



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Alma Ohrankämmen

**Optinen paikannusjärjestelmä  
UWB-sisätilapaikannuksen tarkkuuden  
arvioimiseksi**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö

Energia- ja informaatiotekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Automaatio ja tietotekniikka

Vaasa 2026

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Alma Ohrankämmen
<b>Tutkielman nimi:</b>	Optinen paikannusjärjestelmä UWB-sisätilapaikannuksen tarkkuuden arvioimiseksi
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Oppiaine:</b>	Automaatio ja tietotekniikka
<b>Työn ohjaaja:</b>	TkT Janne Koljonen ja KtT Timo Mantere
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2026 <b>Sivumäärä:</b> 70

---

**TIIVISTELMÄ:**

Tutkimuksen toimeksiantajana toimi Euroopan aluekehitysrahaston rahoittama Tulevaisuuden varastonhallinta ja logistiikka saumattomalla tarkkuuspaikannuksella (TULEVA) -hankekokonaisuus. Tämän tutkimuksen tuloksia hyödynnettiin hankkeen työpaketeissa. Tutkimuksen tavoitteena oli UWB-järjestelmän tarkkuuden arvioiminen 2D-paikannusjärjestelmällä. Tutkimus toteutettiin laboratiivisena kokeellisena tutkimuksena. Tutkimusympäristönä toimi Vaasan Technobothnian tila, joka simuloi varastoympäristöä. Tilaan rakennettiin optinen paikannusjärjestelmä tutkimusta varten.

Tutkimuksen kirjallisuuskatsaukseen kerättiin tietoa UWB- ja optisesta paikannustekniikasta, varastoista ja niissä olevasta paikannustekniikasta sekä koordinaatistoista että koordinaattijärjestelmistä. Teoreettisena viitekehystenä toimivat kirjallisuuskatsaus ja TULEVA-hankkeen tuottamat materiaalit ja hankkeen tälle tutkimukselle asettamat tutkimusrajaukset.

Tutkimus toteutettiin rakentamalla optinen paikannusjärjestelmä tilaan, johon UWB-paikannusjärjestelmä otettiin käyttöön. Tutkimuksen toteuttaminen sisälsi olemassa olevan optisen paikannuksen aineiston käyttämistä ja ohjelmien rakentamista toimivaksi optisen paikannusjärjestelmän kokonaisuudeksi. Toteutuksessa käytettiin Python-ohjelmointikieltä.

Tutkimuksessa selvisi, että optisen paikannusjärjestelmän koordinaatit WGS84-järjestelmässä eivät olleet vertailukelpoisia UWB-paikannusjärjestelmän geodeettisten koordinaattien kanssa. Tutkimuksessa ei täten pystytty arvioimaan UWB:n lopullista tarkkuutta. Tutkimusta voidaan viedä tulevaisuudessa pidemmälle tekemällä UWB-paikannusjärjestelmän tuloksista yhteensopivia optisen paikannusjärjestelmän kanssa.

---

**Avainsanat:** UWB, sisätilapaikannus, optinen paikannusjärjestelmä, TULEVA-hanke, kameran kalibrointi, koordinaattijärjestelmät.

---

**UNIVERSITY OF VAASA****School of technology and innovation****Author:** Alma Ohrankämnen**Thesis title:** Evaluating the accuracy of UWB indoor positioning with optical positioning system**Major:** Automation and Information Technology**Supervisor:** D.Sc.Tech Janne Koljonen and D.Sc.Econ Timo Mantere**Year of graduation:** 2026 **Number of pages:** 70

---

**ABSTRACT:**

The study was commissioned by the European Regional Development Fund-funded project Future Inventory Management and Logistics with Seamless Precision Positioning (TULEVA). The results of this study were applied in the project work packages. The objective of the study was to assess the accuracy of the UWB system with a 2D-tracking system. The study was executed as a laboratory-based experimental study. The research environment was the Vaasa Techno-bothnia facility, which simulates a warehouse environment. An optical positioning system was installed in the space for the study.

For the literature review of the study, information was gathered on UWB and optical positioning technology, warehouses and their positioning technology, as well as on coordinate systems. The literature review and the materials produced by the TULEVA project, together with the research boundaries set by the project.

The study was carried out by building an optical positioning system in the space where the UWB positioning system would be deployed. The implementation of the study involved using the existing optical positioning data as well as building the software into a working optical positioning system. The implementation used the Python programming language.

The study disclosed that the coordinates of the optical positioning system in WGS84 were not comparable with the geodetic coordinates of the UWB positioning system. Thus, the study did not succeed in assessing the final accuracy of the UWB. In the future, the study can be taken further by making the UWB results compatible with the optical positioning system.

---

**Keywords:** UWB, indoor positioning, optical positioning system, TULEVA project, camera calibration, coordinate systems.

## Sisällys

Kuvat	5
Taulukot	6
1 Johdanto	11
2 Paikannustekniikka varastoissa	15
2.1 Sijaintitiedon määrittämisen menetelmät ja järjestelmät	15
2.2 Varastotyypit	16
3 Tutkimuksessa käytettävät paikannustekniikat	18
3.1 UWB-teknologia	18
3.2 Optinen paikannustekniikka	20
3.3 UWB- ja optisen paikannusjärjestelmän hybridimallin toteutus varasto- ympäristössä	21
3.4 Erilaiset paikannustekniikat	23
3.5 Optinen vääristymä	27
3.6 OpenCV-avoin lähdekoodikirjasto	30
4 Tutkimuksessa käytettävät koordinaatistot ja koordinaattijärjestelmät	32
4.1 Koordinaattijärjestelmät	32
4.1.1 Maantieteellinen WGS84-koordinaattijärjestelmä	33
4.1.2 Todellisen maailman koordinaatit	34
4.1.3 Kamerakoordinaatisto	35
4.1.4 Kuvakoordinaatisto	37
4.2 Homogeeniset koordinaatit	38
4.3 Kameran ulkopuolisten parametrien transformaatiot	40
4.4 Paikallisen koordinaatiston määrittäminen UTM-kalibroinnin avulla	42
5 Tutkimusprosessi	47
5.1 Kameran kalibrointi	49

5.1.1	Demonstraatio pilottiympäristön rakentamisesta ja kameran kalibroinnista Technobothnialla	51
5.1.2	Ruututaulun kulmien paikallistaminen	56
5.1.3	Kalibrointikuvioiden paikallistaminen	57
5.1.4	Kameran alueella olevan kohteen keskipisteen muuttaminen WGS84 koordinaatistoon	57
5.2	UWB-paikannuksen tarkkuuden määrittäminen optisella paikannuksella	58
5.2.1	Maksimivirhe ja keskiarvo	59
5.2.2	RMSE ja MAE	61
5.2.3	B90	62
6	Johtopäätökset ja tulosten tulkinta	63
	Kirjallisuutta	65

## Kuvat

Kuva 1	Prosessi UWB-paikannuksen tarkkuuden arvioimiseksi optisen paikannuksen avulla. Prosessissa yhdistetään eri koordinaatistoja ja lähteitä. (mukaillen Välisuo Petri, 2022)	13
Kuva 2	Paikannusjärjestelmät (mukaillen Sanastokeskus 2002)	16
Kuva 3	Kamerassa esiintyvän positiivisen ja negatiivisen säteittäisen vääristymän vaikutus kuvaan sekä kameran kuva ilman vääristymää (mukaillen Weng, Cohen, ja Herniou 1992)	28
Kuva 4	Säteittäinen ( $d_r$ ) ja tangentialinen ( $d_t$ ) vääristymä: Ideaali sijainti ja sijainti vääristymällä kameran optiikassa (mukaillen Weng et al. 1992)	28
Kuva 5	Todellisen maailman- ja kamerakoordinaatiston projektiot kuvakoordinaatistoon (mukaillen Fisher 1997 ja OpenCV 2025)	36
Kuva 6	Kameran sisäiset parametrit (mukaillen Fisher 1997)	38
Kuva 7	Takymetrilla mitatut mittauspisteet merkittynä Technobothnian karttaan. Georeferoitu Technobothnian pohjapiirustus (mukaillen Petri Välisuo, 2022)	43

Kuva 8	Vaasan yliopiston Technobothnian laboratorion pohjapiirroksen tukiasemien sijoituspaikat ja kameran rajaaman alueen sijainti pohjapiirroksessa vihreällä (mukaillen Mahmoud Elsanhoury, 2022)	44
Kuva 9	Tutkimuksen viitekehys ja tutkimusasetelma	48
Kuva 10	Tutkimusprosessin vaiheet 1–3	49
Kuva 11	Technobothnian laboratorion tilaan rakennettu tutkimusympäristö demonstraatiota varten, jossa ovat NC353L-kamera (1) ja mustavalkoinen ruudukkomatto (2)	52
Kuva 12	Kameran kuva mustavalkoisesta ruudukkomatosta ilman kalibrointia tutkimuksen pilottiympäristössä	53
Kuva 13	Mustavalkoisen ruudukkomaton kalibroitukuvio tutkimuksen pilottiympäristössä	53
Kuva 14	Funktion <code>cv.cornerSubPix()</code> suorittama kulmien tarkennus gradienttien (punainen) ja siirtovektoreiden (musta) avulla (mukaillen OpenCV n.d.c)	57

## Taulukot

Taulukko 1	UWB- ja optisen paikannusjärjestelmien eroavaisuudet	23
Taulukko 2	Sisätilojen paikannustekniikoiden vertailutaulukko (mukaillen Deputter 2024)	26
Taulukko 3	Tutkimuksessa kalibrointiprosessin tehtävät, matemaattiset käsitteet ja niiden toteutukset	30
Taulukko 4	Takymetrimittaukset UTM-koordinaateilla Technobothnia-rakennukseen kuvan 7 mukaisesti merkityistä mittauspisteistä	44

## Symbolit

$\Theta$	Kiertokulma
$t_y, t_x$	x- ja y-translaatiovektori
$\mathbf{R}$	$3 \times 3$ rotaatiomatriisi, joka kuvaa kameran orientaation todellisen maailman koordinaattijärjestelmässä
$\text{res}_{xy}$	Kuvan vaaka- ja pystysuorapikseleillä määritelty kokonaisresoluutio
$\mathbf{P}$	Projektiomatriisi
$\mathbf{x}$	Homogeeniset koordinaatit kuvatasolla
$\mathbf{X}$	Homogeeniset koordinaatit kamera-avaruudessa
$\mathbf{C}$	Kamera kalibrointimatriisi (sisäiset parametrit)
$u_0, v_0$	Pääpisteen koordinaatit
$\mathbf{T}$	$3 \times 1$ translaatiovektori, joka kuvaa kameran sijainnin maailman koordinaattijärjestelmässä
$\mathbf{X}_w$	Homogeeniset koordinaatit maailmankoordinaatistossa
$\lambda$	Skaalauskerroin perspektiiviprojektiossa,
$X_c, Y_c, Z_c$	Kolmiulotteiset koordinaatit kamera-avaruudessa
$k_u, k_v$	Skaalaukertoimet kuvatasolla pituuden ja leveyden suunnassa pikseleinä per pituusyksikkö
$f$	Kameran polttoväli
$u, v$	Kuvapisteen koordinaatit kuvatasolla pikseleinä
$X_{pixels}, Y_{pixels}$	Kameran vaaka- ja pystysuunnassa olevien pikselien kokonaismäärä
$X_w, Y_w, Z_w$	Kolmiulotteiset koordinaatit maailmankoordinaatistossa

## Operaattorit

$\mathbf{R} \cdot \mathbf{v}$	matriisien $\mathbf{R}$ ja $\mathbf{v}$ kertolasku
$\mathbf{R} \cdot \mathbf{v}$	Matriisien $\mathbf{R}$ ja $\mathbf{v}$ kertolasku
$\mathbf{C} \cdot \mathbf{x}_c$	Kalibrointimatriisin $\mathbf{C}$ ja homogeenisten koordinaattien $\mathbf{x}_c$ kertolasku
$\mathbf{R}\mathbf{X}_w + \mathbf{T}$	Kameran ja maailman koordinaattijärjestelmän välinen euklidinen transformaatio
$\mathbf{P}\mathbf{X}$	Projektiomatriisin $\mathbf{P}$ ja homogeenisten koordinaattien $\mathbf{X}$ kertolasku
$\mathbf{C}[\mathbf{R} \mathbf{T}]\mathbf{X}_w$	Projektiomatriisin yhtälö, jossa on kamera kalibrointimatriisi $\mathbf{C}$ , rotaatiomatriisi $\mathbf{R}$ ja translaatiovektori $\mathbf{T}$
$\lambda = \frac{f}{z_c}$	Skaalauskerroin perspektiiviprojektiossa
$\mathbf{R}^T\mathbf{R} = \mathbf{I}$	Rotaatiomatriisin $\mathbf{R}$ ominaisuus (ortogonaalisuus)
$\mathbf{P} = \mathbf{C}[\mathbf{R} \mathbf{T}]$	Yleinen 3x4 projektiomatriisi
$\mathbf{X} = \mathbf{R}\mathbf{X}_w + \mathbf{T}$	Kameran ja maailman koordinaattijärjestelmän välinen transformaatio

## Lyhenteet

2D	kaksiulotteinen (engl. two dimensional)
3D	kolmiulotteinen (engl. three dimensional)
AI	tekoäly (engl. Artificial Intelligence)
EAKR	Euroopan aluekehitysrahasto
B90	90% virhe (engl. 90% Boundary Error)
BLE	Bluetooth Low Energy
CLT	keskuusrajaeteoreema (engl. Central Limit Theorem)
GNSS	maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä (engl. Global Navigation Satellite System)
GPS	maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä (engl. Global Positioning System)
GSM	maailmanlaajuinen digitaalinen matkapuhelinjärjestelmä (engl. Global System for Mobile Communications) (alunperin ransk. Groupe Spécial Mobile)
ISM	teollinen, tieteellinen ja lääketieteellinen (engl. Industrial, Scientific and Medical)
LIDAR	valotutka (engl. light detection and ranging)
MAE	keskimääräinen absoluuttinen virhe (engl. mean absolute error)
MSE	keskimääräinen neliövirhe (engl. mean squared error )
NGA	Yhdysvaltain kansallinen maantieteellis-tiedusteluvirasto (engl. National Geospatial-Intelligence Agency)
NSSDA	The National Standard for Spatial Data Accuracy -standardi
OpenCV	Avoimen lähdekoodin konenäkö-kirjasto (engl. Open Source Computer Vision Library)
RFID	radiotaajuustunnistus (engl. Radio Frequency Identification)
RMSE	Keskineliövirhe (engl. Root Mean Square Error)
RSSI	Vastaanoton signaalin vahvuuden indikaattori (engl. received signal strength indicator)
PSF	pisteen leviämistoiminto (engl. Point Spread Function)
TDoA	saapumisaikaero (engl. Time Difference of Arrival)

ToA	saapumisaika (engl. Time of Arrival)
ToF	lentoaika (engl. Time of Flight)
TULEVA	Tulevaisuuden varastonhallinta ja logistiikka saumattomalla tarkkuuspaikannuksella
UMTS	maailmanlaajuinen liikkuvan televiestinnän järjestelmä (engl. Universal Mobile Telecommunications System)
UTM	karttaprojektiojärjestelmä koordinaattien osoittamiseen maan pinnalla sijaitseville paikoille (engl. Universal Transverse Mercator)
UWB	ultralaajakaista (engl. ultra wideband)
WGS84	Yhdysvaltain puolustusministeriön ylläpitämä ja määrittelemä tasokoordinaattijärjestelmä (engl. World Geodetic System 1984)
WPS	Wi-Fi-paikannusjärjestelmä (engl. Wi-Fi positioning system)

# 1 Johdanto

Paikannustekniikan käyttäminen on nykypäivänä osa ihmisten arkea. Yritykset voivat hyödyntää paikannustekniikkaa sisälogistiikassa ja varastohallinnassa yrityksen tuottavuuden parantamiseen. Paikannustekniikan markkinoilla on erilaisia optisia paikannusjärjestelmiä, jotka käyttävät kameroita tai muita optisia antureita henkilön tai esineen sijainnin määrittämiseen. Sisätilapaikannus on tärkeä teknologia useille teollisuudenaloille esimerkiksi varastoinnissa ja logistiikassa, koska tarkat paikannustiedot mahdollistavat tehokkaamman varastohallinnan ja helpottavat muun muassa tavaran seuranta ja käsittelyä.

Tämä tutkimus oli osa Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoittamaa Tulevaisuuden varastohallinta ja logistiikka saumattomalla tarkkuuspaikanuksella (TULEVA) -hanketta, joka toteutettiin Pohjanmaan ja Etelä-Pohjanmaan maakunnissa. (*Technobothnia*, s.a.; Välisuo, 2022). Hankkeen tavoitteena oli muun muassa tuottaa ja laajentaa älylogistiikan avoimia ohjelmistoja ja menetelmiä sekä tulevaisuuden teknologioiden tuntemusta, edistää sovellusten kehittämistä uusiin teknologiaratkaisuihin pohjautuen ja edistää teollisen internetin hankkeiden jatkokehittämistä. Hankkeessa syntyneitä uusia teollisen internetin paikanmääritysmenetelmiä on mahdollista hyödyntää esimerkiksi sisätilalogistiikassa ja varastohallinnassa. (Välisuo, 2022)

Hankkeen kohderyhmät valmistavat järjestelmiä varastohallintaan tai logistiikkaan tai hyödyntävät niitä järjestelmiä sekä keskittyvät teollisen internetin menetelmiin ja sen sovelluksiin. Hankkeen kohderyhmää olivat myös alueiden korkeakoulut ja muut tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoimijat sekä muilta kuin logistiikan aloilta autonomisten järjestelmien sovelluksia kehittävät yritykset ja yritykset, jotka tarjoavat kuluttajien mobiilipaikannusta. (Työ- ja elinkeinoministeriö, n.d.). Hankkeen kumppaniverkosta olivat Vaasan yliopiston Digital Economy -tutkimusala, Vaasan Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö sekä Seinäjoen ammattikorkeakoulun tekniikan yksikkö. (*Technobothnia*, s.a.; Välisuo, 2022).

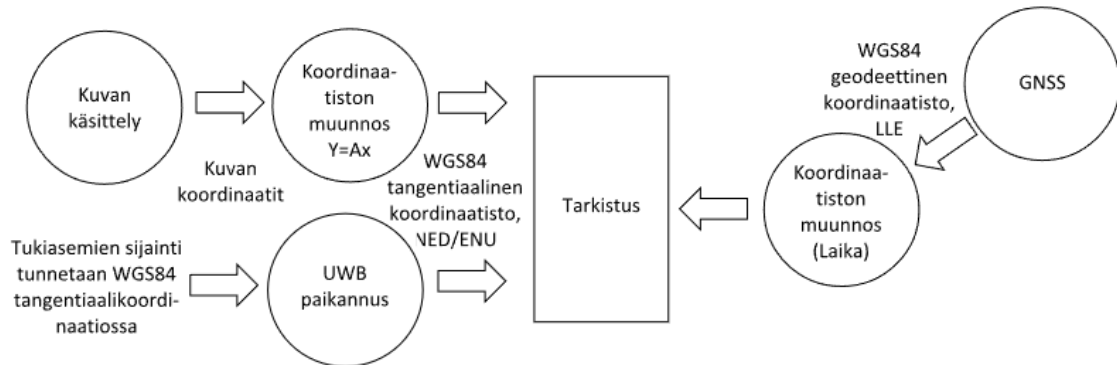
TULEVA-hanke koostui neljästä työpaketista, jotka muodostivat hankkeen kokonaisuuden: 1) sisätilapaikannuksen testiympäristön rakentaminen Technobothnialle ja Framille, 2) tarkkuuspaikannusmenetelmien algoritmikehityksen ja ohjelmoinnin satelliittipaikannusmittauksilla, kaksitaajuus-Galileolla ja lähiverkkomittauksilla ultralaajakaistalla (UWB, engl. ultra wideband), 3) tarkkuuspaikannusta hyödyntävien logistiikkaprosessien ja -konseptien määrittely sekä 4) saumattomien tarkkuuspaikannusmenetelmien demonstrointi teollisen internetin, älylogistiikan ja resurssienhallinnan toteutuksissa sekä toimitusketjun alkuperän varmentamisessa. (Välisuo, 2022).

Hankkeessa tuotettua paikannustekniikkaa voi hyödyntää yritysten varastoissa ja varastoiminnassa. Varastossa UWB-paikannustekniikalla voidaan saavuttaa tarkka sisätilapaikannus. Tämä tutkimus sisältyy hankkeen vaiheisiin 1–4, ja se liittyy tarkan sisätilapaikannuksen määrittelemiseen optisen paikantamisen avulla. Tässä tutkimuksessa rakennetaan Vaasaan tutkimuskeskus Technobothnialle optisen sisätilapaikannuksen testiympäristö, jolla simuloidaan varastoympäristöä. Tutkimusta varten tilaan rakennetaan optinen paikannusjärjestelmä. Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää varastotekniikassa. Tutkimuksen optisessa paikannuksessa kerätyt kohteiden paikkatiedot perustuvat paikannettavan kohteen keskipisteeseen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli muodostaa teoreettinen ymmärrys siitä, kuinka tarkasti kaksiulotteinen (2D) -paikannusjärjestelmä pystyy arvioimaan UWB-järjestelmän tarkkuutta. Tutkimuksen tutkimuskysymyksiä olivat: soveltuuko optinen 2D-paikannusjärjestelmä teoriassa UWB-paikannusjärjestelmän tarkkuuden arvioimiseen yksinkertaisessa staattisessa tilanteessa? Kuinka teoriassa määritellään UWB-paikannusjärjestelmän tarkkuus optisella paikannustekniikalla? Tämä tutkimus on ajankohtainen, koska tulevaisuudessa UWB-tekniiikan käyttäminen sisätilapaikannuksessa tulee yleistymään nopeasti. (Välisuo, 2022)

Kuvassa 1 esitetään UWB-paikannustekniikan tarkkuuden määrittämisen osuutta TULEVA-hankkeessa. Tukiasemien WGS84-tangentiaali koordinaatiston tunnetut sijainnit toimivat vertailukohtana tutkimuksessa. Koordinaattimuunnokset tehtiin WGS84-tangentiaali

koordinaatistoon ja WGS84-geodeettisten järjestelmien välillä. Kaaviossa esitellään asetelma tutkimus- ja testausympäristöstä, jossa UWB-paikannuksen tarkkuus määritellään verrattuna tarkempaan paikannustekniikkaan eli optiseen paikannustekniikkaan. (Henkilökohtainen keskustelu Välisuo P., 2022). Kameroissa olevat sisäänrakennetut GNSS-vastaanottimet eivät tuota riittävää tarkkuutta määrittämään paikannusta, joka olisi tarkka (Carvajal-Ramirez, Carvajal-Ramirez, Aguera-Vega, & Martinez-Carricondo, 2021).



**Kuva 1.** Prosessi UWB-paikannuksen tarkkuuden arvioimiseksi optisen paikannuksen avulla. Prosessissa yhdistetään eri koordinaatistoja ja lähteitä. (mukaillen Välisuo Petri, 2022).

Luku 2 käsittelee sijaintitiedon paikantamiseen käytettävien paikannusjärjestelmien yleiskuvaa. Luvussa esitetään erilaisia varastotyyppisiä ja niiden asettamia rajoitteita käytettävälle paikannustekniikalle. Luku 3 käsittelee tutkimuksessa käytettävät paikannusteknologiat eli UWB-teknologian ja optisen paikannusteknologian sekä niiden yhdistämisen varastoympäristöissä. Luvussa 3 käsitellään erilaisia sisätilapaikannustekniikoita vertailutaulukon avulla. Luvussa myös esitetään OpenCV-avoimen lähdekoodin tietokonenäkö- ja oppimiskirjasto, jota käytetään tutkimuksessa työkaluna kameran linssin optisen vääristymän korjaamiseen.

Luvussa 4 esitetään tutkimuksessa käytettävät koordinaatistot, koordinaattijärjestelmät ja muunnokset. Tutkimuksessa käytetään maantieteellistä WGS84-koordinaattijärjestelmää, todellisen maailman koordinaatteja sekä kamera- ja kuvakoordinaatistoja. Luvussa esitetään ulkoisen kameran transformaation parametrit ja kuvataan paikallisen koordinaattijärjestelmän luomisen prosessi UTM-kalibrointipisteillä, jota käytetään pikselidatan muuttamiseksi todellisen maailman koordinaatteihin.

Luku 5 käsittelee tutkimusprosessin, jossa esitetään kokeellisen tutkimuksen prosessi. Tutkimusprosessiin kuuluu kameran kalibrointi, jossa määritellään kameran sisäiset parametrit ja korjataan kameran linssissä esiintyvä optinen vääristymä. Tutkimusprosessissa havainnollistetaan demonstraatiolla pilottiympäristön rakentaminen ja kameran kalibrointi, joka toteutetaan Technobothnian sisätiloissa. Kameran kalibrointiin sisältyy ruututaulun kulmien- ja kalibrointikuvioiden paikallistaminen ja kameran alueella olevan kohteen keskipisteen muuttaminen maantieteelliseen WGS84-koordinaattijärjestelmään. Luvussa esitetään sijaintitarkkuuden määrittämiseen käytettävä menetelmä. Luvussa kuvataan esimerkki UWB- ja optisen paikannusjärjestelmien vertailua varten ja tarkkuuden arvioinnissa käytettävät keskeiset tilastolliset mittarit: maksimivirhe, keskiarvo, RMSE, MAE ja B90. Luvussa 6 esitetään johtopäätökset ja tulosten tulkinta. Luvussa käsitellään tulkintaa tutkimukseen parhaiten sopivasta tarkkuusanalyysistä ja käsitellään optisen paikannusjärjestelmän käyttämistä paikannusjärjestelmän määrittämiseksi.

## 2 Paikannustekniikka varastoissa

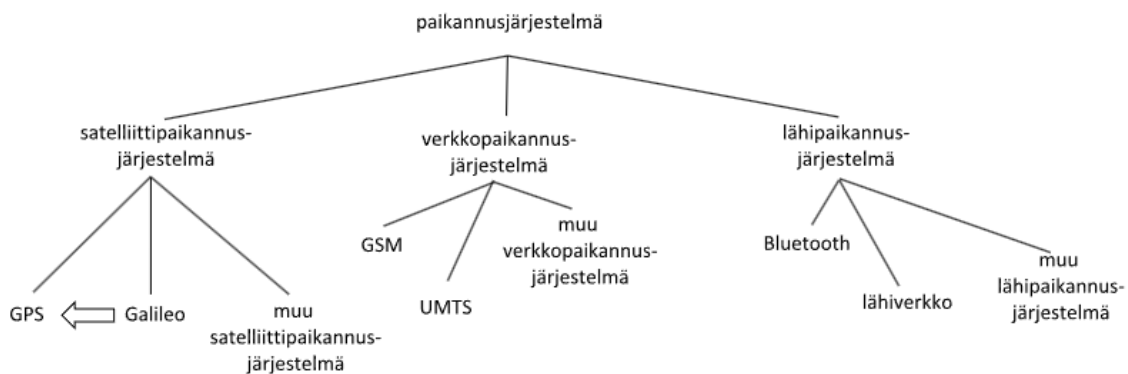
Erilaisilla paikannustekniikoilla voidaan saavuttaa halutun kohteen mahdollisimman ajan-  
tasainen sijaintitieto, joka tapahtuu esimerkiksi tietyin aikavälein toistuvana. Paikannettu  
kohde voi olla ihminen, tavara tai laatikko. (Välisuo, 2022). Paikannustekniikka varastois-  
sa on yleistynyt, ja sen vaikutukset näkyvät yrityksen tuottavuudessa, toimintavarmuu-  
den tehostumisena ja laadun parantumisena. Paikannustekniikan kehittyminen vähentää  
ihmisten tekemiä virheitä. Paikannustekniikkaa käyttämällä tiedot ovat aina ajan tasal-  
la. Paikannustekniikan käyttö tulee yleistymään tulevaisuudessa voimakkaasti ja niiden  
markkinat tulevat laajenemaan entisestään. (Marin, n.d.). Eri teollisuuden alojen kilpai-  
lukykyyn vaikuttaa myös se, miten yrityksen logistiikka on toteutettu. Logistiikan tehok-  
kuutta on parannettu merkittävästi älylogistiikan avulla. Paikannustekniikan valinnassa  
täytyy huomioida ympäristö ja käytettävissä oleva tila. (Elsanhoury et al., 2022).

### 2.1 Sijaintitiedon määrittämisen menetelmät ja järjestelmät

Paikannus tarkoittaa kohteen sijainnin määrittämistä koordinaatistossa. Paikannusta voi-  
daan tehdä erilaisilla menetelmillä, joista yksinkertaisin paikannusmenetelmä on kartta ja  
kompassi. Nykyään paikannusta käytetään muun muassa navigointiin ja hätätilanteiden  
hallintaan. (Pahlavan, 2018). Paikannusjärjestelmien kehittäminen on tärkeää ja niitä on  
integroituna jo moniin laitteisiin. Esimerkiksi puhelimeen on integroitu paikannusjärjestel-  
mä, jota tietty sovellus käyttää. Paikannusjärjestelmien täytyy tulevaisuudessa kehittyä,  
jotta näitä sovelluksia pystytään kehittämään paremmin kohderyhmää palvelevaksi. Esi-  
merkiksi kun henkilö käyttää paikannusjärjestelmää, hän ei yleensä ole paikallaan vaan  
liikkeessä, tällöin myös hänen käytössään oleva vastaanotin liikkuu. Paikannusjärjestel-  
mässä voidaan käyttää myös muita paikannusratkaisuja, kuten inertiasensoreita. (Euroo-  
pan avaruusjärjestö, 2019).

Kuvassa 2 on esitetty satelliitti-, verkko- ja lähipaikannusjärjestelmät, joita käytetään si-  
jaintitiedon määrittämiseen. Satelliittipaikannusjärjestelmä paikantaa signaaleja välittävi-

en satelliittien avulla. Yleisimpiä satelliittipaikannusjärjestelmiä ovat maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä (GPS, engl. Global Positioning System) ja Galileo. GPS-järjestelmä on maailmanlaajuinen, jota ylläpitää ja hallinnoi Yhdysvaltain puolustusministeriö. Euroopassa toimii Galileo, joka on GPS-tyyppinen paikannusjärjestelmä. Differentiaalinen- ja avustettu GPS korjaa ja parantaa paikannuksen sijaintitarkkuutta. Verkkoipaikannusjärjestelmä käyttää maailmanlaajuisia digitaalisia matkapuhelinjärjestelmiä (GSM, engl. Global System for Mobile Communications), maailmanlaajuisia liikkuvan televiestinnän järjestelmiä (UMTS, engl. Universal Mobile Telecommunications System) tai muita verkkoipaikannusjärjestelmiä. Lähipaikannusjärjestelmä käyttää Bluetoothia, lähiverkkoa tai muuta lähipaikannusjärjestelmää. (Sanastokeskus, 2002).



Kuva 2. Paikannusjärjestelmät (mukaillen Sanastokeskus 2002).

## 2.2 Varastotyypit

Varasto on esimerkiksi varistorakennus, varastotila tai varastossa oleva tavara. Varastointi tarkoittaa varastossa tapahtuvaa varastotoimintaa ja -toimintoja. Varastointipalveluja asiakkailleen tarjoavat logistiikkapalveluyritykset tuottavat palvelua liiketoimintaperiaatteella. Tuotteiden varastointi on usein välttämätöntä. Yrityksillä liiketoiminnan tavoitteen on pitää mahdollisimman vähän varastoja toimitusketjun kaikissa vaiheissa, jotta yrityksen pääoma vapautuu muihin tarpeisiin. (Logistiikan Maailma, n.d.).

Varastot ovat tärkeä osa yrityksille toimitusketjun hallinnointiin. Yrityksen käytössä olevia varastoja voidaan eritellä perus-, käyttö-, kierto- tai eräköko varastoiksi. Näiden varasto-

jen tuotteet ja tarpeet vaihtuvat kulutuksen ja täydennysrytmin mukaisesti. Varmuusvaraston tärkein tehtävä on turvata tuotteiden saatavuus kysynnän vaihdellessa. Puskuri-varastolla yritys varautuu esimerkiksi tuotteen saatavuusongelmiin. Prosessivarasto on esimerkiksi tuotannossa oleva varasto, johon varastoidaan esimerkiksi valmisteilla olevia tuotteita odottamaan niiden jatkokäsittelyä. Kausivaraston avulla yritys pyrkii pitämään tuotannon tasaisena kysynnän kausittaisessa vaihtelussa. (Logistiikan Maailma, n.d.).

Varastoja luokitellaan esimerkiksi varastotyyppin mukaan ulko-, kylmä-, lämmittämättömiin-, lämmitettyihin-, pakaste- ja erikoisvarastoihin. Ulkovarasto voi olla myös katettu ja sinne sijoitettava tavara laitetaan hyllyyn tai maahan. Tavaroiden tulee kestää kosteuden ja lämpötilojen vaihtelut. Lämmittämätön varasto on yleisin yritysten käyttämä varastotyyppi, koska sen rakennus- ja ylläpitokustannukset ovat alhaiset. Varastossa olevien tuotteiden täytyy kestää lämpötilan vaihteluita ja kosteutta. Lämmitetty varasto on yleensä 6–10 astetta ulkolämpötilaa korkeampi ja se on myös kalliimpi ratkaisu rakentaa ja ylläpitää kuin muut edellä mainitut varastot. (Logistiikan Maailma, n.d.).

Lämmitetyssä varastossa ei ole lämpötilojen vaihteluita tai kosteusongelmia. Kylmävarasto on tarkoitettu tavaroille, jotka eivät saa jäätyä eivätkä saa olla lämpimässä. Kylmävaraston lämpötila on -8 – +2 astetta. Pakastevaraston säilytyslämpötila on -18 astetta, ja se on tarkoitettu tavaroiden pitkäaikaiseen varastointiin. Pakastevarastossa olevien tavaroiden tulee kestää jäätymistä. Erikoisvarastoissa lämpötila ja ilmankosteus on tarkasti säädettävissä. Vaarallisten aineiden varasto tarvitsee viranomaisluvut ja siellä säilytetään vaarallisia aineita. (Logistiikan Maailma, n.d.).

### 3 Tutkimuksessa käytettävät paikannustekniikat

Tutkimuksen keskeisimmät teknologiat ovat UWB-teknologia ja optinen paikannustekniikka. Näiden teknologioiden lisäksi luvussa 3.4 esitetään vertailua erilaisista sisätilapaikannustekniikoista, joiden avulla voidaan perustella optisen paikannusmenetelmän valinta UWB-teknologian tarkkuuden määrittämiseksi. Luvun osioissa 3.1 ja 3.2 syvennyttään UWB-teknologian ja optisen paikannustekniikan periaatteisiin. Luvun osiossa 3.3 esitetään mahdollisuus optisen paikannustekniikan ja UWB-teknologian yhdistämisestä tarkan paikannuksen saavuttamiseksi. Luvun osiossa 3.4 käsitellään optisen paikannusteknologian haaste optisesta vääristymästä, joka on huomioitava tarkan paikannustekniikan saavuttamiseksi. Luvun osiossa 3.5 esitetään OpenCV-avoimen lähdekoodin kirjasto, joka on ohjelmistotyökalu ja jota käytetään muun muassa kameran kalibrointiprosessissa.

#### 3.1 UWB-teknologia

UWB-teknologia käyttää laajaa taajuusaluetta tiedon siirtämiseen lyhyiden etäisyyksien päähän käyttämällä langatonta lähetintä tiedon kuljettamiseen. UWB-teknologian avulla voidaan määrittää henkilön tai esineen sijainti käyttämällä muutaman nanosekunnin mittaisia pienitehoisia pulsseja, jotka lähetetään laajalla taajuusalueella. UWB-teknologian laajan spektrin ansiosta laitteiden välistä pulssidataa pystytään lähettämään nopeasti. UWB-teknologia käyttää laajaa taajuusaluetta langattomalla lähettimellä tiedon siirtämiseen. (Kocur, 2019; RF Editorial Team, 2021).

Samoin kuin GPS:ssä, UWB:ssä tunnisteen seurantaan ja paikannukseen käytetään tunnisteen ympärillä olevia tukiasemia, jotka UWB:n tapauksessa ovat UWB-tukiasemia. (Guruprasad, 2020). UWB-teknologia lähettää signaaleja laajalla taajuusalueella pienitehoisina pulseina, yleensä taajuuskaistoilla 3,1–10,6 GHz. UWB-teknologian etuna on myös alhainen virrankulutus ja se mahdollistaa suurien tietomäärien siirtämisen suurilla nopeuksilla. (Niemelä, Haapola, Hämäläinen, & Iinatti, 2017).

UWB-teknologia on radiotekniikka, jossa käytetään sähkömagneettisia aaltoja. Sen sähkömagneettisten aaltojen spektritiheys on pieni ja kaistanleveys on yli 25 prosenttia keskitaajuudesta. UWB-teknologiaa on hyödynnetty UWB-järjestelmien sovelluksissa, esimerkiksi henkilöiden paikantamisessa, turvallisuusoperaatioiden seurannassa, teollisissa sovelluksissa, paikannusjärjestelmissä ja langattomissa viestintäjärjestelmissä. (Kocur, 2019).

UWB-teknologialla tehdyllä paikannuksella voidaan saavuttaa noin 10 cm tarkkuus laboratorioympäristössä lentoaika (ToF, engl. Time of Flight) tai saapumisaikaero (TDoA, engl. Time Difference of Arrival) -menetelmillä, ja sen kaistanleveydet voivat olla yli 500 MHz. (Dachs, 2020; RF Editorial Team, 2021; Viljamaa, 2024). UWB-teknologiassa tunniste lähettää lyhytaikaisen Gaussian pulssin. Pulssi on tyypillisesti enintään nanonsekunnin mittainen. Pulssi antaa ajanmääritystietoa, joka on korkearesoluutioinen. TDoA-menetelmässä hyödynnetään aikaeroja tunnisteiden 3D-sijainnin laskemiseen. (Guruprasad, 2020). UWB-teknologiaa voidaan käyttää sisätiloissa esimerkiksi varastotiloissa muutaman tuhannen neliömetrin alueella riippuen ankkureiden määrästä ja käytössä olevasta järjestelmästä, mutta ulkotiloissa alue on pienempi (Schjørring et al., 2022).

Matala teho tarkoittaa, että se ei todennäköisesti häiritse muita laitteita ja se ei ole häiriöherkkä esimerkiksi samalla taajuudella toimivista langattomista laitteista. Näiden ominaisuuksien vuoksi UWB-teknologia toimii hyvin ympäristöissä, joissa muilla langattomilla tekniikoilla on ongelmia. (Glover & Atkinson, 2017). Suurissa varastoissa UWB-teknologia voi olla parempi vaihtoehto, koska UWB mahdollistaa korkean tarkkuuden ja luotettavuuden sekä se pystyy läpäisemään esineitä monimuotoisissa ympäristöissä. Näiden vuoksi UWB soveltuu hyvin teollisuusvarastojen seurantajärjestelmiin. (Alarifi et al., 2016).

UWB-ankkurit täytyy asettaa strategisesti ja tarkasti WGS83-koordinaattijärjestelmän avulla. UWB-paikannusjärjestelmä mittaa etäisyyden tunnisteiden solmun ja ankkurisolmun saapumisajan (ToA, engl. Time of Arrival) avulla. Tunnisteiden vastaanottaessa signaalin ankkurista, määrittää ankkuri etäisyytensä muihin ankkureihin laskemalla signaalin ToA:n. (Gao et al., 2024).

## 3.2 Optinen paikannustekniikka

Optiset paikannustekniikat kuuluvat kuvapohjaisten tekniikoiden luokkaan, jossa paikannuksessa käytetään kameroita ja tietokonenäköä. Luokka jakautuu egomotion-järjestelmiin ja staattisiin anturijärjestelmiin. Egomotion-järjestelmä arvioi kameran sijainnin suhdetta staattiseen ympäristöön, kun taas staattinen anturijärjestelmä paikantaa liikkuvaa objektia kuvista. (Alarifi et al., 2016). Lyhyillä etäisyyksillä optiset järjestelmät ovat tarkempia kuin UWB-järjestelmä, minkä vuoksi ne sopivat tarkkaan seurantaan (Cledat, Rufener, & Cucci, 2021).

Yksinkertaisen laitteiston vuoksi UWB-järjestelmät voidaan integroida helposti muihin laitteisiin. UWB-paikannusjärjestelmät ovat edullisempia kuin optiset paikannusjärjestelmät. (RF Wireless World, 2023). Langattomat verkot voidaan helposti yhdistää UWB-järjestelmään yhdeksi kokonaisuudeksi, kun taas optinen järjestelmä on vaikeampi integroida langattomaan verkkoon. (Schyga, Hinckeldeyn, & Kreutzfeldt, 2022). Optista paikannusjärjestelmää eivät häiritse radiotaajuisista lähteistä tulevat signaalit, kuten ne häiritsevät UWB-järjestelmää interferenssillä tai kaukokenttähäiriöillä, sillä optinen paikannusjärjestelmä ei perustu radiotaajuussignaaleihin. (Alarifi et al., 2016; Schyga et al., 2022).

Optinen paikannustekniikka käyttää valoa, kuten näkyvää valoa tai infrapunavaloa paikannettavan kohteen sijaintitiedon keräämiseen. Tietokoneella ohjelmoidut optiset kohteet, kuten geometriset kuviot ovat helppoja määrittellä, ja ne mahdollistavat kameran kuvasta kohteen paikantamisen suhteessa todelliseen maailmaan. (Cledat et al., 2021). Optisella paikannusjärjestelmällä voi olla rajoituksia, esimerkiksi sen rajallinen toimintasäde ja suoran näköyhteyden edellyttäminen paikannettavaan kohteeseen. (Alarifi et al., 2016).

Optisen paikantamisen tarkkuuteen vaikuttavat negatiivisesti yli- ja alivalotus, valaistuksen vaihtelu, linssin laatu sekä pisteen leviämiskäyrä (PSF, engl. Point Spread Function). Ylivalotuksessa kameran kuva on liian kirkas, kun taas alivalotuksessa se on liian tum-

ma. Yli- ja alivalotus vaikuttavat siihen, miten PSF:n ja valaistuksen vaihtelu toimivat ja lopullisessa näkymässä kameran kuvassa. Yli- ja alivalotuksen aiheuttamaa vääristymää kuvassa voidaan korjata muun muassa algoritmeilla. Kameran kuvassa epäterävyyttä voi aiheuttaa ei-ideaalissa muodossa oleva PSF-linssi. PSF:n vaikutus esiintyy kameran kuvassa kuvattavan kohteen reunalla ja kulmissa epätarkkuutena. Nämä negatiivisesti kuvan tarkkuuteen vaikuttavat tekijät on otettava huomioon optisessa paikantamisessa kuvasta saadun datan tarkkuuden parantamiseksi. (Cledat et al., 2021).

### **3.3 UWB- ja optisen paikannusjärjestelmän hybridimallin toteutus varasto- ympäristössä**

Varastoissa ja logistiikassa on käytössä paikannusjärjestelmiä, joilla seurataan muun muassa omaisuutta ja varastonhallintaa. Paikannusjärjestelmän valinnassa tulee huomioida esimerkiksi varastossa- ja logistiikka- ympäristöissä olevat rajoitukset, jotka vaikuttavat paikannusjärjestelmän valintaan. UWB-järjestelmä soveltuu esimerkiksi omaisuuden seurantaan pitkien etäisyyksien kantamilta. (Wang, Li, Zhang, Lv, & Hou, 2018). Lyhyillä etäisyyksillä optiset järjestelmät ovat tarkempia kuin UWB-järjestelmä, ja ne sopivat tarkkaan seurantaan (Cledat et al., 2021).

UWB-järjestelmät ovat kestäviä ja niitä voidaan käyttää useissa eri ympäristöissä. Yksinkertaisen laitteiston vuoksi UWB-järjestelmät ovat optista paikannusjärjestelmiä edullisempia ja ne voidaan integroida helposti muihin laitteisiin. (RF Wireless World, 2023). UWB-järjestelmät ovat helppoja ottaa käyttöön ja ne ovat myös helppokäyttöisiä, eivätkä ne vaadi erikoislaitteistoa tai käyttäjältä erityisosaamista (RF Wireless World, 2023). Langattomat verkot voidaan helposti yhdistää yhdeksi kokonaisuudeksi UWB-järjestelmään, kun taas optinen järjestelmä on vaikeampi integroida langattomaan verkkoon. (Schyga et al., 2022).

Optista paikannusjärjestelmää eivät häiritse radiotaajuisista lähteistä tulevat signaalit, kuten ne häiritsevät UWB-järjestelmää interferenssillä tai kaukokenttähäiriöillä. Varastot,

joissa on esimerkiksi paljon tuotteita tai tuotteiden sijainnin tarkkuus todetaan tärkeäksi, kannattaa käyttää optista paikannusta. UWB-paikannus on hyödyllinen esineiden sijaintitiedon määrittämisessä huoneen sisällä, ja se soveltuu käytettäväksi varastoissa. Optimaalisen paikannustuloksen saavuttamiseksi on hyvä käyttää optista- ja UWB-paikannusjärjestelmää yhdessä. (Alarifi et al., 2016; Schyga et al., 2022). Yhdistämällä UWB- ja optinen paikannusjärjestelmä saadaan käyttöön molempien järjestelmien vahvuudet. Yhdistelmällä voidaan saavuttaa tarkempi ja luotettavampi paikannus.

Esimerkiksi suurissa varastoissa optinen paikannusjärjestelmä on parempi vaihtoehto, koska siellä on todennäköisesti paljon esineitä. Samaisessa varastossa UWB-järjestelmä paikantaa esineiden sijainnin. Kun käytetään molempia paikannusjärjestelmiä yhdessä, voidaan saavuttaa tarkempi tieto tuotteiden sijainnista varaston sisällä. Lisäksi varaston- ja inventaarion hallintaa voidaan parantaa käyttämällä molempia järjestelmiä yhdessä, jolloin saadaan reaaliaikainen tieto varaston tilanteesta. (Alarifi et al., 2016).

Varastossa, jossa käytetään paikannusjärjestelmää, täytyy huomioida huoneen rakenne, laitteet, huolto ja ylläpito, niiden kustannukset, tietoturva, käyttötarkoitus ja yhteensopivuus. Varastossa tulee olla riittävä valaistus optista paikannusta varten. Varastossa, jossa on paljon radioaaltoja heijastavia seiniä, voivat aiheuttaa häiriöitä paikannukseen. Tällöin radioaallot voivat antaa virheellisiä sijaintitietoja, koska paikannuslaite määrittää kohteen sijainnin lähettämällä radioaaltoja mittaamalla etäisyyden kohteeseen. Ongelmaksi saattaa myös muodostua se, että radioaallot heijastuvat eri suuntiin ja ne voivat tulla paikannuslaitteeseen eri ajankohtina. (Alarifi et al., 2016). Taulukossa 1 havainnollistetaan UWB- ja optisen paikannusjärjestelmien eroavaisuuksia toimintaperiaatteessa, tarkkuudessa, kestävyudessa, kustannuksissa, helppokäyttöisyydessä, integroinnissa ja häiriöherkkyydessä.

**Taulukko 1.** UWB- ja optisen paikannusjärjestelmien eroavaisuudet.

Järjestelmä	UWB-paikannus	Optinen paikannus
<b>Toimintaperiaate</b>	Ultra-wideband-radiosignaalit (RF Editorial Team, 2021)	Kamerat, tietokone ja valonlähde kohteen sijainnin määrittämiseen (Cledat et al., 2021)
<b>Tarkkuus</b>	Noin 10 cm laboratorioympäristössä (Dachs, 2020; RF Editorial Team, 2021; Viljamaa, 2024)	Erittäin tarkka lyhyillä etäisyyksillä (Cledat et al., 2021)
<b>Kestävyys</b>	Erittäin kestävä ja soveltuu monenlaisiin ympäristöihin, sillä se ei vaadi erityistä valaistusta tai linssien laatua (RF Wireless World, 2023)	Vähemmän kestävä, herkkä valaistusolosuhteille ja linssien laadulle (Cledat et al., 2021)
<b>Kustannukset</b>	Edullisempi yksinkertaisen laitteiston vuoksi (RF Wireless World, 2023)	Kalliimpi (RF Wireless World, 2023)
<b>Helppokäyttöisyys</b>	Helppo ottaa käyttöön ja käyttää (RF Wireless World, 2023)	Vaatii enemmän erikoislaitteistoa ja osaamista (RF Wireless World, 2023)
<b>Integrointi</b>	Helppo integroida langattomiin verkkoihin (Schyga et al., 2022)	Vaikeampi integroida langattomiin verkkoihin (Schyga et al., 2022)
<b>Häiriöherkkyys</b>	Herkkä radiotaajuisille häiriöille (Schyga et al., 2022)	Herkkä valaistusolosuhteille ja linssien laadulle (Cledat et al., 2021).

Sisätalapaikannustekniikassa on eduksi, jos käytettävässä paikannustekniikassa on suuri kaistanleveys ja tiedonsiirtonopeus, lyhyt viestin pituus, pieni lähetysteho ja suuri läpäisykyky. Nämä ominaisuudet toteutuvat UWB-tarkkuuspaikannustekniikassa, mutta sillä on myös haasteita esimerkiksi signaalihäiriöiden esiintyminen tiheässä ympäristössä. (Elsanhoury et al., 2022).

### 3.4 Erilaiset paikannustekniikat

UWB-teknologian lisäksi on olemassa sisätalapaikannustekniikka Bluetooth Low Energy (BLE), joka käyttää 2,4 GHz:n teollinen-, tieteellinen- ja lääketieteellinen (ISM, engl. industrial, scientific and medical) taajuusaluetta. Kuten UWB-teknologian käyttämät kes-

kikaistat 6–8,5 GHz, on BLE-tekniikan käyttämä taajuusalue laajasti saatavilla ympäri maailmaa. Monet laitteet käyttävät samaa taajuusaluetta BLE-tekniikan kanssa, jonka seurauksena langattoman tiedonsiirron suorituskyky voi hidastua ja heikentyä. BLE-tekniikalla on yhteensopivampi kolmannen osapuolen liitettävyyden kuin UWB-tekniikalla, mutta UWB-tekniikan asennustapa on yksinkertaisempi. (Viljamaa, 2024).

UWB-paikannustekniikka ei ole yhtä helposti integroitavissa muihin laitteisiin kuin BLE-tekniikka, koska BLE-tekniikalla on kompatibilimpi liitettävyyden kolmannen osapuolen laitteiden kanssa. BLE-tekniikalla voidaan saavuttaa noin viiden metrin tarkkuus. BLE-tekniikka perustuu vastaanoton signaalin vahvuuden mittaamiseen (RSSI, engl. received signal strength indicator). RSSI ilmaisee signaalin voimakkuuden heikentymistä signaalin lähettämisestä. UWB-tekniikka on tarkempi kuin BLE-tekniikka, koska BLE-tekniikka käyttää paikantamisessa RSSI-mittausta, kun taas UWB-tekniikka käyttää ToF-mittausta. Sisätilojen paikannustekniikoista esimerkiksi UWB-tarkkuuspaikannustekniikka on viime vuosikymmeninä herättänyt positiivista huomiota ominaisuuksiltaan verrattuna muihin radiotaajuuspohjaisiin sisätilojen paikannusjärjestelmiin. (Deputter, 2024; Elsanhoury et al., 2022; Viljamaa, 2024).

GPS on paikallistamisjärjestelmä, jonka paikannustarkkuus ulkotiloissa on noin 10 metriä. GPS-paikannusjärjestelmä ei toimi sisätiloissa. Wi-Fi-paikannusjärjestelmä (WPS, engl. Wi-Fi positioning system) käyttää sisätilapaikantamisessa antureita, jotka on asennettu erikseen tai Wi-Fi -infrastruktuuria, joka on valmiiksi olemassa. WPS:n tarkkuus on noin 5–15 m, joka on UWB-tekniikan 10–30 cm tarkkuuteen verrattuna huonompi. (Deputter, 2024)

Valotutka-menetelmässä (LIDAR, engl. light detection and ranging) käytetään pyörivää laseria etäisyyden ja kulman mittaamiseen esteestä. Pelkän LIDAR-menetelmän avulla ei voida saavuttaa paikannusta, joka on absoluuttinen. Jos olosuhteet ovat ideaalit, voi LIDAR-menetelmä yhdessä yhdistettyjen paikannustekniikoiden kanssa saavuttaa paikannuksen, jonka tarkkuus on absoluuttinen. (Deputter, 2024).

Kamerapohjainen paikannus hyödyntää tekoälyyn (AI, engl. Artificial Intelligence) rakentuvaa kuvankäsittelyä, useita kameroita ja niiden tukijärjestelmiä tai liikkuvaa kameraa. Liikkuvalla kameralla tarkoitetaan kameraa, joka on kiinnitetty paikannettavaan kohteeseen. Usean kameran käyttämistä kamerapohjaisessa paikantamisessa tulee haasteeksi kohteen tunnistaminen, etenkin kun kohteet ovat liikkuvia ja järjestelmän on tunnistettava kohde samaksi, kohteen liikkuessa yhden kameran näkymästä toiseen. Usean kameran järjestelmissä seurantavirheitä voivat aiheuttaa myös esimerkiksi huono valaistus tai kohteen epämuodostuminen kuvaan. Liikkuva kamera voi seurata vain yhtä paikannettavaa kohdetta, jonka takia se ei ole käytännöllinen, jos seurattavia kohteita on useita. (Deputter, 2024).

Radiotaajuustunnistus (RFID, engl. Radio Frequency Identification) käyttää tietojen lähettämiseen ja vastaanottamiseen radiotaajuuksia. RFID-tunnistetta käytettäessä on tunnistettavaan kohteeseen kiinnitettävä tarra yksilöllisillä tiedoilla. Tunnetuin RFID-sovellus on Near-field communication (NFC). RFID-tunnisteita on passiivisia ja aktiivisia. Passiivisilla RFID-tunnisteilla ei ole omaa virtalähdettä, kun taas aktiivisilla RFID-tunnisteilla on oma virtalähde. Passiivisen RFID-tunnisteen virhemarginaali on kolme prosenttia, kun taas aktiivisen RFID-tunnisteen virhemarginaali on 5–20 %. Taulukossa 2 on vertailutaulukko sisätilojen paikannustekniikoista: UWB, BLE, Wi-Fi, GPS, kamer, LIDAR ja passiivinen RFID. Taulukossa käsitellään paikannustekniikoiden tarkkuutta, skaalautuvuutta, reaaliaikaisuutta, oman infrastruktuurin sisältyvyys, etäisyysseuranta ja kustannuksia. (Deputter, 2024).

Taulukko 2. Sisätilojen paikannustekniikoiden vertailutaulukko (mukaillen Deputter 2024).

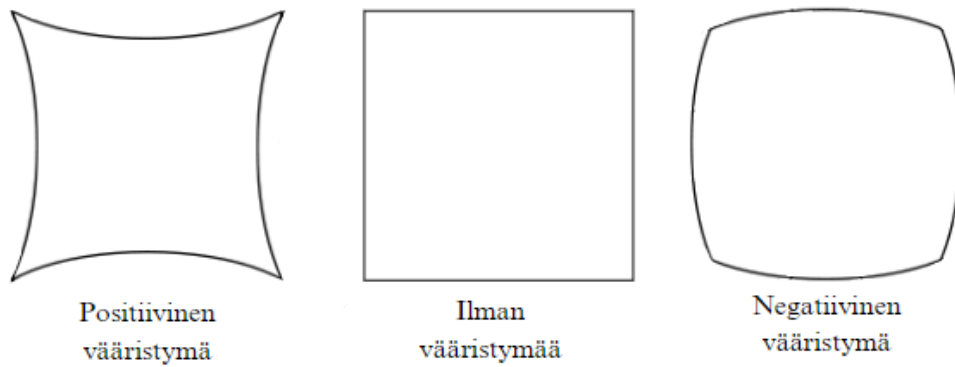
Järjestelmä	UWB	BLE	Wi-Fi	GPS	Kamera	Lidar	Passiivinen RFID
Tarkkuus (cm)	10–30	500	500–1500	500–1000 vain ulkotiloissa	10–30	1	Ei sovellettavissa
Skaalautuvuus	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	Kyllä
Reaaliaikaisuus	Kyllä	Kyllä	Voidaan saada reaaliaikaisesti, mutta hyvin pienellä päivitysnopeudella	Voidaan saada reaaliaikaisesti, mutta hyvin pienellä päivitysnopeudella	Kyllä	Kyllä	Ei
Oma infrastruktuuri	Ei	Ei. Tilanteissa, joissa Wi-Fi-tukiasemat tukevat BLE-paikannusta, ei tarvita erillistä infrastruktuuria	Ei/Kyllä. Wi-Fi-tukiasema on yleensä valmiiksi olemassa, jonka takia Wi-Fi-paikannus ei tarvitse erillistä infrastruktuuria	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei
Etäisyysseuranta (m)	20–30	20	30	Ei sovellettavissa	20	60–100	0,05–5
Kustannukset	Alhainen	Erittäin alhainen	Keskinkertainen	Keskinkertainen	Erittäin korkea	Erittäin korkea	Erittäin matala

### 3.5 Optinen vääristymä

Suurin osa kameroista aiheuttaa kameran kuvassa jonkinlaista vääristymää. Kuvassa 3 käsitellään kameroiden kuvissa esiintyviä vääristymiä, jotka aiheuttavat kuvan kaareutumista. Vääristymät jakautuvat kahteen pääkategoriaan, positiiviseen vääristymään (engl. pincushion distortion) ja negatiiviseen vääristymään (engl. barrel distortion). Vääristymän laatuun vaikuttavat kamerassa käytetty objektiivi, polttoväli ja etäisyys kuvattavaan kohteeseen. Ideaalitulanteessa kameran kuvassa ei ole vääristymää, mutta kamerakokoonpanossa tapahtuu sisäisiä virheitä, esimerkiksi kameran linssi ei ole paraabeli. (Mansurov, 2020; Weng et al., 1992).

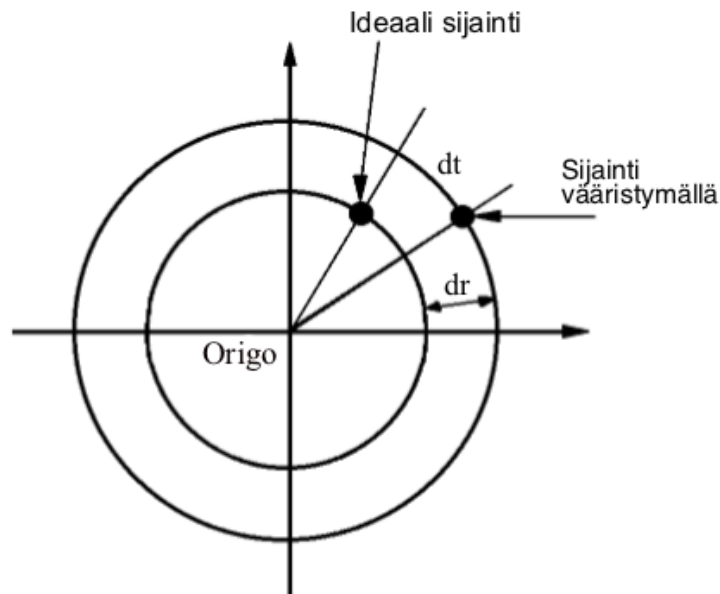
Kuvassa 3 esitetään kuvan negatiivinen vääristymä eli tynnyrivääristymä, jonka suorat linjat kaareutuvat sisäänpäin muotoutuen tynnyrimäiseksi. Negatiivinen vääristymä esiintyy objekteissa, jotka ovat laajakulmaisissa ja zoom-objektiiveissa, joissa on suhteellisen lyhyt polttoväli. Negatiivinen vääristymä johtuu objektin laajasta näkökentästä, koska se on laajempi kuin mikä on kuvakennossa. Kuvan linjat kaartuvat sisäänpäin objektin näkökentän sovittautuessa mahtuakseen kuvaan. Negatiivisessa vääristymässä vääristymisen määrän esiintymiseen vaikuttaa kameran ja sen kohteen välinen etäisyys. (Mansurov, 2020).

Positiivinen vääristymä esitetään kuvassa 3. Positiivinen vääristymä, eli tynnyväristymä, on vastakohta negatiiviselle vääristymälle. Positiivisen vääristymän kuvassa suorat linjat kaareutuvat ulospäin keskipisteestä muotoutuen tynnymäiseksi. Positiivista vääristymää esiintyy erityisesti kameroissa, joissa käytetään teleobjektiiveja. Positiivinen vääristymä tapahtuu, kun kuvakennon koko on suurempi kuin kuva-ala, minkä seurauksena optisen akselin kuva suurentuu kuvan reunoja kohti. Positiivisen vääristymän seurauksena kuva-alan ollessa pienempi kuva laajenee kuvan kulmiin voidakseen sopia kuvakennoon. (Mansurov, 2020). Objektiivin käyttö kamerassa aiheuttaa vääristymää kuvassa, jonka takia kamerasta saatu kuva edellyttää kalibrointia vääristymän korjaamiseksi. (Weng et al., 1992).



**Kuva 3.** Kamerassa esiintyvän positiivisen ja negatiivisen säteittäisen vääristymän vaikutus kuvaan sekä kameran kuva ilman vääristymää (mukaillen Weng et al. 1992).

Kuvassa 4 havainnollistetaan, miten kameran linssissä esiintynyt vääristymä siirtää kuvan pisteitä ulospäin niiden ideaalisesta sijainnista. Ideaalinen sijainti kuvaa pistettä, jossa kuvassa ei ole vääristymää, kun taas sijainti vääristymällä on piste, joka on siirtynyt kauemmas Origosta eli kuvan keskipisteestä radiaalisen vääristymän vaikutuksen vuoksi. Säteittäinen vääristymä  $dr$  on muutos ideaalisen- ja vääristyneen sijainnin välisessä etäisyydessä. Tangentiaalinen vääristymä  $dt$  on ideaalisen- ja vääristyneen sijainnin välillä tapahtunut pisteen siirtyminen tangentiaalisesti. (OpenCV, n.d.b; Weng et al., 1992).



**Kuva 4.** Säteittäinen ( $dr$ ) ja tangentiaalinen ( $dt$ ) vääristymä: Ideaali sijainti ja sijainti vääristymällä kameran optiikassa (mukaillen Weng et al. 1992).

Kameran kuvassa esiintyvää optista vääristymää ei voi poistaa kokonaan, mutta sen aiheuttama vaikutus kuvaan voidaan minimoida teknologian ja laskennallisten menetelmien avulla. Objektiivin käyttö kamerassa aiheuttaa vääristymää kuvassa, jonka takia kamerasta saatu kuva edellyttää kalibrointia vääristymän korjaamiseksi. Kameran kalibroinnin prosessissa määritellään ulkoiset ja kameran sisäiset parametrit. Tässä prosessissa parametrien määrittämisen lisäksi korjataan objektiivin aiheuttamaa vääristymää. (Weng et al., 1992).

Linssin vääristymän määrittäminen saadaan säännöllisellä ruudukolla. Säännöllisellä ruudukolla voidaan vääristymään kameran linssissä kuvaamiseen käyttää viivojen poikkeamaa suorien viivojen ideaalista. Kameralinssin etäisyys testikuvioon vaikuttaa linssivääristymään, joka esiintyy usein yhdessä projektiovääristymien kanssa. (Klette, 2014).

### 3.6 OpenCV-avoin lähdekoodikirjasto

Open Source Computer Vision Library (OpenCV) on avoimen lähdekoodin tietokonenäkö- ja koneoppimiskirjasto. OpenCV:tä käytetään infrastruktuurin luomiseen sovelluksissa, jotka käyttävät koneellista havaitsemista. OpenCV:llä on useita tuhansia optimoituja algoritmeja, joita voidaan käyttää esimerkiksi tunnistamaan ihmiskasvot ja korkealaatuisen kuvan tuottamiseksi yhdistämällä useita kuvia. OpenCV-kirjastossa on useita eri käyttöjärjestelmiä ja ohjelmointikieliä. (OpenCV Team, n.d.). Tutkimuksessa käytettiin OpenCV-lähde-koodikirjastoa kuvankäsittelyyn, kerätyn datan analysointiin ja käyttäjän kanssa vuorovaikutuksessa olevien toimintojen toteuttamiseen.

Tässä tutkimuksessa korjattiin manuaalisesti kameranlinssissä esiintyvä vääristymä kuvanmuokkauksella, jolloin `cv2.undistort()`-funktion käyttäminen ei ollut tarpeellista. Funktio `cv2.undistort()` mainitaan koodissa, sillä alun perin kuvaa ei ollut tarkoitus muokata manuaalisesti. Taulukossa 3 esitetään tutkimuksessa käytetyn kameran kalibrointiin ja kuvavääristymän korjaamisen keskeiset tehtävät, matemaattiset käsitteet ja niiden toteutukset.

**Taulukko 3.** Tutkimuksessa kalibrointiprosessin tehtävät, matemaattinen käsitteet ja niiden toteutukset.

Tehtävä	Matemaattisen käsite	Toteutus
Shakkilaudan havaitseminen	2D-3D-pisteiden vastavuus, homografia	<code>cv2.findChessboardCorners()</code> (OpenCV, n.d.b)
Kameran kalibrointi	Neulansilmäkamera-malli ja kuvavääristymän korjaus	<code>cv2.calibrateCamera()</code>
Kuvavääristymän korjaus	Käänteinen kuvavääristymämalli	<code>cv2.undistort()</code>
Keskipisteen laskeminen	Koordinaattien painotettu keskiarvo	<code>np.sum()</code> , <code>np.dot()</code>
Pikselikoordinaattien muunnos todellisen maailman koordinaateiksi	Skaalauskerroin	Kerrottuna skaalauskerroinella

Tutkimuksessa käytettiin transformaatiota OpenCV:n (n.d.b) sisäänrakennettujen omi-

naisuuksilla, joita ovat `cv2.findChessboardCorners()`, `cv2.undistort()` ja `cv2.calibrateCamera()`. Shakkikuvion sisältävästä kuvasta sisäänrakennettu ominaisuus `cv2.findChessboardCorners()` tunnistaa 2D-kuvapisteet  $(u,v)$ . 2D-kuvapisteet sovitetaan yhteen 3D-koordinaattien kanssa. (OpenCV, n.d.b).

## 4 Tutkimuksessa käytettävät koordinaatit ja koordinaattijärjestelmät

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksen UWB- ja optisen paikannuksen paikkatietojen käsittelyyn ja muuntamiseen käytetyt koordinaattijärjestelmät ja muunnokset. Luvun alussa esitellään peruskoordinaattijärjestelmät, WGS84-maantieteellinen järjestelmä ja projektiomatriisi. Projektiomatriisissa on kolme koordinaattijärjestelmää: kamera, kuva ja todellinen maailma (Fisher, 1997). Koordinaattijärjestelmien jälkeen käsitellään homogeeniset koordinaatit, joiden avulla yksinkertaistetaan paikannusjärjestelmien välisiä muunnoksia. Määrittelemällä avaruudelliset viitekehykset tarkasti, voidaan saavuttaa tarkka paikannus. Tutkimuksessa demonstroidaan Technobothnian koordinaattijärjestelmää, jonka takia luvussa esitellään UTM-mittauspisteillä täydennetty Technobothnian-koordinaattijärjestelmä. Technobothnian koordinaattijärjestelmän avulla voidaan yhdistää paikalliset ja globaalit viitekehykset.

### 4.1 Koordinaattijärjestelmät

Koordinaattijärjestelmien avulla voidaan esittää paikkatietoa koordinaattien avulla. Käyttämällä karttaprojektiota voidaan 3D Maan pinta esittää tasokoordinaatistolla. Karttaprojektiossa esiintyy projektiovirheitä vääristyneissä etäisyyksissä, pinta-aloissa, muodoissa ja suunnissa. Geodeettinen datumi määrittelee koordinaatiston origon, mittakaavan ja koordinaattiakselien suunnat. Vertausellipsoidin pintaa projisoidessa lieriön pinnalle ja lieriön levitettäessä tasoksi, muodostetaan suorakulmainen tasokoordinaatisto. (Maanmittauslaitos, 2025).

Vertausellipsoideja on erilaisia, joista useimmiten käytetään GRS80- tai WGS84-ellipsoideja. Suomen länsi- ja itäreunoilla syntyy mittasuhteisiin vääristymää Suomen alueen suuren pinta-alan vuoksi. Mittasuhteissa syntyneellä vääristymällä voi olla merkitystä tarkkoja koordinaatteja käyttävissä sovelluksissa. Vääristymän takia Suomen kunnissa on käy-

tössä ETRS-GKn-koordinaattijärjestelmiä, jonka takia ei esiinny projektiovirhettä. (Maanmittauslaitos, 2025).

WGS84 on geodeettinen datumi, joka määrittelee Maan muodon sekä leveys- ja pituusasteet. UTM (engl. Universal Transverse Mercator) on ruudukkopohjainen projisoitu koordinaattijärjestelmä, joka käyttää WGS84-datumia tasaisen kartan luomiseksi. WGS84-järjestelmässä määritellään maailmanlaajuinen sijaintijärjestelmä, kun taas UTM-järjestelmän ruudukkopohjalla voidaan tehdä tarkkoja mittauksia ja kartoituksia. Paikkatietojen käsittelyssä on yleistä UTM- ja WGS84-koordinaattien välinen konvertoiminen. Konvertoimiseen liittyvä prosessi sisältää matemaattisia kaavoja, jotka ottavat huomioon maapallon ellipsoidin muodon ja käytettävän UTM-vyöhykkeen. (GISGeography, 2022b; Maanmittauslaitos, 2025).

#### **4.1.1 Maantieteellinen WGS84-koordinaattijärjestelmä**

World Geodetic System 1984 (WGS84) on Amerikan Yhdysvaltojen puolustusministeriön maailmanlaajuinen maantieteellinen tasokoordinaattijärjestelmä, jonka on määritellyt ja jota ylläpitää National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Tasokoordinaattijärjestelmää WGS84 käytetään muun muassa GPS-standardeissa ja se käyttää Maan massakeskipistettä koordinaattijärjestelmän nollapisteenä. WGS84-tasokoordinaattijärjestelmä rakentuu ellipsoidista, standardoidusta koordinaattijärjestelmästä, korkeustiedoista ja geoidista. (GISGeography, 2022b; Toitū Te Whenua, n.d.). WGS84-tasokoordinaattijärjestelmän avulla määritellään maailmanlaajuinen sijainti, jossa käytetään pituus- ja leveysasteita maapallon pyöreää muotoa mukaillen. (GISGeography, 2022a).

Tasokoordinaattijärjestelmiä on useita erilaisia toteutuksia ja jokaisella on oma geodeettinen datumi. (Toitū Te Whenua, n.d.). Tätä käytetään kuvantamaan maapallon pinnalla olevien ei tunnettujen pisteiden sijaintia, kun geodeettinen datumi on tunnettu. (National Geodetic Survey, 2021). WGS84-tasokoordinaattijärjestelmä perustuu sferoidiin, joka käyttää kulmayksiköitä. (Esri, n.d.a).

WGS84-Maan muotoon perustuva karttaprojektio UTM-koordinaattijärjestelmä on suunniteltu pienempien ja selkeästi rajattujen maantieteellisten alueiden sisällä toteutettavaan paikannukseen. Karttaprojektiossa maapallon 3D-pistesijainnit muunnetaan 2D-tasokoordinaatistoon, jotta koordinaattitiedon käsitteleminen on helpompaa. Geodeettinen WGS84-koordinaattijärjestelmän tavoin UTM perustuu WGS84-ellipsoidiin, mutta UTM käyttää lineaarisia yksiköitä (Esri, n.d.a) (Esri, n.d.b). UTM-koordinaattijärjestelmässä maapallon pinta projisoidaan kaksiulotteiselle tasolle, ja paikannetun kohteen sijainti ilmaistaan lineaarisena yksikkönä koordinaattimuodossa projektiossa käytettävässä tassa. (GISGeography, 2022a).

#### 4.1.2 Todellisen maailman koordinaatit

Todellisen maailman koordinaatit muodostavat koordinaatistojärjestelmän, jonka avulla voidaan määrittää objektin sijainti ja asento. Jotta todellisen maailman koordinaatit voidaan muuntaa kuvatason koordinaateiksi, on koordinaatit muunnettava ensin todellisen maailman koordinaateista kamerakoordinaatteihin, minkä jälkeen koordinaatit muunnetaan kamerakoordinaateista kuvatason koordinaateiksi. Kalibrointikuvion, esimerkiksi shakkiruudun, avulla voidaan yhdistää todellisessa maailmassa tunnettujen koordinaattien pisteet niitä vastaaviin kuvakoordinaattien pisteisiin. Pistepareilla voidaan laskea kameran sisäiset ja ulkoiset parametrit yhtäaikaisesti. (OpenCV, 2025).

Euklidinen muunnos kameran ja todellisen maailman koordinaattien välillä on yhtälön 1 mukainen (Fisher, 1997). Projekttiivisen- ja homogeenisen muunnoksen yhdistämällä saavutetaan muunnos, joka kuvaa todellisen maailman koordinaatit kuvatason koordinaateiksi. (OpenCV, 2025).

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{R}\mathbf{X}_w + \mathbf{T} \quad (1)$$

Yhtälössä 2 muunnetaan todellisen maailman koordinaatit  $(X_w, Y_w, Z_w)$  kamerakoordi-

naatteihin  $(X_c, Y_c, Z_c)$ . Yhtälössä muunnos ottaa huomioon kameran sijainnin ja suunnan todellisessa maailmassa. Yhtälössä  $\mathbf{R}$  kiertomatriisi kohdistaa todellisen maailman akselit kameran akseleihin. Yhtälössä  $\mathbf{T}$  on siirtovektori, joka siirtää maailman origon kameran origoon. Yhtälössä käytetään  $\mathbf{0}^T$  homogeenisten koordinaattien säilyttämiseen. (Fisher, 1997).

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Yhtälössä 2 projisoidaan 3D-kamerakoordinaatit 2D-kuvan pikseleiksi (Fisher, 1997). Todellisen maailman- ja kameran koordinaattien muunnos toisiinsa tehdään lineaarisella muunnoksella (Klette, 2014). Yhtälö 3 määrittelee  $3 \times 4$  projektimatriisin Euklidisesta 3-avaruudesta kuvaan yhtälöiden 4 mukaisesti. (Fisher, 1997).

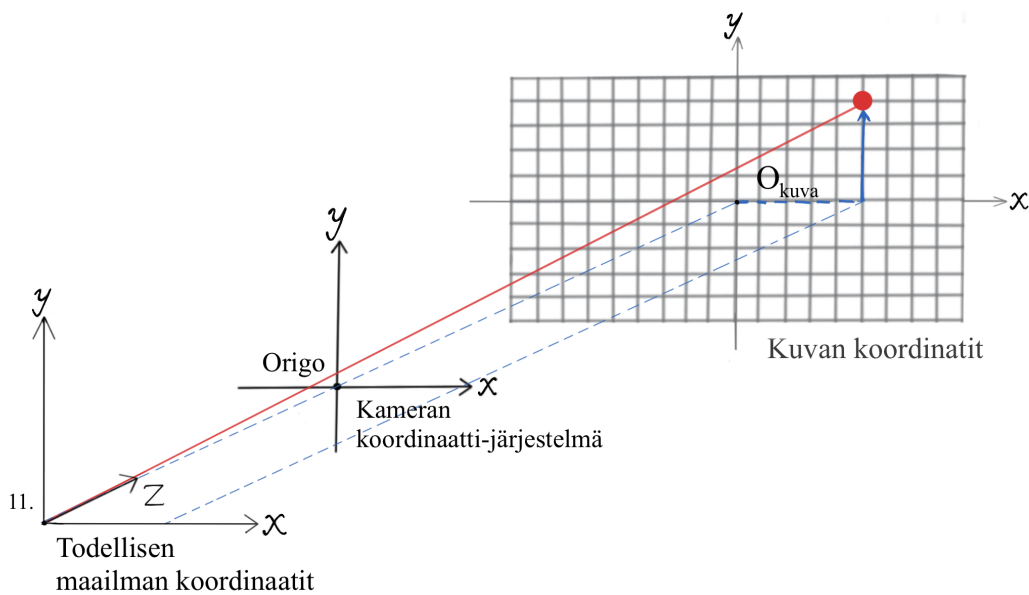
$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C}[\mathbf{R}|\mathbf{T}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \mathbf{C}[\mathbf{R}|\mathbf{T}] \quad (4)$$

### 4.1.3 Kamerakoordinaatisto

Kuvassa 5 esitetään todellisen maailman- ja kamerakoordinaatiston projektiot kuvakoordinaatistossa. Todellisen maailman koordinaatisto on 3D-koordinaatisto, joka muodos-

tuu akseleista  $x$ ,  $y$  ja  $z$ . Todellisen maailman koordinaatistossa määritellään kuvateen sijainti. Kameran koordinaattijärjestelmä on 2D-koordinaatisto, joka muodostuu akseleista  $x$  ja  $y$ . Myös kuvan koordinaatit ovat 2D-koordinaatistossa, joka muodostuu akseleista  $x$  ja  $y$ . Kameran koordinaattijärjestelmässä kamera on aseteltu niin, että kuvatasolle projisoituu todellisen maailman koordinaattien pisteet. Kuvan taso on taso, johon on projisoitu kameran 3D-pisteet. Kuvassa esitetty punainen projisointiviiva osoittaa todellisen maailman 3D-pisteen kuvatasolla kameran linssin kautta. Kuvassa esitetään jokaisen koordinaatiston origot. (Fisher, 1997; OpenCV, 2025).



**Kuva 5.** Todellisen maailman- ja kamerakoordinaatiston projektio kuvakoordinaatistoon (mukaillen Fisher 1997 ja OpenCV 2025).

Yhtälössä 5 esitetään 3D-piste  $(X_c, Y_c, Z_c)$  kamerakoordinaateilla projisoituna 2D-tasolle. Perspektiiviprojektioilla määritetään projektio, jossa kuvatason  $(x_c, y_c)$  koordinaatit lasketaan polttovälin  $f$  avulla. (Fisher, 1997; OpenCV, 2025).

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, \text{ missä } \lambda = \frac{f}{Z_c}. \quad (5)$$

Yhtälössä 6 esitetään lineaarinen kartoitus homogeenisten koordinaattien välillä. Yhtälössä  $3 \times 4$ -projektiomatriisi esittää 3D:n ja 2D:n välistä suhdetta. (Fisher, 1997; OpenCV, 2025).

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

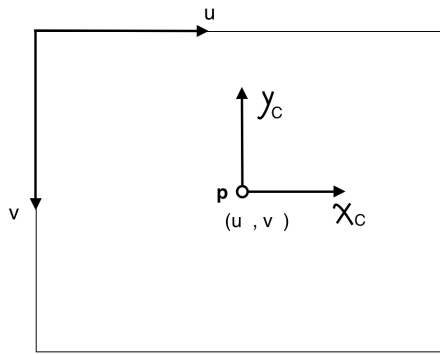
Kameran kuvan ja kuvapisteen koordinaatit säädetään vastamaan todellisia koordinaatteja kalibroitukuvion avulla, jolloin myös kamera laskee tarvittavat kertoimet korjaamaan optiikan aiheuttamaa kuvan vääristymää.

#### 4.1.4 Kuvakoordinaatisto

Projektiomatriisissa on kolme koordinaattijärjestelmää: kamera, kuva ja todellinen maailma (Fisher, 1997). Digitaalinen kuva koostuu pikseleiden sarakkeista ja riveistä. Kuva-koordinaatistossa pikseli voidaan tunnista sarakkeen- ja rivin numeron kokonaislukuparilla (Eck, 2021).

Yhtälö 7 osoittaa kamerasisäisen muunnoksen, jossa 3D-koordinaatit  $(x_c, y_c, f)$  muutetaan 2D-pikselikoordinaateiksi  $(u, v)$ . Yhtälössä 7  $k$ :n yksiköt ovat pikseli kuvan pituutta kohden. Kuvassa 6 esitetään kamerasisäiset parametrit. Kameran sisäiset parametrit ovat osa yhtälöä 7. (Fisher, 1997).

$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fk_u & 0 & u_0 \\ 0 & -fk_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix} \quad (7)$$



**Kuva 6.** Kameran sisäiset parametrit (mukaillen Fisher 1997).

Yhtälössä 8 esitetty on kameran matriisi  $C$ , joka antaa kuvan pisteen ja säteen välisen muunnoksen euklidisessa 3D-avaruudessa. (Fisher, 1997).

$$C = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Yhtälössä 8 esitetty  $\alpha_u$  on  $fk_u$  ja  $\alpha_v$  on  $-fk_v$ . Kun kamera on kalibroitu, se pystyy toimimaan suunta-anturina. Suunta-anturi mittaa säteiden suunnan 2D-suuntamittarin tavoin. Kun kameran matriisi  $C$  on määritetty, kamera on kalibroitu. (Fisher, 1997).

## 4.2 Homogeeniset koordinaatit

Kameran mallinnuksessa on hyödyllistä rajoittaa skaalautumisen vapautta ja erottaa toisistaan vastakkaiset suunnat. Kameran mallinnuksessa on otettava huomioon, että pisteet sijaitsevat aina kameran edessä. Kameran edessä sijaitsevat pisteet johtavat orientoituihin entiteettien esittämiseen, joka on vain positiivisella skalaarilla kertomisen suhteen muuttumaton. (Förstner & Wrobel, 2016).

Käyttämällä kahden koordinaatin sijasta kolmea koordinaattia homogeeniset koordinaatit

määrittelevät pisteen tasossa. Koordinaatistoa kutsutaan homogeeniseksi, koska sen avulla voidaan muuntaa funktioita ilman, että käyrän aste muuttuu. (Vince, 2012). Homogeenisiä koordinaatteja käytetään tietokonenäössä ja grafiikassa, koska homogeenisten koordinaattien avulla kääntämisen, kiertämisen, skaalauksen ja perspektiiviprojektion kaltaiset operaatiot voidaan toteuttaa matriisioperaationa. (Prateek, 2014).

Homogeeniset koordinaatit ovat projektiogeometriassa käytettävä koordinaattijärjestelmä. Geometrisia kokonaisuuksia euklidisessa avaruudessa puolestaan esittävät epähomogeeniset koordinaatit. Homogeenisiä koordinaatteja käytetään äärettömyyden käsitteen esittämisessä. Homogeenisiä koordinaatteja käytetään heijastamaan 3D-näkymä 2D-kuvatasolle. Homogeeniset koordinaatit yksinkertaistavat suoran lineaarisuuden säilytettävien muunnosten yhdistämistä ja kääntämistä, koska muunnokset esitetään matriisivektoritulona. Homogeeniset koordinaatit yksinkertaistavat annetuista elementeistä rakennettuja geometrisia elementtejä. Tämän lisäksi ne yksinkertaistavat geometrisien rajoitusten ilmaisemista homogeenisina yhtälöinä. (Förstner & Wrobel, 2016).

3D-euklidisessa geometriassa pisteet ja objektit esitetään x-, y- ja z -koordinaateilla, joilla avaruudessa mitataan pisteiden sijaintia. 3D-koordinaatistosta siirryttäessä 2D-koordinaatistoon euklidisen geometrian säännöt pysyvät voimassa. (Prateek, 2014). Euklidinen koordinaattijärjestelmä on kohteen sijainnin kuvaamiseen käytettävä koordinaattijärjestelmä (Förstner & Wrobel, 2016; Prateek, 2014). Homogeeniset 3D-koordinaatit esitetään 4D-vektoreina. 4D:n vektorin neljäs koordinaatti on eri luku kuin 0 (Prateek, 2014).

Perspektiiviprojektion matriisilla kuvataan kamera, joka homogeenisten koordinaattien avulla kuvaa 3D-pisteen 2D-kuvaan. Perspektiiviprojektio voidaan esittää yhtälöllä 9, missä  $\lambda = \frac{f}{z_c}$ . Yhtälön 9 lineaarisena kartoituksena homogeenisten koordinaattien välillä saadaan yhtälö 10. (Fisher, 1997; Prateek, 2014).

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 4.3 Kameran ulkopuolisten parametrien transformaatiot

Kameran ulkopuolisia parametreja käytetään, kun kameran koordinaatistoa suhteutetaan todellisen maailman koordinaatistoon. Kameran ulkopuolisia parametreja ovat translaatio eli siirtomuunnos (engl. translation) ja rotaatio eli kierto (engl. rotation). (Nam, 2022; Ohler, 2009). Homogeenisten koordinaattien avulla voidaan toteuttaa translaatio ja rotaatio matriisioperaatioina (Prateek, 2014).

Kameran ulkoinen orientaatio määritellään rotaatiomatriisilla  $R$  ja translaatiovektorilla  $t$ , jotka toisiinsa liittävät kameran- ja todellisen maailman koordinaatistot (Ohler, 2009). Rotaatiomatriisi (engl. rotation matrix) on lineaarialgebrassa käytettävä muunnosmatriisi Euklidisessa avaruudessa rotaation suorittamiseen. Yhtälössä 11 esitetään rotaatiomatriisi  $R(\theta)$ , missä kiertokulma on  $\Theta$ . Yhtälössä 12 esitetään 3D-rotaatiomatriisi, jossa matriisi rotaatioi 3D-pistettä Z-akselin ympäri kulmalla  $\Theta$ . (Vince, 2012).

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Kun 2D-kartesiokoordinaatit (engl. Cartesian coordinates) korvataan 3D-homogeenisilla koordinaateilla, jokaiseen  $(x, y)$ -pariin liitetään 1. Tämä ratkaisee translaatiomuunnoksen luomiseen liittyvän ongelman, koska translaatiota ei voida esittää lineaarisena muunnoksena 2D-kartesiokoordinaatistossa. Yhtälössä 13 esitetään translaatio, joka on homogeenisenä matriisimuunnoksena yhtälö 14. Muodon geometria ei voi muuttua, koska muodon jokaiseen pisteeseen tehdään translaatio. (Vince, 2012).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + t_x \\ y + t_y \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Käyttämällä homogeenisia koordinaatteja voidaan suorittaa tasossa määritettyjä laskutoimituksia kattaen tapaukset, joita ei voida tehdä epähomogeenisten  $(x, y)$ -koordinaattien takia (Klette, 2014).

Uudet akselit saadaan yhtälön 15 mukaisesti, kun suhteessa vertailujärjestelmään koordinaatistoa rotatoidaan ja translatoidaan. Alkuperäisessä koordinaatistossa olevan pisteen tietämiseksi uudessa koordinaatistossa on koordinaateista  $P(x, y)$  erotettava järjestelmän siirtymä  $(x - t_x, y - t_y)$ . (Vince, 2012).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -t_x \\ 0 & 1 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

#### 4.4 Paikallisen koordinaatiston määrittäminen UTM-kalibroinnin avulla

UTM-koordinaatit ovat kartografinen projektiojärjestelmä, joka kertoo paikannetun sijainnin metreinä merenpinnan yläpuolella. UTM-koordinaatit lisäävät tarkkuutta sijainnissa maantieteellisille pisteille, kulmille ja etäisyyksille. UTM-koordinaatit projisoidaan maapallon yli pinnalle, joka on sylinterimäinen. Hyvän tarkkuuden saavuttamiseksi, sijaintia ja etäisyyttä laskettaessa, säilytetään kulmien arvo. UTM-koordinaatistojärjestelmää käytetään esimerkiksi tietokoneohjelmissa mittausten tarkkaa asettamista varten. (MeteorologyenRed, n.d.).

Matemaattisilla kaavoilla ja algoritmeilla voidaan UTM-koordinaatit muuntaa maantieteellisiksi koordinaateiksi, jolloin saadaan paikannettavan kohteen sijainti leveys- ja pituusasteissa. Muunnokset huomioivat UTM-koordinaattien vyöhykkeen, pohjoisen- tai eteläisen pallonpuoliskon, koordinaattien etäisyyden keskilinjasta ja keskimeridiaanista. UTM-koordinaateilla, jotka eivät ole todellisen maailman koordinaatteja, saavutetaan tarkka maantieteellinen paikannus tietyn rajatun alueen sisäpuolella. (MeteorologyenRed, n.d.). Kaista, jolla Suomi sijaitsee, sijoittuu noin 13 asteen levyiselle projektiokaiselle itäisen pituusasteiden 19–32 välille. UTM-järjestelmän 19–32 kaistojen lisäksi Suomi ulottuu myös kaistoille 34 ja 36. Kaista 35 on ETRS-TM35FIN-järjestelmässä levitetty kattamaan koko Suomen alue. (Maanmittauslaitos, 2025).

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan todellisen maailman koordinaattien hyödyntämistä optisen paikannusjärjestelmän Origon paikannuskoordinaattien määrittämiseksi käyttäen Technobothnian karttaa ja siihen liittyviä tietoja käytännön esimerkkinä. Tutkimuses-

sa hyödynnettiin ammattikorkeakoulu Yrkeshögskolan Novian opiskelijoiden Takymetrilla mitattavia karttaprojektiojärjestelmän Universal Transverse Mercator (UTM)-mittauspisteitä Technobothnian tiloista. Kuvassa 7 on Takymetrilla mitatut mittauspisteet merkittyinä Technobothnian pohjapiirustukseen. Määritetyt todellisen maailman koordinaatit eivät voi olla tarkempia kuin mitä on todellisen maailman koordinaattien määrittämiseen käytetty takymetri.



**Kuva 7.** Takymetrilla mitatut mittauspisteet merkittyinä Technobothnian karttaan. Georeferoitu Technobothnian pohjapiirustus (mukaillen Petri Välisuo, 2022).

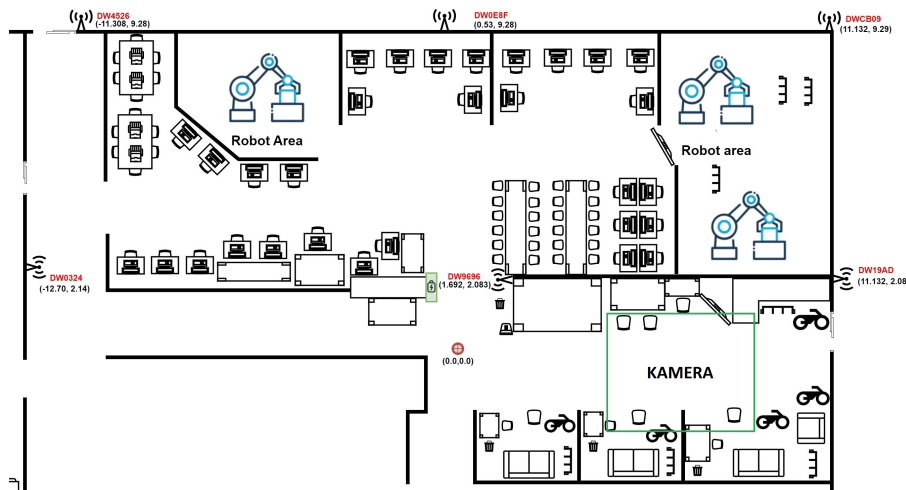
Tämän tutkimuksen esimerkissä käytetty optinen paikannusjärjestelmä perustuu UTM-koordinaateilla tunnettuihin referenssipisteisiin. Todellisen maailman koordinaattien tarkkaan paikantamiseen tarvitaan koordinaatit WGS84-koordinaatteina. UTM-mittauspisteiden avulla lasketaan kameran keskipisteen eli origon sijainti todellisen maailman koordinaatistossa. Kaikki optiseen paikantamiseen käytetyn kameran havaitsemat pisteet ovat 2D-tasolla, jotka havaitaan lattiatasolla. Tutkielman esimerkistä kuvasta 7 on laskettu UTM-mittauspisteiden koordinaatit taulukkoon 4, johon piste 11 eli origo on merkattu kameran keskipisteeksi. Koska piste on määritetty origoksi, voidaan kameralla saatujen kuvantason

koordinaattien koordinaatit muuntaa todelliseen maailman koordinaateiksi.

**Taulukko 4.** Takymetrimittaukset UTM-koordinaateilla Technobothnia-rakennukseen kuvan 7 mukaisesti merkityistä mittauspisteistä .

Piste	Pisteen nimi	Leveysaste	Pituusaste
1.	103	63,10457643	21,59488593
2.	9001	63,10454216	21,59483291
3.	104	63,10449675	21,59486003
4.	9002	63,10434772	21,59504992
5.	107	63,10434281	21,59510493
6.	108	63,10439841	21,59539793
7.	3.1	63,10484953	21,59587543
8.	3.4	63,10450714	21,59620036
9.	1.1	63,10462183	21,59467441
10.	1.3	63,10461194	21,59462268
11.	Origo	63,104463	21,595052

Kuvassa 8 on pohjapiirros tutkielman esimerkissä esitetystä Technobothnian laboratorion alueesta, jolla Decawace MDEK1001 - UWB-kehityssarja otettiin käyttöön (Elsanhoury, 2022). Esimerkissä Technobothnian laboratorion pohjapiirrokseseen on merkitty kameran näkökenttä, joka on kuvannut kameran havaintokulmassa olevan alueen.



**Kuva 8.** Vaasan yliopiston Technobothnian laboratorion pohjapiirroksen tukiasemien sijoituspaikat ja kameran rajaaman alueen sijainti pohjapiirroksessa vihreällä (mukaillen Mahmoud Elsanhoury, 2022).

Mittauksissa valitaan vertailupisteeksi Origo-piste. Kun tiedetään pisteen sijainti UTM-koordinaatistolla ja kameran kuvan koordinaateissa, lasketaan muiden kameran kuvan koordinaatistolla olevien pisteiden sijainnit todellisen maailman koordinaatistolla, suhteessa tiedettyyn pisteeseen. Kameran sijainti todellisen maailman koordinaateissa saadaan laskemalla kameran kuvassa olevan Origo-pisteen sijainti todellisen maailman koordinaatistossa, sillä niiden koordinaatit ovat identtiset. Mikäli näin ei olisi, pitäisi kameran todellisen maailman koordinaatit määrittää erikseen.

Tutkimuksessa esimerkkinä käytettävillä Technobothnian laboratorion mittauspisteillä voidaan kuvassa 7 esitetyn Technobothnian koordinaatiston avulla määrittää kameran keskipisteen eli origon koordinaatit todellisessa maailmassa. Technobothnian koordinaatit ovat todellisen maailman koordinaatteja. Technobothniasta tehtiin koordinaatisto, koska tämän tutkimuksen esimerkissä hyödynnetään Technobothnia-rakennuksen piirustuksia kameran keskipisteen todellisen maailman koordinaattien laskemisessa. Kun kameran keskipisteen koordinaatit Technobothnian laboratorion tilassa on määritelty, voidaan kamerasta löydetty koordinaatit määrittämään WGS84-koordinaatistossa.

Tämän tutkimuksen esimerkissä optisessa paikantamisessa käytetyn kameran resoluutio on 2592 pikseliä vaakasuunnassa ( $X_{pixels}$ ) ja 1936 pikseliä pystysuunnassa ( $Y_{pixels}$ ). Tämä tarkoittaa, että kameran kuvaresoluutio  $res_{xy}$  on 5018112 pikseliä eli noin 5 megapikseliä (MP), joka saadaan pysty- ja vaakasuunnan pikselien tulona laskentayhtälössä 16. Esimerkissä laskettu resoluutio mahdollistaa tarkan kuvantamisen, mikä on välttämätöntä kohteiden tunnistamiseksi kuvasta.

$$res_{xy} = X_{pixels} \cdot Y_{pixels} \quad (16)$$

Kun tunnetaan kameran pikselimäärät sekä vastaavat todellisen maailman pituudet vaak- ja pystysuunnassa, voidaan laskea pikselien ja senttimetrien välinen suhde. Tämän avulla pystytään muuntamaan pikselikoordinaatit todellisen maailman koordinaateiksi.

Esimerkin tutkimusympäristössä todellisen maailman ja kameran mittasuhteeksi laskettiin 0,026453125 senttimetriä per pikseli, mikä tarkoittaa, että jokainen kameran pikseli vastaa 0,026453125 senttimetriä todellisessa maailmassa.

## 5 Tutkimusprosessi

Tämä teoreettinen tutkimus on tarpeellinen, koska sen avulla voidaan määrittää UWB-paikannustekniikan tarkkuus ja sen luotettavuus varastoympäristöissä. Tutkimusongelmana on UWB-paikannustekniikan tarkkuuden määrittäminen optisella (2D) -paikannustekniikalla. Tutkimuksesta saatua tietoa voidaan hyödyntää varastoympäristöissä ja se on sovellettavissa myös muiden paikannustekniikkojen tarkkuuksien määrittämiseen sekä tarkan paikkatiedon saavuttamiseen kameralla. Sisätilapaikannus on tärkeä teknologia monille teollisuudenaloille esimerkiksi varastoinnissa ja logistiikassa. Tarkat paikannustiedot mahdollistavat tehokkaamman varastonhallinnan ja helpottavat muun muassa tavaran seuranta ja käsittelyä.

Luvussa 4.4 esitetyn Technobothnian laboratorion tilan koordinaatiston esimerkin avulla havainnollistetaan teoriaa UTM-koordinaattien määrittämisestä. Tutkimuksen tavoitteena on antaa ohjeet optisen paikannusjärjestelmän UWB-sisätilapaikannuksen tarkkuuden arvioimisen testiympäristön rakentamiseksi sekä määrittää testauksessa käytettävät menetelmät ja paikannuksesta saatujen virheiden analysointitavat.

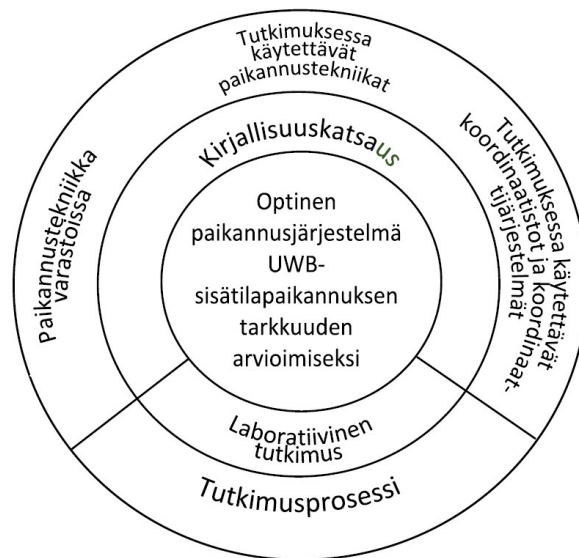
Tämän tutkimuksen tutkimuskysymykset ovat seuraavat

- 1) Soveltuuko optinen 2D-paikannusjärjestelmä teoriassa UWB-paikannusjärjestelmän tarkkuuden arvioimiseen yksinkertaisessa staattisessa tilanteessa?
- 2) Kuinka teoriassa määritetään UWB-paikannusjärjestelmän tarkkuus optisella paikannustekniikalla?

Tutkimuksen tavoitteena oli muodostaa teoreettinen ymmärrys siitä, kuinka tarkasti kaksiulotteinen (2D) -paikannusjärjestelmä pystyy arvioimaan UWB-järjestelmän tarkkuutta. Tutkimuksen lopputuloksena on teoreettinen vastaus tutkimuskysymyksiin, joita voivat hyödyntää varastotilojen paikannustekniikkaa kehittävä yritykset.

Tämä tutkimus oli osa TULEVA-hankkeen työpaketteja. Hanke oli määritellyt tämän tutkimuksen ajankohdan. Hankkeessa tehdyt päätökset ja rajaukset vaikuttivat tämän tutkimuksen aiheeseen, tutkimuskysymysten asetteluun, tutkimuksen toteuttamiseen sekä siinä käytettäviin menetelmiin, välineisiin ja laitteisiin. Tämä tutkimus on ajankohtainen, koska tulevaisuudessa Ultra-Wideband (UWB) tekniikan käyttäminen sisätilapaikannuksessa tulee yleistymään nopeasti (Välisuo, 2022).

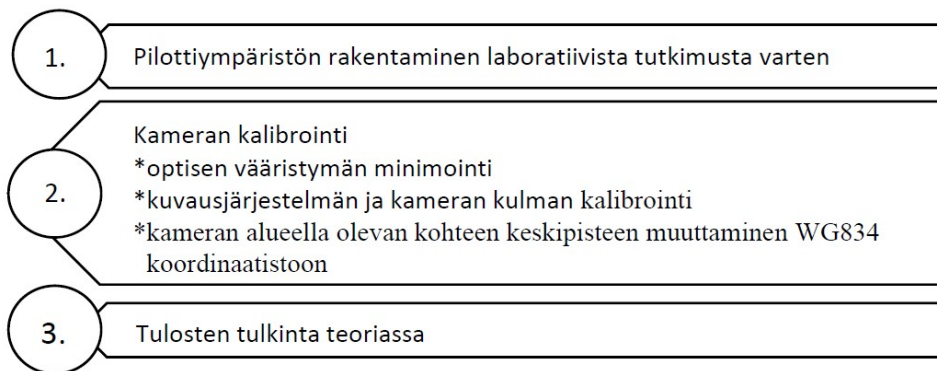
Kuvassa 9 on visualisoitu tämän tutkimuksen viitekehys ja tutkimusasetelma. Uloimmasa kehässä ovat tutkimuskohteet, joita ovat paikannustekniikka varastoissa, tutkimuksessa käytettävät paikannustekniikat sekä tutkimuksessa käytettävät koordinaatistot ja koordinaattijärjestelmät. Sisemmässä kehässä ovat tutkimusmenetelmät, joita ovat laboratiivinen tutkimus ja kirjallisuuskatsaus. TULEVA-hanke järjesti tämän tutkimuksen laboratiivisen tutkimuksen toteuttamiseen tarvittavat välineet ja tutkimuslaboratoriotilan Technobothniasta, Vaasan yliopistolta. Sisemmässä ympyrässä on optinen paikannusjärjestelmä UWB-sisätilapaikannuksen tarkkuuden arvioimiseksi, jossa yhdistetään uloimman ympyrän sektoreista koostetut tiedot. Ne esitetään teoreettisina ratkaisuihin, joilla tämän tutkimuksen tulokset voidaan siirtää käytäntöön.



**Kuva 9.** Tutkimuksen viitekehys ja tutkimusasetelma.

Kuvassa 10 on esitetty tutkimusprosessin vaiheet 1–3. Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa rakennettiin Vaasaan Technobothnian tutkimuskeskukseen varasto-olosuhteita to-

dentava pilottiympäristö optisen paikantamisen mittauksia varten. Pilottiympäristön rakentamisessa tuli huomioida muun muassa valon määrä ja esteettömyys. Tässä vaiheessa Novia ammattikorkeakoulun opiskelijaryhmä mittasi pilottiympäristössä Takymetrilla todellisen maailman koordinaatit heille annetuista sijainneista. Toisessa vaiheessa keskityttiin kameran kalibrointiin, jossa huomioitiin optinen vääristymä sekä kuvausjärjestelmän ja kameran kulman kalibrointi. Kameran alueella oleva keskipiste muutettiin WGG834-koordinaatistoon. Kolmannessa vaiheessa tuotettiin teoriatietoa siitä, miten tutkimusprosessissa syntyneet mittaustulokset tulkitaan. Tulosten vertailu auttoi ymmärtämään, miten UWB- ja optinen paikannustekniikka toimivat varastotekniikassa ja mitkä tekijät vaikuttivat niiden tarkkuuteen.



Kuva 10. Tutkimusprosessin vaiheet 1–3.

## 5.1 Kameran kalibrointi

Kameran sisäiset parametrit määrittää yleensä kameran valmistaja, mutta valmiiksi määritetyt tiedot eivät usein ole tietokonenäköön perustuviin sovelluksiin riittävän tarkkoja. Tämän vuoksi kameran sisäiset parametrit on kalibroitava. Kameran kalibroinnissa käytetään geometrisia kuvioita, joita voidaan mitata erittäin tarkasti 2D- ja 3D-pinnoilla. Geometriset kuviot tallennetaan ja ne paikannetaan saatujen kuvien tuloksena. Geometrisien kuvioiden ulkonäköä kuvaruudukossa verrataan geometristen kuvioiden mittaustuloksiin todellisessa maailmassa. (Vince, 2012).

Jokaisella kameralla on oma kamerakoordinaatisto. Kamerakoordinaatiston origo sijait-

see kameran projektiokeskipisteessä. Kamerakoordinaatistossa origo toimii kameran sisäisen koordinaatiston nollapisteenä suhteessa optiseen akseliin. Kalibrointilaitetta voidaan käyttää määrittelemään todellisen maailman koordinaatit kuvasta, sillä hetkellä, kun laitteella otetaan kuva. Kameran kalibroinnissa tarkastellaan koordinaattimuunnosta todellisen maailman koordinaateista kameran koordinaatteihin, objektiivinen vääristymä kuvattuna todellisen maailman koordinaateista ja kameran koordinaattien keskusprojektion vääristymättömiin kuvakoordinaatteihin. Kameran kalibroinnissa määritellään myös pääpisteen avulla siirto todellisen maailman koordinaatteihin, joka määrittää kameran anturin koordinaatit. Kameran kalibroinnissa lisäksi muunnetaan anturikoordinaatit kuvamuistin pikselikoordinaateiksi. (Vince, 2012).

Paikannusjärjestelmän kalibrointi oli tärkeä osa tätä tutkimusta, jotta kohteen sijainnin paikantamisen data on luotettavaa. Kameran kalibrointi edellyttää kameran sisäisten- ja ulkoisten parametrien laskemista. Nämä parametrit saadaan laskettua ottamalla testikuvioita, jotka antavat joukon kulmapisteitä laskemista varten. Testikuvio voi olla esimerkiksi kuva shakkilaudasta. Tarkempien ja luotettavampien kameran parametrien saavuttamiseksi testikuvioita tarvitaan vähintään 10 kappaletta. Kameran kalibroinnissa tärkeitä tietoja ovat syöttötiedot todellisen maailman 3D-pisteiden joukosta ja niiden vastaavista 2D-koordinaateista kameran kuvassa. (OpenCV, n.d.b).

Kaikki kamerat aiheuttavat perspektiivivääristymiä. Erityisen merkittäviä perspektiivivääristymät voivat olla laajakulmaisissa objektiiveissa, koska kuvakulma on laaja ja kuvassa on paljon ympäristöä. Perspektiivivääristymä aiheutuu siitä, että kamera tallentaa kuvan kolmiulotteisesta maailmasta kaksiulotteiselle kuvapinnalle muuttaen muun muassa kohteiden sijainnin ja koon suhteessa toisiinsa. Tällöin suora linja näyttää kaarevalta tai vinolta, ja kuvan reunat voivat olla epäselviä. Tämän kaltaiset vääristymät ovat korjattavissa jälkikäteen esimerkiksi ohjelmistoilla, jotka muuttavat kuvan perspektiiviä. (Mansurov, 2020; Weng et al., 1992).

Halvat neulanreikäkamerat (engl. pinhole camera) aiheuttavat kameran kuvaan vääristymää, joista kaksi tunnetuinta ovat säteittäinen- ja tangentialinen vääristymä (OpenCV,

n.d.b). Kameran kalibrointiprosessissa on otettava huomioon kameran kuvassa tapahtuva säteittäinen vääristymä. Kun kalibroidun kameran kuvasta tunnetaan piste, voidaan laskea 2D-projisoitu piste. Jos kameran kuvassa on vääristymää, se on huomioitava kameran kalibroinnissa, jotta saadaan tarkka projektio alkuperäisestä 3D-pisteestä. (Lefèvre & Drap, 2016). UWB-paikannuksen tarkkuus voidaan määrittää kameran pikselien todellisen maailman koordinaateista.

### **5.1.1 Demonstraatio pilottiympäristön rakentamisesta ja kameran kalibroinnista Technobothnialla**

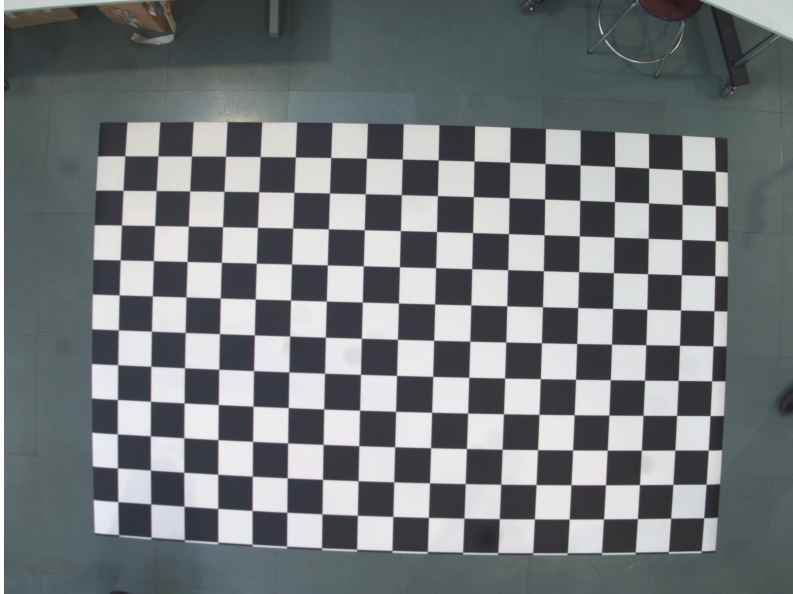
Tutkimusta varten rakennettiin pilottiympäristö demonstroimaan optisen paikantamisen mittauksia. Tutkimusympäristönä toimi entinen Vaasan puuvillatehdas Technobothnia, jossa oli mahdollista toteuttaa simuloitava ympäristö tutkimukselle ja mittauksille. Technobothnian rakenteellinen samankaltaisuus nykyvarastojen kanssa teki siitä mahdollisen kohteen optisen paikantamisen mittauksille. Tutkimuksessa valittiin alue, jonka lattian sivun pituus oli noin 2–3 metriä, jotta kameran resoluutio on 5 MP. Resoluutio 5 MP tarkoittaa sitä, että optisen paikannuksen tarkkuus voi olla senttimetrin murto-osa. (Henkilökohtainen keskustelu, P. Välisuo, 14.01.2022). Kuvassa 11 olevan pilottiympäristön rakentaminen demonstraatiota varten oli monivaiheinen prosessi, jossa oli huomioitava esimerkiksi ympäristön rakenne ja valaistusolosuhteet, kameran asettelu ja kalibrointi sekä mittalaitteen käyttö. Tässä tutkimuksessa shakkikuvion sijasta käytetään mustavalkoista ruudukkomattoa.



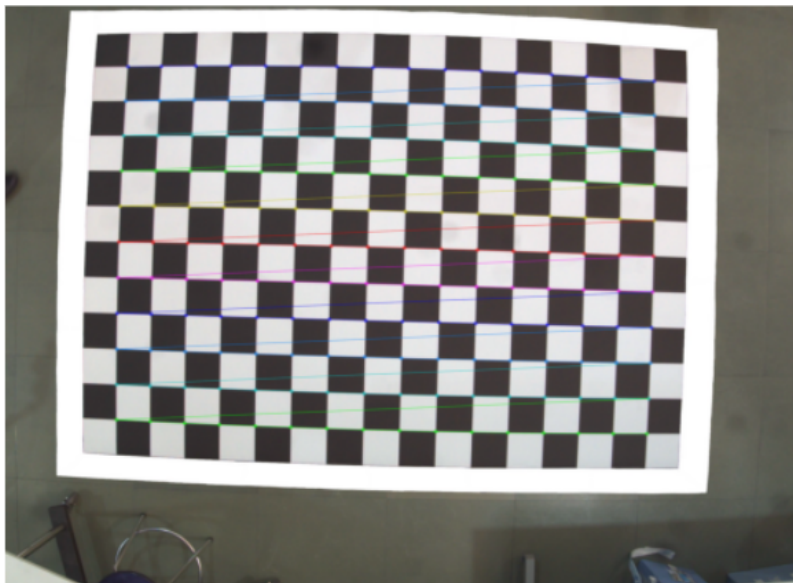
**Kuva 11.** Technobothnian laboratorion tilaan rakennettu tutkimusympäristö demonstraatiota varten, jossa ovat NC353L-kamera (1) ja mustavalkoinen ruudukkomatto (2).

Kuvissa 12 ja 13 on demonstraatiossa käytetyn kameran kalibroinnin prosessi, joka rakentui optisen vääristymän minimoinnista, kuvausjärjestelmän ja kameran kulman kalibroinnista. Optisten ominaisuuksien tarkkuuden määrittäminen kamerassa oli osa kalibrointiprosessia. Kalibrointiprosessiin kuuluivat linseissä olevan vääristymän korjaaminen ja kamerassa olevan resoluution määrittäminen, jotka toteutettiin kalibrointiohjelmilla ja tutkimusympäristöstä otetuilla kuvilla. Kuvassa 12 on esimerkki Vaasan yliopiston Technobothnian laboratoriossa ei kalibroidulla neulanreikäkameralla otettu kuva mustavalkoisesta ruudukkomatosta. Kuvassa esiintyy säteittäistä- ja tangentiaalista vääristymää. Kuvan mustavalkoisen ruudukkomaton reunoille tehtiin kuvankäsittelyohjelmalla valkoiset reunukset. Kuvassa 13 havainnollistetaan kuvaan 12 tehtyä kalibrointikuviota. Kameran kalibroinnissa havaittiin ongelmia kalibrointialgoritmin tarkkuudessa. Ongelman minimoimiseksi käytettiin valkoisia reunuksia vähentämään suurta kontrastia valkoisen reu-

nan ja taustan välillä.



**Kuva 12.** Kameran kuva mustavalkoisesta ruudukkomatosta ilman kalibroitua tutkimuksen pilottiympäristössä.



**Kuva 13.** Mustavalkoisen ruudukkomaton kalibroitukuvio tutkimuksen pilottiympäristössä.

Pilottiympäristön demonstraation kuvausten järjestelyissä varmistettiin muun muassa oikea valaistus ja esteettömyys. Lisäksi kamera asetoitiin ja kalibroitui suoraan lattialaattojen kaakelisaumojen mukaisesti. Kameran kalibroitua tehtiin käyttämällä lattian kaakelisaumojen avulla. Lattian kaakelisaumojen avulla havaittiin, että kameran kuvassa esiin-

tyvää kulmavääristymää ei pystytty minimoimaan riittävästi. Tämän vuoksi demonstraatioissa otettiin käyttöön mustavalkoinen ruudukkomatto, joka auttoi kameran kalibroinnissa. Mustavalkoisella ruudukkomatolla myös minimoitiin kulmavääristymää ja sen avulla määritettiin kamera-alue.

Kuvassa 11 esitetään kameran sijoittelu tutkimuksen pilottiympäristössä. Kamera oli sijoitettu laboratorion katon tukipylyväeseen noin neljän metrin korkeuteen. Kameraa ei voinut sijoittaa laboratoriossa korkeammalle kiinnitysongelmien vuoksi. Kameran kalibrointia varten otettiin useita testikuvia. Testikuvissa havaittiin, että mitä korkeammalle kamera sijoitettiin lattian pinnasta, sitä pienempi oli kameran kuvassa esiintyvä perspektiivivääristymä ja sitä isompi on kameran kuvan paikannusalue. Testikuvissa havaittiin myös, että käytettävä kamera tuotti herkästi optista vääristymää, joka johtui kameran linssistä. Kun kameran etäisyys kohteesta kasvaa, objektin eri osat näyttävät olevan lähempänä toisiaan, jolloin perspektiivivääristymä pienenee.

Kun kamera oli kohdistettuna suoraan alaspäin lattiakaakelin saumoihin, se aiheutti virheitä, joista seurasi kameran kuvassa esiintyvä kulmavääristymä. Kulmavääristymä vaikutti kameran kuvaamiin kohteisiin. Kulmavääristymä aiheutui siitä, että kameraa ei saatu asetettua täysin suoraan suhteessa lattialaattojen saumoihin. Kulmavääristymän vuoksi kamera kuvasi lattialaattojen saumat vinosti, jolloin todellisen maailman koordinaattien laskelmien tulokset voivat olla epätarkkoja ja virheellisiä. (Kuva 11).

Kuvassa 12 esiintyvän kulmavääristymän vähentämiseksi tutkimuksessa tehtiin Python-ohjelma, `CorrectBarrelDistortion.py`. Tämä ohjelma korjasi kameran kuvassa esiintyvän kulmavääristymän, jolla kulmavääristymän verran korjattiin paikannettuja koordinaatteja. (Välisuo & Ohrankämmen, 2022a). Kuvassa 11 on esitetty tutkimukseen käytettävien välineiden asettelu Tecrobotnian laboratorion pilottiympäristössä. Elphehl NC353L-kameran alle laitettiin mustavalkoinen ruudukkomatto, jonka avulla tulkittiin ja korjattiin kameran kuvan vääristymää.

Ennen kameran kalibrointia, kameralla otettiin testikuvia mustavalkoisesta ruudukkoma-

tosta tutkimuksen pilottiympäristössä. Kuvissa havaittiin perspektiivin vääristymää Technobothnian suorien linjojen kaareutumisella, mikä johtui kameran optisesta vääristymästä (kuva 12). Tämä vääristymä korjattiin käyttämällä kahta eri Python-ohjelmaa, joita olivat `distortion_compensation_1.py` ja `CorrectBarrelDisortion.py` (Välisuo & Ohrankämnen, 2022a, 2022b). Optisen vääristymän minimointi oli tärkeää, koska se vaikuttaa suoraan mittausten- ja paikantamisen tarkkuuteen. Optinen vääristymä voi vaikuttaa kohteen sijaintiin todellisessa maailmassa. Optisen vääristymän minimoimiseksi tehtiin kameran kalibrointi- ja korjausohjelmia, jotka paransivat kameran tarkkuutta ja luotettavuutta. Ohjelmat, joita käytettiin olivat `distortion_compensation_1.py` ja `CorrectBarrelDisortion.py`.

Ohjelmassa `distortion_compensation_1.py` käytettiin testikuvissa havaittuja vääristymiä tarkemman kameran mallin luomiseen. Kuva 12 on yksi käytetyistä testikuvista mallin luomisessa. Luotu malli vähensi kameran kuvan perspektiivin vääristymää. (Välisuo & Ohrankämnen, 2022b). Kuvassa mustavalkoisen ruudukkomaton ulkopuolinen tila on tummentunut vinjetoinnin vaikutuksesta. `CorrectBarrelDisortion.py` -ohjelman avulla minimoitiin kameran optisen vääristymän aiheuttamaa vinjetointia. Kuvassa 13 on esitetty vinjetoinnin minimoimisen vaikutukset, jolloin kameralla otetun kuvan kohteet näkyivät tasaisemmin kuvassa. (Välisuo & Ohrankämnen, 2022a).

Tässä tutkimuksessa kehitettiin kohteen paikantamiseen kameran kuvausalueella Python-ohjelma `center2.py` (2022), jonka ohjelmoinnissa hyödynnettiin StackOverflown sivustolla julkaistun käyttäjän nathancyn (2022) tekemää ohjelmaa. Tätä ohjelmaa käytettiin kameran kuvausalueella olevien tarralappujen eli kalibrointikuvioiden koordinaattien määrittämiseen. Kameran avulla voidaan määrittää kalibrointikuvion sijainti kameran kuvassa. (Ohrankämnen, 2022). Tämän jälkeen optisen paikannuksen koordinaatit muunnettiin WGS84-koordinaatistoon, jonka jälkeen tuloksia voitiin verrata UWB-paikannustekniikalla saatuihin tuloksiin.

### 5.1.2 Ruututaulun kulmien paikallistaminen

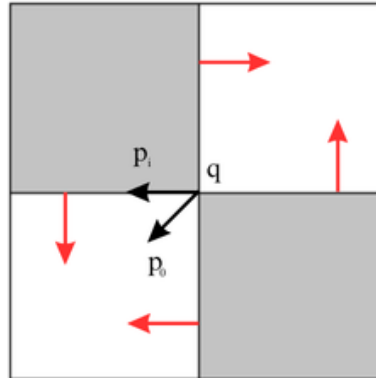
Kulmien paikallistaminen ruututaulussa edellyttää, että tallennetuista kuvista on poistettu kameran linssissä esiintyvä vääristymä. Mustavalkoisen shakkikuvioisen ruututaulun kulmat voidaan likimääräisesti tunnistaa leikkauspisteissä olevien ruudukkoviivojen avulla. Näin voidaan määrittellä alipikselin tarkkuudella ruutujen kulmat. (Vince, 2012). Ruututaulun kulmien paikallistamisessa on ilmoitettava kuinka monta ruutua ja sisäkulmaa on ruututaulussa, jotta käytettävä ohjelma tietää ruututaulun koon, jota se etsii. Tämän jälkeen ohjelma palauttaa kulmapisteet ja totta olevan arvon. (OpenCV, n.d.b).

Tässä tutkimuksessa shakkikuvioisen ruututaulun sijasta käytettiin mustavalkoista ruudukkomattoa. Technobothnian laboratorion pilottiympäristössä demonstroitiin tilannetta, jossa mustavalkoisessa ruudukkomatossa on 12 pystysuoraa ja 17 vaakasuoraa ruudukkoa (kuva 12). Vincen (2012) esittämän esimerkin mukaisesti tulkittiin, että ruudukkoviivoista tulee 12 + 17 piikkiä Hough-avaruudessa tunnistamaan linjasegmentit. Ruudukkoviivan määrittelee jokaisen tunnistetun ruudukkoviivan piikki. Mustavalkoisen ruudukkomaton kuvassa ruututaulun kulmat määrittelevät ruudukkoviivojen leikkauspisteet. (OpenCV, n.d.b, n.d.c).

Kuvassa 13 esitetään ohjelman `CorrectBarrelDisortion.py` osoittaman ruudukon kuvion onnistuneen tunnistuksen. Ruudukossa kulmat tarkoittavat pisteitä, joissa mustat ja valkoiset ruudut sivuavat toisiaan. Ohjelma käyttää kulman tunnistusalgoritmia tunnistamaan mustavalkoisen ruudukkomaton kulmat ja yhdistämään viivoilla nämä kulmat. Kuvassa kulmat tunnistetaan järjestyksessä vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas. (OpenCV, n.d.b, n.d.c; Välisuo & Ohrankämmen, 2022a).

Kun kuvan ruudukon kulmat ovat löydetty voidaan parantaa kulmien tarkkuutta OpenCV-kirjaston `cv.cornerSubPix()`-funktiolla (OpenCV, n.d.b). Tässä tutkimuksessa funktiota on käytetty Python-ohjelmassa `CorrectBarrelDisortion.py` (Välisuo & Ohrankämmen, 2022a). Kuvassa 14 esitetään `cv.cornerSubPix()`-funktio, joka suorittaa toistokierroksen kulmien tai säteittäisten alipikselin (engl. sub-pixel) sijaintien paikan-

tamiseksi. Alipikselin kulman paikantaminen perustuu siihen, että jokainen vektori, joka sijaitsee  $q$ :n lähellä ja on keskiöstä  $q$  pisteeseen  $p$ , on on kohtisuorassa kuvan gradienttiin pisteessä  $p$ . (OpenCV, n.d.c).



**Kuva 14.** Funktion `cv.cornerSubPix()` suorittama kulmien tarkennus gradienttien (punainen) ja siirtovektoreiden (musta) avulla (mukaillen OpenCV n.d.c).

### 5.1.3 Kalibrointikuvioiden paikallistaminen

Pyöreiden tai neliömuotoisten pisteiden avulla voidaan määritellä kalibrointikuvio. Tätä menetelmää voidaan käyttää silloin, kun kalibroidaan kameraa samalla alueella kuin missä kameraa on tarkoitus käyttää. Näin kalibrointikuvio voidaan kiinnittää pysyvästi staattiseen pintaan. Kalibrointikuvion sijainti kameran kuvassa voidaan määrittää alipikselin tarkkuudella laskemalla kuvion keskipiste. Kalibrointikuvion tarkkuus voidaan määrittää standardimenettelyllä, jossa tunnistetaan kalibrointikuvan pikselialue. Tämän jälkeen lasketaan pikselialueen keskipiste käyttäen kuvassa määritettyjä arvoja. (Vince, 2012).

### 5.1.4 Kameran alueella olevan kohteen keskipisteen muuttaminen WGS84 koordinaatistoon

Kuvan kohteen sijainnin todellisen maailman koordinaatit määritetään konvertoimalla kuvan koordinaatit kameran koordinaateiksi, jonka jälkeen kameran koordinaatit konvertoidaan todellisen maailman koordinaateiksi WGS84-koordinaatteina. Tutkimuksessa rakennettiin `worldCoordinates3.py`-ohjelma Python-ohjelmointikielellä koordinaattien

muuntamiseksi pikselikoordinaateista todellisen maailman koordinaatteihin (Boon Jin, 2021; Välisuo & Ohrankämnen, 2022c). Ohjelma käsittelee kuvan niin, että se havaitsee ja seuraa kuvassa olevaa kohdetta. Ohjelma laskee kuvan kohteen keskipisteen. Koordinaattien käsittelyn automatisoinniksi ohjelma sallii ohjelmassa interaktiivisen hiirellä klikkaamisen kohteen koordinaattien määrittämiseksi. Ohjelma `worldCoordinates3.py` laskee sarakke- ja rivi-indeksien keskihajonnan x- ja y-koordinaattien määrittämiseksi. Ohjelma skaalaa x- ja y-koordinaatit pikseleistä senttimetreiksi. (Välisuo & Ohrankämnen, 2022c).

Ohjelma `worldCoordinates3.py` muuntaa kuvan sävyltään harmaaksi, jolloin voidaan binäärisellä raja-arvolla eristää haluttu kohde (Guruprasad, 2020; Välisuo & Ohrankämnen, 2022c). Tässä tutkimuksessa eristetty kohde esitettiin mustana pisteenä valkoisella taustalla, jolloin raja-arvon alittavat pikselit tulkittiin ohjelmassa mustaksi eli kohteeksi ja ylittävät valkoiseksi eli taustaksi. Yksinkertaisin segmentointimenetelmä on raja-arvojen asettaminen. Harmaasävyisessä kuvassa on jokaisella pikselillä yksi arvo ja värillisellä kuvalla on kolme arvoa. (Chen & Chen, 2009; Guruprasad, 2020).

Suuret erot pikselien väleillä määritellään ohjelmassa kohinana. Määrittämällä enimmäisarvon, ohjelmassa voidaan estää ääriarvoja vaikuttamasta merkittävästi kohteen keskipisteen laskemiseen. (Välisuo & Ohrankämnen, 2022c). Kameran kuvan ja maan välinen suhde voidaan kartoittaa homografialla (engl. homography) (OpenCV, n.d.a). Tässä tutkimuksessa pikselikoordinaatit yhdistettiin maassa oleviin koordinaatteihin homografiamatriisilla. Homografian avulla määritettiin kohteen pikselien sijainneista kohteen sijainti todellisen maailman koordinaateissa WGS84-koordinaatteina.

## **5.2 UWB-paikannuksen tarkkuuden määrittäminen optisella paikannuksella**

Paikannustekniikoiden arviointitarkkuuden kokonaistuloksen määrittämisessä on käytetty muun muassa seuraavia tilastollisia menetelmiä: maksimivirhe (engl. maximum error), keskiarvo (engl. mean value) ja keskineliövirhe (RMSE, engl. root mean square error).

Näiden lisäksi suorituskyvyn mittaamiseen kahden eri koordinaattijärjestelmän välillä on käytetty neliöetäisyyttä (MAE), keskihajontaa ja keskimääräistä neliövirhettä (MSE, engl. mean squared error) kahden eri koordinaattijärjestelmän välillä. (Tomazic, 2021).

Paikannetuista koordinaateista tulee tehdä riittävän suuri otanta testejä, jotta voidaan määrittää paikkatietojen olevan tarkkoja ja luotettavia. Tulosten on pystyttävä osoittamaan, että paikkatiedoissa ei ole järjestelmällistä siirtymää eli keskimääräisen eron on oltava 0 ja vaihtelun hyvin pientä. Suuri otanta vähentää tehdyn paikannuksen epäluotettavuutta. (Carvajal-Ramirez et al., 2021). Paikannusjärjestelmien tarkkuutta määrittelevät tutkimukset eivät esitä otannan kokoa. Carvajal-Ramirez et al. (2021) tutkimuksesta voidaan päätellä, että otannan koon tulee olla vähintään 50 kappaletta. Näin voidaan todeta, että määritettyyn tarkkuuteen voidaan luottaa vähintään 50 kappaleen paikannuksen otannalla.

UWB-paikannuksen tarkkuus pystytään määrittämään vähintään 50 kappaleen otannalla optisen- ja UWB-paikannuksen koordinaateista. Otanta edellyttää, että optisen- ja UWB-paikannuksen sijainnit ovat samassa kohdassa. Myös kohdennettava piste, jonka paikannusta otetaan, on UWB:llä ja optisella paikantamisella oltava sama. Vertailemalla UWB:n tuloksia optiseen paikannukseen voidaan mitata UWB-paikannuksen tarkkuutta. Optisen paikantamisen tulee olla tarkka, koska se auttaa saamaan mahdollisimman luotettavaa dataa UWB:n tarkkuuden määrittelemiseksi. Tarkka suhdentaminen vähentää virheitä, joita kuvankäsittelyalgoritmien soveltamisessa voi esiintyä.

### 5.2.1 Maksimivirhe ja keskiarvo

Vertaamalla paikannusjärjestelmän identtisten pisteiden koordinaatteja tarkemman paikannusjärjestelmän vertailumittauksiin, voidaan määrittää paikannusjärjestelmän tarkkuus. Tällöin molemmilla järjestelmillä mitataan samoja pisteitä. Vertailua varten on kehitettävä vertailukoordinaatit  $(p_{x,i}, p_{y,i})$  tarkemmasta paikannusjärjestelmästä ja saman pisteen vertailukoordinaatit  $(q_{x,i}, q_{y,i})$  verrattavasta paikannusjärjestelmästä. Paikannus-

virhe  $e_i$  yhtälössä (17) on koordinaattien välinen euklidinen etäisyys. Paikannusvirhe  $e_i$  määrittelee paikannustarkkuuden. (Aksu, Aksoy, & Korpeoglu, 2011; Tomazic, 2021). Yhtälössä esitetään koordinaattiparien välinen euklidinen etäisyys. Yhtälöstä voidaan määrittää paikannusvirheen suuruus. Kokonaissuorituskyky saadaan laskemalla keskimääräinen virhe ja keskihajonta. (Aksu et al., 2011).

$$e_i = \sqrt{(q_{x,i} - p_{x,i})^2 + (q_{y,i} - p_{y,i})^2} \quad (17)$$

Yhtälössä (18) esitetään keskimääräisen virheen laskeminen eli kuinka paljon paikannusjärjestelmän mittaukset poikkeavat keskimäärin toisistaan. Tilastollisilla menetelmillä kuten keskivirheellä  $\mu_e$  ja keskihajonnalla  $\sigma_e$  voidaan kuvata paikannusvirheissä mahdollisesti esiintyviä epäsäännöllisiä virheitä. Yhtälössä  $N$  on otettujen paikannusten lukumäärä. (Aksu et al., 2011)

$$\mu_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \quad (18)$$

Yhtälössä (19) esitettävä keskihajonta  $\sigma_e$  kuvaa, kuinka paljon virheet keskimäärin poikkeavat keskivirheestä  $\mu_e$ . (Aksu et al., 2011). Tämän avulla keskihajonta  $\sigma_e$  osoittaa paikannusvirheiden johdonmukaisuuden.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i - \mu_e)^2} \quad (19)$$

Yhtälöt (17) ja (18) noudattavat paikannusjärjestelmien testauksessa käytettyjä vakiintuneita tarkkuuden määrittämiseen käytettyjä menetelmiä. Keskivirhe  $\mu_e$  kertoo suoraan virheen siirtymän suuruuden ja suunnan. Keskivirhe  $\mu_e$  kuvaa siirtymässä tapahtunutta virhettä, kun taas yhtälön (19) esittämä keskihajonta  $\sigma_e$  taas heijastaa satunnaista hajon-

taa. (Aksu et al., 2011).

### 5.2.2 RMSE ja MAE

Keskineliövirhe (RMSE, engl. Root Mean Square Error) on tilastollinen indikaattori paikkatietoaineistojen tarkkuuden arviointiin. RMSE saadaan laskemalla neliöjuuri aineiston koordinaattiarvojen ja identtisissä pisteissä sijaitsevan toisesta aineistosta riippumattoman, tarkkuudeltaan tarkemman vertailtavan aineiston koordinaattiarvojen neliöerojen keskiarvosta. (Federal Geographic Data Committee, 1998). RMSE-menetelmää voidaan käyttää UWB-paikannuksesta saatujen koordinaattien vertaamiseen optisesta paikantamisesta saatuihin todellisen maailman koordinaatteihin määrittämään UWB-paikannuksen koordinaattien tarkkuutta.

Normaalijakaumasta laskettu todennäköisyys antaa teoreettisen perustan RMSE:n käytölle määrittämään mallin epätarkkuuden määrää virheiden ollessa normaalisti jakautuneita. (Hodson, 2022). Virheiden voidaan olettaa olevan normaalijakautuneita, koska keskusrajateoreemaan (CLT, engl. Central Limit Theorem) mukaan useiden toisistaan riippumattomien virhelähteiden yhdistelmä pyrkii normaalijakaumaan. (Inside GNSS, 2020).

The National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) -standardissa kartoilla ja digitaalisissa paikkatietoaineistoissa olevien pisteiden sijaintitarkkuuden arvioimiseksi verrattuna tarkempiin maantieteellisiin sijaintitietoihin, sovelletaan tilasto- ja testausmenetelmää. Paikannustarkkuuden arvioinnissa NSSDA käyttää RMSE:ta. NSSDA määrittelee, että koordinaattien tarkkuus ilmoitetaan 95 prosentin todennäköisyydellä eli 95 prosentissa paikkatietoaineiston sijainneista virhe todelliseen sijaintiin on ilmoitettuun tarkkuusarvoon nähden yhtä suuri tai pienempi. (Federal Geographic Data Committee, 1998).

Yhtälössä 20 esitetään laskumenetelmä keskimääräisen neliövirhe RMSE laskemiselle. Virheiden noudattaessa normaalijakaumaa on RMSE optimaalinen virhemittari. RMSE:ssä käytetyn neliöinnin vuoksi aineistossa olevilla suuremmilla virheillä on enemmän pai-

noarvoa lopputulokseen kuin pienemmillä virheillä. (Hodson, 2022).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2} \quad (20)$$

Keskimääräinen absoluuttinen virhe (MAE, engl. Mean Absolute Error) on RMSE:n tavoin regressiomallin arvioimiseen käytetty indikaattori. MAE mittaa virheiden keskiarvoa ilman neliöintiä. MAE on optimaalinen virhetulosten noudattaessa Laplace-jakaumaa. RMSE on optimaalinen normaalisti jakautuneille virheille, MAE soveltuu tasaisesti jakautuneille virheille. (Hodson, 2022). Koska UWB-paikannusten virheiden voidaan olettaa olevan normaalijakautuneita, RMSE on teorian mukaisesti sopiva tilastollinen indikaattori arvioimaan UWB-paikannuksen tarkkuutta vertaamalla tuloksia optisen paikannusjärjestelmän tuloksiin. UWB-paikannuksen tarkkuuden määrittämiseksi valittiin RMSE, koska RMSE on optimaalinen normaalisti jakautuneille virheille.

### 5.2.3 B90

Paikannusjärjestelmissä tarkkuutta voidaan mitata käyttämällä prosenttipohjaisia rajoja, jotka vaihtelevat 50–95 % todennäköisyyteen. Vaihteluvälillä 90 prosenttipisteen virhe (B90, engl. 90% Boundary Error) on tasapainossa luotettavuuden ja käytännöllisyyden kanssa. B90:ssa määritetyn virherajan täyttää 90 % mittauksista ja 10 % virherajasta poikkeavista arvoista voidaan hyväksyä. Gaussian jakauman tarkkuuden vaihteluväli on 90–95 %. Prosenttipisteen todennäköisyyden rajoja käytetään navigoinnissa luotettavuuden todentamiseen reaaliaikaisesti korkean turvallisuusvaatimuksen omaavissa sovelluksissa. Normaalijakauma kuvaa virheiden vaihtelua 90–95 %:n tarkkuusalueella, mutta CLT:n rajoitusten vuoksi normaalijakauma ei pysty ennustamaan tarkasti virheiden ääripäiden käyttäytymistä. (Inside GNSS, 2020).

## 6 Johtopäätökset ja tulosten tulkinta

Tutkimusprosessin vaiheiden toteuttaminen vaatii tarkkuutta ja huolellisuutta, jotta kei-notekoisesti luotu varastotila ja -olosuhteet olisi toistettavissa todellisissa varasto-olosuh-teissa. Tällöin tutkimuksesta saatava informaatio on hyödynnettävissä ja sillä on positiivista vaikutusta yrityksen logistiikkaan ja varastohallintaan.

RMSE-indikaattorilla voidaan arvioida UWB-paikannuksen tarkkuutta vertaamalla tulok-sia optisen paikannusjärjestelmän tuloksiin. Tämä vertailu on tärkeää, koska sen avulla pystytään määrittämään UWB-paikannuksen tarkkuus ja luotettavuus. RMSE-indikaattori mahdollistaa kvantitatiivisen indikaattorin myös muiden paikannusjärjestelmien tarkkuuk-sien määrittelemiselle. Tutkimuksessa havaittiin, että optinen paikannusjärjestelmä on riittävän tarkka referenssijärjestelmä UWB-paikannustekniikan tarkkuuden määrittämi-seksi.

Tutkimuksessa kerätyn ja tutkitun teorian pohjalta voidaan päätellä, että optinen pai-kannusjärjestelmä on tehokas ja tarkka menetelmä UWB-paikannustekniikan tarkkuuden määrittämiseksi. Esitetyn teorian pohjalta voidaan toteuttaa muunkin paikannusjärjestel-män kuin UWB-paikannusjärjestelmän tarkkuuden määrittäminen, esimerkiksi BLE- tai Wi-Fi-paikannusjärjestelmän. Tässä tutkimuksessa käytettyä kokeellista tutkimusta ja ti-lastollisia mittareita voidaan käyttää arvioimaan myös muiden paikannustekniikoiden tark-kuutta.

Tutkimuksen teoriatieto antaa tärkeää tietoa varastohallinnan ja sen logistiikan paran-tamiseksi. Tutkimuksessa käytetty optinen paikannusteknologia on tarkka vertailukoh-ta muille paikannusjärjestelmien tarkkuuksille. Optinen paikannus on kustannustehokas menetelmä toisen paikannusjärjestelmän tarkkuuden määrittämiseksi. Tämän tutkimuk-sen tuloksena optisen paikantamisen avulla voidaan saavuttaa tarkkuus, joka huomioi va-rastojen rakenteet. Tutkimusta voidaan jatkaa yhdistämällä optinen- ja UWB-paikannus-tekniikka. Yhdistelmän käytössä voitaisiin hyödyntää tässä tutkielmassa esitettyjä tilastol-

lisiä menetelmiä empiirisesti. Tutkimusta voidaan hyödyntää määrittämään myös muiden paikannusjärjestelmien tarkkuutta.

## Kirjallisuutta

- Aksu, H., Aksoy, D., & Korpeoglu, I. (2011). A study of localization metrics: Evaluation of position errors in wireless sensor networks. *Computer Networks*, 55(15), 3562–3577. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2011.06.023>
- Alarifi, A., Al-Salman, A. M., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M. A., & Al-Khalifa, H. S. (2016). *Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances*. Noudettu [2023-04-22]<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/707>
- Boon Jin, S. (2021). *Convert camera picture into real world coordinates*. Noudettu [2022-20-06]<https://discuss.python.org/t/convert-camera-picture-into-real-world-coordinates/11564>
- Carvajal-Ramirez, F., Carvajal-Ramirez, F., Aguera-Vega, F., & Martinez-Carricondo, P. (2021). *Uav photogrammetry and remote sensing*. Basel, Switzerland: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Chen, Y.-S., & Chen, Y.-S. (2009). *Image processing / yung-sheng chen, editor*. Place of publication not identified: IntechOpen.
- Cledat, E., Rufener, M., & Cucci, D. (2021). Compensating over- and underexposure in optical target pose determination. *Pattern Recognition*, 116, 107930. Noudettu [23-03-03]<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320321001175>
- Dachs, C. (2020). *Uwb: A reborn standard for high-accuracy location services*. Noudettu [2023-06-20]<https://www.5gtechnologyworld.com/uwb-a-reborn-standard-for-high-accuracy-location-services/>
- Deputter, M. (2024). *Uwb versus other tracking technologies in 2024*. Noudettu [25-01-01]<https://www.pozyx.io/newsroom/uwb-versus-other-technologies>
- Eck, D. (2021). Teoksessa *Introduction to computer graphics* (s. 11-17).
- Elsanhoury, M., Mäkelä, P., Koljonen, J., Välisuo, P., Shamsuzzoha, A., Mantere, T., ... Kuusniemi, H. (2022). Precision positioning for smart logistics using ultra-wideband technology-based indoor navigation: A review. *IEEE Access*, 10, 44413-44445.

- Esri. (n.d.a). *What are geographic coordinate systems?* Noudettu [2023-07-04][https://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/What\\_are\\_geographic\\_coordinate\\_systems/003r00000006000000/](https://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/What_are_geographic_coordinate_systems/003r00000006000000/)
- Esri. (n.d.b). *What are projected coordinate systems?* Noudettu [2023-07-04][https://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/What\\_are\\_projected\\_coordinate\\_systems/003r0000000p000000/](https://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/What_are_projected_coordinate_systems/003r0000000p000000/)
- Euroopan avaruusjärjestö. (2019). *Esa leads drive into our 5g positioning future*. Noudettu [2023-06-25][https://www.esa.int/Applications/Navigation/ESA\\_leads\\_drive\\_into\\_our\\_5G\\_positioning\\_future](https://www.esa.int/Applications/Navigation/ESA_leads_drive_into_our_5G_positioning_future)
- Federal Geographic Data Committee. (1998). *Geospatial positioning accuracy standards, part 3: National standard for spatial data accuracy* (Tekn. rap. nro FGDC-STD-007.3-1998). Reston, Virginia, USA: Federal Geographic Data Committee.
- Fisher, B. (1997). *3x4 projection matrix*. Noudettu [2023-06-24][https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL\\_COPIES/EPSRC\\_SSAZ/node3.html](https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/EPSRC_SSAZ/node3.html)
- Förstner, W., & Wrobel, B. P. (2016). *Photogrammetric computer vision: Statistics, geometry, and reconstruction*. Springer.
- Gao, Z., Yan, J., Yang, C., Fan, W., Zheng, Y., & Li, J. (2024). *Gnss/uwb integrated positioning with robust helmert variance component estimation*. Noudettu <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117723009766>
- GISGeography. (2022a). *How universal transverse mercator (utm) works*. Noudettu [2023-06-24]<https://gisgeography.com/utm-universal-transverse-mercator-projection/>
- GISGeography. (2022b). *World geodetic system (wgs84)*. Noudettu [2023-06-24]<https://gisgeography.com/wgs84-world-geodetic-system/>
- Glover, I., & Atkinson, R. (2017). 1 - overview of wireless techniques. Teoksessa D. Uttamchandani (toim.), *Wireless mems networks and applications* (s. 1-33). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100449-4.00001-4>
- Guruprasad, P. (2020, 06). *Overview of different thresholding methods in image processing*.
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (rmse) or mean absolute error (mae):

- when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487.  
<https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Inside GNSS. (2020, May). Why is bounding gnss errors under rare or anomalous conditions important, and what makes it difficult? *Inside GNSS*. Noudettu <https://insidegnss.com/why-is-bounding-gnss-errors-under-rare-or-anomalous-conditions-important-and-what-makes-it-difficult/>
- Klette, R. (2014). *Concise computer vision : An introduction into theory and algorithms / by reinhard klette*. (1st ed. 2014. p.). London: Springer London.
- Kocur, D. (2019). *Uwb technology and its applications / edited by dusan kocur*. London, United Kingdom: IntechOpen.
- Lefèvre, J., & Drap, P. (2016). *An exact formula for calculating inverse radial lens distortions*. Noudettu [25-03-09]<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4934233/>
- Logistiikan Maailma. (n.d.). *Varastotyytit ja -tekniikka*. Noudettu [22-03-09]<https://www.logistiikanmaailma.fi/logistiikan-toimijat/varastointi/varastotyytit-ja-tekniikka/>
- Maanmittauslaitos. (2025). *Koordinaattijärjestelmät*. Noudettu [25-05-09]<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/koordinaatit-ja-paikannus/koordinaattijarjestelmat>
- Mansurov, N. (2020). *What is lens distortion?* Noudettu [2024-11-12]<https://photographylife.com/what-is-distortion>
- Marin, T. (n.d.). *Mitä on sisäpaikannus?* Noudettu [2023-06-24]<https://trackinno.com/fi/esineiden-internet-iot/mita-on-sisapaikannus/>
- MeteorologyenRed. (n.d.). *Utm coordinates*. Noudettu [2023-05-01]<https://www.meteorologiaenred.com/fi/coordenadas-utm.html>
- Nam, H. (2022). *Machine learning in sensors and imaging*. Basel: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- nathancy. (2022). *How to detect area of pixels with the same color using opencv*. Noudettu [2022-06-07]<https://stackoverflow.com/questions/57282935/how-to-detect-area-of-pixels-with-the-same-color-using-opencv>
- National Geodetic Survey. (2021). *Datums and reference frames*. Noudettu [2023-06-24]<https://geodesy.noaa.gov/datums/index.shtml>
- Niemelä, V., Haapola, J., Hämäläinen, M., & Linatti, J. (2017). *An ultra wideband sur-*

- vey: *Global regulations and impulse radio research based on standards*. Noudettu [2023-04-08]<http://jultika.oulu.fi/files/nbnfi-fe2018062726514.pdf>
- Ohler, C. (2009). *3d computer vision : efficient methods and applications* / christian wohler. Teoksessa *3d computer vision : efficient methods and applications* (1. p., s. 17–18). Springer.
- Ohrankämnen, A. (2022). *Center*. Noudettu [2022-24-08]<https://github.com/UniVaasaDigiEco/hybrid-positioning-system/blob/main/OpticalPositioning/src/center2.py>
- OpenCV. (2025). *Camera calibration and 3d reconstruction*. (Accessed: 1 June 2025) Noudettu [https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group\\_\\_calib3d.html](https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html)
- OpenCV. (n.d.a). *Basic concepts of the homography explained with code*. Noudettu [25-04-12][https://docs.opencv.org/4.x/d9/dab/tutorial\\_homography.html](https://docs.opencv.org/4.x/d9/dab/tutorial_homography.html)
- OpenCV. (n.d.b). *Camera calibration*. Noudettu [25-04-12][https://docs.opencv.org/3.4/dc/dbb/tutorial\\_py\\_calibration.html](https://docs.opencv.org/3.4/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html)
- OpenCV. (n.d.c). *Feature detection*. Noudettu [25-08-13][https://docs.opencv.org/3.4/dd/d1a/group\\_\\_imgproc\\_\\_feature.html#ga354e0d7c86d0d9da75de9b9701a9a87e](https://docs.opencv.org/3.4/dd/d1a/group__imgproc__feature.html#ga354e0d7c86d0d9da75de9b9701a9a87e)
- OpenCV Team. (n.d.). *About*. Noudettu [2024-06-12]<https://opencv.org/about/>
- Pahlavan, K. (2018). Teoksessa *Indoor geolocation science and technology at the emergence of smart world and iot* (s. 235-268).
- Prateek, J. (2014). *The concept of homogeneous coordinates*. Noudettu [2023-03-04]<https://prateekvjoshi.com/2014/06/13/the-concept-of-homogeneous-coordinates/>
- RF Editorial Team. (2021). *What is ultra-wide band (uwb) technology?* Noudettu [2023-04-08]<https://www.everythingrf.com/community/what-is-ultra-wide-band-uwb-technology>
- RF Wireless World. (2023). *Advantages of uwb — disadvantages of uwb*. Noudettu [2023-01-13]<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-disadvantages-of-UWB.html>
- Sanastokeskus. (2002). *Paikannusjärjestelmät*. Noudettu [2022-1-07]<https://>

termipankki.fi/tepa/mot/mot.php?Opt=256&ListWord=@40@40ID@3DTSK@  
5F30@2DIDrgh2HdJe3DqcMrf5MS6@2DMQ&SearchWord=paikannusj@C3@  
A4rjestelm@C3@A4&dic=1&page=results&UI=figr&Source=Record

- Schjørring, A., Cretu-Sircu, A. L., Rodriguez, I., Cederholm, P., Berardinelli, G., & Mognensen, P. (2022). *Performance evaluation of a uwb positioning system applied to static and mobile use cases in industrial scenarios*. Noudettu [2023-05-10]<https://www.5gtechnologyworld.com/uwb-a-reborn-standard-for-high-accuracy-location-services/>
- Schyga, J., Hinckeldeyn, J., & Kreutzfeldt, J. (2022). *Meaningful test and evaluation of indoor localization systems in semi-controlled environments*. Noudettu [22-03-09]<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9003439/>
- Technobothnia. (s.a.). Noudettu [25-01-01]<https://www.technobothnia.fi/>
- Toitū Te Whenua. (n.d.). *World geodetic system 1984 (wgs84)*. Noudettu [2023-06-24]<https://www.linz.govt.nz/guidance/geodetic-system/coordinate-systems-used-new-zealand/geodetic-datums/world-geodetic-system-1984-wgs84>
- Tomazic, S. (2021). *Indoor positioning and navigation*. Basel, Switzerland: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (n.d.). *Euroopan aluekehitysrahaston (eakr) rahoittaman hankkeen kuvaus*. Noudettu [2022-26-07]<https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektkoodi=A76348>
- Viljamaa, E. (2024). *Mitkä ovat uwb:n ja bluetoothin erot sisätilapaikannuksessa?* Noudettu [2024-10-11]<https://www.iiwari.com/fi/resources/uwb-vs-ble-sisatilapaikannuksessa/>
- Vince, J. (2012). *Matrix transforms for computer games and animation / by john vince*. (1st ed. 2012. p.). London: Springer London.
- Välisuo, P. (2022). *Tuleva - tulevaisuuden varastohallinta ja logistiikka saumattomalla tarkkuuspaikannuksella*. Noudettu [2022-25-07]<https://www.uwasa.fi/fi/tutkimus/hankkeet/tuleva-tulevaisuuden-varastohallinta-ja-logistiikka-saumattomalla>
- Välisuo, P., & Ohrankämmen, A. (2022a). *Correct barrel disortion*. Noudettu [2022-20-06]<https://github.com/UniVaasaDigiEco/hybrid-positioning-system/>

blob/main/OpticalPositioning/src/CorrectBarrelDisortion.py

Välisuo, P., & Ohrankämnen, A. (2022b). *Disortion compensation*. Noudettu [2022-18-05][https://github.com/UniVaasaDigiEco/hybrid-positioning-system/blob/main/OpticalPositioning/src/distortion\\_compensation\\_1.py](https://github.com/UniVaasaDigiEco/hybrid-positioning-system/blob/main/OpticalPositioning/src/distortion_compensation_1.py)

Välisuo, P., & Ohrankämnen, A. (2022c). *worldcoordinates3*. Noudettu [2022-24-08]<https://github.com/UniVaasaDigiEco/hybrid-positioning-system/blob/main/OpticalPositioning/src/worldCoordinates3.py>

Wang, Z., Li, S., Zhang, Z., Lv, F., & Hou, Y. (2018). *Research on uwb positioning accuracy in warehouse environment* (osa 131). Noudettu [22-03-09]<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918306112>

Weng, J., Cohen, P., & Herniou, M. (1992). *Camera calibration with distrotion models and accuracy evaluation* (osa 14) (nro 10).