

Joel Helkala

**Voimanostoliikkeiden suoritusten monitorointi
inertiamittausyksiköillä**

Tietotekniikan Pro gradu -tutkielma

22. marraskuuta 2022

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Joel Helkala

Yhteystiedot: joel.helkala@gmail.com

Ohjaaja: Tapio Frantti

Työn nimi: Voimanostoliikkeiden suoritusten monitorointi inertiamittausyksiköillä

Title in English: Powerlift monitoring with inertial measurement units

Työ: Pro gradu -tutkielma

Opintosuunta: Tietotekniikka

Sivumäärä: 63+0

Tiivistelmä: Tässä Pro Gradu -tutkielmassa tutkittiin onko mahdollista monitoroida voimanostoliikkeiden liikeratoja suorituksen aikana. Monitorointiin käytettiin Movesense-sensoreita, joilla voidaan mitata liikettä kiihtyvyysanturin, gyroskoopin ja magnetometrillä avulla. Tutkielmassa keskityttiin jalkakyykyn ja penkkipunnerruksen suorituksiin. Sensori kommunikoi matkapuhelimen kanssa BLE-protokollan avulla. Tutkielmassa käytettiin konstruktivistista tutkimusmetodia artefaktin eli prototyypin kehittämiseen. Suoritettujen tutkimusten perusteella magnetometrillä ja kiihtyvyysanturin avulla voidaan mitata huomattavalla tarkkuudella kyykyn sekä penkkipunnerruksen liikeratoja. Liikeradoista on myös kerätyn informaation avulla mahdollista havaita virheliikkuvuuksia. Optimaalisiksi sensorien sijainneiksi osoitettiin penkkipunnerruksessa tankojen päädyt ja kyykyssä alaselkä. Tutkielmassa pohdittiin myös kerätyn informaation anonymisyyttä, sekä sitä miten tämä olisi mahdollista suorittaa. Yksinkertaisella suodatuksella, jossa poistetaan kerätystä datasta aloitus ja lopetus kohdat, voidaan poistaa suuri määrä suorittajasta identifioivaa tietoa. BLE-protokolla osoittautuu hyväksi kommunikaatio vaihtoehdoksi toteutetulle artefaktille.

Avainsanat: iot, urheilumonitorointi, imu, ble, voimanosto, movesense

Abstract: In this Master's thesis, it was investigated whether it is possible to monitor and measure the trajectories of powerlifting movements during performance. For the monitoring we used Movesense sensors, which were equipped with accelerometer, gyroscope and magne-

tometer sensors. In this thesis we focused on squat and bench press movements. The used sensors communicated with a mobile phone with a wireless BLE-protocol. Design science research method was used in assistance with this thesis to perform a reliable study. According to the experiments performed in this thesis, we discovered that magnetometer and accelerometer suits perfectly for the monitoring of a powerlifting movement, with an excellent accuracy and the ability to see any error in the trajectory of the movement. It was discovered that the optimal placement of the sensor in bench press was the ends of the bar. In squat the optimal placement was at the lower back of the performer. In this study we also explored the issue of data anonymity related to the information gathered. The majority of a identifiable data is possible to destroy with a simple filter to remove the actions before and after the movement. The BLE-protocol proved to be a worthy choice for the wireless communication.

Keywords: iot, sports monitoring, imu, ble, powerlifting, movesense

Termiluettelo

BLE	Alhaisen virrankulutuksen radiokommunikaatio protokolla laitteiden väliseen keskusteluun. Tunnettu nimellä Bluetooth Smart tai Bluetooth Low Energy.
DoS	Denial of Service on palvelunestohyökkäys, jossa tarkoituksena on luoda suuri määrä yhteyspyyntöjä päätepisteeseen lyhyessä ajassa, joka häiritsee normaaleja toimenpiteitä
DDoS	Distributed DoS on hajautettu palvelunestohyökkäys, jossa yhteyspyynnöt tulevat monesta eri kohteesta
CRC	Cyclic Redundancy Check on virheiden tunnistus menetelmä, jota käytetään raakadatan virheiden todentamiseen.
IoT	Internet of Things on sensoreilla varustettujen laitteiden muodostama verkko.
JSON	JavaScript Object Notation on kevyt ja yleinen tiedonsiirtomuoto
LPWAN	Low-Power Wide-Area Network on kommunikaatioprotokolla kategoria, jonka protokollat pystyvät keskustelemaan langattomasti pitkiä matkoja matalalla teholla
MITM	Man-In-The-Middle hyökkäys, jossa hyökkääjä asettaa itsensä kahden laitteen väliin ja kaappaa kommunikaatiota.
WSN	Wireless Sensor Network on laitteiden muodostama verkko, jossa hyödynnetään langattomia kommunikaatioprotokollia.

Kuviot

Kuvio 1. Kiihtyvyyssanturi toimintaperiaate	7
Kuvio 2. Kiihtyvyyssanturin immunitaetti kulmanopeudelle	8
Kuvio 3. Gyroskoopin toimintaperiaate	9
Kuvio 4. Movesense arkkitehtuuri	20
Kuvio 5. Movesense applikaatio sensorin yhdistys	23
Kuvio 6. Movesense applikaatio data	24
Kuvio 7. IMU:n raakadata kyykyssä	28
Kuvio 8. Movesense aksiaalit	29
Kuvio 9. Penkkipunnerruksen liukuva keskiarvo	31
Kuvio 10. Penkkipunnerruksen WMA	32
Kuvio 11. Sensorien sijainti penkkipunnerruksessa	35
Kuvio 12. WMA penkkipunnerrus tangossa	37
Kuvio 13. WMA penkkipunnerrus ranteessa	38
Kuvio 14. WMA penkkipunnerrus kädessä	39
Kuvio 15. Sensorien sijainti kyykyssä	41
Kuvio 16. Kyykyn monitorointi tangossa	43
Kuvio 17. Kyykyn monitorointi vyössä	44
Kuvio 18. Kyykyn monitorointi ranteessa	45
Kuvio 19. Virheellisen kyykyn monitorointi	46
Kuvio 20. Avustettu mittaus kyykyssä	48

Taulukot

Taulukko 1. Langattomien kommunikaatioprotokollien vertailu	13
---	----

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	URHEILUMONITOROINTI	3
	2.1 Aiemmat tutkimukset	3
	2.2 Monitoroinnin hyödyt	4
	2.3 Tutkimuksissa käytetyt anturit	6
	2.3.1 Kiihtyvyysanturi	6
	2.3.2 Magnetometri	8
	2.3.3 Gyroskooppi	8
3	ESINEIDEN INTERNET	10
	3.1 IoT-käsite	10
	3.2 Tietoturva	11
	3.3 Langattomat kommunikaatioprotokollat	13
	3.3.1 LPWAN	14
	3.3.2 Zigbee	15
	3.3.3 6LowPAN	16
	3.3.4 Bluetooth Low Energy	16
4	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS	18
	4.1 Movesense	18
	4.2 Tutkimusmetodi	20
	4.3 Tutkimuksen tavoitteet	21
	4.4 Datan keräys	22
	4.5 Datan analysointi	25
5	TUTKIMUKSEN TULOKSET JA ANALYYSI	27
	5.1 Liikesensoridatan visualisointi	27
	5.2 Sensorien sijainti	33
	5.2.1 Penkkipunnerrus	34
	5.2.2 Jalkakyykky	40
	5.3 Kerätyn datan anonymisyys	47
6	YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUKSET	50
	LÄHTEET	52

1 Johdanto

Ihmisten käyttämät sensorit päivittäisten toimintojensa monitorointiin ovat kovassa nousussa tällä hetkellä. Ihmiset haluavat koko ajan tarkempaa informaatiota heidän toimistaan ja urheilusuorituksistaan. Teknologian ansiosta ihmisten on mahdollista kvantifoida entistä tarkemmin heidän aktiviteettejaan, oli se sitten kuntoiluun, terveyteen tai työhön liittyvää. Sensoreiden avulla voidaan monitoroida kehon liikkeitä ja antaa täten käyttäjälle parempaa ymmärrystä itsestään (Arogamam, Manivannan ja Harrison 2019). Urheilun avulla ihmiset voivat edistää terveellistä elämää, pidentää elinaikaansa, ennaltaehkäistä sairauksia ja myös parantaa henkistä hyvinvointia. Urheilu on erittäin tärkeää niin lapsilla, kuin aikuisillakin.

Voimaharjoittelu on erittäin hyödyllistä liikuntaa, jolla voidaan vahvistaa kehoa. Voimaharjoittelussa on kuitenkin erittäin tärkeää, että liikkeet tehdään oikeaoppisesti ja huolellisesti. Huonot liikeradat ja väärät harjoittelu käytännöt voivat aiheuttaa enemmän haittaa kuin hyötyä. Ammattuurheilijatkin käyttävät voimaharjoittelua heidän urheilusuoritusten parantamiseen, niin lihasmassan kasvattamisella että räjähtävyyden harjoittamisella. Voimaharjoittelun liikeratojen kriittisyyden vuoksi on erittäin tärkeää, että kokemattomimmat sekä kokeneet urheilijat pystyisivät suorittamaan liikkeitä turvallisesti.

Liikeratojen oikeaoppisuutta ja turvallista suorittamista voidaan monitoroida yleistyvillä sensoreilla. Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää, kuinka tarkasti liikeratoja voidaan monitoroida ja voidaanko tästä saada käyttäjälle hyödyllistä tietoa liikkeen suorituksesta. Käyttäjän liikeratojen ja toistoon kuluneiden aikojen pitkäaikaisella mittauksella voidaan antaa käyttäjälle myös hyvä kuva saavutetusta kehityksestä, niin liikeradan kuin voiman kehityksen kannalta.

Urheilumonitorointia on tutkittu todella paljon, erityisesti urheilusuoritusten tunnistamista, sykeväli vaihtelun analysointia, kalorikulutusta ja käyttäjän kulkeman matkan seuranta. Tutkimuksia voimaharjoittelun seurantaan on huomattavasti vähemmällä, joka motivoi tämän tutkielman suorittamista.

Tutkimuksessa käytettiin Movesense-sensoreita voimannostoliikkeiden monitorointiin. Sensori oli varustettu kiihtyvyyssanturilla, gyroskoopilla ja magnetometrillä. Sensori kommuni-

koi mobiililaitteen kanssa hyödyntäen BLE-protokollaa.

Tutkimuskysymyksiä tässä Pro gradu -tutkielmassa ovat: *Voiko voimannostoliikkeitä monitoroida inertiamittausyksiköillä luotettavasti sekä voiko kerättyä informaatiota suodattaa siten, että informaatiosta voidaan havaita voimannostosuoritusten tapahtumia eikä suorittaja ole mahdollista tunnistaa.*

Tutkielman luvussa 2 käydään läpi aiempia tutkimuksia urheilumonitoroinnista sekä miksi urheilua kannattaa monitoroida. Luvussa 3 tutustutaan esineiden internet käsitteeseen, sekä käsitellään IoT:n tämänhetkistä tietoturva tilannetta sekä käytettyjä langattomia kommunikatioprotokollia. Tutkimuksen suoritus käydään lävitse luvussa 4 ja luvussa 5 esitellään tutkimuksesta saadut tulokset ja tuloksien analyysi. Viimeisenä luvussa 6 käydään läpi tämän Pro gradu -tutkielman yhteenveto sekä mahdolliset jatkotutkimukset aiheeseen liittyen.

2 Urheilumonitorointi

Tässä luvussa käydään läpi urheilumonitoroinnin motivaatiota ja kirjallisuuskatsausta aiheeseen liittyvistä tutkimuksista. Alaluvussa 2.3 käydään läpi tutkimuksissa käytettyjä antureita ja vertaillaan niiden sopivuutta tutkimusongelman ratkaisemiseen. Viimeisenä käydään lävitse urheilumonitoroinnin mukana tulevia tietoturva riskejä.

2.1 Aiemmat tutkimukset

Urheilumonitorointia ollaan tutkittu laajasti niin yksilöllisesti tiettyjen urheilulajien kannalta että kuluttajan aktiviteettien monitorointiin ja tunnistamiseen. Voimaharjoittelu on jäänyt kuitenkin näistä tutkimuksista taka-alalle (Zhou ym. 2016), vaikka se on erittäin yleistynyt urheilumuoto.

Voimaharjoittelu on yleisesti kuvattuna urheilumuoto, jossa painojen nostaminen aiheuttaa kohdennetun lihaksen tai lihasryhmän ylikuormittumisen (*overload*). Voimaharjoittelusta on tullut erittäin suosittu urheilumuoto niin ammattilaisten että harrastelijoiden saralla. Voimaharjoittelu parantaa todistetusti suorittajan fyysistä kuntoa, lihasmassaa, yleiskuntoa että yleistä suorituskykyä. Winett ja Carpinelli (2001) suorittivat tutkimuksen, jonka perusteella vastusharjoittelulla on useita syvällisiä vaikutuksia tuki- ja liikuntaelimiin, se edistää toiminnallisten kykyjen ylläpitoa ja ehkäisee osteoporoosia, sarkopeniaa eli lihaskatoa, alaselän kipuja ja muita vammoja. Tutkimuksen mukaan myös vastusharjoittelu voi positiivisesti vaikuttaa riskitekijöihin, kuten insuliiniresistenssiin, glukoosiaineenvaihduntaan, lepoaineenvaihduntaan, verenpaineeseen, kehon rasvaan ja ruoansulatuskanavan läpikulku-aikaan, jotka liittyvät diabetekseen, sydänsairauksiin sekä syöpään.

Camomilla ym. (2018) suorittivat systemaattisen kirjallisuuskatsauksen tutkimuksista, jotka käyttivät kiihtyvyyssantureita, gyroskooppeja ja magnetometrejä motoristen urheilusuorituksen mittaukseen. Tutkimuksessa löydettiin 2040 paperia, joissa avainsanoja käytettiin otsikossa, tiivistelmässä tai avainsanoissa. Tutkielmien seulonnan jälkeen tutkimukseen valittiin 286 tutkimusta ja 23 katsausta. Näistä papereista vain neljä kohdistui painonostoon. Vastavasti Chambers ym. (2015) suorittivat systemaattisen kirjallisuuskatsauksen tutkimuksista,

jotka käyttivät kiihtyvyyssantureita, gyroskooppeja ja magnetometrejä tietyn urheilusuorituksen mittaukseen. Tutkimuksissa IMU:n piti olla asetettu urheilijaan eikä laitteeseen. Systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa löytyi vain yksi tutkimus, joka keskittyi voimannostoon (Adelsberger ja Tröster 2013).

2.2 Monitoroinnin hyödyt

Urheilusta kiinnostuneet ja ammattiurheilijat etsivät jatkuvasti uusia keinoja parantaa heidän urheilusuoritustaan ja keinoja saada kilpailullista etulyöntiasemaa (J. Zhang ym. 2018). Sensoreiden avulla voidaan edistää niin urheilijoiden suoritusten kehitystä että urheilijoiden turvallisuutta. Tarkkojen mittausten avulla voidaan edistää urheilijoiden valmennusta sekä havaita puutteita urheilusuorituksista (Camomilla ym. 2018; MacDonald ym. 2017).

Urheilijoiden turvallisuuden edistämiseen ollaan käytetty sensoreita mm. amerikkalaisessa jalkapallossa aivotärähdysten havaitsemisessa mittaamalla pään kiihtyvyyksiä (Siegmund ym. 2016). Camomilla ym. (2018) mukaan kiihtyvyyssantureiden mittaukset eivät pysty kuitenkaan tarkasti erottamaan taklauksia törmäyksistä. Mittausten tarkkuuksien parantamiseen voidaan hyödyntää gyroskooppeja (Gastin ym. 2013) sekä kehittää ad hoc-algoritmeja taklauksien tunnistamiseen (Kelly ym. 2012).

On selvää, että fyysinen aktiviteetti edistää ihmisten terveyttä ja ehkäisee sairauksia. Yhdistyneen kuningaskunnan urheilu- ja liikuntatieteiden yhdistyksen konsensuslausunnon mukaan fyysinen aktiviteetti voi vähentää sepelvaltimotaudin, liikalihavuuden ja tyypin 2 diabeteksen riskiä sekä muita kroonisia sairauksia (O'Donovan ym. 2010).

Aktiviteettien kvantifointi motivoi ihmisiä tavoittelemaan terveellisempiä elämänlaatuja. James J. Annesin suorittamassa tutkimuksessa (Annesi 1998) seurattiin miten tietokoneiden antama palaute parantaa kuntoilijan motivaatiota urheiluun. Testiryhmässä jossa henkilöt saivat palautetta huomattiin suurempaa osanottoa ja sitoutumista, pienempi lopettaneiden määrä kuukaudessa, enemmän päiviä ennen lopettamista ja huomattavasti pienempi lopettaneiden määrä (46%) kahdeksan kuukauden testijakson aikana.

Monissa urheilulajeissa käytetään voimaharjoittelua urheilusuorituksen kehittämisen tuke-

na. Burd ym. (2012) mukaan reiden ojennuksessa hitaat toistot kasvattavat huomattavasti lihasproteiinisynteesiä, verrattuna nopeisiin toistoihin. Hitaat toistot olivat tutkimuksessa 6 sekuntia alas ja 6 sekuntia ylös. Tutkielman mukaan TUT (*time under tension*) voi olla todella tärkeä osa urheilusuorituksia, jos tarkoituksena on kasvattaa lihasmassaa tai ehkäistä lihasmassan katoa. Tutkimusten tulokset TUT:in vaikutuksista lihaskasvuun ovat kuitenkin vaihtelevia ja täten tarkkaa korrelaatiota ei voida tällä hetkellä todentaa (Tran, Docherty ja Behm 2006). Yleinen tavoite vastusharjoittelussa on kohdistaa ärsyke jokaiseen suureen lihasryhmään noin 30-90 sekunnin ajan ja tuottaa marginaalinen ylikuormitus verrattuna aikaisempaan harjoitukseen (Feigenbaum ja Pollock 1999). Urheilijan noudattaessa ennalta määrättyjä TUT-aikoja, on mahdollista saada tarkempia vertailukohteita urheilijan kehityksestä.

Voimannostossa liikkeet koostuvat monimutkaisista liikkeiden sarjoista, joissa liikutetaan ulkoista painoa painovoima vektoria vasten. Liikkeissä haastavaa on suorittaa ne oikeilla ajoituksilla, liikeradoilla ja vaiheilla, joka voidaan huomata selvästi aloittelijan voimannostosuorituksista. Mitä tarkemmat suoritukset ajoituksissa ja liikeradoissa on, sitä enemmän pystyy suorittaja nostamaan painoa tehokkaasti ja turvallisesti. Nostetun painon määrä ei kuitenkaan ole suoraan tekijä hyvään suoritukseen. Vahva ja huonosti suoriutuva tekijä voi nostaa enemmän painoa verrattuna heikompaan ja hyvän suorituksen totettutajaan.

Hyvän suorituksen oppiminen on vaikeaa ja aikaa vievää, sillä usein ainut tieto minkä liikkeen suorittaja saa suorituksestaan on onnistuminen tai epäonnistuminen, eikä aina sitäkään. Liikkeen suoritus on mahdollista videoida ja analysoida, mutta tämä on kuitenkin aikaa vievää eikä monet tätä halua tehdä (Adelsberger ja Tröster 2013), ja vaikka aloittelija toiston videoisi, ei hänellä olisi tietoja ja taitoja liikettä analysoida. Edellä mainittujen perusteella voidaan päätellä, että laite joka mittaa suorittajan liikkeet olisi erittäin hyödyllinen, niin ammattilaisille kuin aloittelijoillekin. Mittausten ja analysointien tekeminen pitäisi kuitenkin olla suorittajalle vaivatonta eikä vaatisi kuluttajalta aiempaa tietämystä liikkeiden suorituksesta.

2.3 Tutkimuksissa käytetyt anturit

Urheilussa käytetään monenlaisia antureita käyttäjän toimintojen monitorointiin. Urheilulaeissa voidaan käyttää antureita urheilijan harjoittelun optimointiin, kehittymisen tarkkailuun, suoritusten analysointiin ja turvallisuuden takaamiseen. Laitteiden käyttämät anturit ovat valittava tarkasti mitattavan tarkoituksen mukaisesti. Antureista on olemassa yksi-, kaksi- ja kolmiakselisia versioita. Mitattavien parametrien arvot ovat mitattu suhteessa karteeseen koordinaatistoon (Camomilla ym. 2018). Esimerkiksi kolmiakselisella kiihtyvyyssanturilla mitataan kiihtyvyyksiä x, y ja z aksiaaleilla. Laitteita joilla voidaan mitata liikettä kolmessa ulottuvuudessa, kutsutaan inertiamittausyksiköiksi (IMU). IMU:issa hyödynnetään yleensä useampia sensoreita (MacDonald ym. 2017).

Tutkimuksissa aktiviteettien tunnistamiseen ollaan käytettyä lukuisia antureita, kuten painesensoreita, kiihtyvyyssantureita, gyroskooppeja, mikrofoneja, barometreja, RFID-lukijoita ja GPS:iä (Chang, Chen ja Canny 2007). Kuluttajien käyttämät sensorit ovat yleistymässä kovaa vauhtia. Erityisesti urheilukellot ovat valtaamassa markkinoita kuluttajien keskuudessa (“Heart rate monitors, activity trackers and bike computers” 2004; “Fitbit Official Site for Activity Trackers and More” 2004; “Suunnon urheilukellot, sukellustuotteet, kompassit ja lisävarusteet” 2004). Urheilukellot hyödyntävät GPS:ää, sykemittareita ja pedometrejä seuraamaan käyttäjän kulkemaa matkaa kävellessä, juostessa tai pyöräillessä ja näistä arvioidaan kulutettuja kaloreita (Zhou ym. 2016).

Käyttäjän kehon orientaatiota voidaan tarkkailla antureiden mittaamilla suureilla, mutta vain yhden anturin käyttö voi tuottaa epätarkkoja tuloksia. Tuloksien tarkkuutta voidaan kasvattaa gyroskoopeilla. (Sabatini 2011)

2.3.1 Kiihtyvyyssanturi

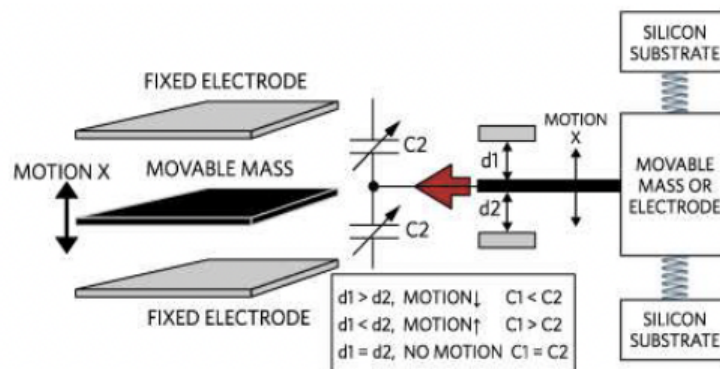
Kiihtyvyyssanturi käyttää elektromekaanista anturia, joka mittaa staattista tai dynaamista kiihtyvyyttä. Staattinen kiihtyvyys voidaan kuvitella esimerkiksi maan vetovoimana ja dynaaminen kiihtyvyys kappaleeseen kohdistuvana liikkeenä. Luvussa 2.2 tuotiin esille, kuinka kiihtyvyyssantureita on käytetty urheilujoiden loukkaantumisen estämisessä ja tunnistamisessa, mutta niitä käytetään myös esimerkiksi autojen turvatyynyjen laukaisemisessa sekä

puhelimien näytön tilan vaihtamista muotokuvan ja maisemakuvan välillä (Dadafshar 2014).

Newtonin toisen liikelain mukaan kappaleen kiihtyvyys on suoraan verrannollinen ja samaan suuntaan kuin kappaleeseen vaikuttava nettovoima ja kääntäen verrannollinen sen massa (Dadafshar 2014). Täten kappaleeseen vaikuttava nettovoima F antaa m massaiselle kappaleelle kiihtyvyyden a .

$$F = ma \quad (2.1)$$

Kiihtyvyyssanturi ei itsessään mittaa kiihtyvyyttä, vaan kiihtyvyys luo voiman jonka anturin mekanismi havaitsee. Anturi täten mittaa kiihtyvyyden epäsuorasti anturin aksiaaliin vaikuttavasta voimasta (Dadafshar 2014). Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä metriäneliökunnissa (m/s^2) tai suhteessa maan painovoimaan eli G-voimissa (Dadafshar 2014). Maan päällä ilman kalibrointia kiihtyvyyssanturi näyttäisi $9,81m/s^2$ kiihtyvyyttä ylöspäin.



Kuvio 1. Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate (Dadafshar 2014)

Kuvassa 1 esitetään kiihtyvyyssanturin toiminta yhdellä liikkuvalla massalla. Massa on sijoitettu kahden liikkumattoman elektrodilevyn väliin jousen avulla. Kiihtyvyys saa massan liikkumaan lähemmäksi jompaa kumpaa elektrodilevyä, täten muuttaen kondensaattorin kapasitanssia. Kiihtyvyyden suunta voidaan laskea vertaamalla kondensaattoreiden arvojen erot. (Dadafshar 2014)

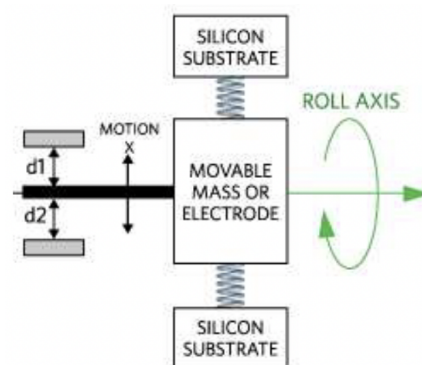
2.3.2 Magnetometri

Magnetometrillä voidaan mitata magneettikenttää tai magneettista dipolimomenttia. Magnetometrejä on monia erilaisia, mutta ne kiteytyvät kahteen kategoriaan, skalaarisiin- sekä vektorimagnetometreihin. Erilaisilla sensoreilla voidaan mitata magneettikentän suuntaa, nopeutta tai voimakkuutta tietyssä pisteessä. Kompassi on hyvä esimerkki laitteesta joka hyödyntää magnetometriä mitatakseen sitä ympäröivän magneettikentän suuntaa.

Ensimmäinen magnetometri joka pystyi mittaamaan magneettikentän voimakkuuden avaruuden pisteessä, kehitettiin Carl Friedrich Gaussin toimesta vuonna 1833. Edwin Hall keksi Hall-ilmion kokeellisesti vuonna 1879, joka on nykyään yleisin magnetometreissä käytetty teknologia. Erittäin hyväkuntoinen ja luotettava Hall-ilmio muunnin on mahdollista toteuttaa tavallisilla integroiduilla piiriprosesseilla, jonka takia kyseinen teknologia on erittäin yleinen. (Ramsden 2011)

2.3.3 Gyroskooppi

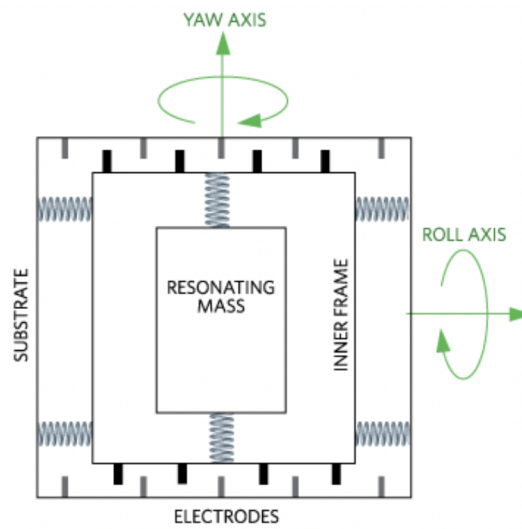
Kiihtyvyysanturi mittaa lineaarista kiihtyvyyttä, kun taas gyroskooppi tai kulmanopeusanturi mittaa kulmanopeutta. Kiihtyvyysanturi ei havaitse kulmanopeuden muutoksia, koska liikuvan massan etäisyys elektrodilevyihin pysyy samana. Tätä tapahtumaa havainnollistetaan kuvassa 2.



Kuvio 2. Kiihtyvyysanturin immunitetti kulmanopeudelle (Dadafshar 2014)

Kulmanopeus gyroskoopissa mitataan yksikössä astetta/sekunti eli *dps*. Resonoivan gyroskoopin rakenne koostuu resonoivasta massasta joka on yhdistetty sisäiseen kehykseen jousil-

la ja sisäinen alusta on yhdistetty jousilla ulompaan substraattiin. Tämän avulla voidaan mitata Coriolis-kiihtyvyyttä elektrodien avulla, jotka ovat asetettu substraatin ja sisäisen kehyksen väliin. (Dadafshar 2014)



Kuvio 3. Gyroskoopin toimintaperiaate (Dadafshar 2014)

3 Esineiden internet

Tässä luvussa käydään läpi IoT -käsitettä alaluvussa 3.1. Alaluvussa 3.2 käydään läpi nykyistä IoT-järjestelmien tietoturva tilannetta. Viimeisessä alaluvussa käydään läpi IoT-laitteissa käytettyjä langattomia kommunikaatioprotokollia ja niiden ominaisuuksia.

3.1 IoT-käsite

Esineiden internet (IoT) koostuu sulautetuista laitteista, jotka ovat kuin pieniä tietokoneita. Sulautettua järjestelmää voitaisiin kuvitella esimerkiksi jääkaapissa, joka alkaa hälyyttämään, jos jääkaapin ovi on liian kauan auki tai jääkaapin lämpötila ei ole optimaalinen. Jääkaapin sisällä on pieni sulautettu laite, jolla on erittäin tarkka tehtävä. Laitteen tarkoitus on antureiden avulla tarkastella fyysistä ympäristöään ja suorittaa toimintoja tarkkailujen perusteella. Sulautetut laitteet voivat olla yhteydessä kommunikaatioprotokollien avulla ja näin muodostaen esineiden internetin. IoT-laitteilla on tyypillisesti pieni muistikoko, matala tiedonsiirtonopeus, rajoitettu laskentakyky sekä langattomat laitteet ovat usein paristokäyttöisiä.

IoT:n tai esineiden internetin avulla laitteet voivat nähdä, kuulla ja aistia niiden ympäristöään (Al-Fuqaha ym. 2015). IoT-laitteissa olevat anturit ovat silta digitaalisen ja fyysisen maailman välillä. Antureiden avulla laitteet tunnistelevat fyysistä ympäristöään, muuntavat kerätyn informaation digitaaliseen muotoon sekä toimivat kerätyn informaation perusteella. Laitteiden keräämän informaation avulla voidaan luoda hyödyllisiä palveluita, jotka eivät tarvitse ihmisen vuorovaikutusta.

Kuluttajalle esineiden internettiä voidaan hyödyntää helpottamalla kuluttajan elämää. Esineiden internetin avulla voidaan luoda älykkäitä koteja, jossa IoT-laitteet aistivat fyysistä ympäristöään ja ilmaistaan havainnoista kuluttajalle ja tehdään toimenpiteitä aktuaattorien avulla. Älykkäässä kodissa voidaan antureiden avulla aistia omistajan saapuminen, jonka seurauksena IoT-laite pistää eteisestä valot päälle riippuen nykyisestä valoisuudesta. Vastavasti esineiden internettiä voidaan hyödyntää yritysmaailmassa esimerkiksi kokoushuoneiden lämpötilan optimoinnissa.

IIoT-laitteita (*Industrial IoT*) hyödynnetään tehtaissa sekä muissa teollisuuden ympäristössä. Kyseisillä laitteilla voidaan automatisoida linjatyöskentelyä sekä ilmoittaa mahdollisista ongelma tilanteista tai vaarallisista fyysistä ominaisuuksista laitteen sisällä, kuten lämpötilasta, suoraan laitteiden mekaanikolle. (“What are IoT devices?” 2022)

Esineiden internetissä on mahdollista hyödyntää monenlaisia verkottumis-, viestintä ja liitettävyysprotokollia. Protokollien optimaalinen valinta esineiden internet -verkkoon on erittäin riippuvainen järjestelmän tarkoituksesta. Langattomaan kommunikointiin kuuluvat LPWAN, Zigbee, Bluetooth Low Energy, Z-Wave, RFID sekä NFC (“What are IoT devices?” 2022). Vaihtoehtoja on monia muitakin, mutta nämä ovat yleisimmät valinnat langattomiin tarpeisiin. Jokaisella valinnalla on omat etunsa, jonka takia käymme luvussa 3.3 lävitse muutamaa valittua protokollaa, tuomalla esiin protokollien teknisiä ominaisuuksia, kuten kantamaa, tiedonsiirtokapasiteettiä ja virrankulutusta.

3.2 Tietoturva

IoT-laitteiden yleistymisen niin teollisuudessa kuin kuluttajilla on ollut kiihtyvässä kasvussa. IoT-laitteiden avulla voidaan kehittää älykkäitä koteja, -kaupunkeja sekä muita älykkäitä autonomisia järjestelmiä. Huolimatta vuoden 2021 Covid-19 pandemiasta ja mikrosiru pulhasta (Wu, Zhang ja Du 2021), IoT-laitteiden määrän uskotaan kasvavan vuonna 2022 noin 18%, jolloin laitteiden määrä olisi noin 14.4 miljardia (“Number of connected IoT devices growing 18% to 14.4 billion globally” 2022). Vastaavasti “Number of IoT Connected Devices Worldwide” 2022 mukaan vuonna 2022 IoT-laitteiden määrä päätellään olevan 11.57 miljardia ja vuodelle 2030 ennustetaan noin 25.44 miljardia laitetta. Ennusteiden määrä voi vaihdella lähteestä riippuen paljonkin, koska IoT-laitteiden määrittely ei ole selkeä, sekä IoT-laitteiden oikeaa määrää on mahdoton tietää. Statistan ennusteiden mukaan IoT-laitteiden määrä vuonna 2025 on noin 31 miljardia (“Global IoT connections worldwide” 2020).

IoT-laitteiden valtava kasvu tuo mukanaan tuntemattomia riskejä, joita rikolliset pystyvät käyttämään hyväksi yllättävissä paikoissa. IoT-infrastrukturi ja IoT-palvelut tuovat valtavia turvallisuushaasteita käyttäjille, koska näiden mukana tulee merkittävä kasvu hyökkäysalustoissa, heterogeenisyydessä, kompleksisuudessa sekä resurssien määrässä (Pacheco ja Hariri

2016; Z. Zhang ym. 2014). Kyberhyökkäykset voivat kohdistua laitteiden lähettämän informaation kaappaamiseen, laitteiden yhdistäminen botti-verkkoon (Antonakakis ym. 2017), laitteiden kommunikaation estämiseen tai jopa antureiden toimintaan. IoT-laitteet voivat olla käytössä monissa ympäristöissä, kuten teollisuudessa, älykkäissä kodeissa, ajoneuvoissa tai ihmisessä itsessään kiinni. Erityisesti suosiota kasvattaneet IoT-laitteet ovat mobiililaitteet, älykellot ja muut älytarvikkeet. Hyökkääjien mahdollisuudet kaapata henkilön yksityistä informaatiota ovat kasvaneet suuresti. Äärimmäisissä tapauksissa hyökkääjän on myös mahdollista aiheuttaa IoT-laitteen käyttäjälle fyysistä vahinkoa (Halperin ym. 2008).

Yleisesti IoT-laitteissa on matala laskentateho, virrankulutus, tallenustila ja verkkokapasiteetti, joiden takia IoT-laitteet ovat alttiimpia erilaisille hyökkäyksille, verrattuna muihin päätelaitteisiin. IoT-laitteiden kasvavan suosion takia, kaupalliset tuotteet yritetään saada nopeasti markkinoille ja tämän takia laitteiden tietoturvaan ei panosteta tarpeeksi (Arias ym. 2015). IoT-laitteiden tietoturvan puutteellinen toteuttaminen jättää laitteet haavoittuvaksi monenlaisille hyökkäyksille, joista yleisimmät ovat Man-In-The-Middle (MITM), laitteen kaappaus ja palvelunestohyökkäys (DoS) (Jung, Cho ja Lee 2020). Langattomat laitteet ovat usein paristokäyttöisiä ja usein IoT-laitteiden toiminnassa kommunikaatio on virrankulutuksen kannalta kallein. Tämän takia laitteisiin kohdistuva hyökkäys voi yrittää turhaan kommunikoida laitteen kanssa. Hyökkäys voi täten kuluttaa huomattavan nopeasti laitteen energialähteen ja täten aiheuttaa laitteen virran katkeamisen.

IoT-laitteen keräämä informaatio voi olla valmistajan ja kuluttajan näkökulmasta hyödyttöä ja tämän takia laitteen tietoturvaan ei panosteta. IoT-laitteisiin kohdistuvat hyökkäykset eivät kuitenkaan aina ole tarkoitettu laitteen keräämän datan keräämiseen, vaan sitä voidaan käyttää myös bottiverkkoon, DDoS-hyökkäykseen tai pelkästään laitteen toiminnan lamauttamiseen. Tästä esimerkitapauksena voidaan esittää vuonna 2016 tapahtunut Mirai-bottiverkko (Antonakakis ym. 2017). Mirai oli matomainen haittaohjelma, joka saastutti IoT-laitteita ja kaappasi laitteet mukaan DDoS-bottiverkkoon. Mirai hyökkäysi useaan korkean tason kohteeseen hyödyntäen saastuttamia laitteitaan ja saastutti suurimmillaan noin 600 000 kohdetta.

3.3 Langattomat kommunikaatioprotokollat

Esineiden internetissä älykkäät laitteet kommunikoivat keskenään yleisesti langattomien kommunikaatioprotokollien avulla. IoT-järjestelmiä on monenlaisiin tarkoituksiin ja täten myös järjestelmät vaativat erilaisia kommunikaatioprotokollia. IoT-järjestelmässä langattoman kommunikaatioprotokollan on toimittava pienellä virrankäytöllä, mutta siihen vaikuttaa muitakin tekijöitä. IoT-järjestelmissä vaihtelee esimerkiksi laitteiden etäisyydet, ympäristö ja välitettävän datan määrä. Näiden perusteella on järjestelmän suunnittelijan valittava oikea langaton kommunikaatioprotokolla.

Yleisimmät IoT-kommunikaatioprotokollat ajautuvat kahteen kategoriaan, pitkän matkan protokoliin (*Low Power Wide Area Network*, LPWAN) sekä lyhyen matkan protokoliin. LPWAN on pitkän matkan matalakulutuksinen kommunikaatioprotokolla, jossa tunnetuimmat protokollat ovat Sigfox, LoRaWAN ja NB-IoT (Mekki ym. 2018).

	BLE	Zigbee	LPWAN
Kantavuus	< 40m	< 100m	< 20km
Tiedonsiirtonopeus	< 2Mb/s	40 - 250Kb/s	< 300Kb/s
Taajuus	2.4GHz	2.4GHz, 915MHz, 868MHz	Sub-GHz
Virrankulutus	< 15mA	50mA	32mA
Salaus	AES-128	AES-128	AES-128 tai GPP
Verkon laajuus	rajaton	65 535	100 000
Kustannus	matala	matala	korkea

Taulukko 1. Langattomien kommunikaatioprotokollien vertailu

Taulukossa 1 esitellään yleisten langattomien kommunikaatioprotokollien ominaisuuksia. Tähän osioon on valittu kaksi yleisintä lyhyen matkan kommunikaatioprotokollaa Bluetooth LE ja Zigbee, vertailun vuoksi on valittu myös LPWAN ominaisuuksia. Seuraavissa alaluissa käydään kommunikaatioprotokollia tarkemmin lävitse, mutta taulukkoon on otettu esille näiden ominaisuudet. LPWAN-protokollan osioon on valittu kaikista optimaalisimmat tulokset LoRaWAN:in ja NB-IoT:n ominaisuuksista. Taulukosta voidaan havaita, että BLE antaa parhaimmat tulokset lyhyen matkan kommunikaatioon, Zigbeeen ollessa toisena. Zigbee tarjoaa useampaa taajuuskaistaa, mutta huomattavasti pienemmällä tiedonsiirtonopeu-

della. BLE on myös erittäin helposti käyttöön otettavissa, sillä se voi suoraan kommunikoida useiden laitteiden kanssa, kuten mobiililaitteen. LPWAN-protokollissa on pienivirrankulutus ja LoRaWAN voi toimia lisensoimattomalla Sub-GHz taajuusalueella. LPWAN kustannukset kuitenkin ovat huomattavasti suuremmat verrattuna lyhyen matkan protokollisiin, sekä käyttöönotto on huomattavasti haastavampaa, koska ne usein toimivat lisensoituilla taajuuksilla.

3.3.1 LPWAN

IoT-teknologiaa käytetään nykyään useilla eri sovellusalueilla, kuten älykkäissä kodeissa, maanviljelyssä, teollisuudessa ja turvallisuudessa. Osa IoT-laitteista tarvitsee tämän takia pitkän matkan radioviestinnän. Kommunikaatioprotokollat kuten BLE ja Zigbee eivät sovelly pitkälle matkalle, vastaavasti mobiiliverkoilla voidaan saavuttaa pitkiäkin matkoja, mutta laitteiden virrankulutus kasvaa huomattavasti. Tämä ongelma johti LPWAN-teknologian syntymiseen, jolla varmistetaan pitkän matkan kuuluvuus sekä alhainen virrankulutus. (Mekki ym. 2018)

LoRaWAN kehitettiin vuonna 2009, ranskalaisen Cycleo nimisen startupin toimesta. Kolme vuotta myöhemmin yhdysvaltalainen Semtech osti LoRaWANin (Mekki ym. 2018). Vuonna 2015, LoRa-Alliance standardoi LoRaWANin, joka pohjautui LoRa-kommunikaatioprotokollaan. LoRa on patentoitu hajaspektritekniikka, joka käyttää lisensoimatonta alle GHz taajuutta (Sforza 2013). LoRa on johdannainen chirp-hajaspektrimodulaatiosta (CSS), jonka avulla LoRa pystyy lähettämään informaatiota pitkien matkojen yli 868MHz:n taajuusalueella (Reynders ja Pollin 2016). CSS kehitettiin vuonna 1940, ja sitä käytettiin armeijan sovelluksiin sen häiriökestävyyden ja pitkien viestintäetäisyyksien takia. (Sinha, Wei ja Hwang 2017)

Statistan mukaan vuonna 2023 LoRaWAN ja NB-IoT kattavat 85.5% kaikista LPWAN-yhteyksistä ("NB-IoT vs LoRaWAN" 2020; "LoRaWAN vs NB-IoT" 2020). LoRa keskittyy enemmän akunkestoon ja edullisiin sovelluksiin, vastaavasti NB-IoT:n ominaisuudet painottuvat enemmän korkeaan palvelunlaatuun (QoS), pieneen viiveeseen, skaalautuvuuteen sekä lähetetyn paketin kokoon, kaikista suurimman etäisyyden ja kattavuuden tarjoaa kuitenkin

Sigfox. (Sinha, Wei ja Hwang 2017)

Lora-Alliancen julkaiseman paperin (“NB-IoT vs LoRaWAN” 2020) mukaan LoRaWANin korkein mahdollinen kulutus on 32mA ja matalin on unitilassa 1 μ , vastaavasti NB-IoT:n korkein virrankulutus on 120mA ja unitilan virrankulutus on 5 μ . NB-IoT kuluttaa enemmän virtaa synkronisen kommunikaation, QoS-käsittelyn ja OFDM/FMDA-taajuushyppely tekniikan takia (Mekki ym. 2018). Matalan virrankulutuksen ansioista molemmille verkoilla voidaan saada erittäin pitkät elinajat, joita voidaan vielä pidentää esimerkiksi energian keräämisellä ympäristöstä tai verkon arkkitehtuuri ratkaisulla (Wu, Redouté ja Yuce 2018; Sherazi ym. 2018; Mao, Fidan ja Anderson 2007).

LoRaWAN tarjoaa kuusi hajautustekijää (SF7-SF12), jossa korkeampi hajautuskerroin tarjoaa pidemmän lähetyalueen, mutta pienemmän datan lähetyksenopeuden. Lähetyksenopeus on 50Kb/s-300Kb/s ja paketin maksimikoko on 243 tavua. NB-IoT on kapeakaistainen LPWAN-tekniikka, joka voi toimia LTE- sekä GSM-lisensoiduilla taajuuksilla. NB-IoT:ssa lähetyksenopeus on 200Kb/s ja paketin koko on 1600 tavua. LoRaWANin kattavuus on noin 20 kilometriä ja NB-IoT:n kattavuus on 10 kilometriä. (Mekki ym. 2018)

3.3.2 Zigbee

Zigbee on langaton kommunikaatioprotokolla, joka myös mahdollistaa kommunikaation matalalla virrankulutuksella, lyhyellä kantamalla sekä pienellä datansiirtonepeudella. Fyysisen ja MAC-kerrosten luontiin käytetään IEEE 802.15.4 protokollaa, mutta verkko-, tietoturva- ja sovelluskerrokset ovat Zigbeeen muodostamat (Ghamari ym. 2015). Artikkelin He (2010) mukaan Zigbee on syrjäyttämässä Bluetooth-protokollaa erityisesti terveydenhuollossa potilaiden terveyden tarkkailuun käytetyissä laitteissa.

Zigbee pystyy operoimaan muutamalla eri taajuuksialueella, joiden mukana tulevat myös vaikutukset tiedonsiirtokapasiteettiin. Suurimman tiedonsiirtokapasiteetin 250Kb/s tarjoaa 2400MHz:n taajuus, seuraavaksi on 915MHz taajuus 40Kb/s nopeudella sekä viimeisenä pienimmän tiedonsiirtokapasiteetin 20Kb/s tarjoaa 868MHz taajuus (Ghamari ym. 2015). Protokollan kommunikaatioetäisyys on pisimmillään noin 100 metriä (He 2010).

Protokollan MAC-kerros käyttää hyödykseen CSMA/CA-protokollaa kommunikaatiokana-

valle pääsyyn. Zigbee tukee kahdenlaisia laitteita verkossaan, RFD- sekä FFD-laitteita. FFD-laitteet pystyvät toimimaan verkossa verkkokoordinaattorina ja päätenoodina, toisin kuin RFD-laite pystyy toimimaan vain päätenoodina. Verkossa olevat laitteet pystyvät yhdistymään enintään 254 laitteeseen ja verkon enimmäiskoko on 65 535 noodia. (Ghamari ym. 2015; He 2010)

3.3.3 6LoWPAN

6LoWPAN (*IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks*) on verkkoprotokolla, joka on esitelty IETF:n luomassa RFC-6282 standardissa. Kyseisen verkkoprotokollan tarkoitus oli mahdollistaa IPv6:n käyttäminen IEEE 802.15.4 pienitehoisessa langattomassa verkossa 2.4GHz taajuudella, mutta teknologiaa ollaan adaptoitu ja käytetty myös muissa verkkomedioissa, kuten Sub-1 GHz, Bluetooth Low Energy, PLC:ssä sekä pienitehoisessa Wi-Fi:ssä. (Olsson 2014)

3.3.4 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) tai toiselta nimeltään tunnettu Bluetooth Smart radioteknologia on suunniteltu alhaisen virrankulutuksen kommunikaatioon (“Bluetooth Technology Overview” 2022). Alhaisen virrankulutuksen ansiosta BLE on erittäin suosittu kommunikatioprotokolla erityisesti älykkäiden ja puettavien laitteiden keskuudessa. BLE-protokolla lähettää dataa 2.4GHz lisensoimattomalla ISM-taajuusalueella ja 40 eri kanavalla. Jos dataa lähetetään noin 100Kb/s nopeudella, niin maksimaalinen etäisyys voi olla jopa 250 metriä (Wang ym. 2020), mutta maksimissaan tiedonsiirtonopeus on noin 2Mb/s (“Bluetooth Technology Overview” 2022). Kuitenkin Tosi ym. (2017) mukaan BLE:n kantavuus riippuu paljon käytetystä tehosta, mutta pisimmillään se olisi noin 40 metriä. Saavuttaakseen luotettava kommunikointi, olisi etäisyyden suositeltavaa olla alle 40 metriä. 250 metriä kattavan alueen yli kommunikointi ei ole luotettavaa ja on erittäin altis häiriöille.

BLE tukee erilaisia topologia muotoja, kuten *point-to-point*, *broadcast* ja *mesh*, joiden avulla voidaan luoda luotettavia ja laajojakin kommunikaatioverkkoja. BLE:ssä on myös ominaisuuksia sijaintien ja etäisyyksien mittaamiseen. (“Bluetooth Technology Overview” 2022)

Yleisesti BLE-kommunikaatiossa on mukana reuna- ja keskuslaite. Reunalaite on esimerkiksi tässä tutkimuksessa Movesense-sensori ja keskuslaitteena toimii mobiililaite. Reunalaite kerää informaation ja lähettää tämän keskuslaitteelle. Keskustelu laitteiden välillä aloitetaan reunalaitteen toimesta lähettämällä mainostuspaketteja, jotta keskuslaite voi sen havaita. Keskuslaite vastaa mainostuspakettiin lähettämällä yhteydenmuodostuspyyntö paketin reunalaitteelle, joka sisältää esimerkiksi tiedot taajuushyppyihin ja paketin tarkistesumman (CRC). MITM-hyökkäyksellä ulkopuolinen pystyy tulemaan reuna- ja keskuslaitteen väliin kaappaamaan laitteiden välisen keskustelun. (Wang ym. 2020)

BLE-protokolla mahdollistaa lähetetyn datan kryptauksen ja lähettäjän autentikaation. Datat kryptaukseen käytetään kryptausavainta, joka vaihdetaan laitteiden välillä keskustelun alussa. Ilman kryptausavainta, mahdollinen hyökkääjä ei voi kaapata selkokieleisiä paketteja tai esittää olevansa toinen laitteista. On kuitenkin mahdollista, että hyökkääjä on kaapannut laitteiden välisen kommunikaation reunalaitteen lähettämästä mainostuspaketista alkaen, jolloin hyökkääjällä on myös tieto kryptausavaimesta ja taajuushypyistä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on mahdollista asettaa manuaalisesti kryptausavaimet reuna- ja keskuslaitteille, jolloin sitä ei vaihdeta pakettien välityksellä. (Wang ym. 2020)

4 Tutkimuksen toteutus

Tässä kappaleessa käydään lävitse tutkimuksen toteutusta. Alaluvussa 4.1 käydään läpi Movesense sensoria, Movesensen tarjoamia ominaisuuksia sekä heidän akateemista ohjelmaa. Alaluvussa 4.2 käydään lyhyesti läpi tutkimukseen käytettyä tutkimusmetodia. Seuraavassa alaluvussa 4.3 käydään lävitse tutkimuksen tavoitteita sekä motiiveja. Alaluvussa 4.4 käydään läpi metodeja, joilla voimannosto liikkeiden sensoridataa kerätään tutkimukseen sekä viimeisessä alaluvussa 4.5 käydään läpi tapoja, joilla liikkeiden suorituksista kerätty liike-sensoridataa analysoidaan.

4.1 Movesense

Tutkimukseen etsittiin sopivaa kaupallista langatonta sensoria, joka sisältäisi gyroskoopin, kiihtyvyyssanturin sekä magnetometrin. Sensorilta toivottiin myös mahdollisuutta BLE-protokollan kommunikaatioon, jotta keskustelu sensorin kanssa olisi mahdollisimman vaivatonta. Etsintöjen kautta päädyimme suomalaiseen Movesense yrityksen tuotteeseen Movesense Sensor HR+ (“Movesense Sensor HR+” 2022). Sensorissa oli kaikki tarvittavat ominaisuudet sekä mahdollisuudet eri taajuusalueiden mittauksiin. Movesensen tarjoama sensorin kehitys API motivoi myös huomattavasti tuotteen valintaan, koska tämä laajentaa mahdollisuuksia laadukkaan tutkimuksen luomisessa.

Movesense on maailman johtavia yrityksiä langattomien puettavien urheilu-, lääketiede- sekä tutkimussensorien kehityksessä ja tuotannossa. Movesense alkoi sisäisenä projektina Suunnolla, jonka tarkoituksena oli kehittää uusi sensori sykkeen mittaukseen, kertoo Terho Lahtinen, yksi Movesensen tiimin työntekijöistä. Suunnon insinöörit kokeilivat täyden liikkeentunnistuskyvyn lisäämistä yhteen anturiprototyypin. Suunnolla huomattiin, että tämä avaa kokonaan uuden maailman urheilunseurannalle ja kasvaa kauas urheilun ja heidän painopisteiden ulkopuolelle. (“Movesense” 2022)

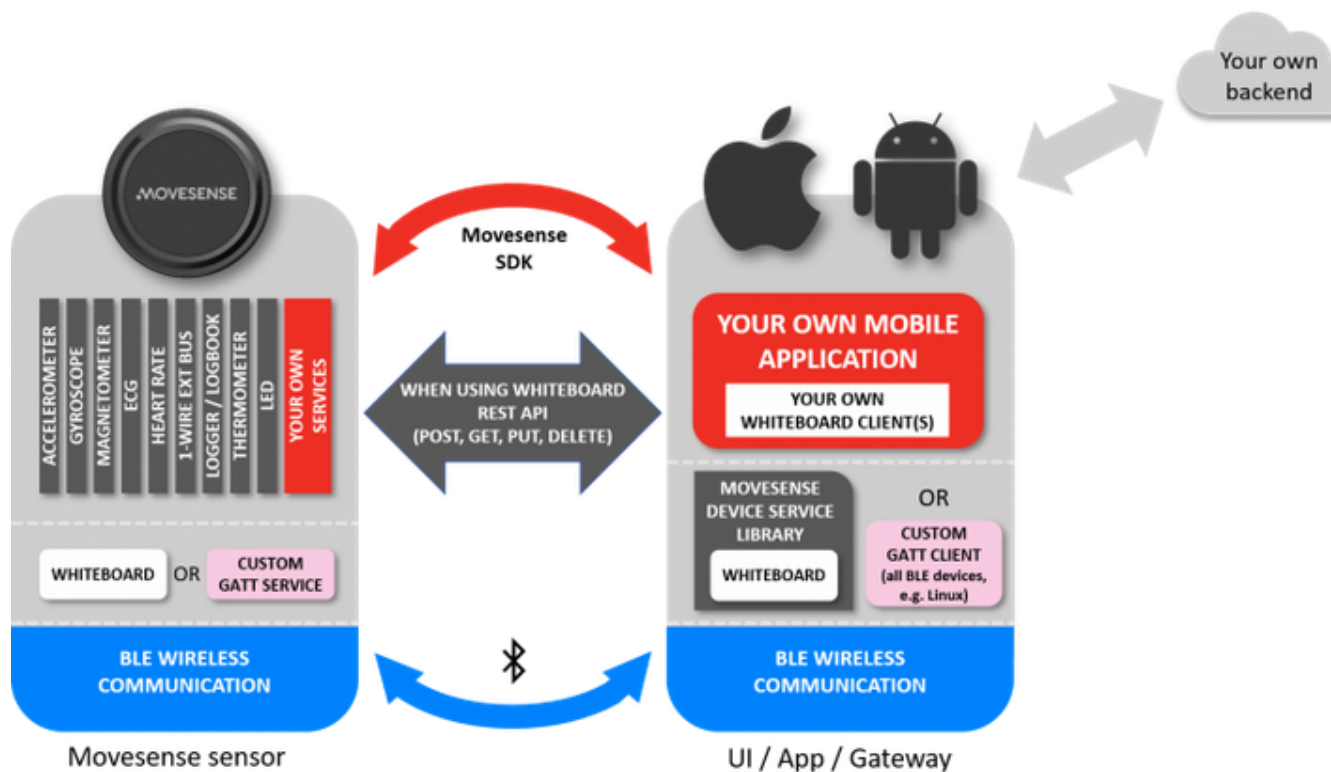
Sisäisten keskustelujen kautta Suunnolla päätettiin projektille muuttaa suuntaa, ja luoda avoin sensori alusta, jota innovaattorit ympäri maailmaa voisivat hyödyntää ja muuttaa ideansa käytäntöön Movesensen avulla. Movesensen sensorilla voidaan ajaa käyttäjän omia sovel-

luksia heidän tarjoaman API:n ansiosta. Movesense on ensimmäinen kaupallisesti saatavilla oleva kuluttaja käyttöön tarkoitettu puettava sensori, joka tarjoaa API:n kolmannen osapuolen applikaatioihin (“Movesense” 2022). Tämän ansiosta Movesensen sensoreilla voidaan tehdä tarpeiden mukaan esimerkiksi reunalaskentaa, jolloin voidaan vähentää lähetettävien pakettien kokoa sensorilta.

Movesense tarjoaa myös mahdollisuuden kehittäjille, tutkijoille ja opiskelijoille osallistua Movesensen akateemiseen ohjelmaan. Ohjelman tarkoituksena on tuoda Movesensea enemmän esille akateemisessa maailmassa ja täten myös tukea potentiaalisia tutkimuksia työkalujen ja ratkaisujen tarjoamisella tehokkaaseen datan keräämiseen (“Movesense Academic Program” 2022). Movesense ystävällisesti otti tämän tutkimuksen heidän akateemiseen ohjelmaan, sekä lähettivät meille ilmaiseksi anturit, pidikkeet sekä mahdollisuuden hyödyntää heidän teknistä tukea.

Movesensen arkkitehtuuri, joka visualisoidaan kuviossa 4, antaa kehittäjälle vapauden ja joustavuuden luoda omia ratkaisuja erilaisiin tarpeisiin. Movesense tarjoaa mobiilisovelluksen, jolla voidaan vaivattomasti keskustella useamman sensorin kanssa samanaikaisesti, sekä tallentaa sensorien keräämää dataa mobiililaitteelle. Kehittäjä voi itse myös luoda keskustelualustan sensorin kanssa ja täten säilyttää kerätyn informaation valitsemassaan tietokannassa. Kuviossa oikealla esitetyn oman mobiiliapplikaation tilalle Movesense tarjoaa myös heidän oman Showcase applikaation, jolla voidaan erittäin helposti kommunikoida ja suorittaa mittauksia sensorien yhteistyössä.

Movesense tarjoaa myös erilaisia pidikkeitä, joiden avulla sensoria voidaan kiinnittää tarpeiden mukaisesti. Tässä tutkimuksessa käytimme tarranauhaa, jonka avulla pystyimme helposti kiinnittämään sensorit voimanostoliikkeen suorittajalle.



Kuvio 4. Movesensen arkkitehtuuri kuvaus (“Movesense Platform” 2022)

4.2 Tutkimusmetodi

Tutkimusmetodina tässä Pro gradu -tutkielmassa käytetään konstruktiiivista tutkimusta tai toiselta nimeltään tunnettua suunnittelutiedettä. Konstruktiiivisen tutkimuksen tarkoituksena on kehittää artefakti (Hevner ym. 2004), joka on tämän tutkimuksen tapauksessa prototyyppi, jolla voidaan visualisoida voimannostoliikkeiden liikeradat sekä varmistaa kerätyn datan anonymisyys. Artefaktin kehityksessä myös tutkitaan optimaalista sijaintia sensoreilla ihmisen kehossa, jossa mittaukset kannattaisi toteuttaa.

Konstruktiiivisessä tutkimuksessa tarkoituksena voi olla kokonaan uuden tuotteen kehittäminen tai olemassa olevan tuotteen parantaminen (Hevner ym. 2004). Yleisesti konstruktiiivisen tutkimuksen tulos on käsin kosketeltava artefakti. Artefaktin suunnittelu alkaa määrittelemällä artefaktin haluttu toiminnallisuus ja suorituskyky (Peffer ym. 2007). Artefaktia kehitetään rakentamisen ja evaluoinnin jatkuvassa syklissä, jotta saavutetaan tarpeiden mukainen lop-

putulos (Hevner ym. 2004).

Tämän Pro gradu -tutkielman yhteydessä käytetään suunnittelutieteen sykliä, jossa pohditaan ratkaisu mahdollisuuksia tutkimuskysymyksiin. Ratkaistaviksi ongelmiksi päätyi optimaalisten sensorien sijainnin selvittäminen liikkeitä suorittaessa sekä kerätyn sensoridatan analysointi. Tutkimuksen syklissä edetään mittausten suorittamiseen valitusta ruumiinosasta, jonka jälkeen analysoidaan kaavioiden avulla kerättyä informaatiota. Kyseinen vaihe tehdään jokaiselle valitulle sensorin sijainnille, jonka jälkeen vertaillaan saatuja tuloksia. Tutkija valitsee optimaalisen sijainnin sensoreille saatujen tulosten perusteella, ja kyseisellä sensorin sijainnilla tehdään useampia mittauksia laadukkaampien analyysien saavuttamiseksi. Jos valitussa sijainnissa havaitaan ongelmia, palataan takaisin sijainnin vertailuun.

4.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän Pro gradu -tutkielman tarkoituksena on luoda konstruktivisen tutkimusmetodin avuin voimannostoliikkeiden monitorointiin artefakti, eli tämän tutkimuksen tapauksessa prototyyppi kyseisestä järjestelmästä. Artefaktin ei ole tarkoitus olla valmis tuote, vaan pohja jatkotutkimuksille sekä tuoda esille haasteita ja mahdollisuuksia vastaavan artefaktin toteuttamisesta.

Tutkimuksen tavoiteena on luoda perusta voimannostoliikkeiden suoritusten monitorointiin inertiamittausyksiköillä. Luvussa 2.1 tuotiin esille systemaattisten kirjallisuuskatsausten tuloksia urheilumonitorointiin liittyen. Tutkimusten perusteella voitiin selvästi nähdä voimannostoharjoittelun monitoroinnin puutteellisen tutkimuksen olemassaolon. Vähäinen tutkimusten määrä aiheesta vaikeuttaa Pro gradu -tutkielman toteuttamista, mutta kasvattaa tämän tärkeyttä. On tärkeää luoda pohja voimannostoliikkeiden monitoroinnille, jotta jatkossa voidaan toteuttaa useampia sekä laadukkaampia tutkimuksia aiheesta. Laadukkailla tutkimuksilla voidaan maksimoida erittäin yleistyvän urheilumuodon turvallisuus niin amatööreille että ammattilaisille, turvallisten suoritusten avulla. Tämän tutkimuksen tuottaman artefaktin avulla pystyttäisiin myös kehittämään tuotetta, jolla voitaisiin tarkasti monitoroida urheilijan kehitystä ja puutteita liikkeissä.

Voimannostoliikkeisiin käytetään IoT-laitteita, joissa on todistetusti erittäin paljon tietoturva

riskejä. Laitteiden keräämää informaatiota voidaan kaapata, sekä ääritilanteissa laitteilla on mahdollista aiheuttaa fyysistä vahinkoa laitteen käyttäjälle. On tärkeää, että arkaluontoista informaatiota ei joudu ilkeämielisen toimijan haltuun ja tämän takia tutkimuksen tavoitteena on tuoda esiin ratkaisuja, joilla näitä tietoturva ongelmia voitaisiin ratkaista voimannosto-monitoroinnin kontekstissa.

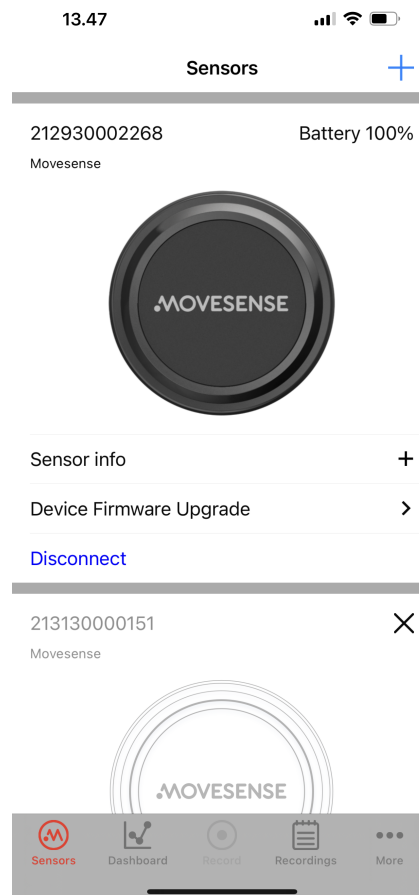
Tutkimuksen keskeisimpänä ja tärkeimpänä tavoitteena on tutkia mahdollisuuksia ja haasteita voimannostoliikkeiden monitoroinnista inertiamittausyksiköillä. Pro gradu on pioneeritutkimus kyseisen prototyypin luomisesta ja sen vaiheista. Tutkimuksessa keskitytään eniten kuitenkin sensorien optimaalisen sijainnin etsimiseen voimannostoliikkeiden aikana, miten kerättyä liikeseuraintietoa voitaisiin visualisoida käyttäjälle tavalla, jolla käyttäjä pystyisi helposti toteamaan yleisesti suorituksen kulku sekä mahdollisesti havaitsemaan virheliikkuksia suorituksen aikana.

Tehtyjen tutkimusten perusteella voimaharjoittelu kehittää huomattavasti suorittajan terveyttä niin tuki- ja liikuntaelimestöön että kardiovaskulaarisiin ominaisuuksiin. James J. Annesin toteuttaman tutkimuksen perusteella voidaan myös päätellä, että urheilusuoritusten kvantifiointi kasvattaa huomattavasti kuntoilijan motivaatioita kuntoilun jatkamiseen ja ennaltaehkäisee kuntoilun lopettamista (Annesi 1998). Urheilu on ollut tämän Pro gradu -tutkimuksen tekijän elämässä vahvasti mukana. Urheilun mukana on tullut tutkijan elämään elinikäisiä ystäviä, hienoja kokemuksia sekä unohtumattomia onnistumisia että epäonnistumisia. Urheilu on erittäin palkitsevaa toimintaa, joka kasvattaa ihmisenä, mutta myös kasvattaa terveyttä. Jos tämän Pro gradu -tutkielman avulla voidaan motivoida yksikin ihminen urheilemaan, on tutkijan mielestä tutkimuksen tavoitteet saavutettu.

4.4 Datan keräys

Tutkimuksen toteuttamiseen on tarpeen kerätä liikeseuraintietoa voimannostoliikkeiden suorituksista. Dataa kerätään suorittajilta, jotka toteuttavat kyykky sekä penkkipunnerrus voimannostoliikkeitä. Maastaveto voimannostoliike jätetään tutkimuksen ulkopuolelle aikarajoitteisuuden takia. Täten tutkimuksessa voidaan keskittyä tarkemmin näihin kahteen yleisempään voimannostoliikkeeseen.

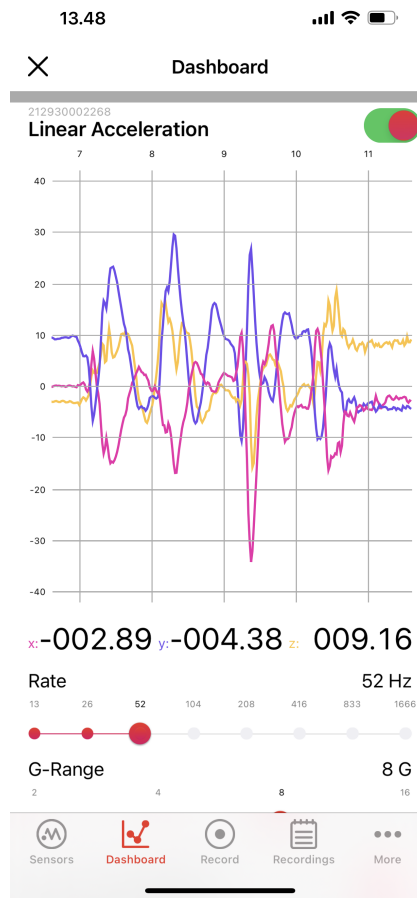
Liikesensoridatan kerääminen liikkeistä toteutetaan Movesense sensoreilla. Sensorit sijoitetaan suorittajan kehon kohtaan, josta on tarkoitus suoritus mitata. Mittauksen aloitus toteutetaan Movesense showcase mobiiliapplikaatiolla, johon sensorit on yhdistetty. Sovelluksella voidaan valita käytettävät anturit sensoreista, jotka tutkimuksen tapauksessa ovat kiihtyvyyssanturi, gyroskooppi sekä magnetometri.



Kuvio 5. Movesense applikaatio sensorin yhdistys

Movesense sensori yhdistetään Movesensen sovellukseen käynnistämällä sovellus ja käynnistämällä sensori. Sovellus havaitsee sensorin automaattisesti, tämän jälkeen käyttäjälle tulee mahdollisuus yhdistää sensoriin. Sensori pystytään identifioimaan kaavion vasemmassa yläkulmassa olevan numerosarjan perusteella, sama numerosarja löytyy fyysisen sensorin takapuolelta. Sensorin yhdistyttyä pystytään Dashboard -välilehdeltä valitsemaan anturit joiden mittauksia haluamme kerätä, sekä pystymme näkemään reaaliajassa anturin mittaustuloksia. Record -välilehdeltä pystymme aloittamaan valittujen anturien mittausten tallentamisen

ja tallennuksen lopettamisen. Recordings -välilehdeltä voimme nähdä tallennetut mittaukset.



Kuvio 6. Movesense dashboard osion näkymä

Suorituksen loputtua sovelluksella sammutetaan datan keräys ja kerätty informaatio, siirretään talteen kovalevyille. Kyseinen kovalevy, jolla kerätty sensori-informaatio säilytetään irti verkosta. Kun tietokone yhdistetään kovalevyyn, ei tietokone saa olla missään verkossa eikä siinä saa olla yhteydessä mitään langattomia laitteita. Tämän avulla minimoidaan mahdollisuudet informaation päätymistä ilkeämielisen toimijan haltuun. Tällöin ainut altis tiedonvuoto hetki on, kun sensori lähettää informaatiota mobiililaitteeseen, mutta tätä turvataan Bluetooth Smartin tietoturva ominaisuuksilla, jota kävimme hieman lävitse luvussa 3.3.4.

Ensimmäisessä tutkimuksen datankeräys vaiheessa kerätään Movesense sensoreilla informaatiota sensorin sijaintiin liittyen. Tarkoituksena on löytää optimaali sijainti kehossa, johon sensorit voidaan sijoittaa ja tämän avulla saada virheettömin sekä visuaalisesti selkein mitaustulos liikkeen suorituksesta. Kerätty sensoridata kiihtyvyyssanturista, gyroskoopista sekä

magnetometrillä visualisoidaan Matlab ohjelmalla. Kun tutkijan mielestä mittausten suorittamiseen optimaalinen sijainti sensoreille on löydetty, jatketaan datankeräyksen seuraavaan osioon. Tässä osiossa on tarkoitus kerätä isompi määrä mittaustuloksia voimannostoliikkeiden suorituksista, jolloin sensorien sijainti ei enää vaihtelee. Tämän avulla voidaan havaita onko sijainnin keräämä informaatio yhtenevä ja käyttökelpoista. Jos tässä vaiheessa todetaan, että sijainti ei ole optimaali, palataan edelliseen vaiheeseen ja valitaan uusi sijainti sensoreille.

Sensorin virallisen ja viimeisen sijainnin löydyttyä, tutkimuksessa kerätään lisää mittaustuloksia liikkeistä. Näiden mittaustulosten tarkoituksena on luoda pohja sensoridatan analyysille, jossa tarkastellaan voidaanko kerätystä sensoridatasta havaita ilmentymiä. Ilmentymien tueksi tutkimuksessa käytetään suoritusten videointia, joita tutkija käyttää tukena sensoridatan analysointiin. Videomateriaalista etsitään vertauskohtia Matlabin tuottamiin kaavioihin sensoridatasta.

4.5 Datan analysointi

Mittausten ensimmäisessä vaiheessa, jossa etsitään sensorien optimaalista sijaintia suorittajan kehossa, mittauksia vertaillaan Matlabin muodostamien kaavioiden perusteella. Ensimmäisessä vaiheessa mittauksia otetaan kaikista suunnitelluista sijainneista, joiden suodattamattomia tuloksia tarkastellaan tutkijan toimesta. Jos sijainti osoittautuu erittäin huonoksi mittausten toteuttamiseen, se voidaan eliminoida tutkimuksen seuraavista vaiheista. Tämän kartoituksen jälkeen voidaan siirtyä kerätyn mittaustulosten suodattamiseen, jonka avulla pystytään hieman tarkemmin vertailemaan mittauksia. Mittausten vertailuun käytetään yksinkertaisia signaalinkäsittely algoritmeja sekä Matlabia kaavioiden esittämiseen. Kaavioita vertaillaan suoritusten referenssivideoihin, joista yritetään havaita ilmentymiä.

Datan analysointiin käytetään hieman edellisessä luvussa sivuutettua suoritusvideon ja Matlabin esittämän liikeseuranta kaavion avulla. Kaavioita eri inertiamittausyksikköjen mittaustuloksista verrataan suorituksesta otetun videon tapahtumiin ja aikaleimoihin. Kaaviossa x-akselilla on aikaleima arvot sekunteina, ja y-akselilla on mittausten arvot. Videon ja anturimittausten aikaleimoja ei ole mahdollista pitää samana, vaan tutkijan on yritettävä tun-

nistaa tapahtumat kaavioiden visualisoinnin avulla.

Tutkija painottaa päätelmänsä mittausten paremmuuden tulkinnassa erityisesti toistojen havainnointiin, sekä toistoihin käytetyn ajan havainnointiin. On myös erittäin tärkeää, että kaaviosta on mahdollista havaita ilmentymiä, joita on liikkeen aikana tapahtunut, kuten kyykyn syvyys tai mahdolliset virheasennot. Jatkotutkimusten kannalta on myös erittäin tärkeää, että gyroskoopin esittämä informaatio on selkeää ja helposti käytettävissä magnetometrin ja kiihtyvyyssanturin signaalien muokkaamiseen. Sensorien sijainnin valitsemisessa otetaan huomioon edeltävät tekijät, mutta myös sijainnin kyky jatkuvasti tarjota tarkkoja mittauksia, eikä ole altis vaihtuvuudelle.

Luvussa 5.3 tullaan pohtimaan kerätyn informaation suodattamista, jotta informaatio on anonymiä. Tietoturvan kannalta on erittäin oleellista, että kerätystä informaatiosta ei ole mahdollista tunnistaa voimanostoliikkeen suorittajaa. Informaation anonymisyys on tärkeää suorittajan yksilöllisyyden, turvallisuuden ja ammattisalaisuuksien kannalta.

5 Tutkimuksen tulokset ja analyysi

Tässä tutkimuksen luvussa käsitellään suoritettujen tutkimusten tuloksia, sekä alaluvuissa käsitellään vaiheet miten tutkimuksen tuloksiin ollaan päädytty. Alaluvussa 5.1 käymme läpi miten liikeanturidataa suodatetaan ja visualisoidaan, jotta suoritetusta voimanostoliikkeestä saadaan mahdollisimman selkeä kaavio tarkkailijalle. Alaluvussa käydään läpi myös tutkijan pohdintaa siitä, mitä haasteita datan suodatuksessa ja visualisoinnissa tulee vastaan sekä mitkä tapahtumat vahvasti vaikuttavat liikesensoridataan. Toisessa alaluvussa 5.2 käymme läpi sensorin sijaintiin liittyvää keskustelua ja päättelyä siitä, miksi tutkimuksen seuraaviin osioihin ollaan valittu jokin tietty sensorin sijainti suorittajalla. Alaluvussa myös pohditaan hieman tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa mittauksen toteuttamiseen. Alaluvussa 5.3 käydään lyhyesti lävitse miten kerättyä informaatiota voidaan suodattaa, jotta datasta olisi mahdollisimman vaikea tunnistaa voimannostoliikkeen suorittaja, luvussa käydään myös läpi tutkijan omaa pohdintaa artefaktin tietoturva ominaisuuksista ja siihen vaikuttavista tekijöistä.

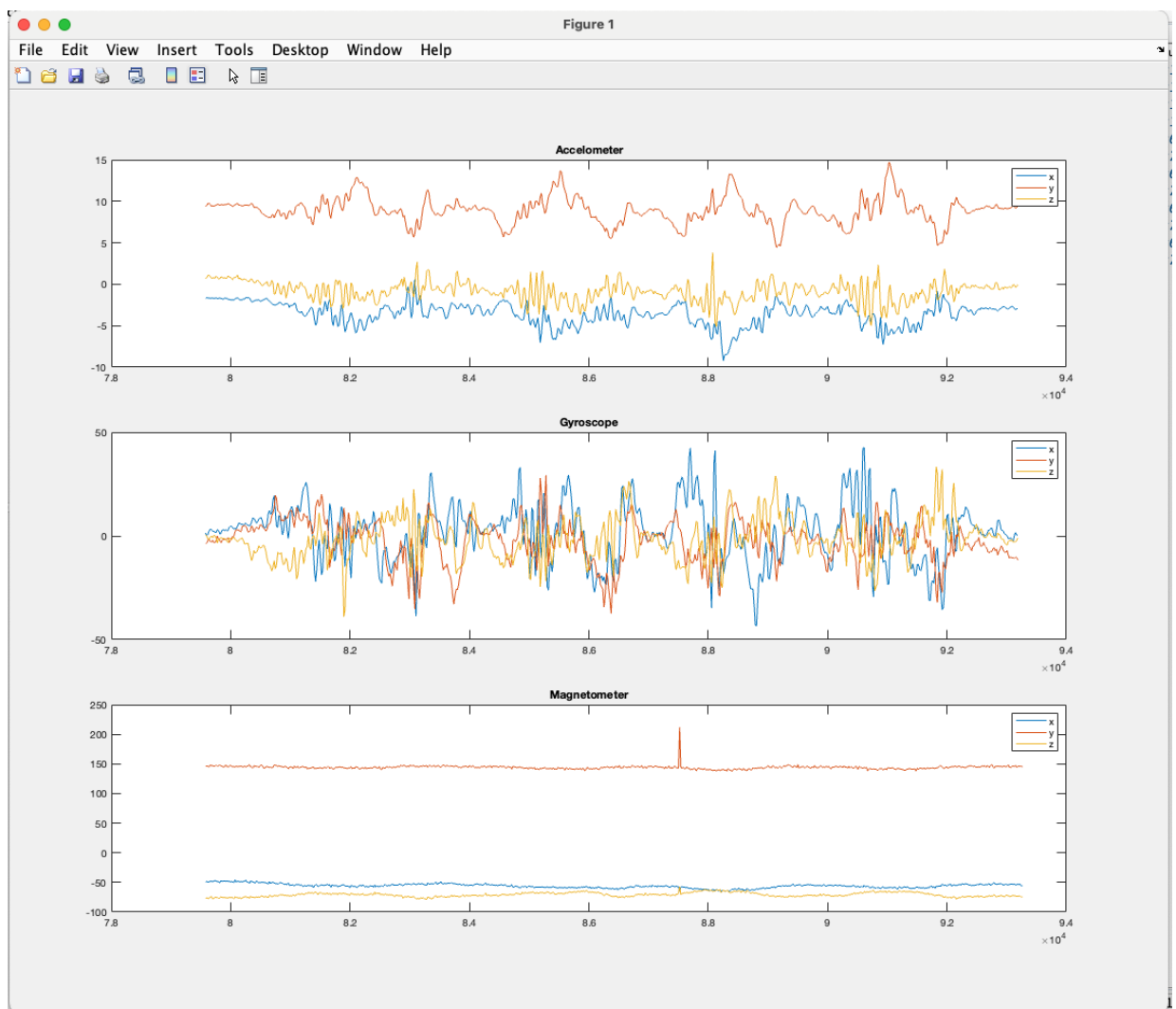
5.1 Liikesensoridatan visualisointi

Movesensen sensoridata tallennetaan JSON-muodossa. JSON on kevyt ja erittäin yleinen tiedonsiirtomuoto. Movesensen mobiilisovelluksella jokaiselle anturimittaukselle luodaan oma JSON-tiedosto, joka sisältää *data* objektin, jonka sisällä on kaikki mittaukset kyseiseltä anturilta. Data objektin sisällä on lapsiobjekti, joka nimetään riippuen kyseisestä anturista, kiihtyvyyssanturilla objekti on "*acc*". Lapsiobjekti sisältää yhden mittauksen aikaleiman sekä muutamia *x*, *y*, *z* mittauspareja. Mittausparien määrä riippuu tehtyjen mittausten taajuuden suuruudesta. Tehdyissä mittauksissa käytettiin 52Hz:n mittaustaajuutta.

Mittausten JSON-tiedostot luetaan Matlab ohjelmalla, jolla ne käsitellään visualisoitaviksi kaavioiksi. Kaavion selkeyden vuoksi raakadatan JSON-tiedosto käsitellään siten, että jokaisessa aikaleimassa on vain yksi *x*, *y*, *z* -objekti, joka on aikaleiman mittausten keskiarvo.

Suodattamaton inertiamittausyksikön keräämän raakadatan mittaukset kyykyn voimannostoliikkeen aikana esitetään kaaviossa 7. Kyseisessä voimannostoliikkeessä ollaan suoritettu kahdeksan kyykky voimannostoliikettä, jonka mittaukset on aloitettu, kun tanko on otettu rä-

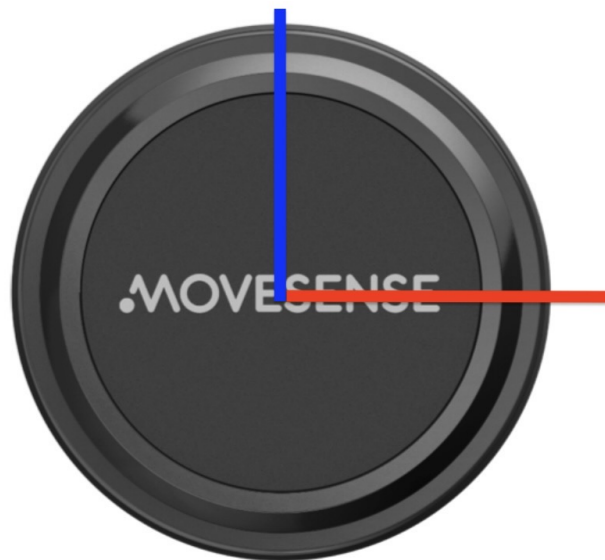
kistä pois ja mittaukset on lopetettu, kun toistot on tehty ja tankoa ei ole laitettu vielä takaisin räkkiin. Ylimpänä kaaviossa visualisoidaan kiihtyvyyssanturin mittauksia, keskimmäisenä on gyroskoopin mittaukset ja alimpana on magnetometrin mittaukset. Kaavioissa X-akselilla mittaukset ovat aikaleimaa vasten liitettyjä ja Y-akselilla on mittausten arvot, esimerkiksi kiihtyvyyssanturin kaaviossa mittausten arvot ovat metriä/sekunnissa. Aikaleima on sensorin generoima, joka luultavasti lähtee juoksemaan sensorin käynnistyttyä.



Kuvio 7. IMU:n raakadata kyykyssä

Anturien kaavioissa mittauksien aksiaalit on värikoodattu; punainen vastaa Y-akselin mittauksia, sininen vastaa X-akselin mittauksia ja oranssi vastaa Z-akselin mittauksia. Kiihtyvyyssanturin mittauksien visualisoinnista on punaisella viivalla eroteltu Y-akseli. Kyseisestä viivasta pystymme selvästi havaitsemaan kahdeksan eroavaa ilmentymää, jotka voisivat kohdentua kyykköjen toistoihin. Mittauksen vaiheet ovat kuitenkin epäselvät ja kyykyn vaiheita on vaikea erottaa kaaviosta, eikä täten voi varmasti päätellä esimerkiksi edes toistojen määrää.

Kiihtyvyyssanturin punainen Y-akselin mittaukset alkavat kaavion X-akselilla noin $10m/s^2$, joka osoittaisi kiihtyvyyttä ylöspäin, kun olemme paikallaan. Kyseinen ilmentymä johtuu luvussa 2.3.1 esitellystä ongelmasta, jossa kiihtyvyyssanturia ei ole kalibroitu huomioimaan maan vetovoima. Tämä pystytään helposti korjaamaan vähentämällä maan vetovoima ($9,81m/s^2$) kiihtyvyyssanturin Y-akselin arvoista. Kyseinen ratkaisu toimii ainoastaan hyvin, jos Moveseancen anturin Y-akseli on linjassa maan Y-akselin kanssa. Tämän takia on tärkeää, että sensorille on löydetty staattinen paikka suorittajassa, jossa Y-akseli pysyisi linjassa. Jos sensorille ei löydy staattista sijaintia, on tarpeen käyttää hyväkseen monimutkaisia ja laskennallisesti vaativia signaalien käsittely algoritmeja signaalien korjaamiseen, esimerkiksi gyroskoopin datasta.



Kuvio 8. Movesense aksiaalit

Tutkimuksessa käytetyssä Movesense sensorissa aksiaaliset menevät kuvion 8 mukaisesti. Y-akseli menee sinisen viivan mukaisesti, X-akseli menee punaisen viivan mukaisesti ja Z-akseli on kohtisuorassa lukijaan päin.

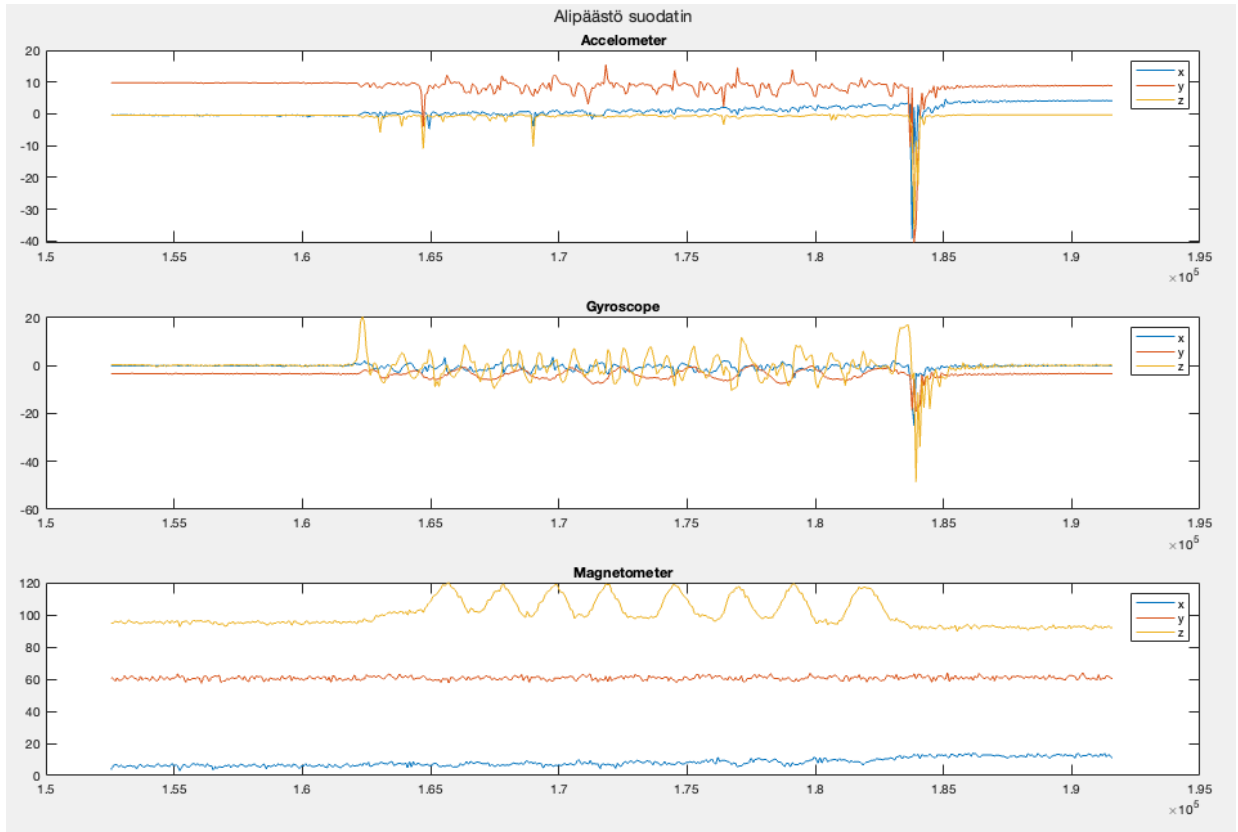
Gyroskoopin mittaukset ovat sekavia ja niistä on ilman suodatusta mahdoton tehdä voimantoliikkeeseen mitään johtopäätöksiä. Magnetometrin kaavio on yllättävän litteä, josta on myös mahdoton tehdä mitään johtopäätöksiä. Täten on tarpeen hyödyntää joitain datan suodatusmenetelmiä. Suodatusmenetelmiksi tutkija päätyi käyttämään kahta yleisintä suodatusmenetelmää, liukuvaa keskiarvoa (*moving average filter*) sekä painotettua liukuvan keskiarvon suodatinta (*weighted moving average filter*).

Liukuva keskiarvo on suodatinrakenne, joka poistaa signaalin korkeataajuuksiset ja päästää lävitse matalataajuuksiset. Liukuvan keskiarvon suodatin on signaalin pehmentämiseen käytettävä suodatin, joka pehmentää pois hetkelliset ylilyönnit tai äänekkäät heilahtelut. Liukuvaan keskiarvoon kuuluu muutamia erityyppisiä suodattimia, kuten yksinkertainen liukuva keskiarvo, kumulatiivinen liukuva keskiarvo, painotettu liukuva keskiarvo sekä eksponentiaalinen liukuva keskiarvo. Yksinkertaisen version 5.1 haittapuolena on se, että suodatin ei poista äänekkäitä signaaleja tehokkaasti, koska jokainen mittauspiste on painotettu samalla tavalla.

$$SMA = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4} \quad (5.1)$$

Tässä tutkimuksessa käytämme painotettua liukuvaa keskiarvo versiota (*weighted moving average*). Painotettu versio muistuttaa paljon yksinkertaista versiota, jonka eroavaisuutena on vain mahdollisuus painottaa valittuja arvoja, jonka avulla pystymme suodattamaan signaalia paremmin. Tehtyjä mittauksia suodatettiin monilla eri painoarvoilla, mutta parhaimmat ja selkeimmät tulokset antoivat kaavio 5.2, jossa i on laskettavan mittauksen indeksi numero. WMA-kaavion painotus riippuu täysin datasta johon sitä käytetään sekä siihen voi ottaa mukaan useammankin aikaleiman mittauksen. Tämän tutkimuksen perusteella selkeimmät kaaviot saatiin neljällä aikaleiman mittauksella, jotka painotettiin keskimmäisiin arvoihin, jolla voidaan taata, että kaavio pysyy pehmeänä. WMA lasketaan niin kauan, kun $i < n - k + 1$, jossa n on mittausten lukumäärä ja k on näytteen lukumäärä WMA:n kaaviossa. Joten WMA:n jälkeen näytteen viimeisimmät $k - 1$ näytettä on jätetty pois.

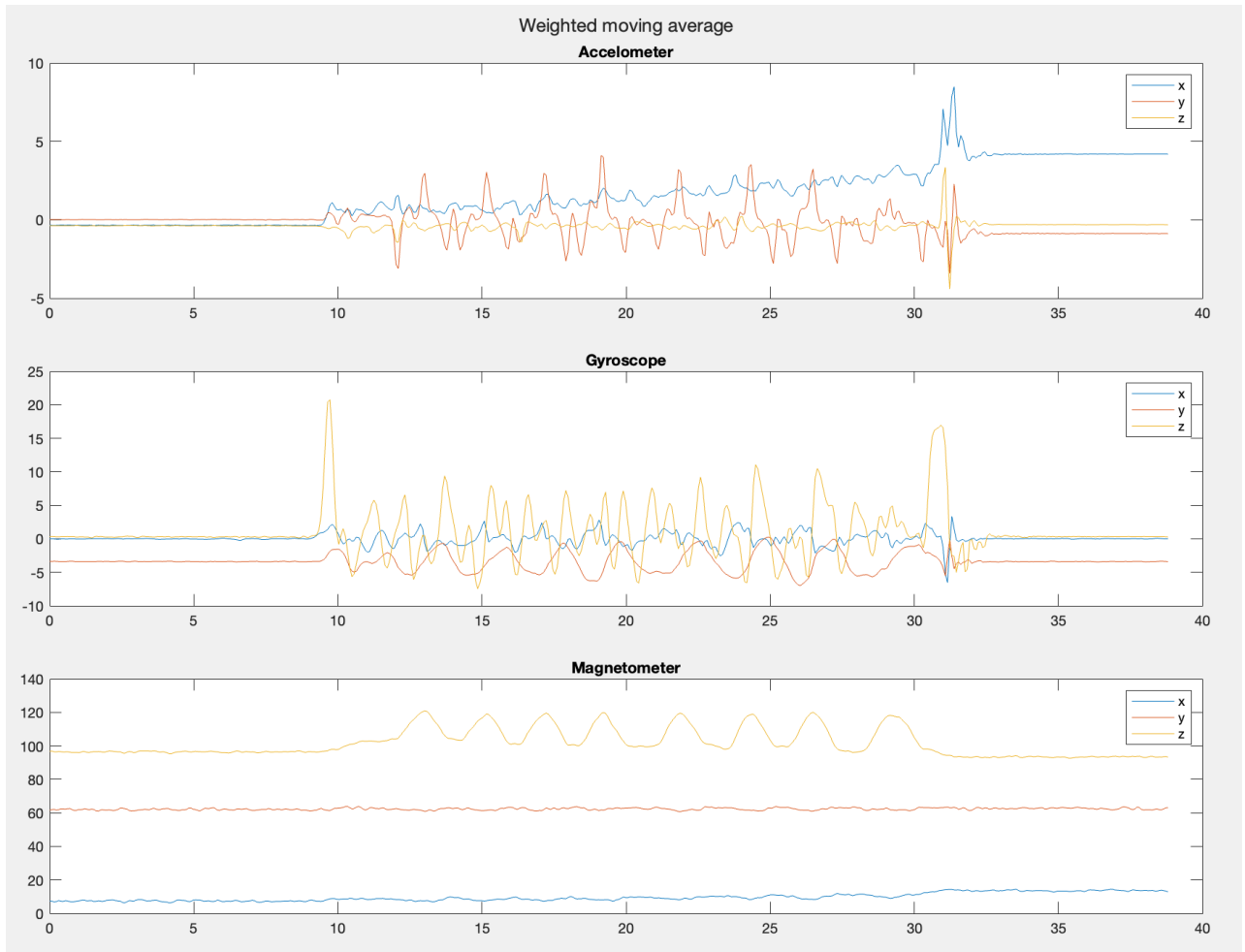
$$WMA_i = a[i] * 0.1 + a[i + 1] * 0.4 + a[i + 2] * 0.4 + a[i + 3] * 0.1 \quad (5.2)$$



Kuvio 9. Penkkipunnerruksen liukuva keskiarvo

Kuviossa 9 olemme käyttäneet liukuvaakeskiarvoa jalkakyykyn voimanostoliikkeen sensordatan suodattamiseen. Raakadatan kuvioon 7 verrattaessa mittaukset ovat huomattavasti pehmeämpiä ja kiihtyvyyssanturin kaavio on edellistä selkeämpi. Alipäästösuodatuksella eli liukuvan keskiarvon suodatuksella pystytään huomaamaan, että magnetometrin Z-akselilla näkyy erittäin selvästi jo penkkipunnerruksen kahdeksan toistoa, kun taas kiihtyvyyssanturin mittausdata on hieman epäselvää tulkita. Kiihtyvyyssanturin mittauksista on erittäin vaikea sanoa, kuinka monta toistoa suorituksessa on tehty. Jokaisen sensorin keräämästä informaatiosta voidaan havaita tangon pois ottaminen telineestä sekä tangon räkitys takaisin telineeseen, jossa takaisin räkitys on erittäin paljon huomattavampi tapahtuma. Gyroskoopin kaaviossa on erittäin paljon liikettä, jota on vaikea analysoida kaavioiden avulla. Magnetometrin aloitus ja lopetus tapahtumat ovat huomattavasti pienemmät verrattuna kiihtyvyyssanturin ja

gyroskoopin mittauksiin. Magnetometrin z-akselilla ylöspäinliike tarkoittaa tangon liikkumista alaspäin suorittajan rintaan kohti.



Kuvio 10. Penkkipunnerruksen WMA

Painotetun liukuvan keskiarvon suodatuksella voidaan havaita yksinkertaiseen liukuvaan keskiarvoon verrattaessa oletetusti, että kaavioissa havaitaan hieman suurempia piikkejä. Kaaviossa 10 kiihtyvyyssanturin y-akselin mittausdata on huomattavasti selkeämpää ja siitä pystytään havaitsemaan toistojen määrät ja tapahtumat huomattavasti selkeämmin verrattuna alipäästö suodatukseen. Alipäästö suodatuksessa havaittiin korkeiden signaalien poistaminen aiheutti informaation katoamista toistojen määrästä. Kiihtyvyyssanturin x-akselissa (sininen) voidaan huomata pientä arvon kasvamista toistojen lisääntyessä, tämä ilmentymä voi johtua tangon päiden kääntymisestä, johon sensori oli kiinnitetty suorituksen aikana.

Kaavioissa havainnollistetaan myös painovoiman suodatus kiihtyvyyssanturin informaatiosta, joka voidaan havaita verrattaessa kaavion 9 ja kaavion 10 kiihtyvyyssantureiden y-akselin arvoja. WMA:n kaaviossa kiihtyvyys alkaa nolasta, mutta alipäästö suodatuksessa y-akselin arvo on aloituksessa noin $10m/s^2$

Painotetun liukuvan keskiarvon potentiaali tarkkojen ja selkeiden mittausten tekemiseen vaikuttaa olevan korkeampi verrattuna alipäästö suodatukseen. Oletetusti alipäästö suodatin poistaa korkeat signaalit kerätystä informaatiosta, mutta tarkkojen mittausten toteuttamiseen tämä ei ole suotavaa, sillä se poistaa kriittisiä elementtejä suorituksista. Liukuvan keskiarvo suodatuksen tarkoituksena on pehmentää kerättyä signaalia, jotta käyttäjä pystyy silmäillen havaitsemaan tapahtumia esitetyistä kaavioista. Näiden takia, tutkimuksessa jatketaan voimannostoliikkeiden suoritusten analysoinnissa WMA-suodatuksella.

5.2 Sensorien sijainti

Sensorin sijainnin optimaalinen selvittäminen voimannostoliikkeen suorittamiseen on erittäin monimutkainen vaihe. Oikeaoppisen voimannostoliikkeen suorittaminen on monen monimutkaisen vaiheen summa, jossa suorittajan täytyy käyttää eri lihasryhmien yhteistyötä, hermoston toimintaa, liikeratojen noudattamista, raajojen optimaalista asentoa, voimannostoliikkeiden eri vaiheiden suorittamista, sekä pitää yllä hyvää tasapainoa. Optimaalinen suoritus kyykyssä ei ole kiveen kirjoitettu ja voi vaihdella suorittajasta riippuen. Suorittaja jolla on pidempi reisiluu suhteessa toiseen suorittajaan, joutuu suorittaa jalkakyykyyn eri liikeratoja noudattaen, liikeradat ovat täten yksilöllisiä. Tämä johtuu siitä, että pidemmän reisiluun omaavalla suorittajalla kehon painopiste kohdistuu eri kohtaan ja täten kyykyyn alaspäin liikkeessä joutuu suorittaja tehdä muutoksia. Ihmisten eroavaisuuksia fyysisten ominaisuuksien ja liikerajoitteiden takia, on mahdoton löytää sijaintia ihmiskehossa, jossa sensori olisi optimaali kaikilla. Tämän takia tutkija keskittyy tutkimuksessa omien liikeratojen ja suoritusten optimaalisen monitoroinnin sijainnin paikantamiseen. Jatkotutkimuksissa pystytään hyödyntämään signaalinkäsittely algoritmeja sekä erityisesti gyroskoopin keräämän anturidatan käyttämistä muiden anturien datan suodatukseen, jotta sensorin sijainnin ei tarvitsisi olla täydellinen.

Voimanostoliikkeiden liikeradoissa on myös useita muitakin tekijöitä, jotka vaikuttavat oikeaoppisen liikkeen suoritukseen. Penkkipunnerrus liikkeessä on tärkeää, että suorittajalla on olkapäänt rintalihaksen alapuolella y-akselissa, jos suorituksessa olkapäänt ovatkin edessä, painon antama kuormitus painottuu olkapäälihakseen rintalihaksen sijasta. Suorittajan asennon tarkastaminen on täten hieman vaikeaa, ilman että olisi useita sensoreita käytössä. Tutkimuksessa käytetään kahta Movesense sensoria suorittajalla, mutta mitä useampaa sensoria käytettäisiin, sitä tarkempaa informaatiota suorituksesta on mahdollista saada. Useampien sensorien käyttö liikeratojen mittaamiseen olisi hyvä lähtökohta jatkotutkimuksille.

5.2.1 Penkkipunnerrus

Penkkipunnerrus liikkeessä sensorien sijainteja tutkittiin suorittajan ranteissa, ranteen ja kyynerpään puolivälissä sekä tangon päissä, jotka havainnollistetaan punaisilla ympyröillä kuviossa 11. Ongelmia penkkipunnerruksen optimaalisessa sensorisijainnissa tuli vastaan ranteiden asennon muutoksessa suorituksen aloituksen yhteydessä sekä tangon päiden pyörimisen takia. Tutkijalla on tiedossa, että versioita tangoista on, joissa pääty on lukittu eikä täten pyöri vapaasti suoritusten aikana. Näitä ei valitettavasti kuitenkaan tutkimukseen löydetty, joten tämä osa-alue olisi myös mahdollisesti optimaalinen tutkimuksen aihe jatkotutkimuksille. Lukittuja tankoja ei usein suosita, koska painojen liikkuminen voi aiheuttaa suurempaa liikevoimaa tangon liikkeessä.

Penkkipunnerruksessa tangon päätyihin asetetut sensorit ovat vakaina suoritukseen asti, verrattuna käteen sijoitettuihin sensoreihin. Tätä tangon antamaa etua voidaan toteuttaa kaikkiin muihinkin sensorin sijainteihin kontrolloimalla mittausten tallennuksen aloitusta ja lopetusta. Kyseistä toimintoa ollaan simuloitu avustajan avulla luvussa 5.3, jota visualisoidaan kaaviossa 20. Tangon päädyt ovat käden sijainteja herkempi tunnistamaan käsien z-akselien eroavaisuudet, koska sensorit ovat kauempana toisiaan, jolloin virheasentojen arvot ovat suuremmat. Tutkimuksessa käytetyssä tangossa oli pyörivät päät, joka aiheutti haasteita tarkkojen mittausten suorittamiseen. Paikallaan pysyvien tankojen potentiaali on tehtyjen mittausten perusteella suurempi, kuin käsissä olevien sensorien. Kaavioissa y-akselilla voidaan nähdä mittausten arvot ja x-akselilla kulkee aika tallentamisen aloituksesta sekunteina.



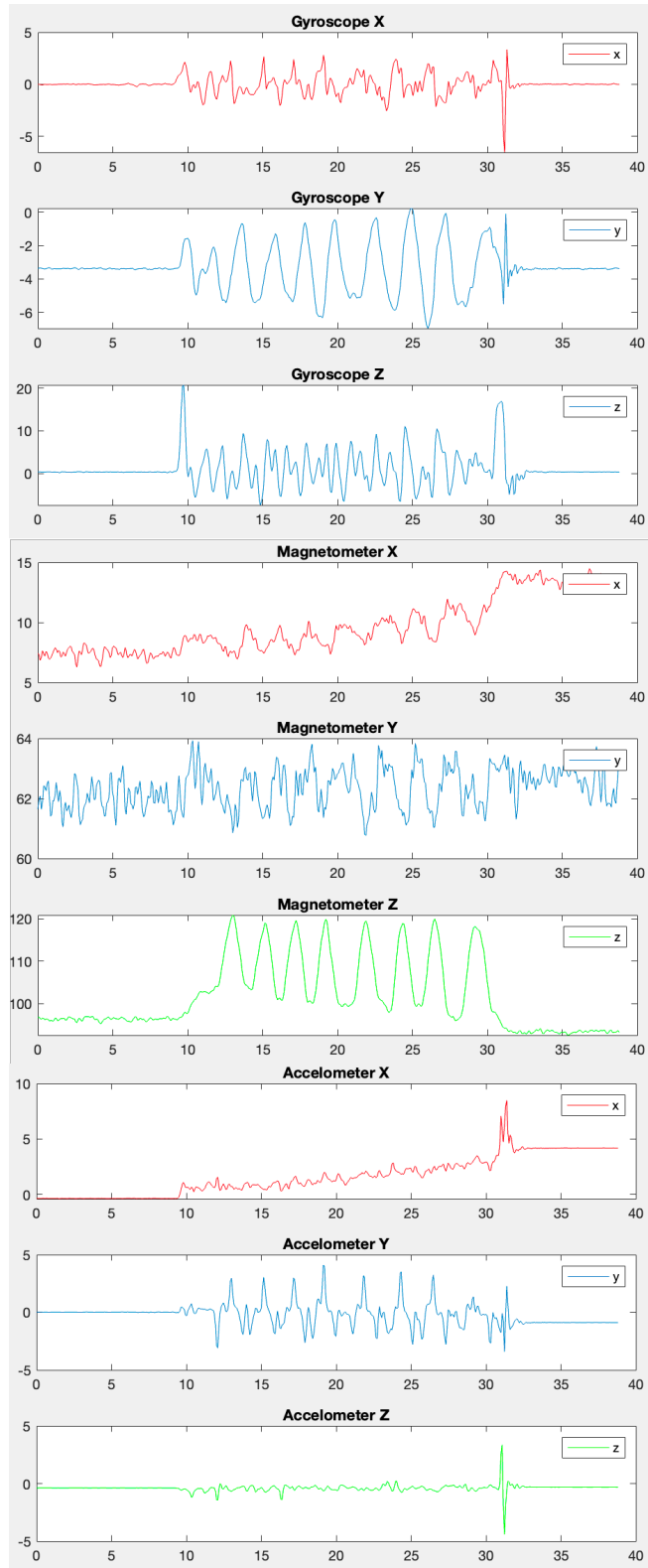
Kuvio 11. Sensorien sijainti penkkipunnerruksessa

Yläranteeseen sijoitetut sensorit olivat erittäin alttiita ranteiden taittumiseen penkkipunnerruksen aloituksen yhteydessä. Sensorit menivät tämän toimesta huonoon asentoon, jolloin mittauksista tuli erittäin epätarkkoja, eikä niistä pystyisi analysoimaan käyttäjän toimesta mitään. Alaranne toisaalta oli turvassa ranteen liikkeeltä ja täten antoi jatkuvasti tarkkoja tuloksia suorituksista. Alaranteessa ei ole tangon päiden aiheuttamaa pyörimistä, eikä yläranteen taittumista. Alaranteessa ei ole kuitenkaan samanlaista tarkkuutta, kuin tangon päissä sensorien etäisyyden takia. Tehdyissä mittauksissa tämä ei kuitenkaan visuaalisesti vaikuttanut huomattavasti. Tangon päädyt vaikuttaisivat olevan optimaalinen sijainti penkkipunnerruksen liikeratojen monitorointiin, olisi tosin tärkeää pystyä lukitsemaan tankojen pyöriminen, jos tämä ei ole mahdollista, on hieman ranteiden alapuolella oleva sijainti myös erittäin kykenevä mittausten suorittamiseen.

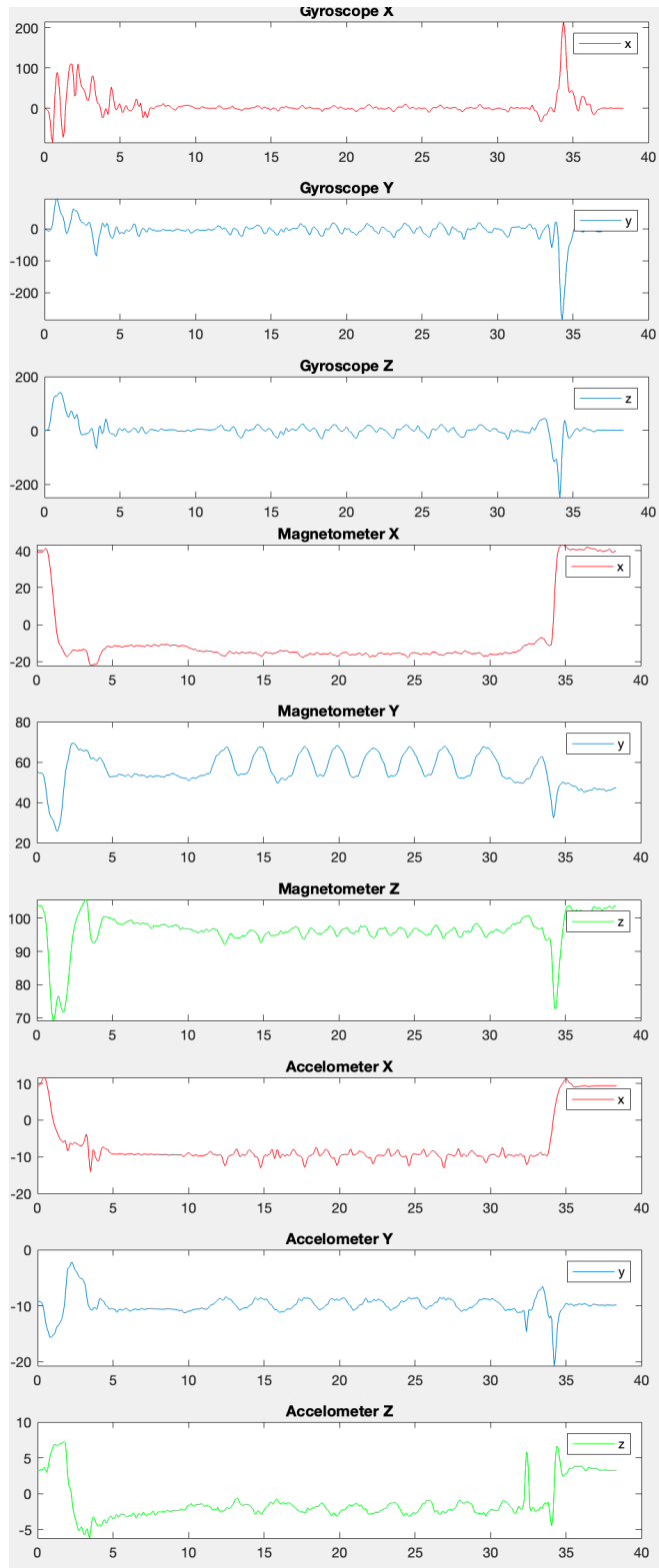
Tankoon sijoitetun sensorin mittauksia voidaan tarkastella kaaviosta 12, jossa voimme havaita magnetometrin sekä kiihtyvyyssanturin x-akselilla tapahtuvan pyörimisliikkeen. Kyseinen ilmentymä johtuu tangon päiden pyörimisestä. Tangossa kuitenkin kiihtyvyyssanturin y-akselin mittaukset ovat erittäin selkeitä ja siitä pystytään hahmottamaan penkkipunnerruksen suoritusta, jossa tutkija on tehnyt kahdeksan toistoa. Suoritusten tahti on pysynyt hyvin samanlaisena, mutta viimeinen toisto ei olla tehty samalla intensiteetillä. Tämä voi

johtua siitä, että helposti viimeistä toistoa ei penkkipunnerruksessa viedä ihan loppuun asti samalla tavalla, kuin muut toistot, vaan se pusketaan melkein suoraan räkkiin. Kiihtyvyyssanturin z-akselin viimeinen piikki johtuu räkytyksestä aiheutuneesta tärähdyksestä ja tangon siirtymisestä sivusuunnassa. Y-akselilla pystytään analysoimaan toistojen räjähtävyyttä esimerkiksi tilanteessa missä tanko nousee rinnalta ylöspäin. Usein penkkipunnerruksessa on tyypillistä koskettaa tangolla rintalihasta, jossa joko pidetään tankoa hetki paikallaan tai lähdetään samantien puskemaan tankoa ylös. Kyseinen tapahtuma näkyy kiihtyvyyssanturin y-akselilla kahtena pienenä alaspäin suuntautuneena piikkinä. Ensimmäinen piikki on tapahtumasta, jossa tanko työnnetään ylös aiheuttaen mittauksissa isoimmat positiiviset piikit, jonka seurauksena tanko tippuu erittäin vähän alaspäin lepoasentoon. Seuraava negatiivinen piikki esittää tangon alaspäin liikettä, joka kyseisen suorituksen aikana on nopea rinnalle kosketus ja ylös. Neljännen ja viidennen toiston välissä, joka ilmentyy noin 20 sekunnin kohdalla, pystytään hahmottamaan hieman pidempi lepoaika tangon ylätilassa verrattuna muihin toistoihin.

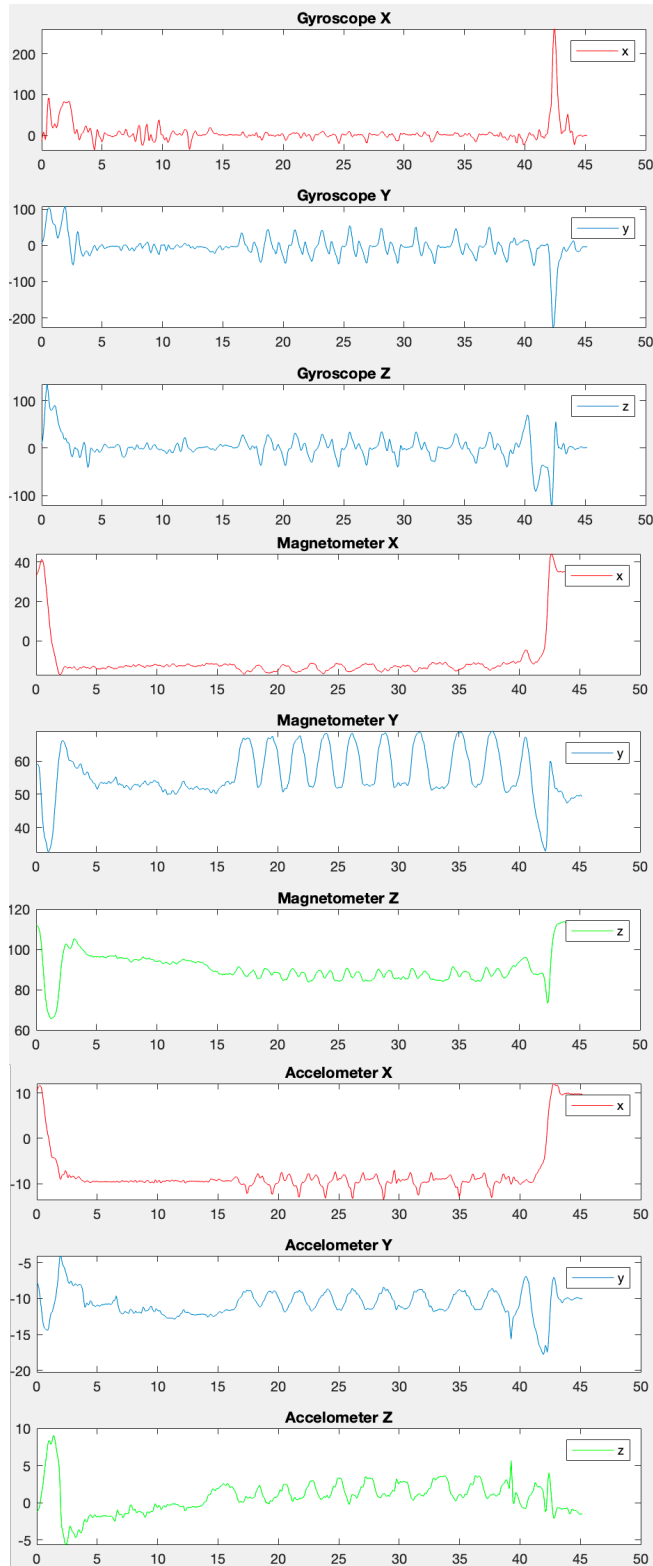
Penkkipunnerruksen y-akselin liike voidaan havaita magnetometrin z-akselilla, jossa mitausten kasvava liike vastaa alaspäin liikettä tangossa. Mittauksessa selvästi tangon korkeus tippuu hieman matalemmalle, kun tango otetaan pois räkistä. Suorituksissa ensimmäinen toisto on huomattavasti matalemmalla, verrattuna muihin toistoihin, joka voi johtua hätäisestä suorituksesta. Neljännessä toistossa voidaan havaita hieman pidempi lepoaika tangon yläasennossa, joka on noin sekunnin pidempi verrattuna muihin lepoaikoihin, sekä pystyttiin hahmottamaan myös kiihtyvyyssanturin mittauksista.



Kuvio 12. WMA penkkipunnerrus tangossa



Kuvio 13. WMA penkki-punnerrus ranteessa



Kuvio 14. WMA penkkipunnerrus kädessä

Käteeseen ja ranteeseen sijoitettuna sensorit antavat tankoon verrattaessa huomattavasti epätarkempia mittauksia, joka voi johtua sensorin orientaation vaihtelusta suorituksen aikana sekä käsien leveydestä tangolla. Käteen eli ranteen alapuolelle sijoitettuna, pystytään kuitenkin hieman tunnistamaan tapahtumia magnetometrin y-akselin keräämästä informaatiosta. Mittauksista pystytään havaitsemaan tangon yläasennon lepotilan pituuksia, toistojen määriä sekä kiihtyvyyssanturin x-ulottuvuudesta pystytään hieman analysoimaan toistojen räjähtävyyttä. Tangon mittauksiin 12 verrattuna informaatio on kuitenkin paljon suppeampaa ja näiden perusteella tankoon sijoitetut sensorit keräävät huomattavasti luotettavampaa ja analysoitavampaa informaatiota penkkipunnerruksesta.

5.2.2 Jalkakyykky

Jalkakyykky voimannostoliikkeen liikeradat ovat hieman monimutkaisemmat verrattuna penkkipunnerrukseen. Kyykyssä on tärkeää selän asento, polvien asennot, kyykyn syvyys, alaselän asento sekä muita tekijöitä. Kyykyssä olisi täten erittäin hyödyllistä käyttää useampaa kuin kahta sensoria suoritusten mittaamiseen. Kyykyssä verrattaviksi sijainneiksi valittiin ranteet, tangon päädyt sekä alaselkä, jossa sensori on painonnostovyöhön kiinnitettynä. Sijainnit on havainnollistettu punaisilla ympyröillä kuviossa 15.

Kyykyn optimaalisen sijainnin etsinnässä tulee vastaan samoja ongelmia, mitä penkkipunnerruksessa tuli vastaan. Tankojen päiden pyöriminen aiheutti satunnaisesti epätarkkoja tuloksia, ranteen taivuttaminen aiheutti huonoja kulmia sensorille sekä vaihtelevuutta sensorin asentoon sarjojen välillä. Kyykyn aloitusasentoon liikkeessä tulee huomattavan paljon enemmän liikettä verrattuna penkkipunnerrukseen, jonka takia tangon päiden mittaus oli huomattavasti haastavampaa.

Kuten tutkielmassa ollaan mainittu aiemmin, kyykyn voimannostoliikkeen suorittaminen on monimutkainen tapahtuma, joten tämän optimaalisen sijainnin löytäminen virheiden kannalta on erittäin haastavaa. Alaselkä on kuitenkin liikkeessä hyvin tärkeässä roolissa, sillä sen olisi tarpeen olla mahdollisimman suorassa sekä se on koko liikeradassa mukana. Täten tutkijalla oli odotuksena, että alaselän mittaaminen voisi olla optimaalinen sijainti. Tangon päätyihin verrattuna alaselällä olisi mahdollista havaita myös paremmin voimannostoliikkees-



Kuvio 15. Sensorien sijainti kyykyssä

sä mahdollisia virheliikkeitä.

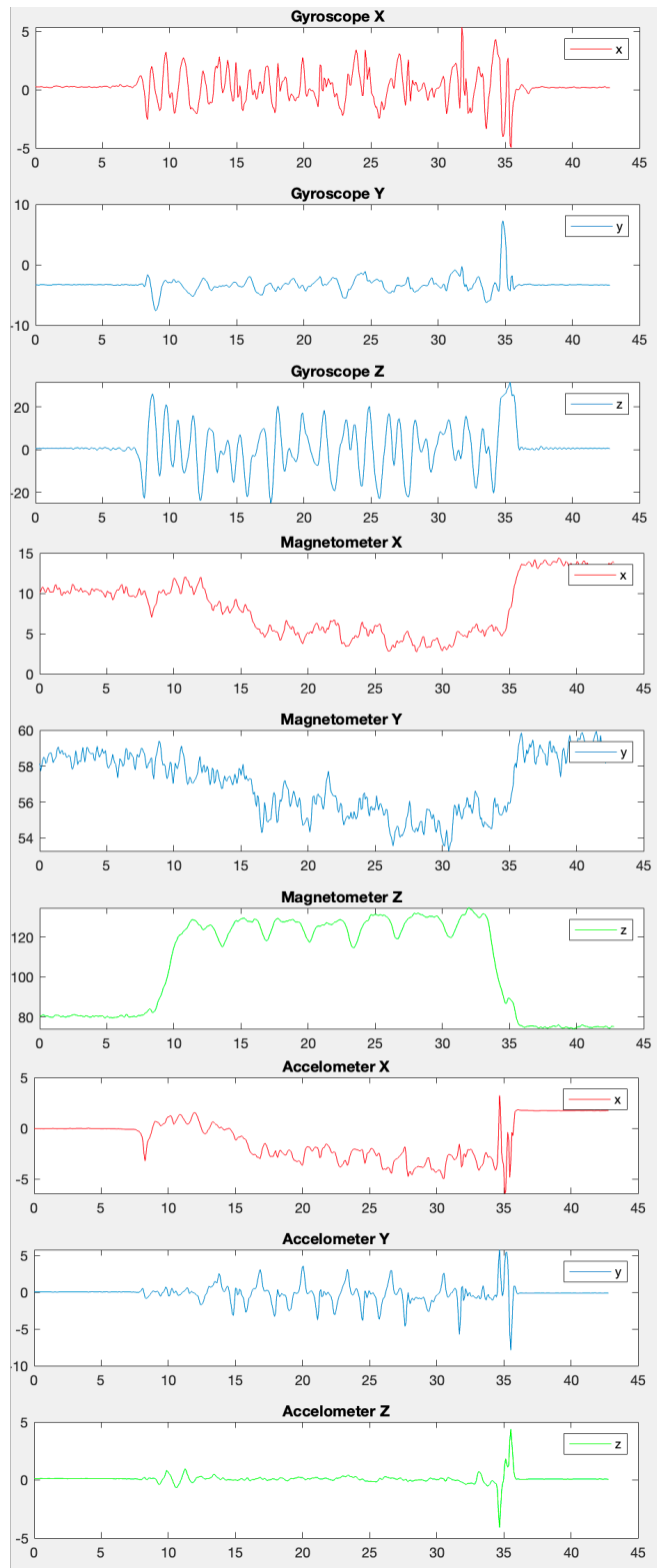
Kyykyssä huomataan samanlainen ongelma ranteen mittauksista, kuin mitä huomasimme penkkipunnerruksessa. Ranteen taipuminen suorituksen aloituksessa aiheuttaa ongelmallisen kulman mittausten suorittamiselle. Kaaviosta 18 voidaan huomata sensorin anturien keräämän datan epätarkkuus. Kaaviosta on mahdoton tulkita voimanostoliikkeen liikeratoja tai edes toistoja. Ainoastaan kiihtyvyyssanturin z-akselin mittaukset näyttäisivät analysoitavilta, mutta tämän analysoinnin tueksi ei ole tukea miltään muulta anturilta tai aksiaalilta.

Tangon mittaukset kaaviossa 16 ovat huomattavasti selkeämmät verrattuna ranteeseen. Antureiden keräämästä informaatisota voidaan päätellä, että noin seitsemän sekunnin kohdalla tanko on otettu räkistä pois ja kiihtyvyyssanturin x-akselin perusteella suorittaja on liikunut taaksepäin. Kyykyn ensimmäinen toisto on alkanut noin 13 sekunnin kohdalla, joka voidaan havaita kiihtyvyyssanturin y-akselin ensimmäisessä pudotuksessa. Kyseisen tapahtuman jälkeen seurataan samaa kaavaa, kuin penkkipunnerruksessa, jossa aksiaalinen ensimmäinen positiivinen nousu on suorittajan nousu kyykystä, jonka jälkeen kiihtyvyys menee

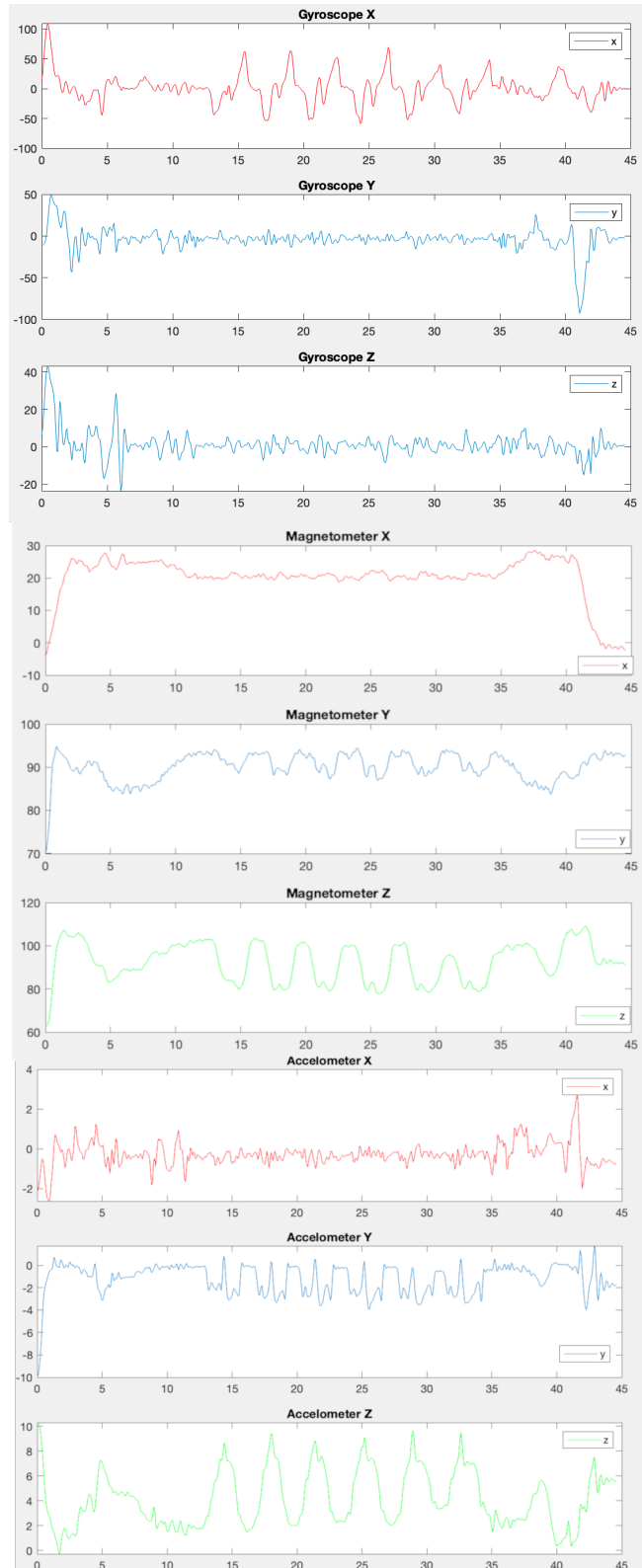
negatiiviseksi hetkeksi ja tasaantuu 15 sekunnin kohdalla, jolloin suorittaja on kyykyn yläasennossa. Magnetometrissä voidaan huomata samat kuusi toistoa, mutta eroavaisuudet toistojen ominaisuuksista on vaikea erottaa. On mahdollista, että tangon päädyt ovat hieman pyörähtäneet, joka on aiheuttanut korkean kasvun ja laskun magnetimetrin päädyissä.

Kaaviosta 17 voidaan huomata heti jokaisen anturin selkeät kaaviot. Kiihtyvyyssanturi on mitannut selkeitä ilmentymiä y- ja z-akselilla, magnetometrillä ilmentymiä on myös y- ja z-akselilla sekä gyroskoopilla on x-akselilla selkeitä pyörimistapahtumia. Kiihtyvyyssanturin x-akselilla voidaan havaita suorittajan liike tangolle sekä liike tangon kanssa taaksepäin aloitukseen, joka on noin 12-13 sekunnin kohdalla. Magnetimetrin z-akselilla voidaan havaita ensimmäisen toiston suorituksen aloitus 14 sekunnin kohdalla, jossa jokainen kaavion alaspäin liike vastaa luontevasti suorittajan alaspäin liikettä. Samalla akselilla havaitaan viidennen ja kuudennen toiston eroavaisuus aiemmista toistoista. Viidennessä toistossa suorittaja ei ole noussut yhtä ylös kuin aiemmissa ja ylhäällä olo on kestänyt hieman lyhyemmän ajan. Kuudennen toiston jälkeen voidaan havaita tangon räkitys, joka voidaan myös havaita kiihtyvyyssanturin x-akselin arvojen kasvussa.

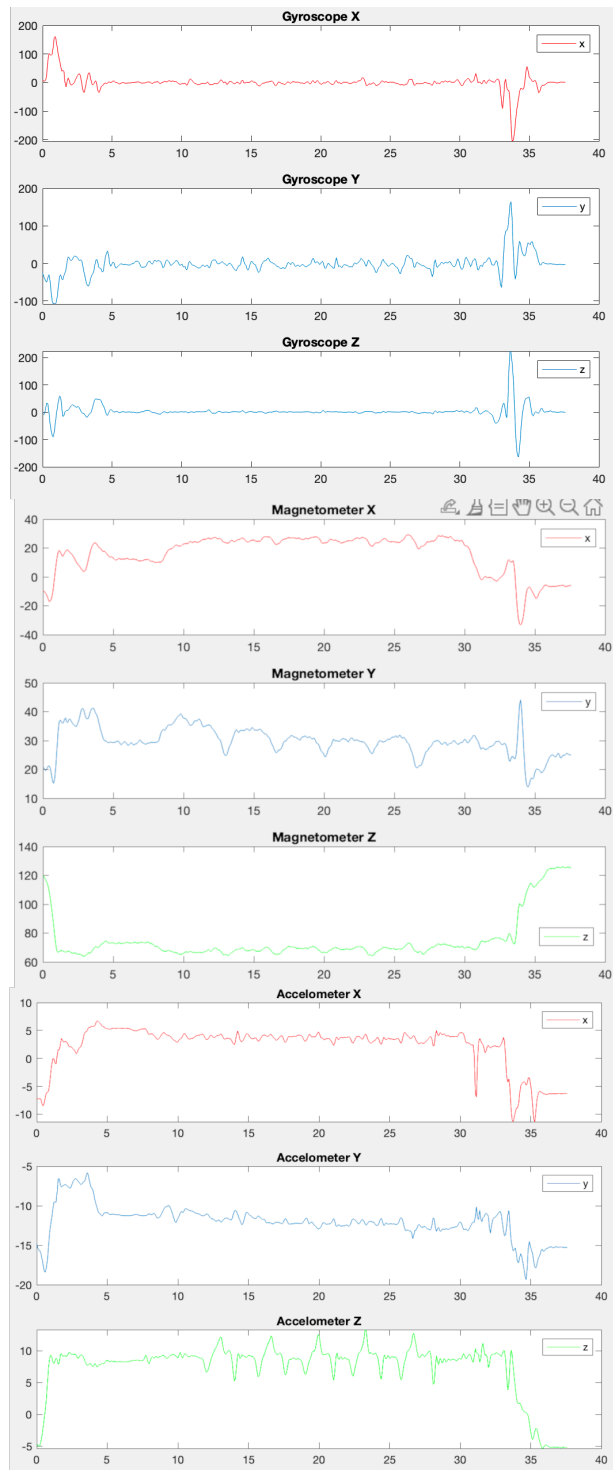
Gyroskoopin x-akselilla voidaan havaita suorittajan alaselän liikettä kyykyn alaosassa. Antureiden ilmentymät johtuvat tilanteesta, jossa suorittajan takapuoli sekä alaselkä kaartuvat hieman suorittajan alle. Tutkija ei ota osaamisalueensa puolesta kantaa siihen, että onko kyseinen tilanne virheliike kyykyssä, mutta analysoinnin puolesta pidetään tapahtumaa virheliikkeenä. Tällä tilanteella voidaan simuloida virhetilanteiden havainnointia voimanostoliikkeissä. Kiihtyvyyssanturin z-akselin mittauksilla voidaan havaita kiihtyvyydet toistojen eri vaiheissa, jossa positiiviset piikit ovat kiihtyvyyttä alaspäin. Kyseisten kaavioiden luettavuutta pystytään parantamaan, kun tiedetään mistä sijainnista mittauksia tehdään ja täten voidaan käyttäjälle helpottaa kaavioiden lukua yksinkertaisesti, esimerkiksi kyseisen kiihtyvyyssanturin akselien mittausten käänteisarvoilla. Tämän avulla käyttäjän on paljon helpompi tulkita tapahtumia.



Kuvio 16. Kyykyn monitorointi tangossa

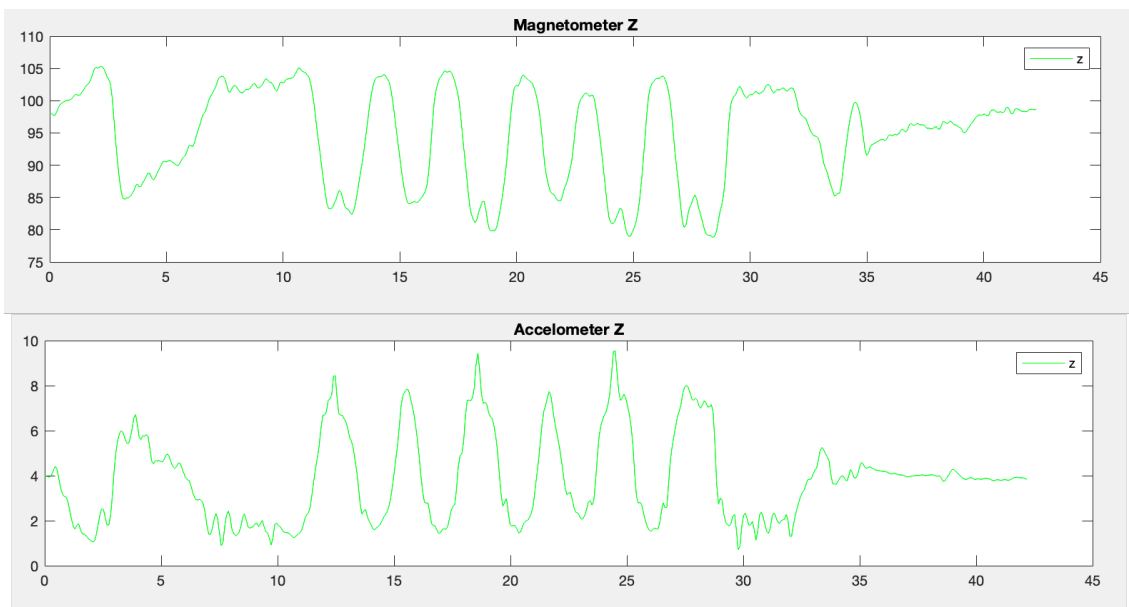


Kuvio 17. Kyykyn monitorointi vyössä



Kuvio 18. Kyykyn monitorointi ranteessa

Virheiden ja toistojen syvyyden ja korkeuden havainnointi onnistuu magnetometrin sekä kiihtyvyyssanturin avulla. Magnetometrillä pystytään havainnoimaan selkeästi kyykyn syvyyttä ja kiihtyvyyssanturilla voidaan havaita toistojen räjähtävyyttä. Kaaviossa 19 ollaan monitoroitu virheellisen kyykyn suoritus, jossa toinen, kolmas ja viides toisto ei ole suoritettu tarpeeksi alas. Magnetometrillä voidaan selvästi huomata kyseisten toistojen eroavaisuus oikein suoritetuista toistoista. Kiihtyvyyssanturilla voidaan huomata myös toistoissa kyykyn alavaiheen kiihtyvyyden intensiteetin puutos. Kuitenkin käyttäjän voi olla hankala itsenäisesti havaita kyseitä eroavaisuuksia vaikka ne ovatkin näkyvillä. Täten olisi tärkeää suodattaa informaatiota siten, että eroavaisuuksia korostetaan.



Kuvio 19. Virheellisen kyykyn monitorointi

5.3 Kerätyn datan anonymisyys

Kuten olemme aiemmin tuoneet tutkimuksessa esille, ihmisten aktiviteettien, elintoimintojen ja elämäntapojen kvantifiointi on yleistynyt suuresti. Ihmisistä kerätään informaatiota tutkimuksiin, heidän oman terveyden seurantaan, päivittäisten aktiviteettien ja kulutuksen seurantaan sekä moniin muihin toimintoihin. Tämä nopea kasvu niin aktiviteettien kvantifioinnissa kuin IoT-teknologiassa asettaa käyttäjistä kerätyn datan alttiiksi ilkeämielisille tekijöille.

Lukuisat organisaatiot julkaisevat kerättyä informaatiota eri tarkoituksiin. Ennen julkaisua informaatio yleisesti tehdään tunnistamattomaksi poistamalla muunmuassa nimet ja sosiaaliturvatunnus. Tämä toimenpide ei kuitenkaan tee informaatiosta tunnistamatonta (LeFevre, DeWitt ja Ramakrishnan 2005). Ammattiurheilijoilla on ammattisalaisuuksia, joita he eivät halua julkisuuteen tai kilpailijoiden saataville. Voimannostourheilijan tapauksessa ammattisalaisuus voisi olla harjoitusten intensiivisyys, toistot, liikkeet sekä harjoituskokonaisuudet. Myös tämän takia on erittäin tärkeää, että kerätty informaatio on tunnistamatonta.

Vuonna 1990 suoritetun tutkimuksen mukaan 87% Yhdysvaltain väestöstä olisi mahdollista identifioida pelkästään sukupuolen, postinumeron ja syntymäajan perusteella. Tutkimukseen perehdyttiin uudelleen vuonna 2006, jonka tuloksina noin 63% yhdysvaltain väestöstä olisi identifioitavissa kerätystä lomakedatasta. Alkuperäisen tutkimuksen yllättävillä tuloksilla motivoitiin Yhdysvaltojen yksityisyyden standardit terveydenhuollon informaatiolle sekä tehokkaiden algoritmien kehittämistä datan anonymisyydelle. (Golle 2006)

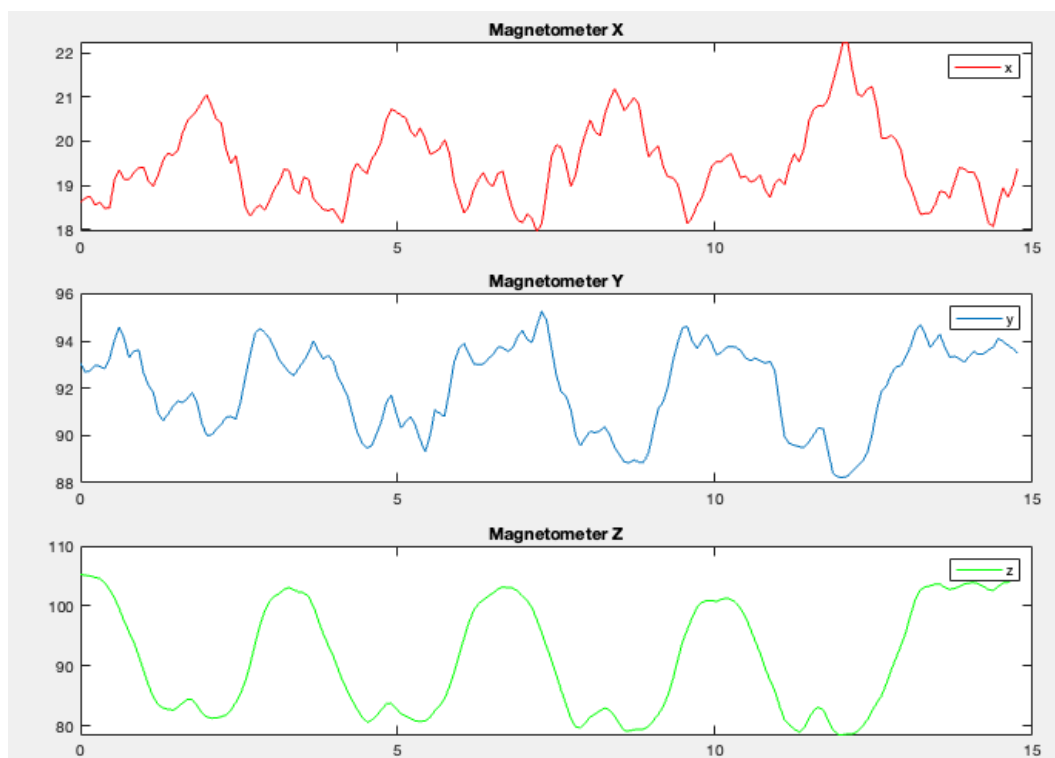
Informaation tunnistamattomuus tai anonymisyys on täten tärkeä näkökulma uuden järjestelmän suunnittelussa, jossa kerätään ihmisistä tietoa. Tässä Pro gradu -tutkielmassa ei mennä datan tunnistamattomuuteen syvälle, vaan pohditaan toimintatapoja joilla olisi mahdollista vaikuttaa ongelmaan. Informaation suodattaminen anonymisyyttä varten on erittäin laaja alue, joka vaatisi täysin uuden tutkimuksen aiheesta. Suodattamisessa tulee vastaan ongelmia, kuten tiedon häviäminen (Ghinita ym. 2007), joka vaikeuttaisi huomattavasti tämän pioneeri tutkimuksen toteuttamista.

Voimannostoliikkeissä suurimmat indikaattorit suorittajasta tapahtuu ennen suoritusta ja suoritusten jälkeen. Erityisesti ammattiurheilijoilla voimannostoissa on tapana asettaa itsensä omalla tavallaan aloitusasentoon, sekä oma tyyhinsä lähteä liikkeestä pois. Tämän perusteel-

la olisi kerätyn informaation tunnistamattomuuden kannalta tärkeintä saada nämä mittaukset jätettyä pois, sillä ne eivät myöskään ole oleellisia mittaustuloksille. Tähän ongelmaan voidaan esittää muutama ratkaisuvaihtoehto. Jos suorittajalla apunaan toinen henkilö, voi tämä aloittaa mittausten tallentamisen silloin, kun suorittaja on liikkeen aloitusvaiheessa, sekä vastaavasti lopettaa mittaukset, kun suorittaja on suorittanut viimeisen toiston.

Toisena vaihtoehtona tutkija ehdottaa yksinkertaista kiihtyvyyssanturia, joka olisi kiinnitettyä suorittajaan, jonka avulla suorittaja antaisi jonkinlaisen heilautuksen päällään tai ranteellaan. Kiihtyvyyssanturi tunnistaa tapahtuman ja aloittaa voimanostoliikesensorien tallennuksen. Kyseinen kiihtyvyyssanturi ja toimintalogiikka pitäisi kuitenkin kehittää erikseen. Kiihtyvyyssanturin sijasta suorittajan valmiuteen on mahdollista käyttää myös äänentunnistinta, joka aktivoituisi ohjelmoidulla komennolla.

Tutkija on toteuttanut ensimmäisen vaihtoehdon toteutuksista, eli tutkijalla oli mahdollisuus avustajan toimesta aloittaa mittausten tallentaminen. Kyseisellä toiminnolla ollaan poistettu erittäin iso tekijä kerätyn liikesensoridatan tunnistettavuudesta.



Kuvio 20. Avustettu mittaus kyykyssä

Kaaviossa 20 suoritettiin neljä toistoa kyykyä, jossa avustaja aloitti mittausten tallentamisen vasta, kun suorittaja oli kyykyn lähtöasennossa, kuten kuvassa 15. Magnetometrin keräämistä sensoridatasta voidaan selkeästi huomata, että informaatiota ei ole muista toimenpiteistä, kuin liikkeen suorituksista. Avustetun tai muuten hallitun mittausten aloituksen ja lopetuksen kontrollointi on yksityisyyden ja datan tunnistamattomuuden kannalta erittäin tärkeää.

Kerätyn sensoridatan aloituksen ja lopetuksen poistaminen on myös mahdollista tehdä koneellisesti, mutta tämän toteuttaminen on erittäin vaikeaa verrattuna tähän toimenpiteeseen. Suorittajien fyysiset eroavaisuudet sekä suorittajien eri osaamistasot ja suoritustyyli asettavat omat haasteensa tapahtumien tunnistamiseen koneellisesti. Koneoppimisella on omat kykynsä tapahtumien tunnistamiseen, mutta tämäkin toteutus on erittäin työläs, virhealtis sekä laskennallisesti raskasta, ottaen huomioon IoT-laitteiden laskentakyky rajoitteisuuden. Yksinkertaisin ja varmin ratkaisu aloitus ja lopetus tapahtumien eliminointiin on käyttäjän tai avustajan toimenpide näiden kontrolloimiseen.

6 Yhteenveto ja jatkotutkimukset

IoT-laitteet ovat kohdanneet lähiaikoina valtavaa suosion kasvua niin teollisuudessa kuin kuluttajien parissa. Ihmiset ovat erittäin kiinnostuneita kvantifioimaan heidän joka päiväistä toimintaansa, niin aktiviteettien tunnistamisesta kalorien kulutukseen. Tutkimusten mukaan aktiviteettien kvantifointi motivoi ihmisiä urheilemaan erityisesti saliuurheilun parissa. Urheilulla pystytään ennaltaehkäisemään monenlaisia vakavia sairauksia, jotka ovat nyky maailmassa erittäin yleisiä. Tässä Pro gradu -tutkielmassa tutkittiin miten voimanostoharjoittelua voidaan kvantifioida monitoroimalla penkkipunnerrus ja kyykky voimanostoliikkeitä inertiamittausyksiköillä.

Tutkimuksella ollaan pystytty hahmottamaan voimanostoliikkeiden haasteita monitoroinnin kannalta, kun käytetään inertiamittausyksiköitä. Haasteita monitorointiin tulee monesta tekijästä, kuten suorittajasta, sensorin sijainnista, laitteista, sekä voimanostoliikkeen liikeraidoista. Liikeradat voimanostoliikkeille on erityisen monimutkaiset varsinkin kyykyssä, jossa on monia eri asioita joita tulee ottaa huomioon hyvän suorituksen toteutuksessa. Tutkimuksessa ollaan keskitytty laskennallisesti pieniin vaihtoehtoihin monitoroinnin suorittamisessa IoT-laitteiden laskentarajoitteisuuden takia.

Tutkimuksessa pystyttiin löytämään optimaaliset anturit sekä anturien sijainnit voimanostoliikkeiden monitorointiin. Erityisesti magnetometri ja kiihtyvyysanturi soveltuu erittäin hyvin laskennallisesti kevyen monitorointialustan toteuttamiseen. Kerätyn sensoridatan suodattaminen vaatii kuitenkin vielä paljon hiomista, johon on tarpeen käyttää gyroskoopin keräämää sensoridataa. Gyroskoopilla on mahdollista korjata sensorin virheasentoja, jolloin täydellisellä sensorin sijoituksella ei ole niin paljon merkitystä, ja täten monitoroinnista tulee käyttäjä ystävällisempi. Liukuvalla keskiarvo suodattimella onnistuttiin suodattamaan informaatiota käyttäjälle visuaalisesti ystävälliseen muotoon, josta on mahdollista havaita tapahtumia voimanostoliikkeiden suorituksissa, kuten toistojen määrät, toistoihin käytetyt aikamäärät sekä voimanostoliikkeiden virheasennot.

Sensoreiden optimaaliseksi sijainniksi osoittautui penkkipunnerruksessa tangon päädyt. Tutkimuksessa käytettiin tankoja joiden päädyt eivät olleet lukittuneet ja täten aiheuttivat epä-

varmuutta toistoissa, mutta osoittautui silti paremmaksi verrattuna muihin sijainteihin. Lukkiutuvalla tangolla tämä olisi erittäin selvää. Kyykyn voimanostoliikkeessä parhaaksi sijainniksi sensoreille osoittautui alaselkään sijoitettu ja voimanostovyöhön kiinnitetty sensori. Tämän sensorisijainnin avulla pystyttiin havaitsemaan alaselän virheasentoja. Kuitenkin kyykyssä oleellisesti on mahdollista tehdä virheasentoja muissakin ruumiin kohdissa, kuten yläselässä. Kyseinen ongelma olisi mahdollista ratkaista asettamalla tangon päätyihin toiset sensorit, joilla voitaisiin monitoroida yläselän liikettä suorituksen aikana.

Jatkotutkimuksia aiheelle on erittäin monia tutkimuksen pioneeri ominaisuuden takia. Kyykyn monimutkaisuuden takia olisi tärkeää yrittää monitoroida useampaa sijaintia suorittajalta, jotta pystyttäisiin saamaan tarkempia mittauksia suorituksista. Pro gradu -tutkielman laajuuden takia tämä ei ollut tämän tutkimuksen rinnalla mahdollista. Tässä tutkielmassa keskityttiin 52 Hz mittaustaajuuksiin, mutta Movesense tarjoaa mahdollisuudet taajuuksille 13, 26, 52, 104, 208, 416, 833 sekä 1666 Hz. Näiden sopivuuden tutkiminen voimanostoliikkeiden monitorointiin olisi myös oleellinen jatkotutkimus aihe.

Tutkimuksessa ollaan myös otettu kantaa siihen miten on mahdollista vaikuttaa kerätyn informaation tunnistamattomuuteen yksinkertaisesti. Tämä onnistuu helposti luvun 5.3 esittämällä tavalla. Datan anonymisyys on kuitenkin erittäin tärkeä asia, jonka tutkiminen olisi erittäin tärkeää kaupallisen tuotteen kannalta.

Movesense tarjoaa ohjelmointi rajapinnan tuotteilleen, jolla on mahdollista kehittää omanlaisia sensoreita omiin tarpeisiin. Tätä hyödyntäen olisi mahdollista kehittää tuote, joka tekee tässä tutkimuksessa kehitettyjä laskennallisesti halpoja suodatuksia reunalaskentana Movesense laitteella. Reunalaskennan avulla pystyttäisiin myös pienentämään langattoman verkon yli lähetettävien pakettien kokoa. Tutkielmassa tutkittiin hieman langattomia kommunikaatioprotokollia, joista Bluetooth Low Energy osoittautui erityisen hyväksi vaihtoehdoksi kommunikaatioprotokollalle, jolla Movesense sensori oli varustettu. BLE tarjoaa erittäin laadukkaan kommunikaatioprotokollan tietoturva ominaisuuksilla, kuten *offline* avain vaihdoilla ja taajuushyppely asetuksilla että vaikuttavalla tiedonsiirtonopeudella sekä helppo käytettävyydellään.

Lähteet

Adelsberger, Rolf, ja Gerhard Tröster. 2013. "Experts lift differently: classification of weight-lifting athletes". Teoksessa *2013 IEEE International Conference on Body Sensor Networks*, 1–6. IEEE.

Annesi, James J. 1998. "Effects of computer feedback on adherence to exercise". *Perceptual and motor skills* 87 (2): 723–730.

Antonakakis, Manos, Tim April, Michael Bailey, Matt Bernhard, Elie Bursztein, Jaime Cochran, Zakir Durumeric, J Alex Halderman, Luca Invernizzi, Michalis Kallitsis ym. 2017. "Understanding the mirai botnet". Teoksessa *26th USENIX security symposium (USENIX Security 17)*, 1093–1110.

Arias, Orlando, Jacob Wurm, Khoa Hoang ja Yier Jin. 2015. "Privacy and Security in Internet of Things and Wearable Devices". *IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems* 1 (2): 99–109. <https://doi.org/10.1109/TMSCS.2015.2498605>.

Aroganam, Gobinath, Nadarajah Manivannan ja David Harrison. 2019. "Review on wearable technology sensors used in consumer sport applications". *Sensors* 19 (9): 1983.

"Bluetooth Technology Overview". 2022. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview>.

Burd, Nicholas A, Richard J Andrews, Daniel WD West, Jonathan P Little, Andrew JR Cochran, Amy J Hector, Joshua GA Cashaback, Martin J Gibala, James R Potvin, Steven K Baker ym. 2012. "Muscle time under tension during resistance exercise stimulates differential muscle protein sub-fractional synthetic responses in men". *The Journal of physiology* 590 (2): 351–362.

Camomilla, Valentina, Elena Bergamini, Silvia Fantozzi ja Giuseppe Vannozzi. 2018. "Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review". *Sensors* 18 (3): 873.

Chambers, Ryan, Tim J Gabbett, Michael H Cole ja Adam Beard. 2015. "The use of wearable microsensors to quantify sport-specific movements". *Sports medicine* 45 (7): 1065–1081.

- Chang, Keng-hao, Mike Y Chen ja John Canny. 2007. "Tracking free-weight exercises". Teoksessa *International Conference on Ubiquitous Computing*, 19–37. Springer.
- Dadafshar, Majid. 2014. "Accelerometer and gyroscopes sensors: operation, sensing, and applications". *Maxim Integrated [online]*.
- Feigenbaum, Matthew S, ja Michael L Pollock. 1999. "Prescription of resistance training for health and disease." *Medicine and science in sports and exercise* 31 (1): 38–45.
- "Fitbit Official Site for Activity Trackers and More". 2004. <https://www.fitbit.com/global/fi/home>.
- Al-Fuqaha, Ala, Mohsen Guizani, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari ja Moussa Ayyash. 2015. "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications". *IEEE communications surveys & tutorials* 17 (4): 2347–2376.
- Gastin, Paul B, Owen McLean, Michael Spittle ja Ray VP Breed. 2013. "Quantification of tackling demands in professional Australian football using integrated wearable athlete tracking technology". *Journal of science and medicine in sport* 16 (6): 589–593.
- Ghamari, Mohammad, Harneet Arora, R Simon Sherratt ja William Harwin. 2015. "Comparison of low-power wireless communication technologies for wearable health-monitoring applications". Teoksessa *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, 1–6. IEEE.
- Ghinita, Gabriel, Panagiotis Karras, Panos Kalnis ja Nikos Mamoulis. 2007. "Fast data anonymization with low information loss". Teoksessa *Proceedings of the 33rd international conference on Very large data bases*, 758–769.
- "Global IoT connections worldwide". 2020. <https://www-statista-com.ezproxy.jyu.fi/statistics/1101442/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>.
- Golle, Philippe. 2006. "Revisiting the uniqueness of simple demographics in the US population". Teoksessa *Proceedings of the 5th ACM Workshop on Privacy in Electronic Society*, 77–80.

- Halperin, Daniel, Thomas S. Heydt-Benjamin, Benjamin Ransford, Shane S. Clark, Benessa Defend, Will Morgan, Kevin Fu, Tadayoshi Kohno ja William H. Maisel. 2008. “Pacemakers and Implantable Cardiac Defibrillators: Software Radio Attacks and Zero-Power Defenses”. Teoksessa *2008 IEEE Symposium on Security and Privacy (sp 2008)*, 129–142. <https://doi.org/10.1109/SP.2008.31>.
- He, Dayu. 2010. “The zigbee wireless sensor network in medical care applications”. Teoksessa *2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, 1:497–500. IEEE.
- “Heart rate monitors, activity trackers and bike computers”. 2004. <https://www.polar.com>.
- Hevner, Alan R, Salvatore T March, Jinsoo Park ja Sudha Ram. 2004. “Design science in information systems research”. *MIS quarterly*, 75–105.
- Jung, Junyoung, Jinsung Cho ja Ben Lee. 2020. “A secure platform for iot devices based on arm platform security architecture”. Teoksessa *2020 14th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, 1–4. IEEE.
- Kelly, Daniel, Garrett F Coughlan, Brian S Green ja Brian Caulfield. 2012. “Automatic detection of collisions in elite level rugby union using a wearable sensing device”. *Sports Engineering* 15 (2): 81–92.
- LeFevre, Kristen, David J DeWitt ja Raghu Ramakrishnan. 2005. “Incognito: Efficient full-domain k-anonymity”. Teoksessa *Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 49–60.
- “LoRaWAN vs NB-IoT”. 2020. <https://ubidots.com/blog/lorawan-vs-nb-iot/>.
- MacDonald, Kerry, Roald Bahr, Jennifer Baltich, Jackie L Whittaker ja Willem H Meeuwisse. 2017. “Validation of an inertial measurement unit for the measurement of jump count and height”. *Physical Therapy in Sport* 25:15–19.
- Mao, Guoqiang, Barış Fidan ja Brian DO Anderson. 2007. “Wireless sensor network localization techniques”. *Computer networks* 51 (10): 2529–2553.

Mekki, Kais, Eddy Bajic, Frederic Chaxel ja Fernand Meyer. 2018. "Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT". Teoksessa *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 197–202. IEEE.

"Movesense". 2022. <https://www.movesense.com>.

"Movesense Academic Program". 2022. <https://www.movesense.com/movesense-academic-program/>.

"Movesense Platform". 2022. <https://www.movesense.com/overview/>.

"Movesense Sensor HR+". 2022. <https://www.movesense.com/product/movesense-sensor-hr/>.

"NB-IoT vs LoRaWAN". 2020. <https://www.iotforall.com/nb-iot-vs-lorawan-which-to-use-for-industrial-iot-applications>.

"Number of connected IoT devices growing 18% to 14.4 billion globally". 2022. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>.

"Number of IoT Connected Devices Worldwide". 2022. <https://financesonline.com/number-of-internet-of-things-connected-devices/>.

O'Donovan, Gary, Anthony J Blazevich, Colin Boreham, Ashley R Cooper, Helen Crank, Ulf Ekelund, Kenneth R Fox, Paul Gately, Billie Giles-Corti, Jason MR Gill ym. 2010. "The ABC of Physical Activity for Health: a consensus statement from the British Association of Sport and Exercise Sciences". *Journal of sports sciences* 28 (6): 573–591.

Olsson, Jonas. 2014. "6LoWPAN demystified". *Texas Instruments* 13:1–13.

Pacheco, J., ja S. Hariri. 2016. "IoT Security Framework for Smart Cyber Infrastructures". Teoksessa *2016 IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self* Systems (FAS*W)*, 242–247. <https://doi.org/10.1109/FAS-W.2016.58>.

Peppers, Ken, Tuure Tuunanen, Marcus A Rothenberger ja Samir Chatterjee. 2007. "A design science research methodology for information systems research". *Journal of management information systems* 24 (3): 45–77.

- Ramsden, Edward. 2011. *Hall-effect sensors: theory and application*. Elsevier.
- Reynders, Brecht, ja Sofie Pollin. 2016. “Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication”. *Teoksessa 2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*, 1–5. IEEE.
- Sabatini, Angelo Maria. 2011. “Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing”. *Sensors* 11 (2): 1489–1525.
- Sforza, Francois (Semtech International AG). 2013. Communications system. Yhdysvaltalainen patentti, haettu 26. maaliskuuta 2013. <https://patents.google.com/patent/US8406275B2/en>.
- Sherazi, Hafiz Husnain Raza, Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco ja Gennaro Boggia. 2018. “When renewable energy meets LoRa: A feasibility analysis on cable-less deployments”. *IEEE Internet of Things Journal* 5 (6): 5097–5108.
- Siegmund, Gunter P, Kevin M Guskiewicz, Stephen W Marshall, Alyssa L DeMarco ja Stephanie J Bonin. 2016. “Laboratory validation of two wearable sensor systems for measuring head impact severity in football players”. *Annals of biomedical engineering* 44 (4): 1257–1274.
- Sinha, Rashmi Sharan, Yiqiao Wei ja Seung-Hoon Hwang. 2017. “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT”. *Ict Express* 3 (1): 14–21.
- “Suunnon urheilukellot, sukellustuotteet, kompassit ja lisävarusteet”. 2004. <https://www.suunto.com/fi-fi/>.
- Tosi, Jacopo, Fabrizio Taffoni, Marco Santacatterina, Roberto Sannino ja Domenico Formica. 2017. “Performance evaluation of bluetooth low energy: A systematic review”. *Sensors* 17 (12): 2898.
- Tran, Quan T, David Docherty ja David Behm. 2006. “The effects of varying time under tension and volume load on acute neuromuscular responses”. *European journal of applied physiology* 98 (4): 402–410.

Wang, Jiliang, Feng Hu, Ye Zhou, Yunhao Liu, Hanyi Zhang ja Zhe Liu. 2020. “BlueDoor: breaking the secure information flow via BLE vulnerability”. Teoksessa *Proceedings of the 18th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 286–298.

“What are IoT devices?” 2022. <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/IoT-device>.

Winett, Richard A, ja Ralph N Carpinelli. 2001. “Potential health-related benefits of resistance training”. *Preventive medicine* 33 (5): 503–513.

Wu, Fan, Jean-Michel Redouté ja Mehmet Rasit Yuce. 2018. “We-safe: A self-powered wearable iot sensor network for safety applications based on lora”. *IEEE Access* 6:40846–40853.

Wu, Xiling, Caihua Zhang ja Wei Du. 2021. “An analysis on the crisis of “chips shortage” in automobile industry——Based on the double influence of COVID-19 and trade Friction”. Teoksessa *Journal of Physics: Conference Series*, 1971:012100. 1. IOP Publishing.

Zhang, Jinnan, Yanghua Cao, Min Qiao, Lingmei Ai, Kaize Sun, Qing Mi, Siyao Zang, Yong Zuo, Xueguang Yuan ja Qi Wang. 2018. “Human motion monitoring in sports using wearable graphene-coated fiber sensors”. *Sensors and Actuators A: Physical* 274:132–140.

Zhang, Z., M. C. Y. Cho, C. Wang, C. Hsu, C. Chen ja S. Shieh. 2014. “IoT Security: Ongoing Challenges and Research Opportunities”. Teoksessa *2014 IEEE 7th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications*, 230–234. <https://doi.org/10.1109/SOCA.2014.58>.

Zhou, Bo, Harald Koerger, Markus Wirth, Constantin Zwick, Christine Martindale, Heber Cruz, Bjoern Eskofier ja Paul Lukowicz. 2016. “Smart soccer shoe: monitoring foot-ball interaction with shoe integrated textile pressure sensor matrix”. Teoksessa *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, 64–71.