

Aalto-yliopisto

Perustieteiden korkeakoulu

Teknistieteellinen kandidaattiohjelma

Tutkimus sisätilojen navigoinnista AR-teknologian avulla

Kandidaatintyö

7.5.2024

Patrick Korhonen

Tekijä Patrick Korhonen		
Työn nimi Tutkimus sisätilojen navigoinnista AR-teknologian avulla		
Koulutusohjelma Teknistieteellinen kandidaattiohjelma		
Pääaine Tietotekniikka	Pääaineen koodi SCI3027	
Vastuupettaja prof. Lauri Savioja		
Työn ohjaaja(t) prof. Antti Ylä-Jääski		
Päivämäärä 7.5.2024	Sivumäärä 23	Kieli suomi

Sisätiloissa tapahtuva paikannus ja navigointi on haastava ongelma, sillä satelliittipohjainen GPS-teknologia ei tarjoa luotettavaa ja tarkkaa paikannustietoa sisätiloissa signaalin heikkenemisen vuoksi. Tässä työssä tutkittiin viittä eri sisätiloihin valjastettua paikannusteknologiaa. Lisäksi kokeellisesti arvioitiin kuvapohjaiseen lisättyyn todellisuuteen pohjautuvan sovelluksen (VimAI) toimivuutta. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, mitkä ovat kuvapohjaisen AR-teknologian vahvuudet ja heikkoudet sisäpaikantamisessa ja -navigoinnissa verrattuna muihin teknologioihin.

Työssä tarkasteltiin WLAN, RFID, Bluetooth, UWB ja magneettikenttä -teknologioiden toimintaperiaatteita ja niiden vahvuuksia ja heikkouksia. WLAN tarjoaa suhteellisen tarkan paikannuksen, mutta vaatii melko paljon asennettua laitteistoa. RFID:llä saavutetaan vähäinen virrankulutus, mutta tagit ovat kalliita ylläpitää. Bluetooth Low Energy (BLE) on edullinen ja energiatehokas. UWB tarjoaa korkean tarkkuuden, mutta on kallis vaihtoehto. Magneettikentät tarjoavat ainutlaatuisen paikannustavan, mutta niiden hyödyntäminen vaatii perusteellista kartoitusta.

Kokeellisessa osassa arvioitiin kuvapohjaiseen AR-teknologiaan perustuvan VimAI-sovelluksen tehokkuutta ja tarkkuutta sisätilojen navigoinnissa. Tulokset osoittivat, että AR-teknologia pystyy tuottamaan intuitiivisen käyttöliittymän navigointia varten. Lisäksi se on tarkka eikä vaadi paljon laitteistoa. Kuitenkin se on altis häiriöille kuten heijastaville pinnoille ja tilan muutoksille.

Avainsanat AR, WLAN, sisänavigointi, sisäpaikannus, VimAI

Sisällysluettelo

1 Johdanto	3
2 Sisäpaikannukseen käytettäviä teknologioita	4
2.1 WLAN	4
2.1.1 Signaalin saapumisaika	5
2.1.2 Signaalin saapumiskulma.....	6
2.1.3 Signaalin saapumisajan ja -kulman hybridi	6
2.1.4 Vastaanotetun signaalin voimakkuus ja tunniste.....	6
2.2 RFID	7
2.3 Bluetooth.....	9
2.4 Ultra-wideband (UWB)	10
2.5 Magneettikentät.....	11
3 VimAI	13
3.1 Lisätty todellisuus	13
3.2 Tutkimuksen toteutus	14
3.3 Testaus.....	15
3.4 Tutkimuksen tulokset	17
3.4.1 Vahvuudet	17
3.4.2 Heikkoudet	19
4 Yhteenveto.....	19
Lähteet.....	21

1 Johdanto

Sisätiloissa tapahtuva navigointi on teknisesti haastava ongelma. Navigointimenetelmiä on nykyään montaa erilaista ja tunnetuin niistä on varmastikin GPS (Global Positioning System). Siinä missä GPS on erittäin käytännöllinen navigointi- ja paikannusmenetelmä ulkona, ei se kykene sisätiloissa toimimaan yhtä tehokkaasti ja tarkasti signaalin heikkenemisen vuoksi. Sisätiloissa tapahtuvaan paikantamiseen ja navigointiin on kehitetty erilaisia ratkaisuja pohjautuen moneen eri teknologiaan. Näitä ovat muun muassa WLAN, ultra-wideband (UWB), Bluetooth sekä magneettikenttiin pohjautuva paikannus (Yassin ym., 2017).

Yllä mainittujen teknologioiden lisäksi sisätiloissa navigointiin on valjastettu kuvapohjaista AR-teknologiaa. Sen avulla luodaan käyttäjälle näkymä, joka yhdistää todellisuuden ja tietokoneella luodun grafiikan, ja mahdollistaa navigoinnin jopa täysin tuntemattomassa tilassa. Sisäpaikantamiseen ja -navigointiin liittyy kuitenkin lukuisia haasteita. Mikään teknologia ei pysty vastaamaan jokaiseen ongelmaan ja haasteeseen, minkä vuoksi yksikään ratkaisu ei yksinään ole täydellinen. Jokaisella toteutuksella on omat haasteensa, mutta AR-teknologiaan liittyviä haasteita ovat suorituskyky, kohdistaminen ja visualisointi. (Rabbi ja Ullah, 2013.)

Tässä tutkielmassa käsitellään sisäpaikannukseen ja -navigointiin toteutettuja ratkaisuja pääpainona AR-teknologian (augmented reality) eli lisätyn todellisuuden hyödyntäminen. Työn ensimmäisessä osassa tehdään kirjallisuuskatsaus, jossa tutkitaan eri sisäpaikantamiseen ja -navigointiin kehitettyjen teknologioiden toiminnallisuuksia, heikkouksia ja vahvuuksia. Toisessa osassa suoritetaan kokeellinen osuus, jossa käytetään sisäpaikantamiseen erikoistunutta sovellusta (VimAI), joka perustuu kuvapohjaiseen AR-teknologiaan. Tuloksia käsitellään luotettavuuden, tarkkuuden ja helppokäyttöisyyden perspektiivistä. Tutkimuskysymyksenä on:

- mitkä ovat kuvapohjaisen AR-teknologian vahvuudet ja heikkoudet sisäpaikantamisessa ja -navigoinnissa verrattuna muihin teknologioihin?

Työn rakenne on seuraavanlainen. Toinen luku käsittelee sisäpaikannukseen kehitettyjä teknologioita, joita ovat WLAN, RFID, Bluetooth, UWB ja magneettikentät. Kolmas luku sisältää kuvapohjaista AR-teknologiaa käyttävän VimAI-sovelluksen avulla toteutetun tutkimuksen. Tutkimuksessa tarkastellaan VimAI:n suoriutumista sisänavigoinnissa. Neljäs luku sisältää yhteenvedon työstä.

2 Sisäpaikannukseen käytettäviä teknologioita

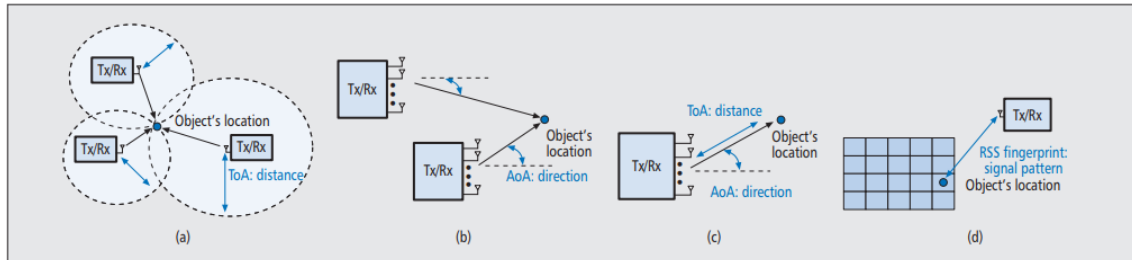
Sisätiloissa tapahtuvan paikantamisen tarve ja suosio on kasvanut viime vuosina langattomien laitteiden kuten älypuhelimien lisääntymisen myötä (Zafari, Gkelias ja Leung, 2019). Sisäpaikantaminen tarkoittaa laitteen tarkan sijainnin selvittämistä sisätiloissa kuten ostoskeskuksissa tai lentokentillä. Sisäpaikantaminen mahdollistaa sisänavigoinnin, jonka avulla pystytään esimerkiksi älypuhelimta käyttäen, navigoimaan paikasta toiseen myös suurissa rakennuskomplekseissa. Sisänavigoinnilla on monia käyttökohteita kuten sokeiden ja näkövammaisten opastaminen, hätäuloskäynnille opastus tai turistien opastaminen museossa (Alarifi ym., 2016). Paikantamista sisätiloissa varten on kehitetty erilaisia teknologioita ja menetelmiä. Tässä luvussa käydään läpi näitä teknologioita ja menetelmiä, sekä niiden heikkouksia ja vahvuuksia. Ensimmäiseksi käsitellään teknologiaa, joka perustuu WLAN:iin.

2.1 WLAN

WLAN eli wireless local area network tunnetaan myös nimillä IEEE 802.11 -standardi ja se on yksi sisäpaikantamiseen käytettävistä teknologioista. Se toimii käytännössä niin, että tilaan on sijoitettu signaaleja lähettäviä tukiasemia (engl. access point), jotka ovat langattomassa yhteydessä laitteeseen, jonka sijaintia selvitetään. Tukiasemat ovat paikallaan ja niiden sijainti on tiedossa. Tämän tiedon avulla laite kuten älypuhelin, pyrkii paikantamaan oman sijaintinsa. (Yang ja Shao, 2015.)

WLAN-teknologia hyödyntää eri menetelmiä sijainnin selvittämiseksi. Näitä ovat muun muassa: signaalin saapumisaika (engl. time of arrival (ToA)), signaalin saapumiskulma (engl. angle of arrival (AoA)), näiden kahden hybridi ToA/AoA, ja vastaanotetun signaa-

lin voimakkuus ja tunniste (engl. received signal strength and fingerprint (RSS fingerprint)) (Yang ja Shao, 2015). Myös muut radioteknologiat, joita käsitellään myöhemmin, hyödyntävät näitä menetelmiä paikantamiseen.



Kuva 1. a) signaalin saapumisaika b) signaalin saapumiskulma c) signaalin saapumisaika/ signaalin saapumiskulma d) vastaanotetun signaalin voimakkuus ja tunniste (Yang ja Shao, 2015).

2.1.1 Signaalin saapumisaika

Kuvan 1 osa a havainnollistaa, kuinka saapumisaikaan pohjautuva menetelmä toimii. Tukiasemat lähettävät signaaleja, jotka paikannettava laite vastaanottaa. Jokaisesta tukiasemasta tulevan signaalin matkaan menevä aika laitteelle lasketaan. Tämä aika kerrotaan valonnopeudella, jotta saadaan laskettua laitteen etäisyys tukiasemasta. Tässä vaiheessa jokaisen tukiaseman etäisyys laitteesta tiedetään, muttei niiden suuntaa. Koska tukiasemien sijainti on vakio ja selvillä, pystytään geometrian avulla selvittämään laitteen tarkka sijainti mittausdatan pohjalta. (Zafari, Gkelias ja Leung, 2019.)

Kun laitteen sijainti halutaan selvittää 2D-ympäristössä, tarvitaan lähettämiä vähintään kolme ja 3D-ympäristössä vähintään neljä. Paikannuksen suorituskyky pystytään määrittämään signaalin kaistanleveydestä (engl. bandwidth). Mikäli kaistanleveys ei ole tarpeeksi leveä, saattaa saapumisajan virheen vaihteluväli olla laaja, mikä johtaa erätarkkaan paikantamistulokseen. Nykyisin suosittu ratkaisu saapumisajan mittauksiin ovat UWB-järjestelmät, jotka tuottavat erittäin korkean tarkkuuden (Yang ja Shao, 2015). UWB-tekniologiaa käsitellään myöhemmin alaluvussa 2.4.

2.1.2 Signaalin saapumiskulma

Kuvan 1 osa b kuvaa kuinka saapumiskulmaan perustuva menetelmä toimii. Menetelmässä signaaleja lähettää antenniryhmä (engl. antenna array), jonka antennit ovat sijoitettu erilleen toisistaan. Kun signaalit saapuvat laitteelle, lasketaan saapumisen aikaerot yksittäin jokaisen antennin kohdalla. Näiden tietojen avulla lasketaan signaalin saapumiskulma, jonka avulla laitteen sijainti pystytään paikantamaan. Saapumiskulmaan perustuvan menetelmän hyvänä puolena on, että laitteen sijainnin arvioimisessa 2D-ympäristössä riittää kaksi lähettäjää eli kaksi yksittäistä antennia ja 3D-ympäristössä kolme lähettäjä. Huonona puolena on tarkkuuden heikkeneminen, kun etäisyydet ovat pitkiä laitteen ja antennien välillä. Lisäksi tarvittava laitteisto on kallista. (Zafari, Gkelias ja Leung, 2019.)

2.1.3 Signaalin saapumisajan ja -kulman hybridi

Kuvan 1 osassa c havainnollistaa, että on mahdollista selvittää laitteen sijainti vain yhdellä tukiasemalla. Tämä onnistuu yhdistämällä signaalin saapumisaika ja -kulma. Tässäkin menetelmässä kaistanleveyden tuottamat ongelmat sekä antennien määrä ovat haaste. Vahvuutena saapumisajan ja -kulman hybridille on, että se voi hyödyntää sekä saapumisajan että -kulman hyviä puolia. (Yang ja Shao, 2015.)

2.1.4 Vastaanotetun signaalin voimakkuus ja tunniste

Pelkän vastaanotetun signaalin voimakkuuden perusteella voidaan määrittää karkeasti paikannettavan laitteen etäisyys. Kun sen rinnalle tuodaan yksilöllinen tunniste, voidaan laitteen sijainti selvittää paremmalla tarkkuudella. Jokaisella sijainnilla on oma tunnistensa monireittivaikutuksen (engl. multipath effect) ansiosta. Monireittivaikutuksen vuoksi kukin sijainti vastaanottaa uniikin signaalin eri reiteistä yhdistyvien säteiden kautta. Signaalilla on ominaisuuksia kuten taajuusvaste ja I/Q-kanavan signaalin voimakkuus, joita voidaan kutsua tunnisteiksi. (Yang ja Shao, 2015.)

Kuten kuvan 1 osa d osoittaa, on alue jaettu niin sanotusti koordinaatistiksi. Jokaisella ruudulla on oma ennalta määritetty tunnisteensa, joka löytyy tietokannasta. Kun paikannettavan laitteen sijaintitunniste on selvitetty, voidaan sitä verrata tietokannasta löytyviin tunnisteisiin ja tehdä johtopäätös laitteen sijainnista. Tämän menetelmän vahvuutena on, että riittää vain yksi tukiasema vastaanottamaan signaaleja. Heikkoutena on mahdollisten

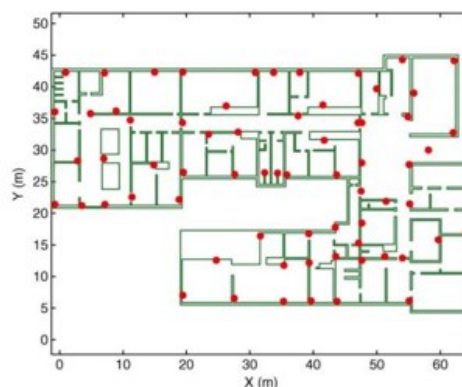
tunnisteiden runsas määrä tietokannassa ja tästä seuraava laskennan nopeuden heikkeneminen. (Yang ja Shao, 2015.)

2.2 RFID

RFID (radio frequency identification) on seuraavaksi käsiteltävä sisäpaikantamiseen ja -navigointiin käytettävä teknologia. RFID perustuu datan säilömiseen ja noutamiseen sähkömagneettisen välityksen avulla. RFID-systeemi muodostuu erinäisistä komponenteista. Näitä ovat lukija, tägi ja antenni. Molemmista sekä lukijasta että tägistä löytyy antenni, joka huolehtii niiden välisestä kommunikaatiosta. RFID-lukijat ja tägit käyttävät ennalta määrättyä radiotaajuutta ja protokollaa, jolla ne voivat lähettää ja vastaanottaa dataa. (Ni ym., 2004.)

RFID-tägit voivat olla joko passiivisia tai aktiivisia. Passiivisen tägin konkreettinen ero aktiiviseen tägiin on, että se toimii ilman sisäistä virtalähdettä. Tämä tarkoittaa, että passiivisen tägin on saatava sähköinen varaus ulkopuolelta. Se onnistuu siten että kun tägi saapuu tarpeeksi lähelle lukijaa, vastaanottaa se sähkömagneettisen signaalin lukijalta, jolloin sähkövirta indusoituu ja varastoituu kondensaattoriin. Kun kondensaattori on tallettanut tarpeeksi sähkövarausta, tägi pystyy lähettämään lukijalle takaisin signaalin, joka sisältää tägin sisältämän informaation. (Weinstein, 2005.) Passiivisen tägin vahvuutena on sen erittäin pitkä käyttöikä ja halpa valmistuskustannus. Toimintasäde on passiivisilla tägeillä kuitenkin erittäin rajallinen, kun taas aktiivisilla tägeillä toimintasäde on pidempi. (Ni ym., 2004.)

Jimenez Ruiz ym. (2012) ovat tehneet tutkimuksen, jonka aiheena oli sisätilojen jalankulkijoiden paikannus ja navigointi. Tutkimuksessa käytettiin joukkoa aktiivisia RFID-tägejä ja yhtä pitkän kantaman RFID-lukijaa (kuva 2), sekä yhtä inertiaalimittayksikköä (engl. inertial measurement unit) välittämään inertiadataa. Tutkimus suoritettiin rakennuksessa, jonka pinta-ala on 2200 m^2 , ja tägejä asennettiin 71 kappaletta jokainen noin 2 metrin korkeuteen (kuva 3). (Jimenez Ruiz ym., 2012.)



Tutkimuksessa arvioitiin, että RFID-lukija vastaanottaa sekunnissa noin 20 paikkainformaatiota tägeiltä, kun tägien tiheys on kuvan 3 mukainen. Kun tägejä oli 71 kappaletta, oli paikannuksen virheen keskiarvo 1,35 metriä. Koe suoritettiin useita kertoja ja tägien määrää vähennettiin jatkuvasti, jolloin havaittiin virheen keskiarvon kasvavan joka kerta. Kun koe suoritettiin 8:lla tägillä, oli virheen keskiarvo 2,7 metriä eli tuplasti lähtökohtaan verrattuna. Tämä osoittaa, että mitä tiheämmässä RFID-tägejä on sitä paremmaksi paikannustuloksen tarkkuus kasvaa. (Jimenez Ruiz ym., 2012.)

Tutkimuksessa päästiin melko tarkkoihin tuloksiin, kun tágien määrä oli suuri. Jos tavoitteena on erittäin tarkat paikantamistiedot, tulee tágellä sijoittaa paljon navigoitavaan tilaan. Koska kyseessä ovat aktiiviset RFID-tágit, voi niiden suuri määrä tulla kalliiksi. Jimenez Ruiz ym. (2012) toteavat tutkimuksessaan, että käytettävien RFID-tágien pariston elinikä olisi noin 6 kuukautta. Tágit voitaisiin tarvittaessa asettaa lepotilaan, kun systeemiä ei käytetä, jolloin voitaisiin saavuttaa pidempi pariston elinikä. (Jimenez Ruiz ym., 2012.) Suuri määrä tágellä vaatii siis myös jatkuvaa ylläpitoa, joka tuo lisäkustannuksia.

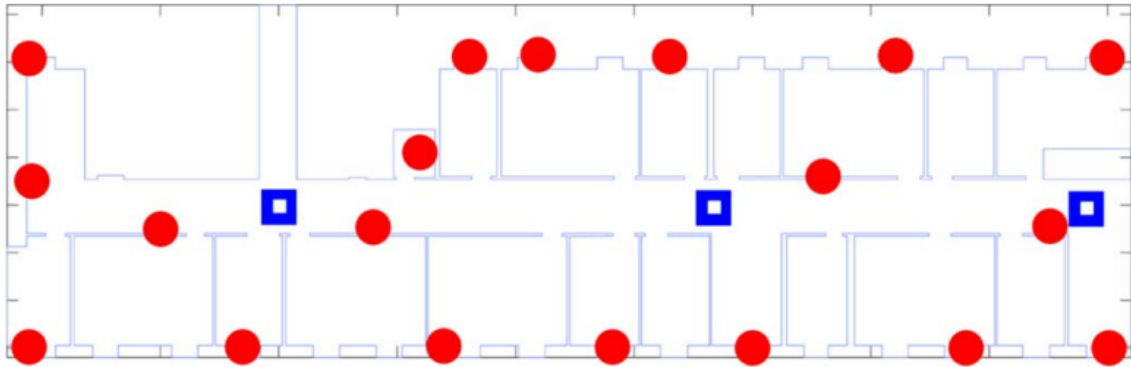
2.3 Bluetooth

Kolmantena käsiteltävä sisäpaikannukseen ja -navigointiin käytettävä teknologia on Bluetooth tarkemmin rajattuna Bluetooth low energy (BLE). Bluetooth on monelle tuttu termi arkipäiväisten langattomien laitteiden kuten kuulokkeiden yhteydessä. Se perustuu laitteiden väliseen langattomaan kommunikaatioon ja tiedonsiirtoon hyödyntäen lyhyen kantaman radiotaajuutta.

BLE suunniteltiin täydentämään perinteistä Bluetoothia sekä mahdollisimman vähän energiaa kuluttavaksi langatonta teknologiaa hyödyntäväksi laitteeksi. Ajansaatossa perinteiseltä Bluetoothilta on vaadittu jatkuvasti enemmän kaistanleveyttä, jonka takia Bluetoothiin datan siirtokykyä on jouduttu kasvattamaan. BLE vastaa kuitenkin päinvastaiseen tarpeeseen. Sen sijaan, että keskityttäisiin nopeaan datansiirtoon, pyritään optimoimaan laitteen erittäin alhainen energiankulutus. Tämän ansiosta voidaan muodostaa pidempikestoinen yhteys erinäisten laitteiden välille kuin perinteistä Bluetoothia käytetään. (Heydon, 2012.)

BLE-majakat (engl. BLE beacon) ovat pieniä laitteita ja suunniteltu kuluttamaan akkua minimaalisesti pariston eliniän kasvattamiseksi. BLE käyttää 40 kanavaa, joista jokainen on 2 MHz levyinen, ja kattaa 2,4 GHz radiotaajuusalueen samoin kuin Wi-Fi. (Faragher ja Harle, 2015.) Kriz ym. (2016) toteavat artikkelissaan, että BLE-majakat ovat edullisia, pieniä ja riippumattomia ulkoisesta virtalähteestä, jonka vuoksi ne ovat hyvä vaihtoehto Wi-Fi:lle (Kriz ym., 2016).

Tutkimuksessaan Faragher ja Harle (2015) tutkivat sisäpaikantamista käyttäen BLE-teknologiaa ja vertaavat sen suorituskykyä Wi-Fi:n tuottamiin tuloksiin samassa tilassa. Tutkimus suoritettiin noin 600 m² tilassa, johon sijoitettiin 19 BLE-majakkaa metrin korkeuteen ja kolme Wi-Fi tukiasemaa (kuva 4). Tutkimuksessa mitattiin vastaanotetun signaalin voimakkuutta ja tunnistetta. Näiden mittausten pohjalta laskettiin sijainnitiedot. Kun BLE-majakoita oli sijoitettu tilaan tiheästi, saavutettiin alle 2,6 metrin tarkkuus 95 % ajasta. Wi-Fi:ä käytettäessä tarkkuus oli vain alle 8,5 metriä. Tämä osoittaa, että on mahdollista saavuttaa tarkempi paikannustulos käyttäen BLE-teknologiaa, kuin Wi-Fi:ä. (Faragher ja Harle, 2015.)



Kuva 4. Tilan pohjapiirros, jossa BLE-majakat punaisina ympyröinä ja Wi-Fi-tukiasemat sinisinä neliöinä (Faragher ja Harle, 2015.)

2.4 Ultra-wideband (UWB)

Seuraavaksi käsitellään Ultra-wideband eli UWB-teknologiaa, joka on erittäin käytännöllinen sisätiloissa tapahtuvaan paikantamiseen. Zafari ym. (2019) toteavat artikkelissaan, että UWB perustuu erittäin lyhyiden pulssien lähettämiseen erittäin leveällä kaistanleveydellä. Pulssien kesto on alle nanosekunnin ja kaistanleveys on yli 500 Mhz. UWB käyttää todella pientä pulssisuhdetta, jonka ansiosta se toimii pienemmällä teholla. Sen käyttö sisäpaikantamisessa on viehättänyt sen kyvyllä olla immuuni toisten signaalien interferenssille, joka on erilaisen signaalin tyyppin ja laajan radiotaajuusalueen ansiota. (Zafari, Gkelias ja Leung, 2019.)

UWB-signaalit eritoten matalataajuiset voivat läpäistä laajasti eri materiaaleja kuten seinä, kuitenkin metallien läpäiseminen tuottaa haastetta. Koska UWB-signaalit ovat niin lyhytkestoisia, eivät ne ole niin herkkiä monireittivaikutukselle. Tämän ansiosta pääreitin signaali pystytään tunnistamaan monireittivaikutuksen tuomien signaalien läsnäollessa, jonka vuoksi on mahdollista arvioida tarkka signaalin saapumisaika. Täten voidaan saavuttaa jopa 10 cm paikannustarkkuus. UWB:n käyttöä kuluttajatuotteissa ja kannettavissa laitteissa kuten älypuhelimissa on rajoittanut UWB-standardin hidas kehitys. (Zafari, Gkelias ja Leung, 2019.)

Käytettäessä UWB:tä etuna on se ei vaadi lisenssiä sen matalan tehon vuoksi. Sitä ei luokitella radiolaitteeksi, koska sen signaali ei interferoi useimpien radiosysteemien kanssa. UWB kuluttaa vähän virtaa verrattuna muihin paikantamismenetelmiin, minkä vuoksi

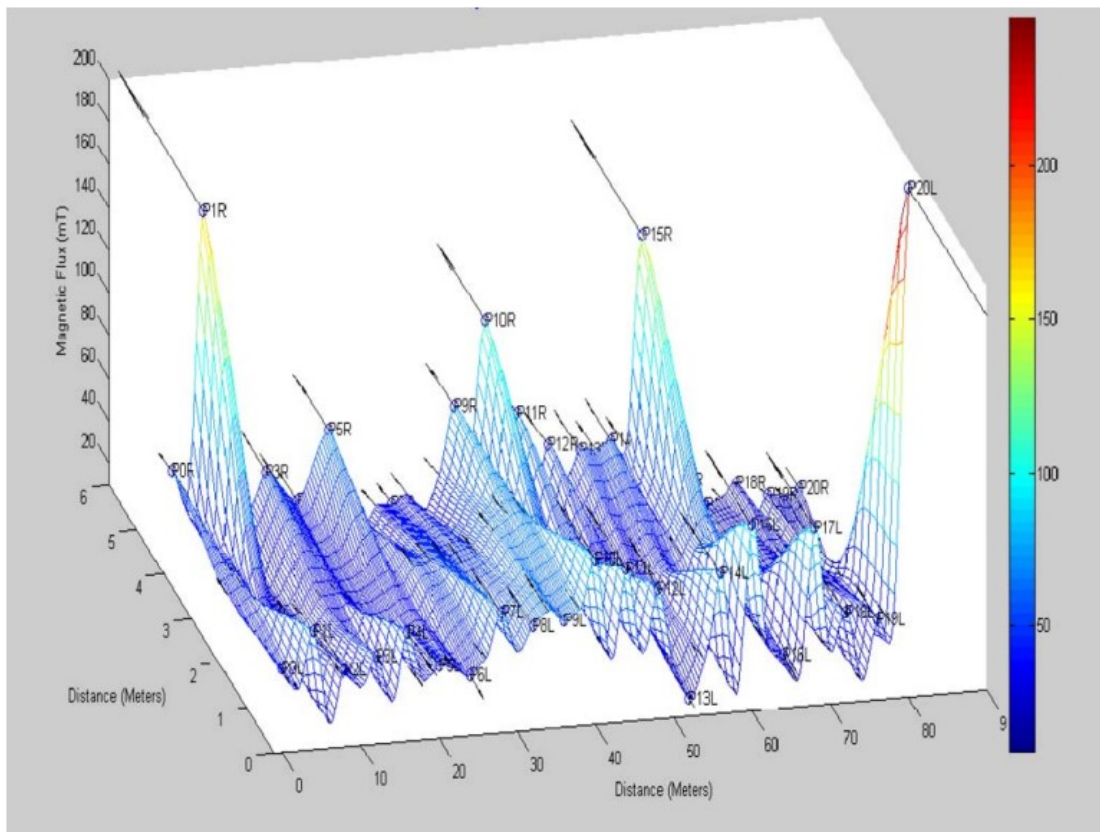
laitteiden akunkesto on pidempi. UWB:llä on sisäpaikantamisen ohella monia muita käyttömahdollisuuksia eri systeemeissä, joissa vaaditaan suurta tarkkuutta. Näitä ovat muun muassa robotin ohjaus, tutkat sekä lääketieteelliset sovellukset. Heikkoutena UWB:tä käytettäessä on mahdollinen lähellä olevien laajaa radiotaajuusalueita käyttävien laitteiden aiheuttama häiriö. Kaupallisesti UWB on kallis verrattuna muihin teknologioihin. Lisäksi koska pulssit ovat erittäin lyhyitä, saattaa niiden synkronointi olla aikaa vievää. (Alarifi ym., 2016.)

2.5 Magneettikentät

Magneettikenttiä voidaan myös hyödyntää paikantamiseen sisätiloissa. Tilaan, jossa paikannus tapahtuu, on luotu kartta, josta ilmenee, kuinka magneettikenttä on jakautunut tilaan. Maapallon magneettikenttää häiritsee pääasiallisesti kartoitettavan rakennuksen metalliset rakenteet. Tilassa on siis ensiksi suoritettavat erillinen magneettikentän kartoitus, jossa mitataan magneettikentän voimakkuutta eri sijainneissa. Jokaiselle sijainnille mitataan oma uniikki tunnisteensa, joka määritetään tietokantaan. Myöhemmin kun itse paikantaminen tapahtuu, mitataan reaaliaikaisesti laitteella kuten älypuhelimella magneettikentän voimakkuutta ja verrataan saatua tunnistetta tietokannan tunnisteisiin. (Davidson ja Piché, 2017.)

Magneettikenttiä käytettäessä paikantamiseen etuna on, että se sijaitsee kaikkialla ja se on suhteellisen vakaa. Se ei myöskään vaadi ennalta asennettua laitteistoa tai infrastruktuuria. Tyypillisen älypuhelimien magnetometrin näytteenottotaajuus on noin 10 Hz, jonka vuoksi magneettikenttäkartan luominen ja paikannus voi olla jatkuvaa. Kuitenkin myös magneettikenttien avulla tapahtuvaan paikantamiseen liittyy omat haasteensa. Yksittäinen tunniste koostuu vain muutamasta parametrystä, korkeintaan kolmesta, mutta yleensä yhdestä tai kahdesta. Magneettikentän gradientti voi joskus olla todella jyrkkä, joka tarkoittaa magneettikentän voimakkuuden nopeaa muutosta lyhyen etäisyyden sisällä. Lisäksi ajoittaiset magneettiset häiriöt voivat olla merkittävä häiriötekijä. (Davidson ja Piché, 2017.)

Gozick ym. (2011) suorittivat tutkimuksen magneettikentän hyödyntämisestä sisäpaikantamiseen. Magneettikentän kartoitus suoritettiin älypuhelimien avulla rakennuksessa, jossa on paljon metallisia tukipylväitä. Osa tukipylväistä vaikutti magneettikentän muutokseen selkeästi paljon voimakkaammin, luoden erottuvan tunnisteen. Vaikka tunnisteroaa suurimmasta osasta pilareita, on silti mahdollisuus, että toisen pilarin tunnisteen on lähes identtinen. Pelkkää yhden pilarin luomaa tunnistetta ei siis käytetty, vaan tunnistuksessa otettiin huomioon myös sen ympäristöä. Kun kartoitus oli valmis, luotiin rakennuksesta magneettinen kartta. Kuva 5 havainnollistaa erään käytävän magneettisen kartan. Kartoitusta testattiin eri huoneissa, jolloin lopputuloksena oli, että yksittäisen huoneen testidata korreloi kyseisen huoneen tunnisteen kanssa vahvasti ja väärän huoneen kanssa heikosti. Tämä osoittaa, että magneettikenttien käyttö sisänavigointiin on mahdollista. (Gozick ym., 2011.)



Kuva 5. Tilaan luotu magneettinen kartta, jossa näyttäytyy tukipylväiden luomat magneettikentän intensiteetit (Gozick ym., 2011.)

3 VimAI

Tämä luku käsittelee AR-teknologiaa ja sen hyödyntämistä sisätiloissa tapahtuvaan paikantamiseen ja navigointiin. Lisäksi luku sisältää kokeellisen osuuden, jossa suoritetaan tutkimus käyttäen VimAI-sovellusta. Seuraavaksi esitellään tarkemmin mitä AR-teknologia eli lisätty todellisuus on.

3.1 Lisätty todellisuus

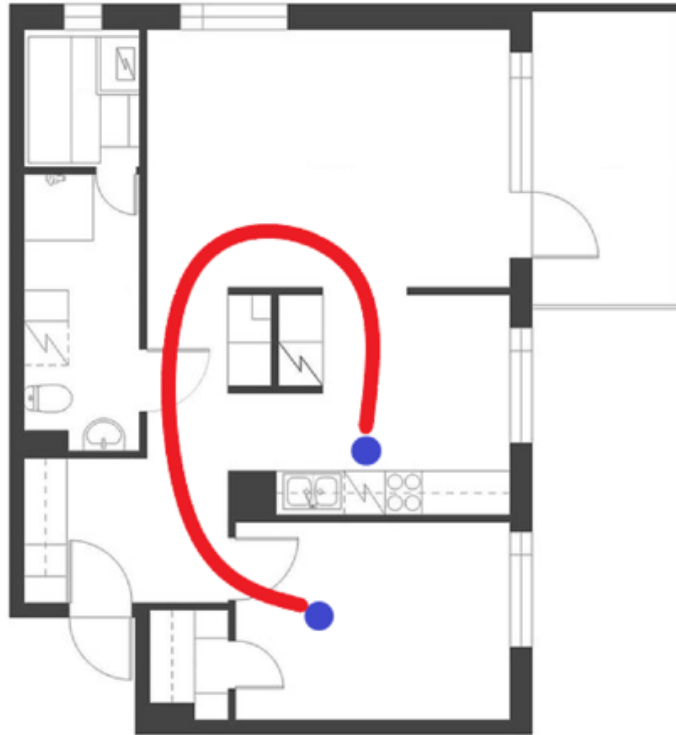
Lisätty todellisuus on teknologia, joka tarkoittaa tietokoneella luotujen elementtien lisäämistä todellisen maailman näkymään. Lisätty todellisuus voidaan toteuttaa erilaisilla seurantatekniikoilla, joita ovat sensoripohjaiset, kuvapohjaiset ja hybridimenetelmät. Sensoripohjaiset seurantatekniikat perustuvat ympäristöön sijoitettuihin sensoreihin. Kuvapohjaiset seurantatekniikat hyödyntävät kuvatietoa kameran sijainnin ja suuntautumisen seuraamiseen. Kuvapohjaiset seurantatekniikat voidaan edelleen jakaa keinotekoisia merkkejä hyödyntäviin, sekä tilan luonnollisia ominaisuuksia hyödyntäviin. Hybridipohjaiset seurantatekniikat nimensä mukaisesti käyttävät useita teknologioita. (Rabbi ja Ullah, 2013.)

Tämä työ keskittyy kuvapohjaiseen ja tilan ominaisuuksia hyödyntävään lisättyyn todellisuuteen sisänavigoinnin näkökulmasta, joten tässä kappaleessa käsitellään sitä. Ensiksi tila, jossa navigointi tulee tapahtumaan, täytyy kuvata. Tämän kuvadatan pohjalta tilan ominaisuudet mallinnetaan. Kun itse paikantaminen tapahtuu, kameran eli tässä tapauksessa käyttäjän älypuhelimien asento ja sijainti lasketaan kuvassa näkyvien ominaisuuksien avulla (Rabbi ja Ullah, 2013). Kameran liikkeessä, asento- ja paikkatiedot päivittyvät jatkuvasti näkyvien ominaisuuksien perusteella.

Lisätty todellisuus ja sen kuvapohjainen seuranta tarjoaa tarkan virtuaalisen informaation rekisteröinnin todelliseen maailmaan pienellä viiveellä (Rabbi ja Ullah, 2013). Sen hyödyntämiseen sisänavigoinnissa liittyy kuitenkin haasteita, joita ovat luotettavuuden puute sekä suuren laskentatehon tarve.

3.2 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutettiin käyttämällä Android-puhelinta, johon asennettiin VimAI. Se koostuu kahdesta erillisestä sovelluksesta VimAI-mapping ja VimAI-navigation. VimAI-mapping- sovellusta käyttäen tila kuvattiin sekä mallinnettiin, ja VimAI-navigation- sovellusta käyttäen pystyttiin navigoimaan mallinnetussa tilassa. Tutkimus suoritettiin yksikerroksisessa 59 m² asunnossa.



Kuva 6. Tila, jossa tutkimus suoritettiin. Mallinnuksen päätepisteet sinisellä ja kuljettu reitti punaisella.

Ensimmäiseksi sovellukselle annettiin mallinnettavan tilan kartta eli pohjapiirros (kuva 6). Seuraavaksi pohjapiirroksen merkittiin lähtöpaikka, ja tilaa lähdettiin kuvaamaan suunniteltua reittiä pitkin. Kuvaaminen älypuhelimella tapahtui siten kuin reittiä olisi videokuvattu, mutta VimAI-mapping hoiti kuvien ottamisen. Kuvaus suoritettiin kävelemällä reittiä rauhallisesti, sekä jatkuvasti kameraa maltillisesti käännellen puolelta toiselle, jolloin tilasta pystyttiin ottamaan useampia kuvia. Kun kuvaus lopetettiin, täytyi

pohjapiirrokseen merkitä lopetuspaikka. Tämän jälkeen sama prosessi suoritettiin uudelleen, mutta käänteisessä järjestyksessä. Uusi aloituspaikka oli aiemman kuvauskerran lopetuspaikka, ja kuljettu reitti täysin sama, mutta toiseen suuntaan. Kun reitti oli kuljettu, pystyttiin tarkistamaan kerätystä datasta kuljettu jälki pohjapiirroksen päällä. Mikäli jälki ei täsmännyt, täytyi kuvat ottaa uudelleen.

Kuvassa 6 näkyy sinisellä reitin päätepisteet ja punaisella reitti, joka kuljettiin edestakaisin. Yhteensä VimAI-mapping keräsi kahdelta kuvauskerralta 111 kuvaa, jotka ladattiin serverille. Serverillä tapahtui siis tilan mallinnus sille annettujen kuvien ja datan perusteella.

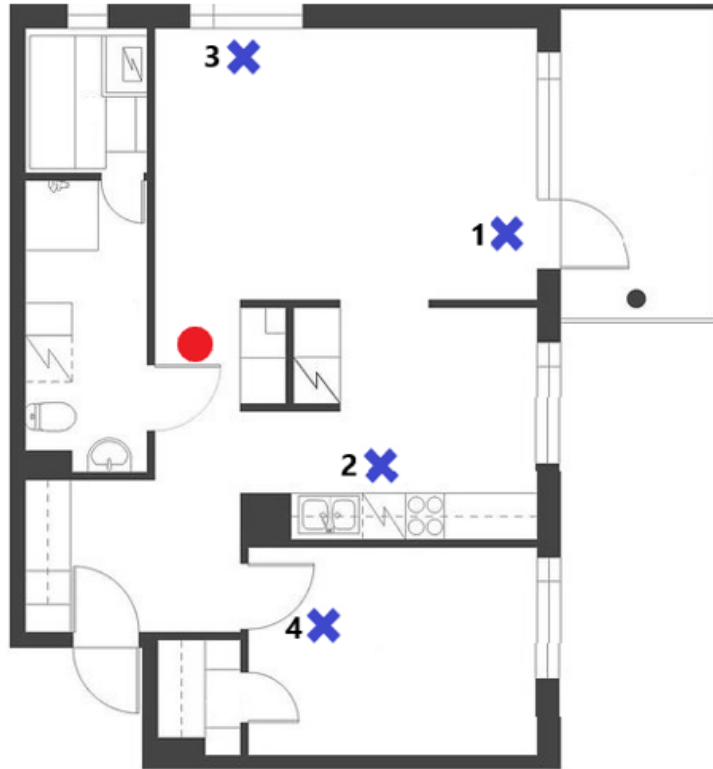
Kun mallinnus serverillä oli valmis, pystyttiin VimAI-navigation sovellusta käyttämään tilassa. Sovelluksesta etsittiin kyseinen tila, ja navigoiminen pystyttiin aloittamaan lähes välittömästi. Aluksi sovelluksen siis täytyi kuitenkin paikantaa laitteen sijainti tilassa, jonka se teki käyttämällä kuvapohjaista seurantatekniikkaa ja hyödyntämällä tilan luonnollisia ominaisuuksia.

3.3 Testaus

Seuraavaksi käsitellään, kuinka testaus suoritettiin. VimAI-mapping tarjoaa kohdepisteiden lisäämisen pohjapiirrokseen. Tätä ominaisuutta hyödynnettiin testauksessa lisäämällä tilan pohjapiirrokseen kohdepiste, johon tuli päästä VimAI-navigation sovellusta käyttäen. Ensimmäiseksi suoritettiin testit, joissa selvitettiin kuinka tehokkaasti VimAI-navigation tunnistaa lähtöpaikan.

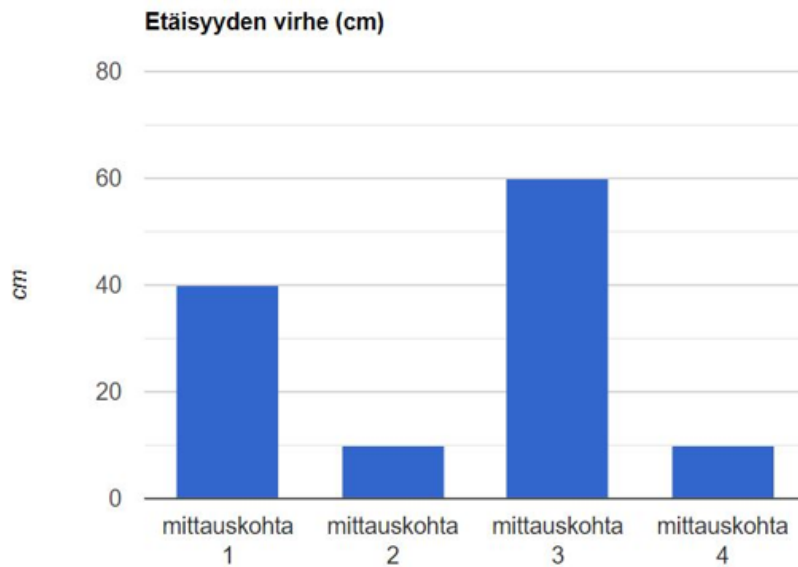
Testejä suoritettiin neljä kappaletta, joista jokaisella testikerralla lähdettiin navigoimaan eri puolelta tilaa. VimAI-navigation tunnisti lähtöpaikan joka kerta ja osasi sijoittaa laitteen lähes täsmällisesti kartalle. Myös kohdepisteelle navigoiminen sujui aina ongelmitta. Näiden testien lisäksi suoritettiin mittaukset, joissa pyrittiin selvittämään paikannuksen virhe senttimetreinä eri puolilla tilaa.

Kuvassa 7 on merkitty sinisillä ruksilla paikat, joissa selvitettiin etäisyyden virhe vertaamalla mihin kohtaan tilaa VimAI-navigaation oli merkinnyt paikannettavan laitteen sijainnin. Ruksit käytiin numeroiden mukaisessa järjestyksessä, ja virheet merkattiin ylös.



Kuva 7. Punainen ympyrä osoittaa lähtöpaikan, ja siniset ruksit ovat numeroitu siinä järjestyksessä, jossa ne käytiin.

Kaavio 1 esittää etäisyyden virheen pyöristettynä lähimpään viiteen senttimetriin. Etäisyyden virheen keskiarvo oli 30 cm. Virheissä on suurehkoa vaihtelua, mutta se on selitettävissä. Mittauskohdat 2 ja 4, joiden tarkkuus oli erittäin hyvä, sijoittuvat kuvassa 6 esitytetylle kuvaamisessa kuljetulle reitille. Kun taas mittauskohdat 1 ja 3, joiden tarkkuus ei yltänyt samalle tasolle, eivät olleet kuljetulla reitillä. Tarkkuutta voidaan varmasti parantaa kuvaamalla tila mahdollisimman perusteellisesti.



Kaavio 1. Etäisyyden virhe eri mittauskohdissa pyöristettynä lähimpään viiteen senttimetriin.

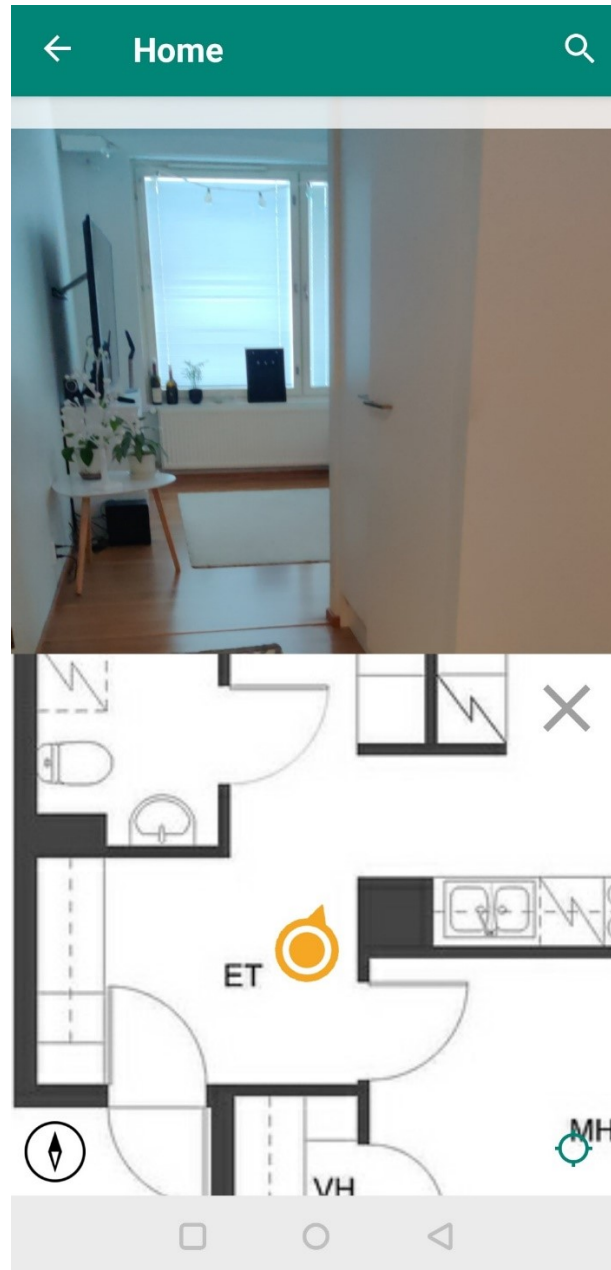
3.4 Tutkimuksen tulokset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuvapohajaisen AR-tekniikan vahvuudet ja heikoudet sisäpaikantamisessa- ja navigoinnissa verrattuna muihin teknologioihin. Lisäksi tarkasteltiin tekniikan helppokäyttöisyyttä käyttäjän näkökulmasta. Tämä osio käsittelee saavutettuja tuloksia ja vastaa ennen tutkimusta määritettyihin kysymyksiin. Tutkimuksen tulokset AR-tekniikkaa koskien käsittelevät ainoastaan VimAI:lla saatuja tuloksia. Tarkastellaan ensiksi AR-tekniikan vahvuuksia.

3.4.1 Vahvuudet

VimAI-navigaatio tarjoaa vastaavanlaisen käyttöliittymän osana navigointia kuin yleisimmät älypuhelimien karttasovellukset (ks. Kuva 8). Tämä on mahdollista, sillä sovelluksella on käytössä tilan yksityiskohtainen pohjapiirros, johon se pystyy sijoittamaan käyttäjän. Kartalle sijoitettu merkki liikkuu tarkasti käyttäjän liikkeen mukaan, mahdollistaen saumattoman navigoinnin. Kohdepisteisiin on mahdollista navigoida tuntematta tilaa, pohjapiirrosta seuraten. Lisäksi tarkastelussa oli helppokäyttöisyys käyttäjän näkökulmasta, joka toteutuu sovelluksen intuitiivisen käyttökokemuksen takia.

AR-teknologian käyttöönotolle eri profiilin tiloissa on omat edellytyksensä, mutta niitä huomioimatta käyttöönotto on helppoa. Tiloihin ei tarvitse asentaa ylimääräistä ja kallista laitteistoa, vaan tilan kuvaaminen ja mallintaminen riittää. Vähimmillään tarvitsee siis vain älypuhelimien.



Kuva 8. Kuvankaappaus VimAI-navigation sovelluksesta.

3.4.2 Heikkoudet

Vaikka AR-teknologiaa tarjoaa etuja, joita ei muilla teknologioilla välttämättä pystytä saavuttamaan, on sillä omat heikkoutensa. Seuraavaksi käydään läpi tutkimuksessa esiin tulleita heikkouksia. Kun tilaa kuvattiin, joutui reitin kulkea useaan otteeseen, jotta sovellus sai rekisteröityä kuljetun reitin oikein pohjapiirroksen. Tämä johtui osin inhimillisestä tekijästä, joka vaikutti omalta osaltaan kuvien laatuun. Kuitenkin myös tilan ominaisuuksilla oli merkitystä. Esimerkiksi peilit ja ikkunat vaikuttivat kuvauksen lopputulokseen heikentävästi. Kun nämä häiriötekijät peitettiin tai poistettiin, saatiin tilasta otettua kelpaavat kuvat sekä kuljettu reitti oikein.

Tilan ollessa erittäin suuri, tuo se varmasti omat haasteensa tilan kuvaamiseen. Lisäksi, mikäli tilan luonnolliset ominaisuudet muuttuvat jatkuvasti, saattaa se vaikuttaa negatiivisesti navigointiin, kun käytössä on vanhentunut malli tilasta. Tällöin on mahdollisesti tilanne, jossa tilasta luotua mallia joutuisi jatkuvasti päivittämään uusilla kuvauksilla.

4 Yhteenveto

Sisätiloissa tapahtuva paikantaminen ja navigointi on monimutkainen ja haastava ongelma, jonka ratkaisemiseksi on kehitetty useita teknologioita ja menetelmiä. Tunnetuin ulkona toimiva paikallistamisjärjestelmä GPS ei pysty tuottamaan tarkkaa ja luotettavaa sijaintitietoa sisätiloissa, joten kehitetyt vaihtoehtoiset ratkaisut, kuten WLAN, RFID, Bluetooth, UWB ja magneettikentät tarjoavat eri lähestymistapoja sisäpaikantamiseen. Tässä työssä käsiteltiin näiden teknologioiden lisäksi kuvapohjaista AR-teknologiaa, joka tarjoaa uuden tavan yhdistää todellisuuden ja tietokoneella luodun grafiikan, mahdollistaen navigoinnin tuntemattomassa ympäristössä.

Ensimmäinen osa työstä esitteli eri sisäpaikannusteknologioiden toimintaperiaatteet, sekä niiden vahvuudet ja heikkoudet. WLAN:in signaalin saapumisaikaan ja -kulmaan perustuvat menetelmät ovat suhteellisen tarkkoja, mutta niiden suorituskyky voi vaihdella signaalin vastaanoton ja muiden signaaleja koskevien häiriöiden vuoksi. RFID:n vahvuus on sen kyky tarjota sijaintitietoa pienellä virrankulutuksella, mutta tägit voivat olla kalliita

ylläpitää. Bluetooth low energy (BLE) on energiatehokas ja edullinen. UWB:n vahvuutena on sen erittäin lyhyt pulssisignaali, jonka ansiosta se tarjoaa korkean tarkkuuden, mutta on kallis. Magneettikenttien hyödyntäminen vaatii perusteellisen kartoituksen tilasta, jossa navigointi tapahtuu, mutta voi tarjota tarkan ja erilaisen lähestymistavan paikantamiseen.

Toisessa osassa tehtiin kokeellinen osuus, jossa käytettiin VimAI-sovellusta, joka perustuu kuvapohjaiseen AR-teknologiaan. Kokeessa arvioitiin sovelluksen suoriutumista sisätilojen navigoinnissa luotettavuuden, tarkkuuden ja helppokäyttöisyyden näkökulmista. Tulokset osoittivat, että kuvapohjainen AR-teknologia tarjoaa mahdollisuuden luoda intuitiivisen ja informatiivisen navigointijärjestelmän. Sen tarkkuus ja suorituskkyky ovat riittäviä moniin käyttökohteisiin.

Kokonaisuudessaan työ osoitti, että AR-teknologialla on potentiaalia tarjota tehokas ratkaisu sisätilojen paikannukseen ja navigointiin, mutta sen tehokas hyödyntäminen edellyttää jatkotutkimuksia ja tarkempaa optimointia. Työssä saavutettiin kattava katsaus nykyisin käytettävistä sisäpaikannusteknologioista sekä kokeellisesti arvioitiin kuvapohjaisen AR-teknologian soveltuvuutta sisätilojen navigointiin.

Lähteet

- Alarifi, A. & Al-Salman, A. & 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. *Sensors*. Vol. 16:5. S. 707. Saatavissa: DOI 10.3390/s16050707.
- Davidson, P. & Piche, R. (2017) A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones. *IEEE Communications surveys and tutorials*. Vol. 19:2. S. 1347–1370. Saatavissa: DOI 10.1109/COMST.2016.2637663.
- Faragher, R. & Harle, R. (2015) Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons. *IEEE journal on selected areas in communications*. Vol. 33:11. S. 2418–2428. Saatavissa: DOI 10.1109/JSAC.2015.2430281.
- Gozick, B. & Subbu, K. P. & Dantu, R. & Maeshiro, T. (2011) Magnetic Maps for Indoor Navigation. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. Vol. 60:12. S. 3883–3891. Saatavissa: DOI 10.1109/TIM.2011.2147690.
- Heydon, R. (2012) Bluetooth low energy. 1. Painos. Indiana, Yhdysvallat: Prentice Hall. 329 s. ISBN 978-0-13-288836-3.
- Jimenez Ruiz, A. R. & Seco Granja, F. & Prieto Honorato, J. C. & Guevara Rosas, J. (2012) Accurate Pedestrian Indoor Navigation by Tightly Coupling Foot-Mounted IMU and RFID Measurements. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. Vol. 61:1. S. 178–189. Saatavissa: DOI 10.1109/TIM.2011.2159317.
- Kriz, P. & Maly, F. & Kozel, T. (2016) Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons. *Mobile information systems*. Vol. 2016. S. 1–11. Saatavissa: DOI 10.1155/2016/2083094.
- Ni, L. M. & Yunhao, L. & Lau, Y. C. & Patil, A. P. (2004) LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID. *Wireless networks*. Vol. 10:6. S. 701–710. Saatavissa: DOI 10.1023/B:WINE.0000044029.06344.dd.
- Rabbi, I. & Ullah, S. (2013) A survey on augmented reality challenges and tracking. *Acta graphica*. Vol. 24:(1–2). S. 29–46.
- Weinstein, R. (2005) RFID: a technical overview and its application to the enterprise. *IT professional*. Vol. 7:3. S. 27–33. Saatavissa: DOI 10.1109/MITP.2005.69.
- Yang, C. & Shao, H. (2015) WiFi-based indoor positioning. *IEEE communications magazine*. Vol. 53:3. S. 150–157. Saatavissa: DOI 10.1109/MCOM.2015.7060497.

Yassin, A. & Nasser, Y. & Awad, M. & Al-Dubai, A. & Liu, R. & Yuen, C. & Raulefs, R. & Aboutanios, E. (2017) Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications. IEEE Communications surveys and tutorials. Vol. 19:2. S. 1327–1346. Saatavissa: DOI 10.1109/COMST.2016.2632427.

Zafari, F. & Gkelias, A. & Leung, K. K. (2019) A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. IEEE Communications surveys and tutorials. Vol. 21:3. S. 2568–2599. Saatavissa: DOI 10.1109/COMST.2019.2911558.