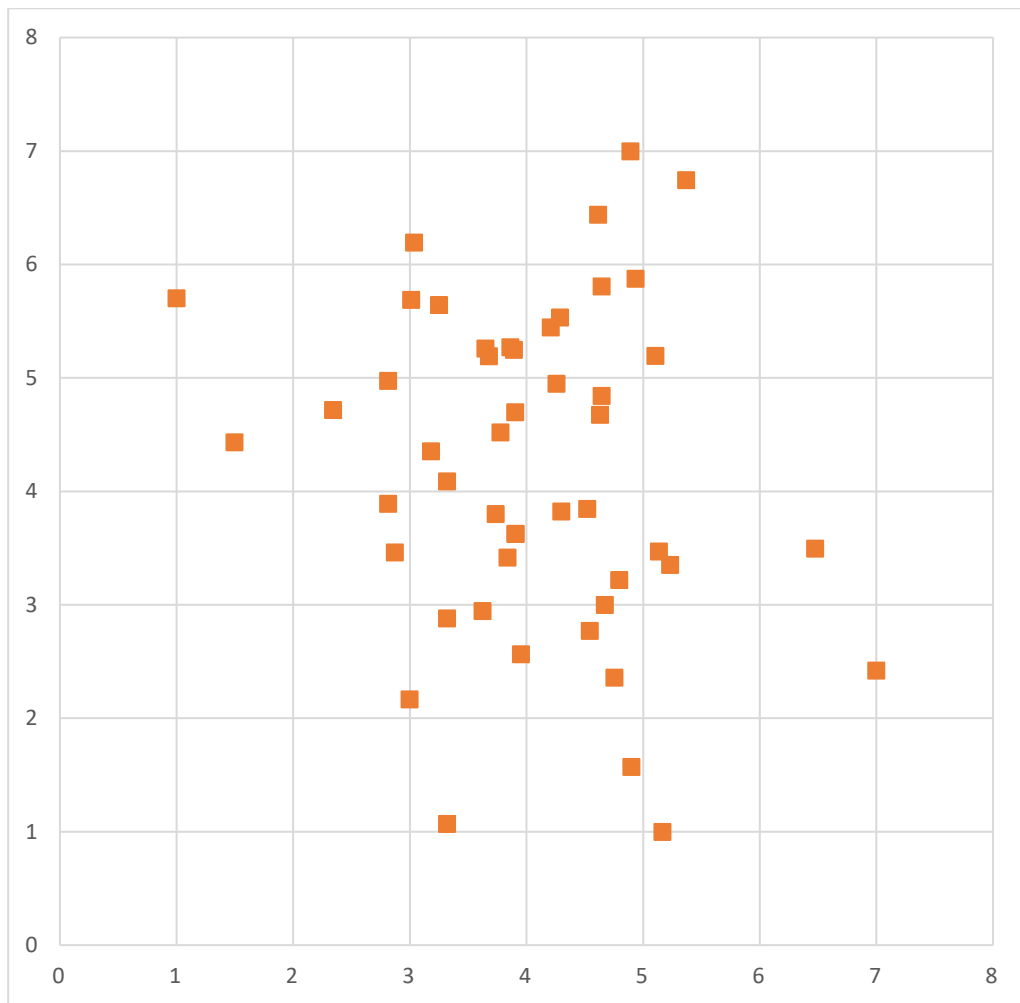
X_{\max} = Arvojoukon suurin X :n arvo

X_{\min} = Arvojoukon pienin X :n arvo

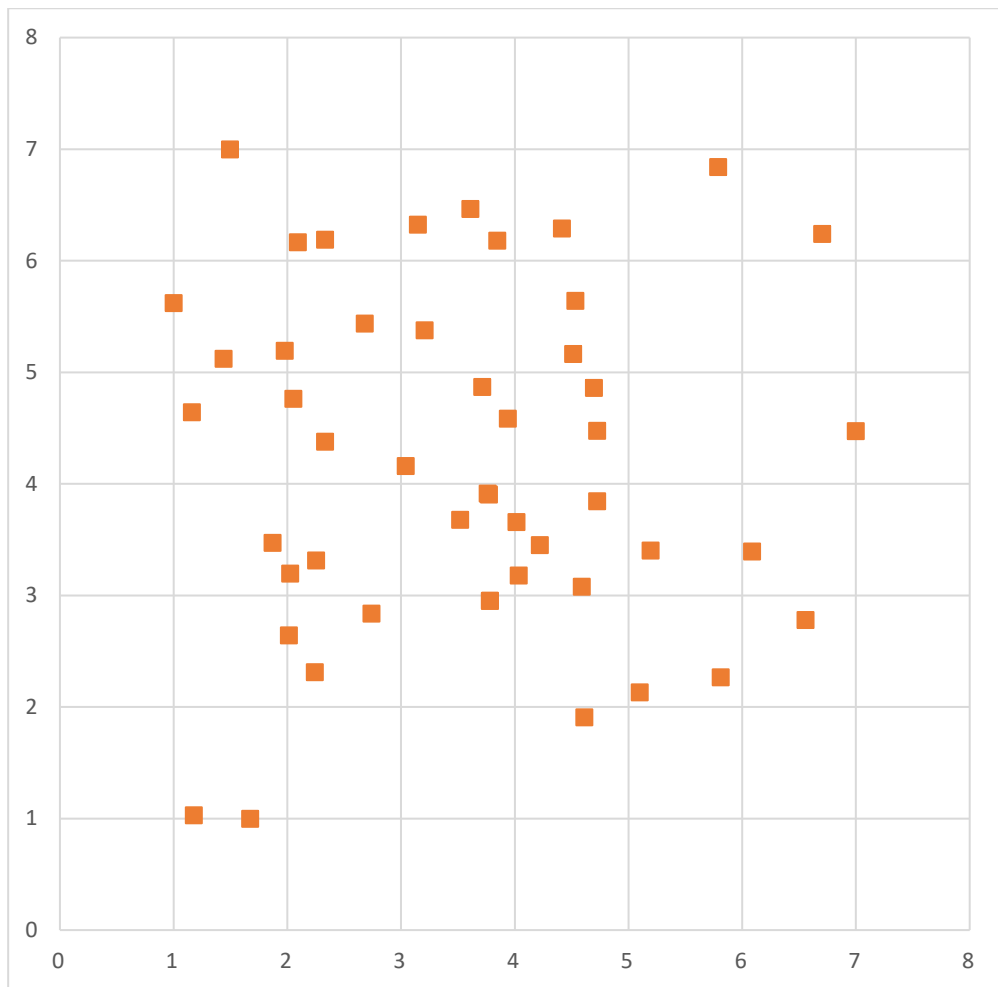
A = Mittausalueen oikean reunan etäisyys koordinaatiston Y -akselista = 7 m

B = Mittausalueen vasemman reunan etäisyys Y -akselista = 1 m.

Vastaava toiminto toistettiin myös Y -koordinaateille. Skaalaamalla saatiin muunnettua arvioitujen koordinaattien joukot kuvioiden 19 ja 20 mukaisiksi niin, että $X_{\max} = Y_{\max} = 7$ ja $X_{\min} = Y_{\min} = 1$. Arvot levittyvät kohtalaisesti mittausalueelle, mutta ovat edelleen hieman liian keskellä.



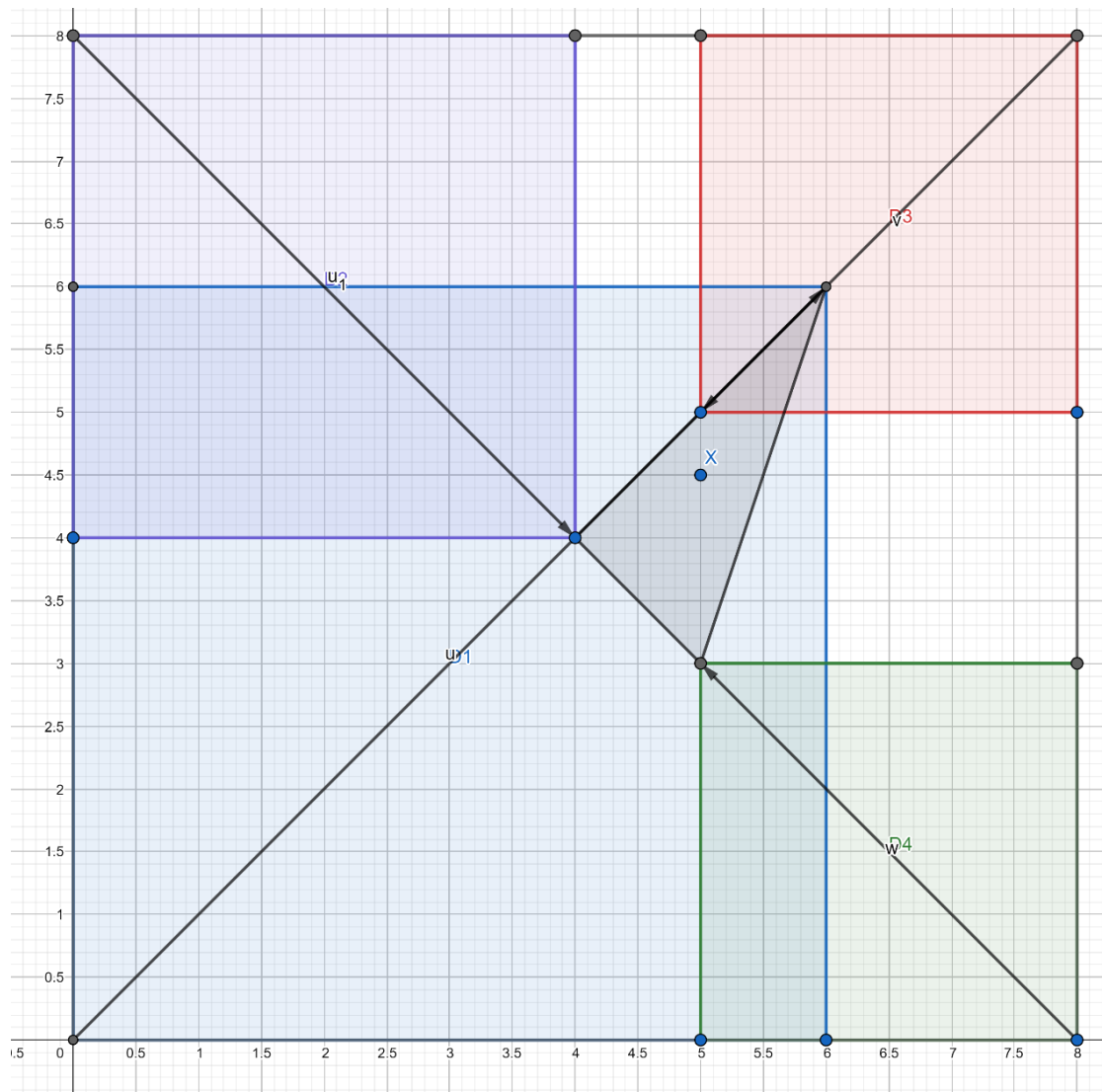
Kuvio 19. Mittauksen 2 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 2 (skaalattu).



Kuvio 20. Mittauksen 3 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 2 (skaalattu).

5.3.3 Sijainnin määrittämisen laskentatapa 3

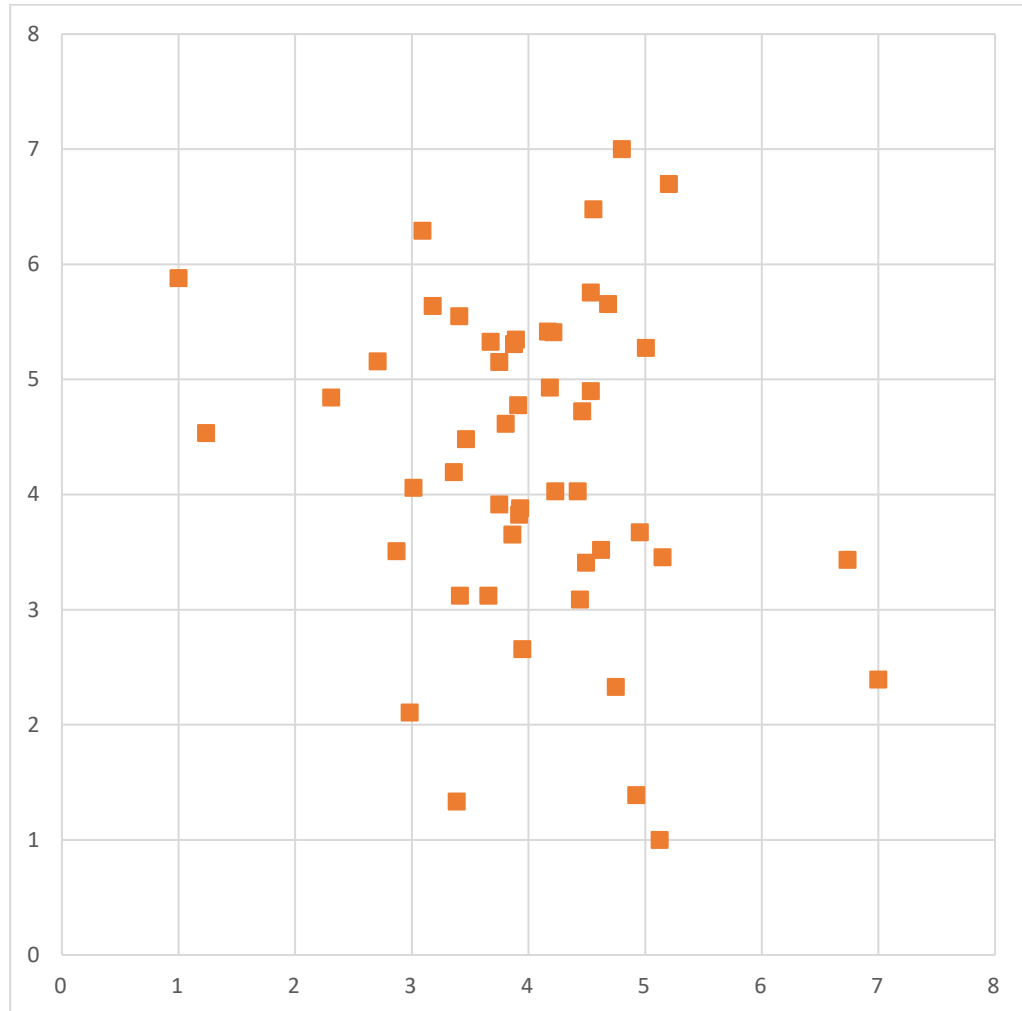
Kolmas tapa määrittää tunnisteen sijainti esitetään kuviossa 21. Siinä kunkin antennin kohdalta piirretään neliö kohti mittausalueen vastakkaista kulmaa niin, että neliön lävistäjän pituus vastaa aiemmin arvioitua tunnisteen etäisyyttä kyseisestä antennista. Sitten lasketaan neliöiden keskimmäisen kulman koordinaattien keskiarvot ja saadaan tunnisteen arvioitu sijainti. Kuviossa 21 tunnisteen arvioitu sijainti X olisi pisteessä $(x, y) = ((6 + 4 + 5 + 5) / 4), ((6 + 4 + 5 + 3) / 4) = (5, 4\frac{1}{2})$.



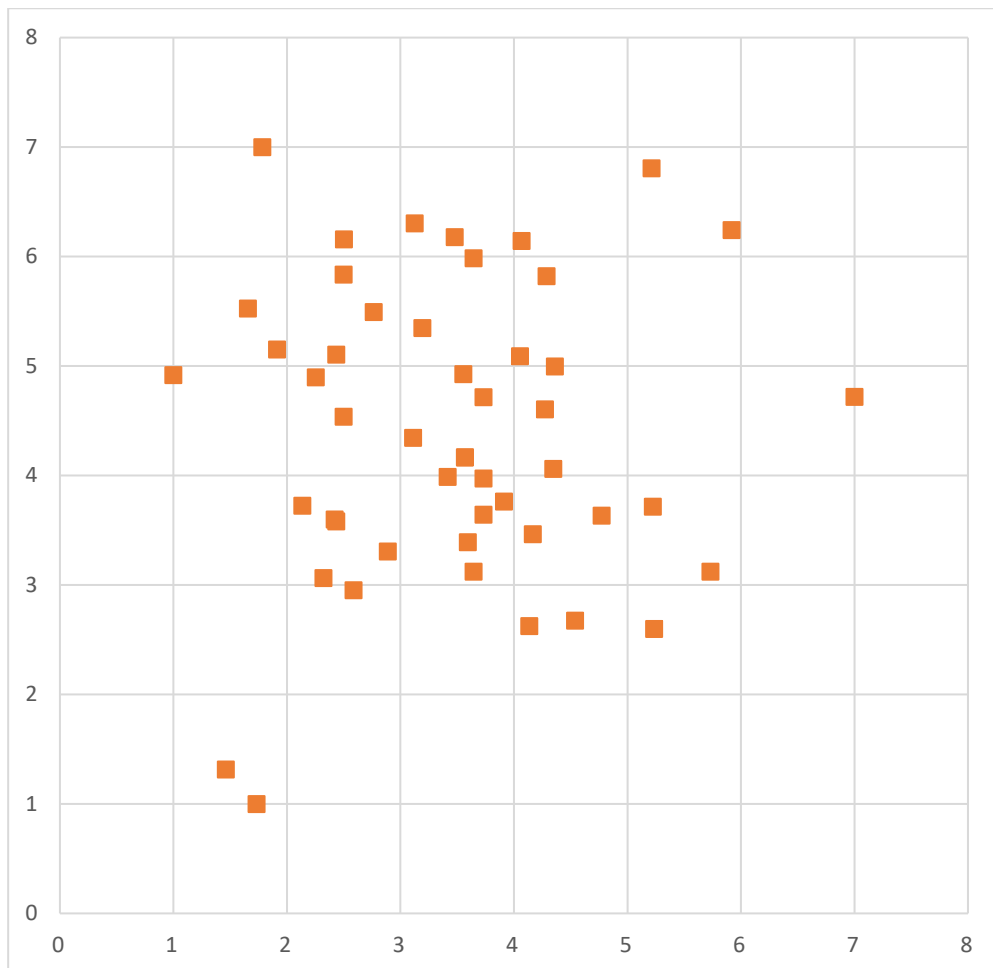
Kuvio 21. Sijainnin määrittämisen tapa 3 havainnollistettuna

Myös laskentatavalla 3 määritetyt arvot on skaalattava kaavaa (4) käyttäen. Skaalatut arvot on esitetty kuvioissa 22 ja 23. Graafisesta esityksestä on helppo huomata yhtä-

läisyyksiä tavalla 2 määritettyjen arvojoukkojen kanssa, mutta erojakin on. Laskentatavan 3 arvot (kuviot 22–23) näyttävät levittyvän mittausalueelle vielä hieman laskentatavan 2 arvoja (kuviot 18–19) heikommin.



Kuvio 22. Mittauksen 2 tulosjoukko käyttäen laskutapaa 3 (skaalattu).



Kuvio 23. Mittauksen 3 tulosjoukko käyttäen laskutapa 3 (skaalattu).

5.3.4 Laskentatapojen vertailu ja virhearviot.

Laskentatapa 1 toimi muuten melko hyvin, mutta kuten kuviosta 24 ilmenee, on joissakin mittauspisteissä tullut suuriakin virheitä. Mittaus 2 oli kohtalaisen tarkka keski-alueella, mutta kulmissa ja laidoilla virheet kasvoivat suuriksi. Mittauksessa 3 virhenousi keskimäärin huomattavasti suuremmaksi kuin mittauksessa 2 ja epätarkimmat mittauspisteet siirtyivät verrattuna mittaukseen 2 kulmista hieman keskemälle.

Mittaus 2									Mittaus 3								
2	1	2	3	4	5	6	7	3	2	1	2	3	4	5	6	7	3
7	4,4	2,3	1,7	2,2	2,8	1,2	1,4	7	7	0,5	1,2	3,3	5,6	4,3	2,4	1,5	7
6	2,1	0,2	1,9	1,3	1,4	2,2	1,9	6	6	1,1	0,2	4	3,4	2,4	2	2,2	6
5	0,6	0,7	2	1	0,5	1,2	1,5	5	5	4,6	5,8	4,6	1	3,7	3,7	2,8	5
4	1,7	0,4	0,7	0,5	0,2	1,7	1,6	4	4	6,6	4,2	1,4	0,9	0,7	3,8	5,7	4
3	2,5	1	2,6	0,7	0,9	0,9	2	3	3	4,1	4,1	2,3	0,5	1,9	4,9	4,6	3
2	1,7	2,4	2,6	1,3	2,1	0,2	0,4	2	2	2,1	1,7	2,3	3,4	6,3	1,4	1,3	2
1	1,7	1,3	3,4	2,2	1,9	3,4	4,3	1	1	2,2	2,5	3,9	5,4	5	1,7	1,2	1
1	1	2	3	4	5	6	7	4	1	1	2	3	4	5	6	7	4

Kuvio 24. Mittauksista 2 ja 3 laskutapaa 1 käyttäen saatujen sijaintitietojen virheet koordinaatistossa (m).

Laskutavan 2 virheet esitetään kuviossa 25. Mittauksen 2 virheet ovat selvästi pienempiä kuin mittauksen 3. Mittauksessa 3 selvästi suurimmat virheet sijoittuvat mitausalueen sisälle vinoneliön muotoon. Vinoneliön keskellä ja ympärillä luvut ovat lähes yhtä tarkkoja kuin mittauksessa 2.

Mittaus 2								Mittaus 3									
2	1	2	3	4	5	6	7	3	2	1	2	3	4	5	6	7	3
7	1,3	2,3	1,4	1,8	2,2	1,1	1,6	7	7	1,4	2	3,8	6,4	4,2	2,4	0,8	7
6	1,6	1,1	1,7	0,7	0,9	1,9	2,4	6	6	1,1	0,8	3,3	3,1	2,7	2,2	2,6	6
5	1,8	1,2	1,8	0,4	0,9	1,6	1,9	5	5	3,9	4,7	3,6	1,8	5,5	4,4	3,1	5
4	2,3	0,8	0,4	1	0,8	1,7	1,9	4	4	6	3,3	0,8	0,3	1,2	4	5,9	4
3	2,6	1,3	1,6	0,9	0,3	1,7	3	3	3	4,4	5,4	2,6	0,8	2,3	4,9	4,9	3
2	2	2	1,9	1,6	2,2	1,3	2,2	2	2	1,3	1,1	3	3,5	6,1	2,3	2,4	2
1	3,1	1,3	1,6	1,1	0,2	2,5	1,4	1	1	1,9	2,2	4,2	5,4	5	2,4	1,8	1
1	1	2	3	4	5	6	7	4	1	1	2	3	4	5	6	7	4

Kuvio 25. Mittauksista 2 ja 3 laskentatapaa 2 käyttäen saatujen sijaintitietojen virheet koordinaatistossa (m).

Laskutavan 3 virheet on esitetty kuviossa 26, josta huomaa helposti tämän laskutavan heikkouden, eli laidat ja kulmat. Ehkä vähän yllättäen tällä laskutavalla mittauksien 2 ja 3 välinen ero on pienin. Aiemmin kuviossa 25 nähty suurten virheiden vino-neliö on havaittavissa myös kuviossa 26, mittauksen 3 puolella.

Mittaus 2									Mittaus 3								
2	1	2	3	4	5	6	7	3	2	1	2	3	4	5	6	7	3
7	6,2	4,7	3,8	3,3	3,5	3,1	2,6	7	7	5,8	5,4	4,6	5,7	3,5	4,1	1,5	7
6	4,8	3,4	2,3	2,4	2,1	2,1	2,3	6	6	4,2	3,9	2	2,5	2,9	3	2,7	6
5	2,5	2,2	1,1	1,6	1,3	1,4	1	5	5	0,8	2,3	1,9	1,4	3,9	2,9	1,4	5
4	0,7	1	0,7	0,8	0,8	0,5	1	4	4	3,2	1,3	0,4	0,3	0,4	2,3	3,6	4
3	0,8	0,6	1,5	1,2	1,6	1,4	1,7	3	3	1,9	2,9	1,3	0,4	1	2,6	1,1	3
2	1,4	2,1	1,9	1,9	1,8	2,9	3,2	2	2	0,9	1	2,3	1,9	3,8	2	2,7	2
1	1,9	2,8	1,5	4,2	4,5	5,7	6,1	1	1	1,4	1,4	3,4	3,2	2,5	4,4	5,1	1
1	1	2	3	4	5	6	7	4	1	1	2	3	4	5	6	7	4

Kuvio 26. Mittauksista 2 ja 3 laskentatapa 3 käyttäen saatujen sijaintitietojen virheet koordinaatistossa (m).

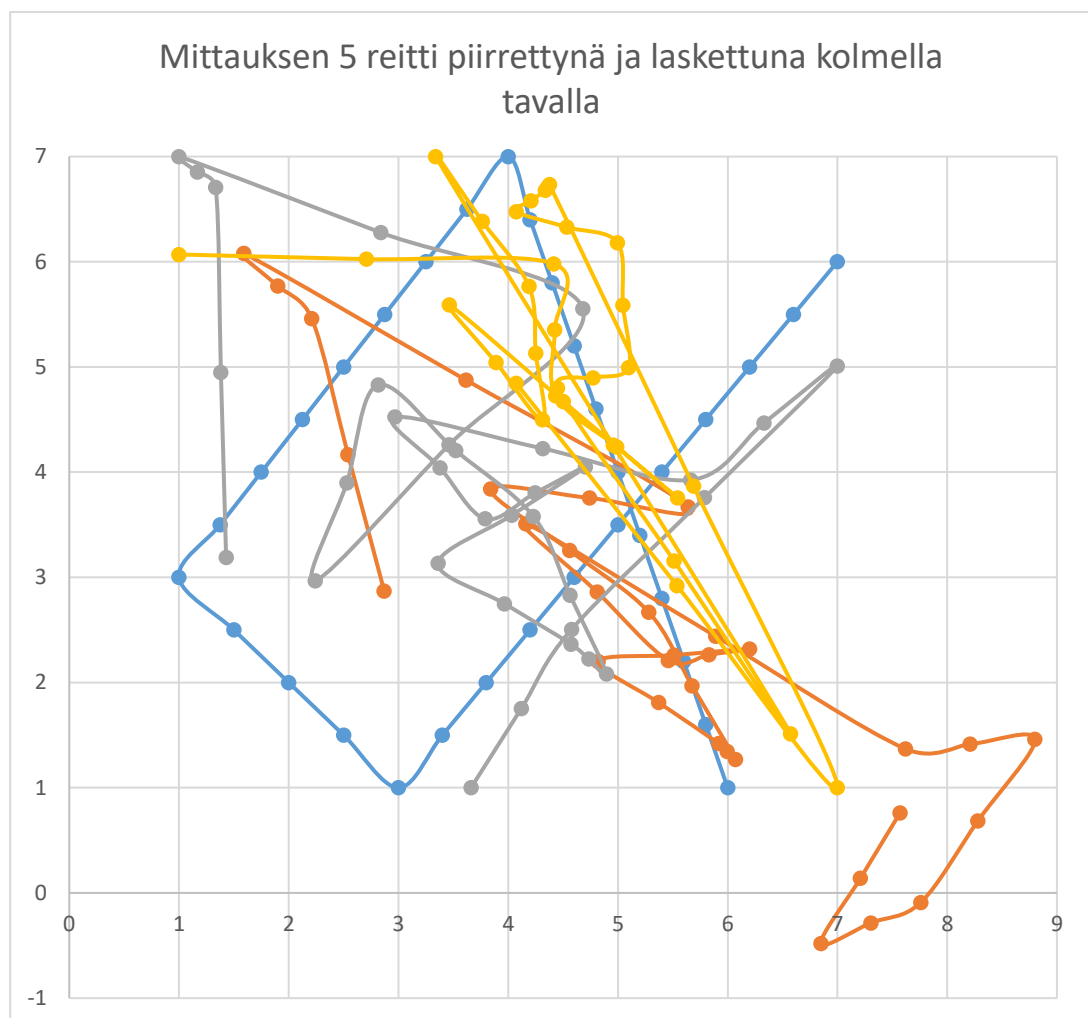
Liitteessä 4 on listattu mittauksen 2 ja 3 eri laskentatavoilla saadut arvot jokaisessa mittauspisteessä, sekä poikkeamat todellisesta sijainnista metreinä. Liitteen 4 pohjalta kootun taulukon 4 mukaan keskihajonta on niukasti pienin käytettäessä ensimmäistä laskentatapa. Mittauksen 3 keskihajonta on puolestaan pienimmillään, kun käytetään laskentatapa 3. Mittauksen 2 keskihajonta on pienin laskentatavalla 2, joskin tapa 1 on lähes yhtä tarkka. Erot eri laskentatapojen keskihajonnan välillä ovat pieniä, kun huomioidaan molemmat mittaukset, mutta melko suuria, jos katsotaan vain toista mittauksista. Mittauksessa 2 keskihajonta oli jokaisella laskentatavalla pienempi kuin mittauksessa 3.

Taulukko 4. Eri laskentatapojen tulosten keskihajonta.

Mittaus	Tapa 1 (m)	Tapa 2 (m)	Tapa 3 (m)
2 + 3	2,33	2,36	2,46
2	1,63	1,60	2,35
3	3,02	3,13	2,56

5.3.5 Laskutapojen soveltaminen liikkuvan kohteen paikantamiseen

Tässä vaiheessa oli saatu arvioitua mitkä laskentatavat toimivat parhaiten, joten oli aika soveltaa niitä liikkuvan kohteen paikantamiseen. Se aloitettiin mittauksen 5 kävelevästä kohdehenkilöstä, koska hitaammin liikkuva kohde pitäisi olla helpompi paikantaa, kun lukukertoja ehtii tulla useampia, joten hajonta pienenee. Tämä osoittautui kuitenkin liian hankalaksi paikannettavaksi, kuten kuvio 27 osoittaa. Kuviossa on piirrettynä sinisellä todellinen liikuttu reitti, sekä eri laskentatavoilla arvioitu reitti oranssilla (1), harmaalla (2) sekä sinisellä (3). Koska mittauksen 5 kävelevän henkilön paikantaminen ei onnistunut järkevästi käytetyillä tekniikoilla, päätettiin mittaukset 4 ja 6 jättää kokonaan käsittelemättä.



Kuvio 27. Mittauksessa 5 liikuttu reitti (sininen) ja kolme laskettua reittiä piirrettyinä.

6 Tulosanalyysi ja johtopäätökset

Kaikki tässä tutkimuksessa käytetyt mittaukset ja laskentatavat pohjautuvat mittauspisteiden arvioituihin etäisyyksiin antenneista. Niiden täytyisi siis olla tarkkoja sekä johdonmukaisia eri antennien välillä, jotta kohteen paikantaminen onnistuisi hyvin. Taulukkoon 5 on laskettu mittausten 2 ja 3 mittauspisteiden etäisyysarvioiden keskimääräinen hajonta todellisista etäisyyksistä kaikilla antenneilla. Mittauksessa 2 keskimääräinen poikkeama oli noin 1,344 m ja mittauksessa 3 hieman enemmän, noin 1,905 m. Kun nämä luvut suhteutetaan etäisyysarvojen todelliseen vaihteluväliin 1,41421–9,89949, etäisyyismäärityksen suhteellinen virhe mittauksessa 2 oli $S_2 \approx 1,34409 / 8,48528 \approx 0,15840 = 15,840 \%$ ja mittauksessa 3 $S_3 \approx 1,90521 / 8,48528 \approx 0,22453 = 22,453 \%$. Prosentuaalisesti näin suuri virhe näkyy tietenkin merkittävänä epätarkkuutena mittauspisteen sijaintia määritettäessä.

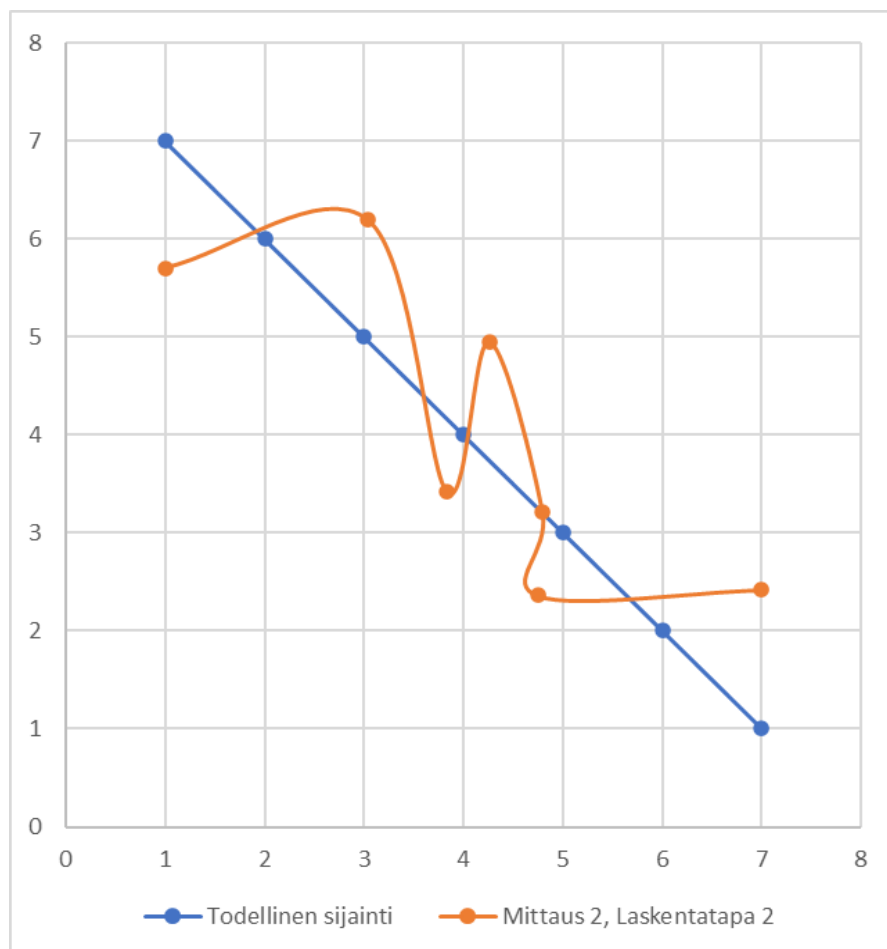
Taulukko 5. Mittausten 2 ja 3 etäisyysarvioiden keskimääräinen hajonta suhteessa todellisiin etäisyyksiin.

Virhe (m)	Antenni 1	Antenni 2	Antenni 3	Antenni 4	Keskiarvo
Mittaus 2	1,5540	1,2755	1,4090	1,1378	1,34409
Mittaus 3	1,8975	1,7837	1,9279	2,0118	1,90521
Molemmat	1,6758	1,5483	1,6930	1,5260	1,61078

Erot mittauksen 2 ja 3 tuloksissa olivat suurelta osin odotettuja. Mittauksessa 3 tunnistetut ovat lähes kiinni kohdehenkilön kehossa, joka vähentää ymmärrettävästi luontatarkkuutta, mutta tulokset ovat silti kohtalaisen johdonmukaisia eikä valtavia poikkeamia eri antennien ja mittauskertojen välillä esiinny. Mielenkiintoinen yksityiskohta on heikoimmalla tarkkuudella paikannettujen mittauspisteiden muodostama

vinoneliön muoto, joka esiintyi vain mittauksessa 3. Syytä sille ei onnistuttu tämän tutkimuksen aikana selittämään.

Kuviossa 28 on esitetty mittauksen 2 laskentatavalla 2 saadut arvot lävistäjän mitauspisteistä. Kuvion pisteiden poikkeamat todellisista sijaintiarvoista ovat yhtä luokun ottamatta pienempiä kuin laskentatavalla 2 saatu keskiarvopoikkeama mittauksen 2 arvoille. Mittaus 2 ja laskentatapa 2 taas oli taulukon 5 mukaan yhdistelmänä keskimäärin kaikista tarkin.



Kuvio 28. Niin sanottu "best case scenario".

Syitä tässä tutkimuksessa heikoksi todetulle paikannustarkkuudelle on useita, joista osa voitaisiin varmasti korjata hyvinkin helposti. Mittauksen signaalivoimakkuusarvoja etäisyydeksi muunnettaessa kaavassa (1) käytetty vakio N voitaisiin määrittellä erikseen mittauksille 2 ja 3. Tämä luultavasti vähentäisi taulukossa 5 nähtäviä hajonta-arvoja ja siten parantaisi paikannustarkkuutta molempien mittausten osalta. Sijainnin laskentatapoja voitaisiin parantaa, jos skaalauskerroimet määriteltäisiin suhteessa tulosjoukon keskihajontaan ääriarvojen sijaan, kuten tässä tutkimuksessa tehtiin. Tämän seurauksena koordinaattien ääriarvoista osa päätyisi mittausalueen ulkopuolelle, mutta niille voitaisiin määrittää sallittu vaihteluväli, jonka rajalle ulkopuolelle jääneet arvot siirrettäisiin. Lisäksi voitaisiin valita hieman suuremman säteilykulman antennit, jotta niillä katettaisiin paremmin myös mittausalueen reunat ja kulmat. Tässä tutkimuksessa käytetyn antennimallin valmistajan ilmoittamien 65 asteen säteilykeilojen asettuminen mittausalueelle on havainnollistettu kuviossa 1.

Liikkuvan kohteen paikantaminen tämän tutkimuksen metodein osoittautui mahdottomaksi ainakin ennen edellä mainittuja toimenpiteitä. Myös mittauksen 2 staattisissa pisteissä ilman signaalin kulkua estävää kohdehenkilöä saadut tulokset ovat harmillisen epätarkkoja. Beach volley -kentän kaltaisessa ympäristössä henkilöpaikantaminen passiivitunnisteilla lieneekin parasta tehdä vielä toistaiseksi vyöhykepohjaisella järjestelmällä. Harmillisesti niiden hankintakustannukset ovat huomattavasti suuremmat, kuin tässä tutkimuksessa käytetyn laitteiston.

7 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kuinka hyvin passiivinen UHF RFID soveltuu reaaliaikaiseen henkilöpaikantamiseen beach volley -kenttää vastaavalla alueella. Tätä varten täytyi hankkia mittauslaitteistot, suunnitella ja toteuttaa mittaukset, käsi-

tellä ja analysoida saatua mittausdataa, kehittää paikannettavan kohteen koordinaattit arvioivia laskentatapoja ja -kaavoja, sekä tulkita saatuja tuloksia. Tässä kaikessa onnistuttiin. Parannettavaa kuitenkin myös jäi, ja erityisesti laskettujen sijaintitietojen suuri keskimääräinen virhe herätti useita kysymyksiä. Valittiinko mittauksiin parhaat mahdolliset laiteasetukset, vai jäikö jotakin oleellista huomioimatta? Entä vaihtelee antennien laatu yksilöittäin merkittävästi, eli voisiko valikoimalla tasalaatuiset antennit parantaa tarkkuutta merkittävästi? Onko syy heikkoon paikannustarkkuuteen pääosin valituissa laskentatavoissa? Ehkäpä näissä kaikissa piilee osa totuudesta. Tulokset puhuvat joka tapauksessa puolestaan: Tässä tutkimuksessa ei saatu passiivisesta UHF RFID:stä irti luotettavaan reaaliaikaiseen henkilöpaikantamiseen riittävää tarkkuutta. Se ei kuitenkaan laske tutkimuksen arvoa, sillä koko prosessista jäi käteen todella paljon tietoa ja taitoa niin minulle kuin muille. Olenkin erittäin tyytyväinen aihevalintaani.

Jos aiheesta tehtäisiin jatkotutkimus, olisi siihen helppo korjata edellä mainittuja puutteita ja lisätä rinnalle uusia paikannusmetodeja. Lisäksi samaan aikaan voitaisiin tutkia vyöhykepohjaisen matriisijärjestelmän tarkkuutta, sillä nämä järjestelmät voisivat täydentää toisiaan. Kun vyöhykepohjainen järjestelmä ilmoittaa vyöhykkeen johon kohde on paikannettu, toinen tutkimuksen kaltainen järjestelmä voisi mahdollisesti tarkentaa paikannusta esimerkiksi vaihekulman avulla (Sun, Zhang, & Ren 2020; Wu 2012). Myös puolipassiivisten tunnisteen paikannettavuutta ja sensoridatan mahdollista käyttöä voisi harkita.

Haasteita tutkimukseen toivat hieman vääristyneet ennako-odotukset tekniikan potentiaalista ja niiden myötä liian optimistinen mittaussuunnitelma. Uusien tunnisteen ja antennien myötä tulleen kantomatkan kehittymisestä puhuttiin paljon JAMK:in pääkampuksella vuonna järjestetyssä RFID Lab Finlandin RFID/NFC-iltapäiväseminaarissa (RFID-Lab Finland 2019). Uuden tekniikan hyödyt eivät kuitenkaan realisoituneet riittävän mittavasti tässä tutkimuksessa. Laadittua suunnitelmaa

pystyttiin onneksi mukauttamaan melko joustavasti lennosta, kun tekniikan rajoitteet ilmenivät. Lisäksi lukuisista yhteydenotoista huolimatta työn ja mittausten toteutukseen tai raportointiin ei saatu lainkaan tukea opinnäytteen ohjaajalta. Tämän takia tutkimuksen suunniteltu aikataulu venyi huomattavasti. Toisaalta aikataulun venyessä tuli pohdittua pitkään ja rauhassa koko tutkimusta, mahdollisia sijainnin määrittämiseen käytettäviä tapoja ja kaavoja, sekä mittausten toteutusta käytännössä. Kii-reisemmällä aikataululla olisi voinut jäädä valmistautuminen mittauspäivään vähäisemmäksi.

Käteän koko projektista jäi valtavasti oppia RFID:stä, käytetyistä ohjelmistoista, tutkimustyöstä ja -toimintatavoista sekä varsin tyytyväinen mieli, vaikka tulokset olivatkin odotuksiini nähden hienoinen pettymys. Uskon ja toivon silti tämän tai vastaavan passiivitunnisteisiin perustuvan tekniikan kypsyvän tulevaisuudessa riittävästi, ja löytävän tiensä myös beach volley -kentille valmentamisen ja pelitaktisen analyysin tueksi.

Lähteet

- A guide to RFID types and how they are used. N.d. Ohjeistava artikkeli atlasRFIDstore:n verkkosivuilla, Viitattu 14.01.2020. <https://www.atlasrfidstore.com/a-guide-to-rfid-types-and-how-they-are-used/>.
- Brchan, J. L., Zhao, L., Wu, J., Williams, R. E. & Perez, L. C. A real-time RFID localization experiment using propagation models. Pp. 141-148. Viitattu 04.09.2020.
- Finkenzeller, K. 2010. RFID handbook. 3.p. Hoboken: Wiley. Viitattu 15.05.2020
- Friedewald, O. & Lange, M. Localization methods by using phase of arrival in systems with passive RFID tag's. Paper presented at the - Smart SysTech 2016; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies, 1-6. Viitattu 15.05.2020.
- High frequency (HF) RFID tags & systems. 2018. Artikkeli everythingRF:n verkkosivuilla, Viitattu 04.09.2020. <https://www.everythingrf.com/community/high-frequency-hf-rfid-tags-systems>.
- Karmakar. 2010. Handbook of smart antennas for RFID systems. Viitattu 16.11.2020
- KINEXON at swatch beach volleyball major series. 2017. Blogipostaus Kinexonin verkkosivuilla, Viitattu 12.12.2019. <https://kinexon.com/blog/swatch-beach-volleyball-majors-series>.
- Liukko, T. 2017. Embedded software development for a real-time locating system; sulautettu ohjelmistototeutus reaaliaikaiseen paikannusjärjestelmään. Viitattu 14.11.2020.
- Ma, Y., Wang, B., Pei, S., Zhang, Y., Zhang, S. & Yu, J. 2018. An indoor localization method based on AOA and PDOA using virtual stations in multipath and NLOS environments for passive UHF RFID. IEEE Access, 6, 31772-31782. Viitattu 09.11.2020.
- Olyazadeh, R. 2012. Least square approach on indoor positioning measurement techniques. Conference: GEOMUNDUS 2012. Lisbon, Portugal, Viitattu 09.11.2020.
- Omer, M. & Tian, G. Y. 2018. Indoor distance estimation for passive UHF RFID tag based on RSSI and RCS. Measurement, 127, 425-430. Viitattu 11.11.2020.
- Pyrrö, J. 2018. ToP Tunniste Oy:n myyntipäällikön sanallinen konsultaatioapu. Viitattu 14.02.2020.

Ray, B. 2018. Active vs. passive RFID for location tracking [2018 UPDATE]. Artikkeleli Link Labsin tuotteen, AirFinderin verkkosivuilla, Viitattu 11.11.2020. <https://www.airfinder.com/blog/active-vs-passive-rfid>.

RFID basics - RFID regulations. 2020. Artikkeleli rfid4u:n verkkosivuilla, Viitattu 02.11.2020. <https://rfid4u.com/rfid-regulations/>.

RFID standards: ISO, IEC, EPCglobal. N.d. Artikkeleli electronics-notes:in verkkosivuilla, Viitattu 14.01.2020. <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/rfid-radio-frequency-identification/standards-iec-iso-epcglobal.php>.

RFID-Lab Finland. 2019. RFID/NFC-iltapäiväseminaarissa suullisia esityksiä eri yritysten edustajilta. JAMK:in pääkampus, Viitattu 10.04.2019.

Rfid-tunnisteet. N.d. Artikkeleli Sunsero-nimisen yrityksen verkkosivuilla, Viitattu 21.06.2020. http://www.sunsero.fi/RFID_tunnisteet/.

Shi, Y., Shi, W., Liu, X. & Xiao, X. 2020. An RSSI classification and tracing algorithm to improve trilateration-based positioning. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20, 15, 4244. Viitattu 16.11.2020.

Sun, Z., Zhang, Y. & Ren, Q. 2020. A reliable localization algorithm based on grid coding and multi-layer perceptron. *IEEE access*. Viitattu 16.11.2020.

Tapaustutkimus. 2015. Ohjeistava artikkeleli Jyväskylän Yliopiston opiskelijoille. Viitattu 14.09.2020. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/tapaustutkimus>.

Thrasher, J. 2013. How is RFID used in the real world? Artikkeleli atlasRFIDstore:n Verkkosivuilla, Viitattu 12.03.2020. <https://www.atlasrfidstore.com/rfid-insider/what-is-rfid-used-for-in-applications/>.

Understanding RSSI. N.d. Ohjeistava artikkeleli Metageek:in verkkosivuilla, Viitattu 27.10.2020. <https://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html>.

Watson, H. J. 2014. Tutorial: Big data analytics: Concepts, technologies, and applications. *Communications of the Association for Information Systems*, 34, Viitattu 14.11.2020.

What is RFID? | the beginner's guide to RFID systems. N.d. Artikkeleli atlasRFIDstore:n verkkosivuilla, Viitattu 12.06.2020. <https://www.atlasrfidstore.com/rfid-beginners-guide/>.

Wu, J. 2012. Three-dimensional indoor RFID localization system. Viitattu 14.09.2020.

Yu, X., Wang, H. & Wu, J. 2020. A method of fingerprint indoor localization based on received signal strength difference by using compressive sensing. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020, 1, 1-13. Viitattu 14.09.2020.

Liitteet

Liite 1. Mittausohjelmiston asetukset.

The image displays three screenshots of the ISC LRU1002 configuration software interface, showing different configuration pages. Each screenshot includes a left-hand navigation tree and a right-hand control panel with buttons like 'Read', 'Apply', 'Reset', and 'DisConnect'.

Top Screenshot: AccessProtection

Parameter	Value
Password	*****
Lock_CFG0	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG1	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG2	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG3	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG4	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG5	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG6	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG7	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG8	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG9	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG10	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG11	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG12	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG13	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG14	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG15	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG16	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG17	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG18	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG19	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG20	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG21	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG22_29	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG30_39	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG40_49	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG50_59	<input type="checkbox"/>
Lock_CFG60_62	<input type="checkbox"/>

Middle Screenshot: HostInterface

Section	Parameter	Value
HostInterface	Interfaces	[RS232;LAN;USB;Discovery]
	RS232	True
	LAN	True
	USB	True
	Discovery	True
Serial	BusAddress	000
	Baudrate	38400 baud
	Parity	even Parity
	Databits	8 Data Bits
	Stopbits	1 Stop Bit
LAN	PortNumber	10001
	Hostname	
Hostname	Enable	<input checked="" type="checkbox"/>
	Length	06
	Name	LUKIA250:190
	Keepalive	
Keepalive	Enable	<input checked="" type="checkbox"/>
	RetransmissionCount	002
	IdleTime	00001 s
	IntervalTime	00005 s
IPv4	IPAddress	192.168.1.166
	SubnetMask	255.255.255.0
	GatewayAddress	192.168.1.1
	Enable_DHCP	<input checked="" type="checkbox"/>
	Autonegotiation	

Bottom Screenshot: HostInterface (Lock_CFG60_62)

Section	Parameter	Value
HostInterface	Interfaces	[RS232;LAN;USB;Discovery]
	RS232	True
	LAN	True
	USB	True
	Discovery	True
Serial	BusAddress	000
	Baudrate	38400 baud
	Parity	even Parity
	Databits	8 Data Bits
	Stopbits	1 Stop Bit
LAN	PortNumber	10001
	Hostname	
Hostname	Enable	<input checked="" type="checkbox"/>
	Length	06
	Name	LUKIA250:190
	Keepalive	
Keepalive	Enable	<input checked="" type="checkbox"/>
	RetransmissionCount	002
	IdleTime	00001 s
	IntervalTime	00005 s
IPv4	IPAddress	192.168.1.166
	SubnetMask	255.255.255.0
	GatewayAddress	192.168.1.1
	Enable_DHCP	<input checked="" type="checkbox"/>
	Autonegotiation	

The image displays three screenshots of the IDBC LRU1002 Configuration tool, showing different sections of the configuration interface. Each screenshot includes a left-hand navigation tree, a central configuration area, and a right-hand control panel.

Top Screenshot: OperatingMode Configuration

- Autonegotiation:** Disable (checked), Duplex (Full Duplex), Speed (100 MBit).
- DataClock:** Format (Wiegand emulation binary 1:1, according written to Transponder).
- Wiegand:** Delay (000), PulseWidth (000), PulseInterval (00000).
- OperatingMode:** Mode (Buffered Read Mode).
- BufferedReadMode:**
 - DataSelector:** UID (checked), Data (checked), AntennaNo (unchecked), Time (checked), Date (checked), InputEvents (checked), RSSI (checked).
 - Mode:** Enable_AntennaPool (checked), ReadCompleteBank (unchecked), ActionOnEPC (unchecked). Note: Each transponder data is stored for each antenna separately.
 - DataSource:** BankNo (EPC memory bank), FirstDataBlock (00000), NoOfDataBlocks (65535), ByteOrderOfData (MSB first).

Middle Screenshot: Filter Configuration

- ByteOrderOfData:** MSB first.
- Filter:** TransponderValidTime (00001 x 100 ms), Enable_Input1Event (checked), Enable_Input2Event (checked), Enable_TriggerEvent (checked), Enable_TimeoutEvent (checked).
- Trigger:** Enable (unchecked), Condition (Level triggered), Enable_UnlimitTransponderValidTime (checked, Note: Valid Time is limited to one Trigger Period), RFOAfterRead (unchecked), NoReadSignalization (No signal emitter will be activated).
- Source:** NotificationMode, ScanMode.
- Miscellaneous:**
 - TransponderIdentification:** Source (Serial Number), DataBlockNo (00000), NoOfDataBlocks (001).
- AirInterface:** TimeLimit (00001 x 5 ms).
- Antenna:**
 - UHF:**
 - No1:** OutputPower (2.0 W), RSSIFilter (000).
 - No2:** OutputPower (2.0 W).

Bottom Screenshot: Region Configuration

- Region:**
 - UHF:** Regulation (EU: Europe).
 - EU:**
 - Channel:**
 - EN302208_4_ChannelPlan:**
 - PreferredChannels:** NoOfChannels, ChannelNo1, ChannelNo2, ChannelNo3, ChannelNo4.
 - Morocco:** ChannelNo1.

Liite 2. Näyte mittausdatasta.

Source.Name	No	TrType	Tag	Date	Time	Antenna	RSSI	Column2	Phase	Column1
17.csv	229 0x84	B		13.2.2020	15.59.16,935	2	-57			14
17.csv	265 0x84	B		13.2.2020	15.59.17,960	2	-57			14
17.csv	9 0x84	B		13.2.2020	15.59.11,480	2	-58			162
17.csv	17 0x84	B		13.2.2020	15.59.11,660	2	-58			162
17.csv	23 0x84	B		13.2.2020	15.59.11,800	2	-58			162
17.csv	32 0x84	B		13.2.2020	15.59.11,995	2	-58			163
17.csv	36 0x84	B		13.2.2020	15.59.12,120	2	-58			162
17.csv	41 0x84	B		13.2.2020	15.59.12,270	2	-58			162
17.csv	48 0x84	B		13.2.2020	15.59.12,405	2	-58			163
17.csv	55 0x84	B		13.2.2020	15.59.12,645	2	-58			163
17.csv	60 0x84	B		13.2.2020	15.59.12,755	2	-58			46
17.csv	66 0x84	B		13.2.2020	15.59.12,900	2	-58			46
17.csv	73 0x84	B		13.2.2020	15.59.13,100	2	-58			46
17.csv	81 0x84	B		13.2.2020	15.59.13,280	2	-58			46
17.csv	85 0x84	B		13.2.2020	15.59.13,380	2	-58			46
17.csv	91 0x84	B		13.2.2020	15.59.13,515	2	-58			46
17.csv	96 0x84	B		13.2.2020	15.59.13,640	2	-58			45
17.csv	102 0x84	B		13.2.2020	15.59.13,760	2	-58			45
17.csv	109 0x84	B		13.2.2020	15.59.13,945	2	-58			45
17.csv	116 0x84	B		13.2.2020	15.59.14,115	2	-58			46
17.csv	121 0x84	B		13.2.2020	15.59.14,255	2	-58			46
17.csv	130 0x84	B		13.2.2020	15.59.14,450	2	-58			45
17.csv	134 0x84	B		13.2.2020	15.59.14,585	2	-58			46
17.csv	139 0x84	B		13.2.2020	15.59.14,690	2	-58			46
17.csv	145 0x84	B		13.2.2020	15.59.14,825	2	-58			45
17.csv	151 0x84	B		13.2.2020	15.59.14,990	2	-58			46
17.csv	157 0x84	B		13.2.2020	15.59.15,125	2	-58			46
17.csv	163 0x84	B		13.2.2020	15.59.15,260	2	-58			46
17.csv	169 0x84	B		13.2.2020	15.59.15,400	2	-58			47
17.csv	173 0x84	B		13.2.2020	15.59.15,515	2	-58			46
17.csv	179 0x84	B		13.2.2020	15.59.15,650	2	-58			46
17.csv	185 0x84	B		13.2.2020	15.59.15,795	2	-58			47
17.csv	191 0x84	B		13.2.2020	15.59.15,945	2	-58			47
17.csv	199 0x84	B		13.2.2020	15.59.16,170	2	-58			46
17.csv	209 0x84	B		13.2.2020	15.59.16,420	2	-58			45
17.csv	215 0x84	B		13.2.2020	15.59.16,545	2	-58			46
17.csv	220 0x84	B		13.2.2020	15.59.16,660	2	-58			14
17.csv	235 0x84	B		13.2.2020	15.59.17,140	2	-58			14
17.csv	240 0x84	B		13.2.2020	15.59.17,270	2	-58			14
17.csv	246 0x84	B		13.2.2020	15.59.17,450	2	-58			14
17.csv	252 0x84	B		13.2.2020	15.59.17,640	2	-58			16
17.csv	258 0x84	B		13.2.2020	15.59.17,805	2	-58			14
71.csv	18 0x84	B		13.2.2020	16.19.25,845	4	-58			135
71.csv	31 0x84	B		13.2.2020	16.19.26,895	4	-58			57
71.csv	32 0x84	B		13.2.2020	16.19.27,300	4	-58			135
71.csv	40 0x84	B		13.2.2020	16.19.27,980	4	-58			56
71.csv	41 0x84	B		13.2.2020	16.19.28,115	4	-58			59
11.csv	1 0x84	A		13.2.2020	15.52.40,300	1	-59			108
11.csv	27 0x84	A		13.2.2020	15.52.41,320	1	-59			109
11.csv	31 0x84	A		13.2.2020	15.52.41,430	1	-59			109
11.csv	116 0x84	A		13.2.2020	15.52.45,025	1	-59			134
71.csv	1 0x84	B		13.2.2020	16.19.24,355	4	-59			85
71.csv	26 0x84	B		13.2.2020	16.19.26,310	4	-59			57
71.csv	59 0x84	B		13.2.2020	16.19.30,120	4	-59			58
11.csv	8 0x84	A		13.2.2020	15.52.40,590	1	-60			108
11.csv	13 0x84	A		13.2.2020	15.52.40,735	1	-60			109
11.csv	18 0x84	A		13.2.2020	15.52.40,880	1	-60			109
11.csv	21 0x84	A		13.2.2020	15.52.41,015	1	-60			109
11.csv	24 0x84	A		13.2.2020	15.52.41,160	1	-60			109
11.csv	37 0x84	A		13.2.2020	15.52.41,565	1	-60			108

Liite 3. Lasketut & todelliset etäisyydet, sekä poikkeamat metreinä.

XY		Mitattu etäisyys Mittaus 2				Todellinen etäisyys				Ero			
X	Y	d1	d2	d3	d4	T1	T2	T3	T4	E1	E2	E3	E4
1	1	1,9353	9,2841	5,6583	10,9503	1,4142	7,0711	9,8995	7,0711	0,5210	2,2131	-4,2412	3,8792
1	2	4,4173	7,2479	9,2841	7,2479	2,2361	6,0828	9,2195	7,2801	2,1813	1,1652	0,0646	-0,0322
1	3	4,4173	7,2479	6,6738	6,6738	3,1623	5,0990	8,6023	7,6158	1,2551	2,1489	-1,9285	-0,9420
1	4	4,7974	6,6738	6,6738	7,8715	4,1231	4,1231	8,0623	8,0623	0,6743	2,5507	-1,3885	-0,1908
1	5	4,7974	7,2479	7,2479	11,8924	5,0990	3,1623	7,6158	8,6023	-0,3016	4,0857	-0,3678	3,2901
1	6	4,4173	4,4173	12,9155	11,8924	6,0828	2,2361	7,2801	9,2195	-1,6654	2,1813	5,6354	2,6728
1	7	5,2101	1,6408	12,9155	10,0829	7,0711	1,4142	7,0711	9,8995	-1,8610	0,2266	5,8444	0,1834
2	1	3,1754	7,8715	7,8715	6,1451	2,2361	7,2801	9,2195	6,0828	0,9393	0,5914	-1,3480	0,0624
2	2	5,2101	7,8715	7,2479	6,1451	2,8284	6,3246	8,4853	6,3246	2,3817	1,5469	-1,2373	-0,1794
2	3	4,4173	6,1451	7,2479	6,1451	3,6056	5,3852	7,8102	6,7082	0,8118	0,7600	-0,5623	-0,5631
2	4	4,4173	4,7974	7,2479	6,6738	4,4721	4,4721	7,2111	7,2111	-0,0548	0,3252	0,0368	-0,5373
2	5	4,7974	4,7974	5,6583	7,8715	5,3852	3,6056	6,7082	7,8102	-0,5878	1,1918	-1,0499	0,0612
2	6	4,7974	6,1451	5,2101	10,0829	6,3246	2,8284	6,3246	8,4853	-1,5272	3,3167	-1,1145	1,5976
2	7	7,2479	2,9238	12,9155	7,2479	7,2801	2,2361	6,0828	9,2195	-0,0322	0,6877	6,8327	-1,9716
3	1	6,1451	5,6583	6,1451	6,1451	3,1623	7,6158	8,6023	5,0990	2,9828	-1,9574	-2,4572	1,0461
3	2	5,2101	6,1451	6,1451	5,6583	3,6056	6,7082	7,8102	5,3852	1,6045	-0,5631	-1,6651	0,2732
3	3	5,2101	7,2479	5,6583	4,7974	4,2426	5,8310	7,0711	5,8310	0,9675	1,4170	-1,4127	-1,0336
3	4	3,4485	4,4173	4,7974	5,6583	5,0000	5,0000	6,4031	6,4031	-1,5515	-0,5827	-1,6058	-0,7448
3	5	4,4173	6,6738	5,6583	6,1451	5,8310	4,2426	5,8310	7,0711	-1,4136	2,4312	-0,1726	-0,9259
3	6	4,7974	6,6738	5,2101	7,2479	6,7082	3,6056	5,3852	7,8102	-1,9108	3,0682	-0,1751	-0,5623
3	7	4,7974	4,7974	5,2101	7,2479	7,6158	3,1623	5,0990	8,6023	-2,8184	1,6351	0,1111	-1,3544
4	1	5,6583	10,9503	6,6738	5,6583	4,1231	8,0623	8,0623	4,1231	1,5352	2,8881	-1,3885	1,5352
4	2	4,7974	5,6583	5,6583	5,2101	4,4721	7,2111	7,2111	4,4721	0,3252	-1,5528	-1,5528	0,7380
4	3	4,7974	6,6738	4,7974	5,6583	5,0000	6,4031	6,4031	5,0000	-0,2026	0,2707	-1,6058	0,6583
4	4	5,2101	5,2101	4,4173	5,2101	5,6569	5,6569	5,6569	5,6569	-0,4468	-0,4468	-1,2395	-0,4468
4	5	4,7974	4,4173	4,7974	5,6583	6,4031	5,0000	5,0000	6,4031	-1,6058	-0,5827	-0,2026	-0,7448
4	6	5,6583	6,1451	5,2101	7,2479	7,2111	4,4721	4,4721	7,2111	-1,5528	1,6730	0,7380	0,0368
4	7	6,6738	6,1451	6,1451	7,2479	8,0623	4,1231	4,1231	8,0623	-1,3885	2,0220	2,0220	-0,8143
5	1	5,2101	10,9503	6,1451	4,7974	5,0990	8,6023	7,6158	3,1623	0,1111	2,3480	-1,4707	1,6351
5	2	4,4173	7,8715	5,6583	7,8715	5,3852	7,8102	6,7082	3,6056	-0,9678	0,0612	-1,0499	4,2659
5	3	5,2101	7,2479	4,7974	4,7974	5,8310	7,0711	5,8310	4,2426	-0,6209	0,1769	-1,0336	0,5547
5	4	5,6583	5,6583	4,4173	4,7974	6,4031	6,4031	5,0000	5,0000	-0,7448	-0,7448	-0,5827	-0,2026
5	5	6,1451	5,6583	3,4485	5,2101	7,0711	5,8310	4,2426	5,8310	-0,9259	-0,1726	-0,7941	-0,6209
5	6	6,1451	4,7974	4,7974	5,2101	7,8102	5,3852	3,6056	6,7082	-1,6651	-0,5878	1,1918	-1,4981
5	7	7,2479	5,6583	7,2479	7,2479	8,6023	5,0990	3,1623	7,6158	-1,3544	0,5593	4,0857	-0,3678
6	1	10,9503	10,9503	5,6583	3,4485	6,0828	9,2195	7,2801	2,2361	4,8676	1,7308	-1,6218	1,2125
6	2	5,6583	10,0829	6,1451	6,1451	6,3246	8,4853	6,3246	2,8284	-0,6662	1,5976	-0,1794	3,3167
6	3	5,6583	6,6738	5,2101	5,2101	6,7082	7,8102	5,3852	3,6056	-1,0499	-1,1365	-0,1751	1,6045
6	4	4,7974	6,6738	4,7974	4,4173	7,2111	7,2111	4,4721	4,4721	-2,4137	-0,5373	0,3252	-0,0548
6	5	7,2479	5,6583	4,7974	5,6583	7,8102	6,7082	3,6056	5,3852	-0,5623	-1,0499	1,1918	0,2732
6	6	5,6583	6,1451	4,4173	6,6738	8,4853	6,3246	2,8284	6,3246	-2,8270	-0,1794	1,5889	0,3492
6	7	7,2479	7,2479	2,9238	7,8715	9,2195	6,0828	2,2361	7,2801	-1,9716	1,1652	0,6877	0,5914
7	1	10,0829	10,9503	5,2101	1,7820	7,0711	9,8995	7,0711	1,4142	3,0118	1,0508	-1,8610	0,3677
7	2	7,2479	8,5487	5,6583	4,7974	7,2801	9,2195	6,0828	2,2361	-0,0322	-0,6709	-0,4244	2,5613
7	3	7,2479	5,6583	5,6583	4,7974	7,6158	8,6023	5,0990	3,1623	-0,3678	-2,9440	0,5593	1,6351
7	4	6,1451	7,8715	4,7974	4,7974	8,0623	8,0623	4,1231	4,1231	-1,9171	-0,1908	0,6743	0,6743
7	5	7,8715	7,2479	4,7974	5,6583	8,6023	7,6158	3,1623	5,0990	-0,7308	-0,3678	1,6351	0,5593
7	6	6,1451	7,8715	2,9238	8,5487	9,2195	7,2801	2,2361	6,0828	-3,0744	0,5914	0,6877	2,4659
7	7	7,2479	7,8715	2,2826	7,2479	9,8995	7,0711	1,4142	7,0711	-2,6515	0,8004	0,8684	0,1769

XY		Mitattu etäisyys - Mittaus 3				Todellinen etäisyys				Ero			
X	Y	d1	d2	d3	d4	T1	T2	T3	T4	E1	E2	E3	E4
1	1	2,6922	7,2479	5,6583	7,2479	1,4142	7,0711	9,8995	7,0711	1,2780	0,1769	-4,2412	3,8792
1	2	2,9238	6,1451	5,6583	5,6583	2,2361	6,0828	9,2195	7,2801	0,6877	0,0624	-3,5612	-0,0322
1	3	8,5487	6,1451	5,6583	6,6738	3,1623	5,0990	8,6023	7,6158	5,3864	1,0461	-2,9440	-0,9420
1	4	11,8924	10,0829	5,6583	5,6583	4,1231	4,1231	8,0623	8,0623	7,7693	5,9598	-2,4039	-0,1908
1	5	6,1451	7,2479	5,2101	5,6583	5,0990	3,1623	7,6158	8,6023	1,0461	4,0857	-2,4057	3,2901
1	6	6,1451	2,6922	5,6583	5,6583	6,0828	2,2361	7,2801	9,2195	0,0624	0,4561	-1,6218	2,6728
1	7	5,6583	2,9238	6,6738	6,6738	7,0711	1,4142	7,0711	9,8995	-1,4127	1,5096	-0,3973	0,1834
2	1	3,4485	5,6583	5,6583	6,1451	2,2361	7,2801	9,2195	6,0828	1,2125	-1,6218	-3,5612	0,0624
2	2	3,7452	6,1451	5,6583	5,6583	2,8284	6,3246	8,4853	6,3246	0,9168	-0,1794	-2,8270	-0,1794
2	3	10,0829	4,7974	4,7974	5,2101	3,6056	5,3852	7,8102	6,7082	6,4773	-0,5878	-3,0129	-0,5631
2	4	6,6738	7,8715	5,6583	5,2101	4,4721	4,4721	7,2111	7,2111	2,2017	3,3994	-1,5528	-0,5373
2	5	5,6583	9,2841	5,2101	4,7974	5,3852	3,6056	6,7082	7,8102	0,2732	5,6786	-1,4981	0,0612
2	6	5,2101	3,4485	5,6583	5,6583	6,3246	2,8284	6,3246	8,4853	-1,1145	0,6201	-0,6662	1,5976
2	7	6,1451	3,1754	7,2479	6,1451	7,2801	2,2361	6,0828	9,2195	-1,1350	0,9393	1,1652	-1,9716
3	1	7,2479	6,6738	5,2101	6,1451	3,1623	7,6158	8,6023	5,0990	4,0857	-0,9420	-3,3922	1,0461
3	2	6,6738	5,6583	5,2101	4,7974	3,6056	6,7082	7,8102	5,3852	3,0682	-1,0499	-2,6002	0,2732
3	3	6,1451	4,7974	4,4173	4,7974	4,2426	5,8310	7,0711	5,8310	1,9025	-1,0336	-2,6537	-1,0336
3	4	4,4173	5,2101	4,4173	4,7974	5,0000	5,0000	6,4031	6,4031	-0,5827	0,2101	-1,9858	-0,7448
3	5	4,7974	7,8715	5,2101	4,4173	5,8310	4,2426	5,8310	7,0711	-1,0336	3,6289	-0,6209	-0,9259
3	6	4,7974	7,2479	4,7974	5,2101	6,7082	3,6056	5,3852	7,8102	-1,9108	3,6424	-0,5878	-0,5623
3	7	5,6583	5,2101	7,8715	5,6583	7,6158	3,1623	5,0990	8,6023	-1,9574	2,0478	2,7725	-1,3544
4	1	6,6738	5,2101	4,7974	7,8715	4,1231	8,0623	8,0623	4,1231	2,5507	-2,8522	-3,2649	1,5352
4	2	5,6583	5,2101	4,7974	6,6738	4,4721	7,2111	7,2111	4,4721	1,1862	-2,0010	-2,4137	0,7380
4	3	4,7974	5,2101	5,2101	4,7974	5,0000	6,4031	6,4031	5,0000	-0,2026	-1,1930	-1,1930	0,6583
4	4	4,7974	5,6583	4,7974	4,7974	5,6569	5,6569	5,6569	5,6569	-0,8595	0,0015	-0,8595	-0,4468
4	5	4,4173	5,6583	4,7974	4,4173	6,4031	5,0000	5,0000	6,4031	-1,9858	0,6583	-0,2026	-0,7448
4	6	4,7974	6,1451	5,6583	4,7974	7,2111	4,4721	4,4721	7,2111	-2,4137	1,6730	1,1862	0,0368
4	7	4,7974	7,2479	12,9155	5,6583	8,0623	4,1231	4,1231	8,0623	-3,2649	3,1248	8,7924	-0,8143
5	1	5,6583	5,6583	5,2101	7,8715	5,0990	8,6023	7,6158	3,1623	0,5593	-2,9440	-2,4057	1,6351
5	2	5,6583	4,7974	4,7974	10,0829	5,3852	7,8102	6,7082	3,6056	0,2732	-3,0129	-1,9108	4,2659
5	3	5,6583	5,6583	4,7974	6,1451	5,8310	7,0711	5,8310	4,2426	-0,1726	-1,4127	-1,0336	0,5547
5	4	4,7974	5,2101	4,7974	4,7974	6,4031	6,4031	5,0000	5,0000	-1,6058	-1,1930	-0,2026	-0,2026
5	5	4,7974	5,6583	12,9155	4,7974	7,0711	5,8310	4,2426	5,8310	-2,2737	-0,1726	8,6729	-0,6209
5	6	4,7974	4,7974	5,2101	5,2101	7,8102	5,3852	3,6056	6,7082	-3,0129	-0,5878	1,6045	-1,4981
5	7	6,1451	7,8715	7,2479	6,1451	8,6023	5,0990	3,1623	7,6158	-2,4572	2,7725	4,0857	-0,3678
6	1	7,8715	5,6583	6,1451	2,4789	6,0828	9,2195	7,2801	2,2361	1,7887	-3,5612	-1,1350	1,2125
6	2	5,6583	6,1451	5,6583	4,7974	6,3246	8,4853	6,3246	2,8284	-0,6662	-2,3402	-0,6662	3,3167
6	3	5,6583	5,2101	4,7974	8,5487	6,7082	7,8102	5,3852	3,6056	-1,0499	-2,6002	-0,5878	1,6045
6	4	5,2101	5,6583	6,1451	7,8715	7,2111	7,2111	4,4721	4,4721	-2,0010	-1,5528	1,6730	-0,0548
6	5	4,7974	5,6583	7,2479	6,6738	7,8102	6,7082	3,6056	5,3852	-3,0129	-1,0499	3,6424	0,2732
6	6	5,6583	5,6583	3,4485	7,2479	8,4853	6,3246	2,8284	6,3246	-2,8270	-0,6662	0,6201	0,3492
6	7	5,6583	5,2101	3,4485	7,2479	9,2195	6,0828	2,2361	7,2801	-3,5612	-0,8727	1,2125	0,5914
7	1	7,8715	7,2479	6,1451	2,6922	7,0711	9,8995	7,0711	1,4142	0,8004	-2,6515	-0,9259	0,3677
7	2	5,6583	5,6583	6,6738	2,6922	7,2801	9,2195	6,0828	2,2361	-1,6218	-3,5612	0,5910	2,5613
7	3	5,6583	5,2101	6,6738	6,6738	7,6158	8,6023	5,0990	3,1623	-1,9574	-3,3922	1,5748	1,6351
7	4	6,6738	6,1451	9,2841	10,0829	8,0623	8,0623	4,1231	4,1231	-1,3885	-1,9171	5,1610	0,6743
7	5	5,6583	6,6738	4,7974	6,6738	8,6023	7,6158	3,1623	5,0990	-2,9440	-0,9420	1,6351	0,5593
7	6	5,6583	6,6738	2,6922	7,8715	9,2195	7,2801	2,2361	6,0828	-3,5612	-0,6063	0,4561	2,4659
7	7	7,8715	7,8715	2,2826	6,6738	9,8995	7,0711	1,4142	7,0711	-2,0280	0,8004	0,8684	0,1769

Liite 4. Lasketut ja todelliset sijainnit kolmella eri tavalla laskettuna, sekä koordinaattiarvojen virheet metreinä.

Mittaus	X	Y	X1	Y1	Virhe1	X2	Y2	Virhe2	X3	Y3	Virhe3
2	1	1	1,38	2,70	1,74	2,87	3,46	3,09	2,87	3,51	1,87
2	1	2	2,58	2,58	1,68	3,00	2,17	2,00	2,98	2,11	1,42
2	1	3	3,52	2,86	2,52	3,62	2,95	2,62	3,66	3,12	0,76
2	1	4	2,69	4,00	1,69	3,32	4,09	2,32	3,36	4,20	0,71
2	1	5	1,56	4,81	0,59	2,81	4,98	1,81	2,71	5,16	2,48
2	1	6	-1,10	5,70	2,12	1,50	4,43	1,64	1,24	4,53	4,79
2	1	7	-3,18	8,34	4,39	1,00	5,70	1,30	1,00	5,88	6,16
2	2	1	3,28	1,31	1,32	3,32	1,07	1,32	3,38	1,33	2,83
2	2	2	4,33	2,36	2,36	3,95	2,57	2,03	3,95	2,66	2,06
2	2	3	3,03	3,03	1,03	3,32	2,88	1,33	3,41	3,12	0,56
2	2	4	1,72	4,34	0,44	2,81	3,89	0,82	3,01	4,06	1,01
2	2	5	1,73	5,61	0,67	3,01	5,69	1,22	3,18	5,64	2,21
2	2	6	1,89	5,78	0,25	3,04	6,20	1,06	3,09	6,29	3,35
2	2	7	-0,21	6,59	2,25	2,34	4,72	2,31	2,31	4,84	4,75
2	3	1	3,67	4,33	3,40	3,90	4,70	3,81	3,91	4,78	2,99
2	3	2	4,00	3,34	1,67	3,91	3,63	1,86	3,92	3,82	1,92
2	3	3	5,46	2,21	2,59	4,54	2,77	1,56	4,44	3,09	1,49
2	3	4	2,36	4,33	0,72	3,18	4,36	0,40	3,46	4,48	0,73
2	3	5	3,84	3,18	2,01	3,84	3,42	1,79	3,86	3,65	1,14
2	3	6	3,51	4,16	1,90	3,78	4,52	1,67	3,81	4,61	2,27
2	3	7	2,21	5,46	1,73	3,25	5,65	1,38	3,41	5,55	3,79
2	4	1	6,22	1,12	2,22	4,90	1,57	1,07	4,92	1,39	4,20
2	4	2	4,00	3,34	1,34	3,91	3,63	1,63	3,93	3,88	1,93
2	4	3	4,66	3,34	0,74	4,30	3,82	0,88	4,23	4,03	1,25
2	4	4	4,33	4,33	0,47	4,26	4,95	0,99	4,18	4,93	0,81
2	4	5	3,01	4,99	0,99	3,65	5,26	0,44	3,75	5,15	1,56
2	4	6	3,51	4,82	1,28	3,86	5,27	0,74	3,88	5,31	2,36
2	4	7	3,51	4,82	2,23	3,89	5,25	1,75	3,89	5,35	3,28
2	5	1	6,80	0,54	1,85	5,17	1,00	0,17	5,12	1,00	4,48
2	5	2	3,51	3,51	2,12	3,74	3,80	2,20	3,75	3,91	1,76
2	5	3	5,79	2,54	0,92	4,79	3,22	0,30	4,62	3,52	1,63
2	5	4	5,15	3,83	0,22	4,63	4,68	0,77	4,46	4,72	0,80
2	5	5	5,45	4,79	0,50	4,94	5,87	0,88	4,68	5,65	1,30
2	5	6	4,16	4,82	1,44	4,29	5,54	0,85	4,21	5,41	2,10
2	5	7	3,01	4,99	2,83	3,68	5,19	2,24	3,68	5,33	3,48
2	6	1	9,44	1,11	3,44	6,47	3,50	2,54	6,73	3,43	5,74
2	6	2	5,78	1,89	0,25	4,75	2,36	1,30	4,75	2,33	2,89
2	6	3	5,15	3,18	0,87	4,52	3,85	1,70	4,42	4,03	1,44
2	6	4	5,63	2,37	1,67	4,67	3,00	1,66	4,49	3,41	0,53
2	6	5	4,81	4,81	1,20	4,65	5,81	1,58	4,54	5,76	1,40
2	6	6	4,16	4,82	2,18	4,21	5,45	1,88	4,17	5,42	2,14
2	6	7	5,37	6,03	1,16	4,89	7,00	1,11	4,80	7,00	3,06
2	7	1	11,04	-0,49	4,30	7,00	2,42	1,42	7,00	2,39	6,06
2	7	2	6,74	2,24	0,36	5,23	3,35	2,23	5,15	3,46	3,15
2	7	3	5,15	3,83	2,03	4,65	4,84	2,99	4,54	4,90	1,72
2	7	4	6,43	2,55	1,56	5,14	3,47	1,94	4,96	3,67	0,96
2	7	5	5,96	3,99	1,46	5,11	5,19	1,90	5,01	5,27	1,01
2	7	6	5,09	5,75	1,93	4,62	6,44	2,42	4,56	6,48	2,30
2	7	7	6,41	5,75	1,38	5,37	6,74	1,65	5,20	6,70	2,64

3	1	1	2,58	2,58	2,23	2,01	2,64	1,93	2,32	3,06	1,38
3	1	2	3,06	2,40	2,09	2,24	2,31	1,28	2,59	2,95	0,88
3	1	3	4,48	5,14	4,09	4,53	5,64	4,41	4,29	5,82	1,90
3	1	4	7,52	3,03	6,60	7,00	4,48	6,02	7,00	4,72	3,16
3	1	5	5,31	3,34	4,62	4,72	3,85	3,90	4,35	4,06	0,76
3	1	6	1,32	7,01	1,06	2,09	6,17	1,11	2,50	5,84	4,17
3	1	7	0,54	6,80	0,50	1,00	5,62	1,38	1,66	5,53	5,84
3	2	1	2,70	3,36	2,46	2,02	3,20	2,20	2,42	3,60	1,42
3	2	2	3,52	2,86	1,74	2,74	2,84	1,12	2,89	3,31	0,99
3	2	3	5,09	5,75	4,14	5,79	6,84	5,39	5,21	6,81	2,95
3	2	4	5,96	2,70	4,16	5,20	3,40	3,25	4,77	3,63	1,28
3	2	5	6,71	1,62	5,80	5,81	2,27	4,69	5,24	2,60	2,28
3	2	6	1,89	5,78	0,25	1,98	5,19	0,81	2,44	5,11	3,90
3	2	7	1,12	6,22	1,17	1,44	5,12	1,96	1,91	5,15	5,42
3	3	1	4,98	4,32	3,87	4,70	4,86	4,22	4,36	5,00	3,41
3	3	2	5,15	3,83	2,83	4,72	4,48	3,02	4,27	4,61	2,28
3	3	3	4,65	4,65	2,34	4,51	5,16	2,64	4,05	5,09	1,31
3	3	4	4,33	3,67	1,37	3,77	3,91	0,78	3,57	4,17	0,44
3	3	5	6,08	1,59	4,60	5,10	2,13	3,55	4,54	2,67	1,92
3	3	6	5,31	2,69	4,03	4,59	3,08	3,32	4,17	3,46	2,04
3	3	7	3,02	3,68	3,32	2,25	3,32	3,76	2,43	3,58	4,57
3	4	1	3,03	6,28	5,37	3,15	6,32	5,39	3,13	6,31	3,24
3	4	2	3,34	5,31	3,38	3,21	5,38	3,47	3,19	5,35	1,88
3	4	3	4,16	3,51	0,53	3,52	3,68	0,83	3,42	3,99	0,42
3	4	4	4,66	3,34	0,93	4,02	3,66	0,34	3,73	3,97	0,32
3	4	5	4,82	2,85	2,30	4,04	3,18	1,82	3,73	3,64	1,36
3	4	6	4,66	2,69	3,38	3,78	2,95	3,05	3,60	3,39	2,50
3	4	7	3,42	1,45	5,58	1,67	1,00	6,44	1,73	1,00	5,71
3	5	1	2,86	5,47	4,96	2,68	5,44	5,01	2,76	5,49	2,53
3	5	2	1,49	7,17	6,25	1,49	7,00	6,11	1,78	7,00	3,79
3	5	3	4,00	4,66	1,94	3,71	4,87	2,27	3,55	4,93	1,02
3	5	4	4,33	3,67	0,75	3,76	3,92	1,24	3,57	4,17	0,44
3	5	5	3,10	1,78	3,74	1,18	1,03	5,51	1,46	1,31	3,95
3	5	6	3,51	4,16	2,37	3,04	4,16	2,69	3,11	4,34	2,93
3	5	7	4,66	2,69	4,33	3,78	2,95	4,23	3,65	3,12	3,50
3	6	1	7,62	1,37	1,66	6,09	3,39	2,40	5,23	3,72	4,38
3	6	2	4,99	3,01	1,43	4,22	3,45	2,30	3,91	3,76	1,97
3	6	3	2,39	6,27	4,87	2,33	6,19	4,86	2,50	6,16	2,64
3	6	4	2,36	4,98	3,77	2,05	4,76	4,02	2,25	4,90	2,27
3	6	5	2,53	3,84	3,66	1,87	3,47	4,40	2,14	3,72	2,88
3	6	6	3,99	5,96	2,02	3,85	6,18	2,16	3,64	5,99	3,01
3	6	7	3,66	6,28	2,45	3,61	6,47	2,45	3,48	6,18	4,13
3	7	1	8,16	0,83	1,17	6,56	2,78	1,83	5,73	3,12	5,13
3	7	2	6,51	0,83	1,27	4,61	1,91	2,39	4,14	2,62	2,74
3	7	3	2,69	4,66	4,62	2,33	4,38	4,87	2,50	4,54	1,10
3	7	4	1,40	5,29	5,74	1,16	4,64	5,87	1,00	4,92	3,65
3	7	5	4,33	4,33	2,75	3,94	4,58	3,09	3,73	4,72	1,39
3	7	6	4,76	6,08	2,24	4,41	6,29	2,60	4,07	6,14	2,66
3	7	7	6,86	5,54	1,46	6,70	6,24	0,81	5,92	6,24	1,50
Keskiarvo	4	4	4,06	3,92	2,33	3,80	4,22	2,36	3,74	4,34	2,46
KA Mittaus 2	4	4	4,05	3,81	1,63	4,03	4,21	1,60	4,01	4,29	2,35
KA Mittaus 3	4	4	4,07	4,03	3,02	3,57	4,22	3,13	3,46	4,4	2,56