



**INERTIANMITTAUSYKSIKÖIDEN JA VIDEOPOHJAISEN TEKOÄLYN
HYÖDYNTÄMINEN URHEILIJOIDEN LIIKEANALYYSISSÄ**

**UTILIZING INERTIAL MEASUREMENT UNITS AND VIDEO-BASED
ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR ATHLETES MOTION ANALYSIS**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

Arttu Asikainen

Tarkastaja: Professori Aki Mikkola

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Engineering Science

Mechanical Engineering

Arttu Asikainen

Utilizing inertial measurement units and video-based artificial intelligence for athletes motion analysis

Bachelor's thesis

2024

42 pages, 9 figures, 0 tables and 0 appendices

Examiner: Professor Aki Mikkola

Keywords: IMU, Inertial motion sensor, Motion analysis, Sports

This bachelor's thesis examines the use of inertial measurement units (IMUs) and video-based artificial intelligence modelling for motion and performance analysis of athletes. The thesis explores the potential of IMU technology by investigating its applicability, accuracy and practicality in monitoring and analysing athletes' movements. While the development project of a ping-pong glove for para-athletes at Lappeenranta-Lahti University of Technology (LUT) serves as one application example in this study, the work aims to provide a broader understanding of the potential of IMU technology for sports motion analysis. It also explores the potential of video-based deep learning and other AI-based motion analysis techniques for sports related motion analysis.

The work has been carried out mainly as a literature review using scientific articles as sources and by refining and summarising the information found in them. In addition, the work includes interviews with individuals conducted in the context of the ping-pong glove project.

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Konetekniikka

Arttu Asikainen

Inertianmittausyksiköiden ja videopohjaisen tekoälyn hyödyntäminen urheilijoiden liikeanalyysissä

Konetekniikan kandidaatintyö

42 sivua, 9 kuvaa, 0 taulukkoa ja 0 liitettä

Tarkastaja: Professori Aki Mikkola

Avainsanat: IMU, Inertianmittausyksikkö, Liikeanalyysi, Urheilu

Tämä kandidaatintyö tarkastelee inertianmittausyksiköiden (IMU) sekä videopohjaisen tekoälymallinnuksen käyttöä urheilijoiden liikeanalyysissä ja suoritusten analysoinnissa. Tutkielmassa tarkastellaan IMU-teknologian potentiaalia tutkimalla sen soveltuvuutta, tarkkuutta ja käytännöllisyyttä urheilijoiden liikkeiden seurannassa ja analysoinnissa. Vaikka para-urheilijalle suunnatun pingishansikkaan kehitysprojekti Lappeenrannan–Lahden teknillisessä yliopistossa (LUT) toimii yhtenä sovellusesimerkkinä tässä tutkimuksessa, pyrkii työ tarjoamaan laajempaa ymmärrystä IMU-teknologian käyttömahdollisuuksista urheilun liikeanalyysissä. Työssä tutkitaan lisäksi videopohjaisen syväoppimista ja muita tekoälymenetelmiä hyödyntävän liikeanalyysin potentiaalia urheilun liikeanalyysissä.

Työ on toteutettu pääosin kirjallisuuskatsauksena käyttäen lähteenä tieteellisiä artikkeleita ja jalostamalla sekä tiivistämällä näistä löytyvää tietoa. Lisäksi työ sisältää pingishansikas projektin yhteydessä tehtyjä henkilöhaastatteluja.

Sisällysluettelo

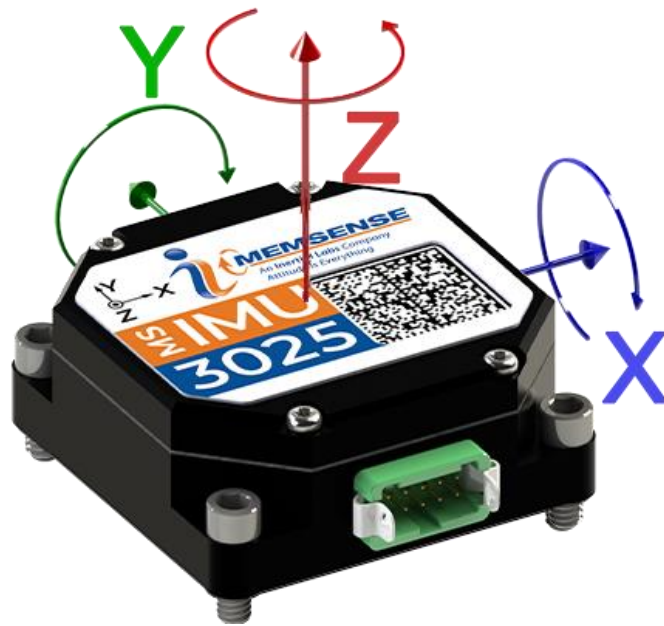
Tiivistelmä

Abstract

1.	Johdanto.....	6
2.	Kirjallisuuskatsaus inertianmittausyksiköistä	9
2.1.	IMU-teknologia ja komponentit	9
2.1.1.	Komponentit	9
2.1.2.	MEMS.....	10
2.1.3.	IMU:n sisäinen sensorifuusio	11
2.2.	Inertianmittausyksiköiden käyttö urheilussa	12
2.2.1.	IMU:jen Käyttö Mailapeleissä.....	13
2.2.2.	Vammojen ehkäisy ja kuntoutus.....	16
2.2.3.	Suorituskykymittarit	17
2.3.	IMU-pohjainen liikeanalyysi verrattuna muihin liikeanalyysin keinoihin	18
2.4.	Integrointi muiden tekniikoiden kanssa.....	21
2.5.	Haasteet.....	22
2.5.1.	Tekniset haasteet.....	23
2.5.2.	Urheilijoiden ja valmentajien asenteet.....	24
2.6.	Tulevaisuudennäkymät	25
3.	Videokuvasta mallinnettu analyysi.....	27
3.1	Videoanalyysin mahdollisuudet urheilun liikeanalyysissä.....	27
3.2	Esimerkkejä videopohjaisen analyysin käytöstä.....	28
3.3	Haasteet syväoppimista hyödyntävän videopohjaisen analyysin käytössä.....	31
4.	Inertianmittausyksikön käyttö LUT yliopiston para-pöytätennismaila projektissa.....	33
4.1.	Parapöytätenniksen lajityypilliset piirteet.....	33
4.2.	Valmentajien tämänhetkinen datankeruuprosessi.....	34
4.3.	Valmentajien ja pelaajien toiveet liikeanalyysille ja datankeruulle.....	35
4.4.	Inertianmittausyksiköiden mahdollisuudet parapöytätenniksessä	36
4.5.	Inertianmittausyksiköiden haasteet parapöytätenniksessä.....	37
5.	Yhteenveto.....	38
	Lähteet	40

1. Johdanto

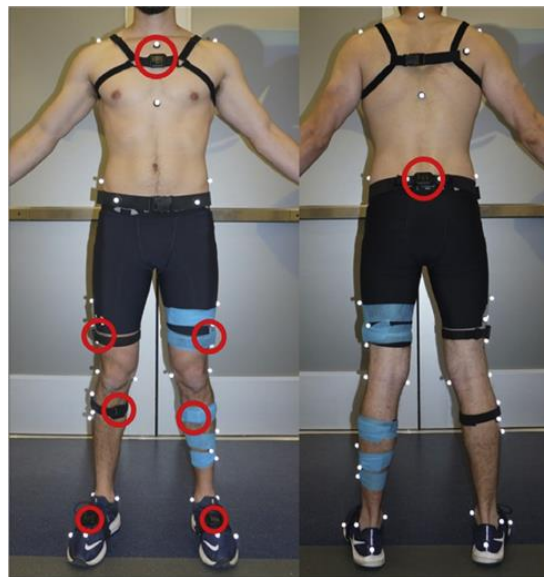
Viimeaikainen kehitys anturitekniologioissa ja puettavien laitteiden hintojen merkittävä lasku ovat johtaneet inertianmittausyksiköihin perustuvien puettavien teknologioiden käyttöönottoon urheilijoiden liikeanalyysissä. IMU-siruihin perustuva puettava teknologia, joka on helppokäyttöistä, pientä ja joustavaa toteuttaa on löytämässä paikkansa urheiluanalytiikan alalla ja kasvattamassa suosiotaan (Rana & Mittal, 2021). Kiihtyvyyssmittareista, gyroskoopeista ja joskus magnetometreistä koostuvat IMU:t tarjoavat kattavan keinon tallentaa ja kvantifioida urheilijoiden liikkeitä. Inertianmittausyksiköt voivat mitata tarkasti lineaarista- ja kulmaliikkeitä sekä antaa reaaliaikaista tietoa kiihtyvyydestä, nopeuden muutoksista ja suunnasta (Ahmad ym., 2013). Valmentajat, urheilututkijat ja urheilijat voivat käyttää näitä tietoja tekniikan arviointiin, harjoitusohjelmien optimointiin ja vammojen ennaltaehkäisyyn. Inertianmittausyksiköiden avulla voidaan kvantifioida parametreja, kuten voimantuottoa, sen suuntaa ja nivelkulmia, mikä auttaa ymmärtämään urheilijan fyysistä suorituskykyä konkreettisesti ja kokonaisvaltaisesti. Inertianmittausyksiköiden pieni koko ja helppokäyttöisyys mahdollistavat niiden käytön liikeanalyysin välineenä haastavissa kenttäolosuhteissa, joissa muu liikeanalyysi ei ole järkevästi toteutettavissa. Tämän työn tarkoituksena on selvittää inertianmittausyksiköiden käytön potentiaalia yleisesti urheiluun liittyvässä liikeanalyysissä sekä LUT-yliopiston projektissa, jossa kehitetään para-urheilijalle pingishansikas.



Kuva 1. IMU ja sen mittaussuunnat (Memsense, 2024)

Inertianmittausyksiköiden suurimpia haasteita urheiluliikeanalyysissä ovat kohina, ajautuminen (drift), integraatiovirheet ja magnetometriin kohdistuvat magneettiset häiriöt. Ajan myötä IMU-sensorit voivat kokea ajautumista, mikä aiheuttaa asteittaista poikkeamaa todellisista arvoista. Ajautuminen voi johtua erilaisista tekijöistä, kuten anturivirheistä, lämpötilan vaihteluista ja pitkäaikaisista kalibrointivirheistä. Kiihtyvyyssmittarien komponentit ja ulkoiset tekijät voivat tuottaa mittauksiin ja signaaleihin melua, erityisesti korkeilla taajuuksilla. Myös kiihtyvyyden integrointi nopeuden saamiseksi ja edelleen integrointi sijainnin saamiseksi voi kumuloida virheitä ajan myötä, erityisesti pitkäaikaisessa liikkeenseurannassa (Zhu & Zhou, 2004). Lisäksi jos IMU sisältää magnetometrin saattavat läheiset metalliesineet ja sähkömagneettiset kentät aiheuttavat häiriötä magnetometrin lukemien tarkkuuteen, mikä voi vääristää suunta-arvioita. (Ahmad et al., 2013) Näitä ongelmia on kuitenkin mahdollista minimoida kalibroinnilla, algoritmeilla ja sensorifuusiolla. Nämä ratkaisut kuitenkin tuovat mukanaan erilaisia haasteita, kuten sopivien suodinarvojen löytämisen erilaisiin käyttötarkoituksiin (Miller ym., 2022) ja eri sensoreiden keskinäisen kalibroinnin (Rehder & Siegwart, 2017). Myös sopivien inertianmittausyksiköiden valitseminen voi tuottaa haasteita. Näitä haasteita ovat esimerkiksi riittävä mittausalue ja näytteenottotaajuus, yksikön koko ja paino, virrankulutus ja kestävyys. Huomioonotettavaa on myös kuhunkin käyttökohteeseen

parhaiten soveltuvan liikeanalyysin keinon valinta. Joissain tapauksissa muut analyysin keinot kuten kuva-analyysi tai useamman analyysin yhdistäminen esimerkiksi sensorifuusion avulla voi olla järkevämpää, kuin Inertianmittausensoreilla tehtävä analyysi. Tämän takia on tärkeää tunnistaa IMU-pohjaisen liikeanalyysin heikkouksia ja vahvuuksia. Lisäksi on tärkeää tunnistaa tuottaako IMU:n avulla tuotettu liikeanalyysi konkreettista ja käyttökelpoista dataa urheilijalle tai valmennukselle.



Kuva 2. IMU:ja (ympyröity) sekä kuva pohjaisessa liikeanalyysissä käytettäviä heijastavia merkkejä sijoitettuna koehenkilöön. (Dahl ym., 2020)

Tutkielman tavoitteena on tunnistaa inertianmittausyksiköihin perustuvan liikeanalyysin käytettävyys eri urheilulajeissa ottaen huomioon kuhunkin urheilulajiin liittyvät ainutlaatuiset liikemallit ja biomekaniikka. Tutkielma pyrkii myös selvittämään minkälaista lisäarvoa IMU toisi LUT-yliopiston pingishansikasprojektiin ja tuottaisiko se urheilijaa hyödyntävää dataa. Tutkielma ei ainoastaan osoita IMU-pohjaisen liikeanalyysin vahvuuksia ja heikkouksia, vaan myös antaa käytännön näkökulman sen käytöstä urheilukontekstissa. Näin edistäen tietoisuutta siitä, miten tätä teknologiaa voidaan tehokkaasti hyödyntää erilaisissa lajispesifeissä liikeanalyyseissa.

2. Kirjallisuuskatsaus inertianmittausyksiköistä

Kirjallisuuskatsauksen lähteinä on käytetty LUT Primo ja Google Scholar hakukoneita. Käytettyjä hakusanoja olivat ”IMU”, ”IMUs in sports”, ”Inertial motion units in sports”, ”IMU in Sports Performance”, ”Injury Prevention with IMUs”, ”IMU Accuracy and Reliability in Sports”.

2.1. IMU-teknologia ja komponentit

IMU:t eli inertianmittausyksiköt ovat elektronisia laitteita, jotka on suunniteltu mittaamaan ja seuraamaan kappaleen liikeominaisuuksia. Inertianmittausyksiköt mittaavat kappaleiden kiihtyvyyttä, kulmanopeutta ja suuntaa käyttäen erilaisia antureita. IMU-teknologiassa keskeisiä komponentteja ovat kiihtyvyyssanturi, gyroskooppi ja magnetometri, jotka yhdessä keräävät tietoja antaen kolmiulotteisen kuvan kappaleen liikkeestä. IMU:t voidaan jakaa kuusiakselisiin ja yhdeksänakselisiin malleihin. Kuusiakselisissa malleissa kiihtyvyyssanturit mittaavat liikettä x-, y- ja z-akseleilla, kun taas gyroskoopit seuraavat kulmanopeutta näiden samojen akselien ympäri. Yhdeksänakseliset mallit sisältävät lisäksi magnetometrin, joka tunnistaa kappaleen orientaation maan magneettikenttään nähden, tarjoten vielä tarkempaa ja monipuolisempaa tietoa (Alandry ym., 2011). IMU-teknologia on kriittinen osa useita nykypäivän sovelluksia, kuten ajoneuvojen navigointi, robotiikka, urheiluanalytiikka ja virtuaalitodellisuus. Näissä sovelluksissa IMU-laitteet tarjoavat tarkkaa ja reaaliaikaista tietoa laitteiden tai ihmisten liikkeistä ja asennoista. Tämän seurauksena ne mahdollistavat monimutkaisten liikkeiden ja dynaamisten toimintojen tehokkaan seurannan ja analysoinnin (Faisal, Purboyo & Ansori, 2020).

2.1.1. Komponentit

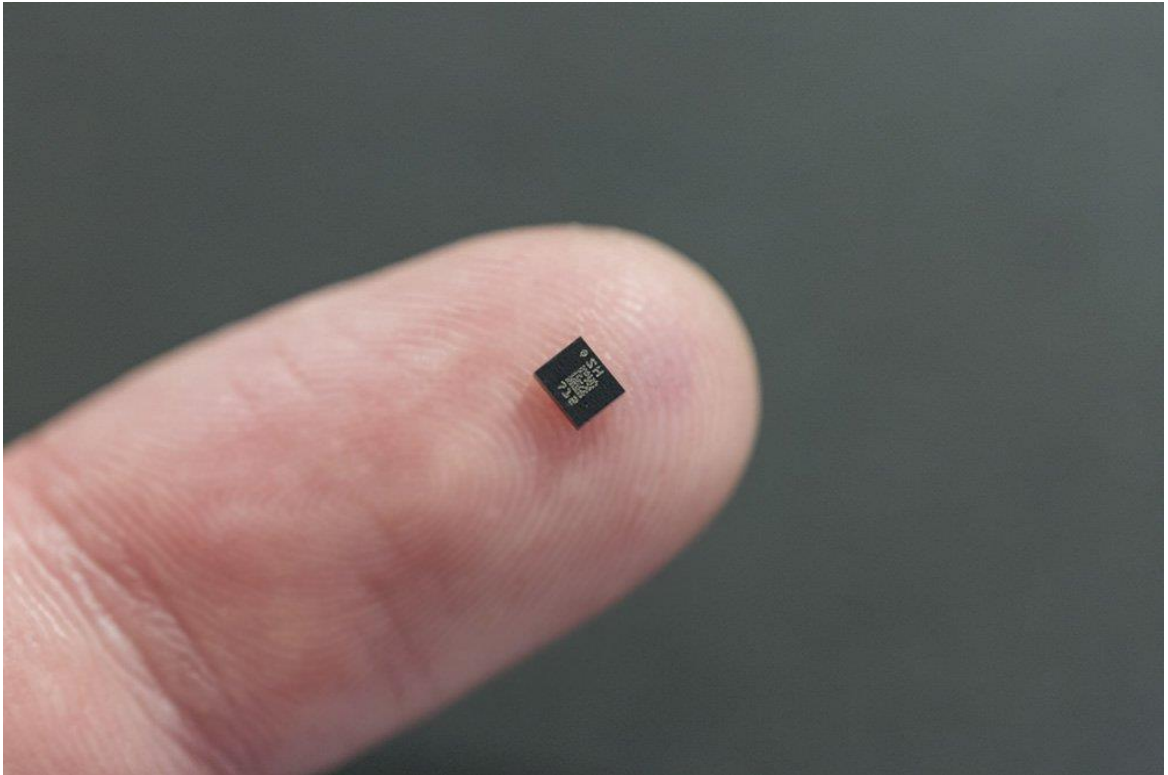
Inertianmittausyksiköissä käytetään kolmea päätyyppistä anturia: kiihtyvyyssmittaria, gyroskooppia ja magnetometriä. Jokaisella näillä antureilla on oma ainutlaatuinen roolinsa liikkeen ja asennon mittaamisessa.

- Kiihtyvyyssmittarit mittaavat lineaarista kiihtyvyyttä pitkin x-, y- ja z-akseleita. Niiden tehtävänä on havaita ja mitata kuinka nopeasti kappaleen nopeus muuttuu ajan suhteen suoraan liikkeessä. Kiihtyvyyssmittareiden avulla voidaan myös tunnistaa painovoiman vaikutus, joka mahdollistaa laitteen asennon määrittämisen suhteessa Maahan.
- Gyroskoopit mittaavat kulmanopeutta, eli kuinka nopeasti laite kääntyy akselinsa ympäri. Ne ovat keskeisiä laitteen orientaation eli asennon muutosten seurannassa. Gyroskooppien avulla IMU voi seurata ja analysoida dynaamista liikettä, kuten käännöksiä ja pyörähdyksiä.
- Magnetometrit mittaavat maan magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa, mikä mahdollistaa laitteen absoluuttisen suunnan määrittämisen suhteessa Maan magneettisiin napoihin. Ne ovat siis digitaalisen kompassin pääkomponentti, joka tarjoaa tärkeää tietoa navigointisovelluksille ja laitteille. Magnetometrien avulla IMU voi tarjota tarkkoja suuntatietoja (Facchinetti, Savioli & Goldoni, 2010).

Yhdessä nämä kolme anturityyppiä tarjoavat kattavan kuvan kappaleen liikkeestä ja asennosta, mahdollistaen monimutkaisten liikesarjojen ja asentojen tarkan seurannan sekä analysoinnin monenlaisissa sovelluksissa aina kuluttajaelektroniikasta, teollisuussovelluksiin ja urheiluanalytiikkaan.

2.1.2. MEMS

Mikroelektromekaaniset järjestelmät (MEMS) ovat piisiruja, joille on yhdistetty mekaaniset elementit, sensorit, toimilaitteet ja elektroniikka. Tämän valmistusteknologian avulla voidaan luoda elektronisia rakenteita mikromittakaavassa. MEMS:in etuja verrattuna tavallisiin valmistustekniikoihin ovat suunnittelun yksinkertaisuus, kustannusten alentaminen, korkea suorituskyky sekä mikroskaalan koko (Taechajedcadarungsri, 2005).



Kuva 3. BPS.Space:n pienoismalliraketeissaan käyttämä inertianmittausyksikkö (BPS.Space, 2018)

Strategisissa sovelluksissa, kuten avaruusrakettien laukaisussa, on perinteisesti käytetty suuren mittakaavan teknologiaa, niiden erittäin korkean tarkkuuden ja pienen ajautumisen (virheen kertyminen ajan myötä) takia. Nämä järjestelmät ovat kuitenkin yleensä kookkaita ja omaavat suuren energiankulutuksen. MEMS-teknologiaa hyödyntävät IMU:t ovat tulleet tärkeäksi osaksi monia edistyneitä sovelluksia, tarjoten pienempiä, energiatehokkaampia ja silti tarkkoja ratkaisuja perinteisten IMU-järjestelmien rinnalle (Chatterjee ym., 2015).

2.1.3. IMU:n sisäinen sensorifuusio

Sensorifuusio viittaa prosessiin, jossa yhdistetään eri antureiden, kuten kiihtyvyydsmittareiden ja gyroskooppien tarjoamaa tietoa. Tämän yhdistämisen tarkoitus on parantaa mittausten tarkkuutta ja luotettavuutta. Kun erilaisten antureiden dataa fuusioidaan IMU-laitteet pystyvät kompensoimaan kunkin anturin yksittäisiä heikkouksia, joka johtaa tarkempiin ja luotettavampiin mittauksiin suunnasta, nopeudesta ja sijainnista. Esimerkiksi (Faisal, Purboyo & Ansori, 2020) havaitsivat tutkimuksessaan, että

kiihtyvyyssanturin data on hyödyllistä pitkäaikaisessa seurannassa, kun taas gyroskoopin data soveltuu paremmin lyhytaikaisiin mittauksiin. Näiden sensorien dataa yhdistelemällä anturifuusion avulla voidaan hyödyntää kunkin anturin erityisvahvuuksia kokonaissuorituskyvyn parantamiseksi.

2.2. Inertianmittausyksiköiden käyttö urheilussa

Inertianmittausyksiköitä on käytetty monipuolisesti erilaisten liikkeiden ja urheilulajien, kuten esimerkiksi golfin, tenniksen, pesäpallon, lentopallon, rugbyyn, laskettelun, kävelyn, hyppäämisen, juoksun ja uinnin datan keräämiseen. Inertianmittausyksiköt mahdollistavat reaaliaikaisen kinemaattisen analyysin ja auttavat parantamaan urheilijan fyysistä valmistautumista. Lisäksi IMU:t ovat olennaisia urheilusuorituksen tehokkuuden ja loukkaantumisriskien arvioinnissa. IMU-pohjaiset puettavat laitteet tarjoavat käyttäjäturvallisen, suoritusta häiritsemättömän ja kustannustehokkaan menetelmän ihmisen liikkeiden seuraamiseen. Ne takaavat luotettavan tiedonkeruun erilaisissa ympäristöissä ja haastavissa olosuhteissa (Arlotti ym., 2022).

Jalkapallossa IMU:ja on käytetty teknisten ja liikunnallisten tietojen keräämiseen. Esimerkiksi tutkimuksessaan (Myhill ym., 2023) tutkivat IMU-mittareiden (F-IMU) validiteettia ja luotettavuutta suoraviivaisen- ja suunnanmuutosjuoksuharjoituksen aikana. Tutkimus toteutettiin kiinnittämällä molempiin jalkoihin kaksi inertianmittausyksikköä päällekkäin. Tutkimuksessa koehenkilöt suorittivat tiettyjä harjoitteita ja heidän nopeuttaan arvioitiin F-IMU järjestelmällä verrattuna optiseen järjestelmään. Tutkimus osoitti, että F-IMU-järjestelmä antoi nopeuden osalta lähes samoja arvoja optisen liikeanalyysin kanssa. Myös luotettavuus yksiköiden välillä oli hyvä tai erinomainen, mikä korostaa inertianmittausyksiköiden potentiaalia ja luotettavuutta liikeanalyysissä jalkapallossa ja muissa joukkueurheilulajeissa. Huomioitavaa tutkimuksessa on se, että F-IMU sisältää jalkapallokohtaisen juoksunseuranta-algoritmin, joka tunnistaa juoksun keskeiset tapahtumat kuten kantapään iskun, varpaiden irtoamisen maasta, nollanopeuden ja nollakorkeuden. Tämä osoittaa, että inertianmittausyksiköiden tarkkuutta on mahdollista parantaa lajispesifissä käytössä datankäsittelyalgoritmien avulla.

Inertianmittausyksiköiden käyttöä on tutkittu myös eri potkujen tunnistuksessa. Tutkimuksessa inertianmittausyksiköistä kerättiin valtavasti raakadataa, joka syötettiin erilaisille deep learning-malleille, jotka pyrkivät tunnistamaan oliko potku syöttö, laukaus vai null-tilanne eli jokin muu liike. Tutkimuksessa suoritettiin 181 sessiota, joista 143 tapahtui laboratorioissa ja 38 kentällä tapahtuvassa pelissä. Mittauksia tehtiin käyttäen 836 eri ikäistä koehenkilöä, joten otanta oli mittava. Paras malli pystyi tunnistamaan 93846 kontaktin joukosta oikean potkutyyppin 92.8 % tarkkuudella (Stoeve ym., 2021). Tässä tutkimuksessa merkittävää on se, että mittauksia tehtiin myös oikeissa pelitilanteissa.

Rugbyn kaltaisissa lajeissa puettavat IMU-laitteet ovat osoittautuneet tehokkaiksi mittareiksi taklausten arvioinnissa. Rugbyssä taklaukset aiheuttavat Rugby unionin datan perusteella 56 % kaikista menetetyistä harjoitus- ja pelipäivistä. Tämän takia taklauksien ymmärtäminen on merkittävä osa vammojen ehkäisyä. Taklaukset ovat kuitenkin samanaikaisesti merkittävä osa peliä, jonka takia taklauksista saatava data on myös käyttökelpoista pelaajan suorituskyvyn arvioinnissa (Kelly ym., 2012).

Kriketissä IMU-laitteita on hyödynnetty syöttöjen havaitsemiseen ja analysoimiseen sekä harjoitus- että kilpailutilanteissa. Syöttäjillä on suurempi fyysinen työmäärä ja korkeammat loukkaantumisprosentit, kuin muilla pelaajatyypeillä. Heitto- ja työmäärän seuranta on pidetty tärkeänä sekä loukkaantumisten ehkäisyssä että fyysisessä valmennuksessa. Tähän mennessä syöttäjien työmäärän seuranta on rajoittunut heitettyjen pallojen määrän manuaaliseen laskentaan. Ottaen huomioon syöttämisen vaativan luonteen ja suuren loukkaantumisriskin, tehokkaat ja tarkat heittotapahtumien mittaukset ovat elintärkeitä syöttäjien työmäärän ja tämän aiheuttaman väsymyksen ymmärtämisessä. (McNamara ym., 2014)

Näiden esimerkkien perusteella inertianmittausyksiköiden käyttö urheilussa tarjoaa tietoa, joka auttaa ymmärtämään ja parantamaan urheilijoiden suorituskykyä ja tekniikoita eri lajeissa.

2.2.1. IMU:jen Käyttö Mailapeleissä

Inertianmittausyksikön käyttöä sulkapallossa on tutkittu mm. eri lyöntityyppien tunnistamiseksi ja taitotasojen arvioimiseksi. Tutkimuksen järjestelmässä käytettiin

pienitehoista MEMS-IMU-yksikköä, jonka keräämä data lähetetään BLE- sirua (bluetooth low energy) käyttäen älypuhelimeen, josta se puolestaan siirtyy mobiilisovellusta käyttäen pilveen. Datankäsittelyn avulla IMU pääsi 97% tarkkuuteen eri lyöntien tunnistamisessa.

IMU pystyi myös erottamaan ammattilaisurheilijoiden ja harrastajien taitotasot (Wang ym., 2018). IMU:jen avulla eri taitotason omaavat pelaajat voivat siis mitata suorituskyykyään ja seurata kehittymistään.

Pöytätenniksessä inertianmittausyksiköitä on käytetty mm. lyönnin havaitsemiseen ranteeseen kiinnitettävään älykellon avulla. Kello yhdisti IMU- ja äänisensoritietoja parantaakseen lyöntien tunnistuksen tarkkuutta (Sharma ym., 2018).



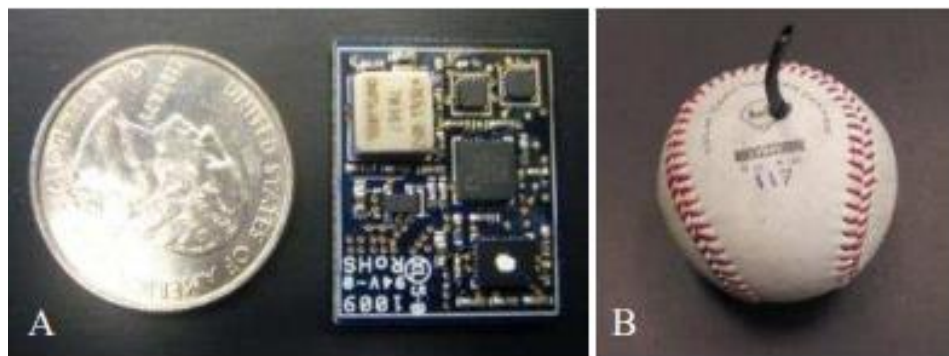
Kuva 4. IMU:ja käytetään mittaamaan tennispelaajan lyöntimääriä ja tarkkuutta (Rana, 2021).

Lisäksi IMU:ja on hyödynnetty lyöntikuorman seurannassa tenniksessä, joka tarjoaa arvokasta tietoa suorituskyyvyn arviointia ja vammojen ennaltaehkäisyä varten mailalajeissa (Arlotti ym., 2022).

Inertianmittausyksiköiden avulla voidaan analysoida esimerkiksi golfin swingin liikeratoja. Golfin oppimisessa oikeanlaisten kehon asentojen ja koordinaation kehittäminen on avain menestykseen. Uusien liikkeiden oppimisen jälkeen aloittelijoiden on vietettävä paljon aikaa harjoitellen samoja toimintoja. Valitettavasti ilman valmentajien valvontaa aloittelijat

saattavat tiedostamattaan ja toistuvasti käyttää virheellisiä asentoja itseharjoittelussa. Virheiden tiedostamatta jättäminen voi johtaa siihen, että pelaajat käyttävät enemmän aikaa ja vaivaa huonon tavan korjaamiseen. On siis hyödyllistä, että aloittelijat oppivat ajoissa välttämään vääriä tekniikoita. Swingin liikeradan lisäksi voidaan tallentaa myös muita swingin ominaisuuksia, kuten nopeus- ja kulmatietoja, jotka voivat auttaa pelaajia seuraamaan edistymistään ja harjoittelemaan itsenäisesti. IMU:jen käytön periaatteita tekniikan opettelussa voidaan soveltaa myös laajasti muiden lajien liikeanalyysiin, esimerkiksi muissa mailapeleissä (Huang ym., 2012). IMU:ja on käytetty myös golffareiden swingimallien erottamiseen ja kehon heilahdusmekaniikan analysointiin, joka on osoittanut niiden potentiaalisen suorituskyvyn parantamisessa ja vammojen ennaltaehkäisyssä golfissa (Santhiranayagagam, 2015).

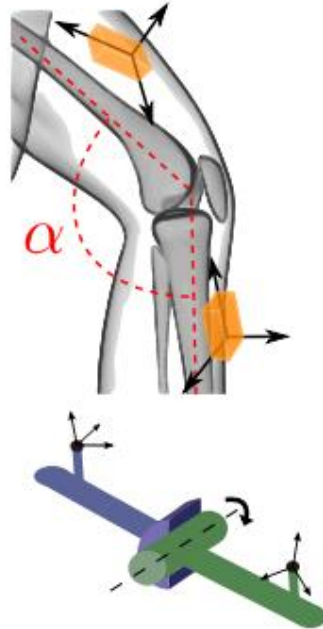
Pesäpallossa MEMS IMU:ja on käytetty edullisena ja huomaamattomana menetelmä pallon nopeuden, kulmanopeuden ja suunnan mittaamiseksi syötön aikana kuvan 5 mukaisella tavalla. Nämä tiedot kertovat pesäpallon vapaan lennon käyttäytymisestä ja erityisesti siitä, miten heittäjän pallolle antama panos (eli pallon nopeus ja kulmanopeus vapautushetkellä) aiheuttaa pallon kierteen (McGinnis, Perkins & King, 2011).



Kuva 5. Pesäpalloon asennettu MEMS IMU (McGinnis, Perkins & King, 2011)

Nämä esimerkit osoittavat, kuinka IMU:ja voidaan hyödyntää monipuolisesti mailapeleissä. Ne tarjoavat arvokasta tietoa taitojen arvioinnista, toiminnan tunnistamisesta, lyöntien havaitsemisesta ja yleisestä liikeanalyysistä, edistäen urheilijoiden suorituskykyä ja valmennuksen tehokkuutta.

2.2.2. Vammojen ehkäisy ja kuntoutus



Kuva 6. Esimerkki Inertianmittausyksiköiden sijoittelusta kehoon nivelkulman (α) mittaamiseksi (Seel, 2014).

Biomekaaninen arviointi: IMU:ta voidaan käyttää urheilijan liikemallien ja biomekaniikan seurantaan harjoittelun ja kilpailun aikana, jotta voidaan tunnistaa tiettyihin kehon osiin kohdistuva mahdollinen rasitus ja siten ehkäistä ylikuormitusvammoja. (Rawashdeh 2016)

Kuormituksen seuranta: IMU:t voivat mitata ulkoista biomekaanista kuormitusta, mukaan lukien kiihtyvyyttä, hidastuvuutta ja suunnanmuutoksia, joka antaa tietoa harjoituskuormituksen hallitsemiseksi ja loukkaantumisriskin minimoimiseksi (Wilkerson 2016).

Suorituskyvyn optimointi: IMU:t voivat seurata erilaisia kinemaattisia mittareita, mikä auttaa optimoimaan urheilijan suorituskykyä ja minimoimaan samalla loukkaantumisriskin yksilöllisen harjoittelun ja tekniikan parantamisen avulla (Marin ym., 2015).

Paluu urheiluun -arvioinnit: Liikeanalyysi on ratkaisevan tärkeää arvioitaessa urheilijan valmiutta palata urheiluun loukkaantumisen jälkeen, sillä sen avulla voidaan arvioida objektiivisesti liikemalleja ja mahdollisia loukkaantumisriskitekijöitä.

IMU:jen potentiaalia vammojen ehkäisyssä on tutkittu muun muassa seuraamalla reaaliaikaisesti selän kaareutumista erilaisissa nostoliikkeissä. Selkäkipuja esiintyy jopa 40,8 % painonnostajista ja ne ovat globaalissa mittakaavassa yksi suurimmista pitkäaikaisten vammautumisien aiheuttajista. Painonnostoon liittyvien vammojen ehkäisyssä korostuvat oikea selkää suojaava asento harjoittelussa. Kun selkäranka on kaareutuneena eteenpäin raskasta kuormaa nostettaessa, selän lihasten tekemän työn osuus vähenee, kun taas nivelsiteiden tukeva voima kasvaa. Tämä aiheuttaa painetta ja voimia nikamien välille. Oikealla nostotekniikalla liiallista kuormitusta selkärankaan voidaan vähentää. On todettu, että selkärangan ollessa neutraalissa asennossa, se on 25 %–40% vahvempi ja sietää paremmin puristusvoimia. Kahdella IMU:lla kyetään seuraamaan selän kaareutumista reaaliajassa ja antamaan käyttäjälle varoituksia asennon muuttuessa loukkaantumisalttiiksi. IMU:t poistavat osittain tarvetta esimerkiksi nostotekniikkaa seuraavalta personal trainerilta tai valmentajalta sekä omalta asennon seuraamiselta peilin kautta, jonka arvioidaan itsessään lisäävän loukkaantumisriskiä (Jenkins & Weerasekera, 2022).

2.2.3. Suorituskykymittarit

Lisäksi IMU:t ovat kykeneviä tallentamaan tietoja pelaajien liikkeistä, jotka kertovat suorituskyvyn eri osa-alueista, kuten ketteryydestä, nopeudesta, kiihtyvyydestä, hidastuvuudesta ja biomekaanisesta kuormituksesta. Tämän datan avulla voidaan analysoida urheilijan taktista käyttäytymistä, fyysistä toimintaa, kuormituksen määrää ja päätöksentekoprosessia. Näiden analyysien avulla voidaan arvioida ja parantaa urheilijoiden suorituskykyä monipuolisesti. (Alanen ym., 2021)

Inertianmittausyksiköitä voidaan käyttää mm. seuraavien suorituskykyparametrien mittaamiseen.

- Nopeus: On ratkaisevan tärkeä urheilijan liikkeen ja suorituskyvyn ymmärtämisen kannalta.
- Kiihtyvyys: Kiihdytysten ja kiihtyvyyden muutosten seuraaminen voi antaa tietoa urheilijan räjähtävyydestä, ketteryydestä ja voimantuotosta liikkeiden aikana.

- Kinemaattiset parametrit: IMU:t voivat antaa tietoja nivelkulmista, raajojen liikkeistä ja kehon segmenttien orientaatioista, joka mahdollistaa liikemallien ja biomekaniikan analysoinnin (Myhill ym., 2023).
- Törmäysvoimat: IMU:illa voidaan mitata törmäysvoimia, mikä auttaa arvioimaan kehoon kohdistuvaa räsitusta hyppäämisen, laskeutumisen tai törmäysten kaltaisten toimintojen aikana (Kelly ym., 2012).
- Kuljettu matka: IMU:t voivat laskea urheilijan eri urheilutoimintojen aikana kulkeman matkan, joka antaa arvokasta tietoa kestävyydestä ja työtahdista.
- Aktiivisuus: IMU:t voivat arvioida urheilijoiden energiankulutusta harjoittelun tai kilpailujen aikana, joka auttaa harjoittelun kuormituksen hallinnassa, palautumisessa ja suorituskyvyn arvioinnissa (DellaSerra, Gao & Ransdell, 2014).

Nämä ovat vain muutamia esimerkkejä, ja IMU:n tiedoista johdetut erityiset suorituskykymittarit voivat vaihdella urheilulajin, analyysin erityistavoitteiden ja seurattavan liiketyypin mukaan.

2.3. IMU-pohjainen liikeanalyysi verrattuna muihin liikeanalyysin keinoihin

Tutkimuksessaan (Dahl ym., 2020) vertasi IMU pohjaisen liikeanalyysin käyttöä alavartalon liikkeiden analysoinnissa alan ”kultaisen standardin” optisen liikeanalyysin kanssa. Tutkimus toteutettiin mitaten 49 perusterveen aikuisen alaruumiin liikettä samanaikaisesti sekä IMU:jen että optisten metodien avulla kuuden eri liikkeen aikana. Liikkeet jaettiin nopeisiin ja hitaisiin liikkeisiin. Nopeita liikkeitä olivat suunnanmuutos vauhdista, polvien nostelu juoksun aikana, sivuttaishyppy jalalta toiselle, laatikon päältä pudottautuminen ja tasajalka hyppy takaisin laatikon päälle. Hitaaksi luokiteltuja liikkeitä olivat puolestaan suorin jaloin vastakkaisen jalan koskettaminen kädellä ja yhden jalan kyykky. Optinen analyysi toteutettiin 17 infrapunakameralla ja 43 kehoon kiinnitetyllä heijastavalla merkillä. Inertianmittaus puolestaan tapahtui käyttäen kahdeksaa yksikköä (APDM Opals). Molempien metodien näytteenottotaajuus säädettiin 128 Hertziin. Lisäksi IMU:t kalibroitiin ennen jokaista näytteenottoa ajautumisen välttämiseksi. Tutkimuksessa

havaittiin inertianmittausyksiköiden suoriutuvan hyväksyttävällä tasolla verrattuna optiseen liikeanalyysiin. IMU:jen havaittiin suoriutuvan hieman paremmin hitaiden liikkeiden analysoinnista. Myös kuva-analyysissä voi olla virheitä. Myös inertianmittausyksiköiden kiinnityksistä johtuvat virheet ovat tutkijoiden mukaan todennäköisiä. Huomioitavaa on myös lyhyet näytteenottoajat, jotka vähentävät inertianmittausyksiköiden ajautumisesta johtuvaa virhettä verratessa pitempiaikaisiin mittauksiin.

(Cottam ym., 2022) puolestaan tutkivat kahden kaupallisen magnetometrin sisältävän inertianmittausyksikön tarkkuutta verrattuna optiseen liikeanalyysiin yksi- ja monitasoisen nopean sekä hitaan liikkeen mittaamisessa. Nopean liikkeen mittaaminen tapahtui mittaamalla 10 nopean/keskinopean krikettisyöttäjän alavartalon liikettä samanaikaisesti jommallakummalla kaupallisella IMU:lla ja optisella metodilla. Jokainen syöttäjä heitti viisi kertaa. Hitaina liikkeinä käytettiin seisten ja istuen tehtyä venytysliikettä. Koehenkilöiden alavartaloihin kiinnitettiin kolme Inertianmittausyksikköä ja inertianmittausyksikköihin kolmen heijastavan merkin rypäs, jota puolestaan kuvattiin 20 kameralla. Huomioitavaa verrattuna Dahl ym. tekemään tutkimukseen merkkien kiinnittäminen inertianmittausyksiköihin poistaa yksiköiden kiinnityksestä johtuvaa mittausvirhettä. Kokeessa havaittiin inertianmittausyksiköiden antavan riittävän tarkkaa dataa liikeanalyysiin etenkin yhdessä tasossa tapahtuvassa liikeanalyysissä maksimipoikkeaman ollessa alle 3 astetta verrattuna optiseen analyysiin. Useammassa tasossa tapahtuvassa nopealiikkeisessä liikeanalyysissä inertianmittausyksiköiden tarkkuus oli hieman heikompaa maksimipoikkeaman ollessa yli 5 astetta verrattuna optiseen metodiin. Tutkijat arvioivat sensorifuusioalgoritmien sekä näytteenottotaajuuksien vaikuttaneen IMU:jen mittaustaajuuksiin.

Poiketen edeltävistä tutkimuksista (Bessone ym., 2022) määrittivät magnetometrit sisältävillä kaupallisilla inertianmittaussensoreilla (aktos-t) ja elektro-optisella analyysillä (Vicon) tekemässään vertailussa IMU:jen antaman datan yläraajojen osalta epätarkaksi (yli 10 asteen poikkeama). Alavartalon osalta IMU:t antoivat tässäkin tutkimuksessa hyväksyttäviä tarkkuuksia. Aktos-t-järjestelmä koostuu 16 inertianmittausyksiköstä,

vastaanottimesta ja ohjelmistosta, joka luo mittausten perusteella biomekaanisen mallin. Viacon puolestaan sisältää 10 infrapunakameraa ja 39 heijastavaa merkkiä. Tutkimus suoritettiin 14 koehenkilöllä ja liikkeinä toimivat erilliset nivelten koukistusliikkeet, kävely ja hyppääminen. Tutkimuksen tekijät arvioivat suurimman virheen liittyvän IMU:n linjaukseen biomekaanisen mallin referenssinä käyttämän T-asennon aikana. Tämä osaltaan selittäisi miksi suurimmat epätarkkuudet ilmenivät ylävartalossa. Lisäksi tutkimusryhmä arvioi kahden eri biomekaanisen mallin käytön voivan aiheuttaa virheitä tuloksiin. Tutkimus osoittaa kalibroinnin ja mittausten valmistelun tärkeyden liikeanalyysissä.



Kuva 7. Viconin juoksutekniikkaa analyysoiva optinen järjestelmä. Juoksijaan on kiinnitetty myös Viconin inertianmittausyksiköitä. (Vicon, 2021)

(Myhill ym., 2023) kuvaavat inertiamittausyksiköiden (IMU) vahvuuksia verrattuna vaihtoehtoisiin järjestelmiin, kuten maailmanlaajuisiin satelliittinavigointijärjestelmiin (GNSS) ja optisiin liikkeentallennusjärjestelmiin. Inertiamittausyksiköiden etuna on, että niitä voidaan käyttää suhteellisen vaivattomasti sekä ulko- että sisätiloissa. IMU:t eivät myöskään ole riippuvaisia satelliiteista, niiden näytteenottotaajuus on suurempi ja niissä on vähemmän mahdollisia mittausvirhelähteitä kuin GNSS-järjestelmissä. Lisäksi IMU:illa voidaan määrittää esimerkiksi juoksun spatiotemporaaliset piirteet, maareaktivoiman

huippuarvo ja pystysuora jäykkyys. IMU:lla on kuitenkin myös rajoituksia, kuten esimerkiksi heikentynyt tarkkuus suuremmilla nopeuksilla ja usein tapahtuvien suunnanmuutosten aikana. Tämä tekee niistä epätarkempia suurilla nopeuksilla ja suurella kiihtyvyydellä suoritettavien tehtävien mittaamisessa. Toisaalta tutkimuksessa viitataan myös GNSS:n tarkkuuden heikkenemiseen suuremmilla nopeuksilla.

Yhteenvedona, tutkimuksissa IMU-pohjaiset järjestelmät osoittautuivat pääasiallisesti kelvollisiksi liikeanalyysimenetelmiksi, erityisesti hitaissa liikkeissä. Kuitenkin on tärkeää pitää mielessä, että lähes kaikissa tutkimuksissa vertailu tehtiin optiseen analyysiin. Optinen analyysi ei välttämättä ole virheetön vertailukohta, jonka vuoksi tuloksiin saattaa vaikuttaa myös sen virheet. Lisäksi mittausten laatuun voivat vaikuttaa yksiköiden kiinnityksestä sekä pehmytkudosten ja nivelten liikkeistä johtuvat häiriöt.

2.4. Integrointi muiden tekniikoiden kanssa

Kun IMU:t yhdistetään esimerkiksi GPS- ja videoanalyysitekniikoihin, saadaan aikaan monipuolinen lähestymistapa urheilusuorituksen tiedonkeruuseen ja analyysiin. Tämä tarjoaa arvokasta tietoa urheilijan suorituskyvystä, liikemalleista ja mahdollistaa entistä tarkemman suorituskyvyn seurannan ja kehittämisen.

IMU:iden integrointi muihin teknologioihin, kuten GPS:ään, videoanalyysiin ja biomekaaniseen mallintamiseen, parantaa ihmisen liikkeiden ja suorituskyvyn analysointia eri sovelluksissa. Urheilun ja liikunnan yhteydessä IMU:t integroidaan usein GPS:n kanssa, jotta saadaan tarkempia ja luotettavampia tietoja nopeuden, etäisyyden ja paikannuksen mittaamiseksi urheilutoiminnan aikana. Lisäksi urheilusuorituksen analysoinnissa IMU:t voidaan yhdistää biomekaaniseen mallintamiseen, josta voidaan johtaa lisämittareita, kuten juoksun spatiotemporaaliset piirteet, josta saadaan syvällisempi käsitys urheilijan liikemekanikasta. Lisäksi IMU:t voidaan integroida videoanalyysijärjestelmiin täydentämään ja validoimaan liiketietoja, joka mahdollistaa kattavamman liikeanalyysin (Myhill ym., 2023).

Integrointi parantaa tietojen tarkkuutta ja luotettavuutta erityisesti analysoitaessa erilaisia urheilukohtaisia liikkeitä ja toimintoja. Yhteenvedona voidaan todeta, että IMU:t integroidaan GPS:n, videoanalyysin ja biomekaanisen mallintamisen kanssa, jotta

urheilusuorituksen analysointiin saadaan moniulotteinen lähestymistapa, joka tarjoaa kattavamman ja tarkemman näkemyksen ihmisen liikkeistä ja urheilusuorituksesta. Kaiken kaikkiaan IMU-tietojen yhdistäminen muihin lähteisiin yhdessä asianmukaisten kalibrointimenetelmien kanssa tarjoaa mahdollisuuksia parantaa saatujen tietojen tarkkuutta, monipuolisuutta ja käytännön hyötyä esimerkiksi urheilusuoritusten analysoinnissa ja liikkeen seurannassa. (Huang ym., 2012)

GPS-Integraatio: IMU:t integroidaan usein GPS-järjestelmiin, jotta voidaan tallentaa ja analysoida urheilijoiden liikkeitä erityisesti ulkoilmalajeissa kuten juoksussa, pyöräilyssä ja soudussa. Kun IMU:n tietoja yhdistetään GPS-mittauksiin, saadaan aikaan tarkka seuranta urheilijan toiminnasta, matkasta ja nopeudesta (Marin ym., 2015).

Videoanalyysin Integraatio: Videoanalyysin yhdistäminen IMU:jen kanssa mahdollistaa kattavan liikeseurannan ja suorituskyvyn arvioinnin. Videopohjaiset järjestelmät tarjoavat visuaalista tietoa, joka täydentää IMU:jen hyvin datapohjaista palautetta. Tämä yhdistelmä parantaa urheilijan tekniikan, liikemallien ja biomekaniikan analysointia ja hahmottamista. Tämä puolestaan mahdollistaa suorituksen syvällisemmän arvioinnin ja palautteen antamisen tekniikan kehittämiseksi ja vammojen ehkäisemiseksi. (Marin ym., 2015).

2.5. Haasteet

Inertianmittausyksiköiden käytön haasteet ja rajoitukset urheilun analysoinnissa liittyvät muun muassa tarkkuuteen, käytännön sovelluksiin sekä käyttäjäkokemukseen. Esimerkiksi (Arlotti ym., 2022) kertoo IMU-pohjaisten puettavien laitteiden haasteista, joita ovat esimerkiksi anturien epätarkka sijoittelu, monimutkaisen kalibroinnin tarve ja rajoitukset käytössä laboratorioympäristön ulkopuolella. Samassa tutkimuksessa tuodaan esiin myös urheilulääketieteessä käytettävien puettavien IMU-antureiden haasteita, kuten sensorien ajautuminen.

2.5.1. Tekniset haasteet

Myös (Marin ym., 2015) mainitsee IMU-teknologian rajoituksiksi inertiatietojen kohinan ja ajautumisen. Tutkimuksessa korostetaan myös kehittyneiden suodattimien ja kalibrointitekniikoiden tarvetta tarkkuuden ja luotettavuuden parantamiseksi. Tarkka anturin sijoittaminen ja asianmukainen kalibrointi biomekaanisten liikkeiden mukaan ovat olennaisen tärkeitä, jotta voidaan määrittää IMU-mittauslaitteiden kelpoisuus. Kalibrointiliikkeet ja anturin tarkka kohdistaminen kehon koordinaattijärjestelmään ovat ratkaisevan tärkeitä kerättyjen tietojen luotettavuuden varmistamiseksi (Arlottia ym., 2022). Kalibrointi- ja jälkikäsitteilytekniikat aiheuttavat haasteita IMU-tietojen tarkkuuden ja luotettavuuden varmistamisessa. Inertiadatan kohinasta ja ajalehtimisestä johtuvien mittausvirheiden vähentämiseksi tarvitaan kehittyneitä suodattimia, kalibrointitekniikoita ja mallintamista (Rehder & Siegwart, 2017).

GPS:n ja Inertianmittausyksikön integroinnissa on huomattu haasteita muun muassa mittausvirheiden lisääntymisessä nopeassa, toistuvassa liikkeessä. Liikedataa ei saatu kvantifioiduksi selväksi mittariksi rasitukselle (tai muillekaan fysiologisille mittareille) eli skaalautuvuus tässä suhteessa huono. Ympäristöolosuhteet estivät GPS signaalin (GPS ongelma). (DellaSerra, Gao & Ransdell, 2014)

Tämän lisäksi (Stoeve ym., 2021) tuo esiin, että IMU-teknologian hyödyntäminen urheilijoiden suorituskyvyn analysoinnissa ja loukkaantumisten ehkäisyssä vaatii tarkkaa huomiota näihin haasteisiin. On tärkeää tunnistaa ja ratkaista nämä rajoitukset, jotta IMU-teknologiaa voidaan hyödyntää tehokkaasti urheilun parissa.

Vaikka ne tarjoavat kannettavan ja kustannustehokkaan keinon liikeanalyysiin, niiden luotettavuus alaraajojen kuormituksen mittaamisessa on ongelma erityisesti mailaurheilussa (Wylde, 2021).

Toinen haaste on eri IMU-mallien välinen vaihtelu, joka voi johtaa epä johdonmukaisuuksiin esimerkiksi datankäsittelyssä, jotka vaikuttavat luotettavuuteen ja pätevyYTEEN. Valmistajien käyttämät tarkat algoritmit ja parametrit ovat usein patentoituja ja julkistamattomia, mikä lisää osaltaan IMU-järjestelmien välistä mahdollista vaihtelua (Cottam ym., 2022).

2.5.2. Urheilijoiden ja valmentajien asenteet

Yksi IMU-pohjaisen analyysin haasteista on sen tarjoaman tiedon käyttöönotto valmennuksessa ja urheilijoiden keskuudessa. Kokevatko urheilijat ja valmentajat IMU-pohjaisen datan käyttökelpoiseksi ja hyödynnetäänkö sitä valmennuksessa ja urheilutekniikassa? (Luczak ym., 2019) haastattelivat tutkimuksessaan 113 valmentajaa puettavan urheiluteknologian käytöstä ja siihen liittyvistä haasteista. Haastattelujen aikana tutkimusryhmä sai selville puettavien laitteiden kolme tärkeintä kriteeriä: On tiedettävä mitä suorituskykyä koskevia tietoja halutaan mitata, kuinka tarkkaa ja käyttökelpoista teknologia on ja mitä sen antamat tiedot tarkoittavat. Valmennuksen puolelta usko puettavien laitteiden datan luotettavuuteen oli heikkoa. Uskon puutteen lisäksi tietoa ei osattu tulkita tarkoituksenmukaisella tavalla tai koettiin, ettei sen tulkitsemiseen ole aikaa. Urheilijoiden kritiikki laitteita kohtaan kohdistui niiden huonoon käyttömukavuuteen ja häirintään suorituksen aikana. Käyttäjät siis haluavat luotettavaa, helposti konkretisoitavaa ja tulkittavaa tietoa ilman, että mittauslaite vaikuttaa suoritukseen.

Artikkelissaan (Wylde ym., 2021) puolestaan käsittelevät valmentajien näkemyksiä ja huolia liittyen inertiamittausyksiköiden käyttöön sulkapallossa. Keskeisiin haasteisiin kuuluu huoli urheilijoiden kokemasta epämukavuudesta ja siitä, miten IMU:jen käyttö vaikuttaa ulkonäköön harjoittelun ja kilpailun aikana. Valmentajien todetaan olevan huolissaan myös siitä, että IMU:n käyttö saattaa häiritä urheilijoiden suoritusta kilpailutilanteissa. Tutkimuksessa tuodaan myös esille, että uusien teknologioiden käyttöönotto urheiluvalmennuksessa vaatii huomioimaan sellaisia tekijöitä, kuin teknologian suhteellinen etu, yhteensopivuus valmennusmenetelmien kanssa, teknologian monimutkaisuus, kokeiltavuus ja tarkkailtavuus. Näiden tekijöiden huomioiminen on tärkeää, jotta valmentajat vakuuttuvat uusien innovaatioiden käyttöönoton hyödyistä. IMU-teknologian hyödyntäminen valmennuksessa edellyttää myös selkeää kommunikaatiota ja koulutusta, jotta valmentajat ymmärtävät teknologian mahdollisuudet ja pystyvät hyödyntämään sitä tehokkaasti urheilijoiden suorituskyvyn parantamiseksi.

2.6. Tulevaisuudennäkymät

Jotta voidaan tutkia IMU-teknologian mahdollisia edistysaskeleita, jotka voivat vaikuttaa urheilusovelluksiin tulevaisuudessa, on ratkaisevan tärkeää tarkastella alan viimeisimpiä ominaisuuksia ja kehitystä.

Inertiamittausyksiköiden käytön tärkeimpiin suuntauksiin urheilun analysoinnissa kuuluu IMU:jen laajamittainen integrointi jokapäiväisen fyysisen aktiivisuuden seurantaan ja kävelyn liikeanalyysiin. Lisäksi on havaittavissa siirtyminen kohti kenttäympäristössä tapahtuvaa liikkeentallennusta perinteisen laboratorioissa tapahtuvan liikkeentallennuksen sijaan. Lisäksi MEMS:n, akkuteknologian, viestinnän, tietojen tallentamisen ja tiedonlouhinnan tulevan kehityksen voidaan odottaa mahdollistavan sen, että IMU:t voivat mitata, kvantifioida, vertailla, valvoa, luokitella ja arkistoida huomattavan määrän kinemaattiseen ja dynaamiseen suorituskykyyn liittyvää dataa ajan mittaan. Näillä edistysaskelilla odotetaan olevan huomattava vaikutus urheilusuoritusten analysointiin (Marin ym., 2015).

On tärkeää kehittää laitteistoon sopivia ja ohjelmistojen kanssa yhteensopivia prosessointialgoritmeja ja -menetelmiä, jotka hyödyntävät MEMS-teknologiaa. Tällöin voidaan varmistaa suorituskykyiset ja pienitehoiset MEMS-IMU:t, joilla on riittävät anturikyvyt erilaisissa liikejärjestelmissä. Tuleviin edistysaskeliin voi myös kuulua sellaisten datankäsittelyalgoritmien kehittäminen, joilla voidaan vaimentaa, kumota ja hylätä epäjohdonmukaisuuksia, häiriöitä, aukkoja, virheellisiä mittauksia ja värähtelyistä, akustisista häiriöistä, häiriöistä, lämpötilaherkkyudestä ja muista ilmiöistä johtuvia tekijöitä. Nämä edistysaskeleet ovat välttämättömiä, jotta voidaan varmistaa tietojen eheys, laatu ja tarkkuus, jotka ovat urheilusovellusten kannalta keskeisiä alueita (Abbott & Lyshevski, 2016).

Yksi kehityssuunta IMU:jen käytettävyyden parantamiseksi voi olla yhä useampien sensorien datan yhdistäminen. Esimerkiksi biofysikaalisia mittauksia, kuten lisäravinteiden vaikutusta, kehon ydinlämpötilareaktioita, kalorimetriaa ja hormonivasteita mittaavien sensoreiden lisääminen. Nämä tiedot ovat tärkeitä esimerkiksi palautumisen, suoritustehon optimoinnin ja rasituksen tarkastelussa.

Toinen kehityssuunta voi olla teknologialla varustettujen käytettävien vaatteiden kehittäminen. Esimerkiksi vuonna 2004 japanilaiset tiedemiehet kehittivät järjestelmän, joka yhdistää GPS:n, sykemittauksen ja kiihtyvyyssmittauksen suoraan käytettäviin vaatekappaleisiin (DellaSerra, Gao & Ransdell, 2014).

3. Videokuvasta mallinnettu analyysi

Edistykset tekoälyn ja tarkemmin syväoppimisen alalla, ovat mahdollistaneet liikkeen analysoinnin ja kolmiulotteisten hahmomallien luomisen videokuvasta. Tämä menetelmä mahdollistaa dynaamisten hahmomallien luomisen, jotka voivat jäljitellä laajaa valikoimaa ihmisten toimintoja, kuten liikkumista ja urheilulajeja, esimerkiksi suoraan internetistä löytyvistä videoklipeistä. Julkisesti saatavilla olevien videoklippien käytön keskeinen etu on valtava määrä dataa, jota voidaan hyödyntää mallien koulutukseen, välttämällä kompleksit ja kalliit asetelmat liikkeenkaappausdatan keräämiseen (Zhang ym., 2023).

3.1 Videoanalyysin mahdollisuudet urheilun liikeanalyysissä

Syväoppimismallit voivat tunnistaa ja analysoida pieniäkin liikkeitä ja biomekaanisia malleja suurella tarkkuudella. Hahmomallien avulla on myös mahdollista analysoida esimerkiksi, minkä suuruista ja suuntaista voimaa mallinnettavan hahmon on täytynyt minäkin hetkenä tuottaa. Tämä mahdollistaa urheilijoiden suoritusten syvällisemmän ymmärtämisen ja heidän tekniikoidensa hienosäätämisen (Peng ym., 2018).

Syväoppimismalleilla on mahdollista käsitellä ja analysoida videodataa reaaliajassa, joka mahdollistaa välittömän palautteen urheilijoille harjoittelun aikana. Tämä nopeuttaa oppimisprosessia ja auttaa urheilijoita säätämään tekniikkaansa reaaliajassa.

Liikeanalyysin avulla voidaan tunnistaa biomekaanisia malleja, jotka saattavat lisätä loukkaantumiseriskiä. Syväoppiminen voi auttaa tunnistamaan riskialttiit liikemallit ja ehdottamaan korjaustoimenpiteitä loukkaantumiseriskin minimoimiseksi.

Jokainen urheilija on yksilöllinen, ja syväoppiminen mahdollistaa räätälöityjen valmennusohjelmien kehittämisen analysoimalla urheilijan ainutlaatuisia liikemalleja. Tämä parantaa valmennuksen tehokkuutta ja auttaa saavuttamaan parempia tuloksia (Wang, 2019).

Joukkueurheilussa videodatan syväoppiminen mahdollistaa koko joukkueen liikkeiden analysoinnin samanaikaisesti ja täten auttaa ymmärtämään pelin dynamiikkaa, joka

puolestaan auttaa valmentajia suunnittelemaan parempia taktiikoita ja toimintamalleja peliin (Naik ym., 2022).

Urheilijoiden omien suoritusten lisäksi syväoppimisen avulla voidaan analysoida myös vastustajien pelityylejä ja -strategioita esimerkiksi internetistä löytyvistä videoista, joka antaa arvokasta tietoa pelin valmisteluvaiheeseen ja strategian suunnitteluun.

3.2 Esimerkkejä videopohjaisen analyysin käytöstä

Tutkimuksessaan Peng ym. (2018) hyödyntävät syväoppimisen edistystä tarkan 3D-asennon arvioinnissa monokulaarisista videoista. Julkaisu tutkii haastetta liittyen tarkan liikedatan poimimiseen videoista, joka on perinteisesti jäänyt jälkeen laadussa verrattuna liikkeenkaappausjärjestelmistä saatuun tietoon. Asennon arvioinnin ja vahvistusoppimisen integrointi mahdollistaa epätäydellisten asentosekvenssien käsittelyn siten, että simuloitujen hahmojen liikkeet luonnollisesti huolimatta alkuperäisen asentodatan virheistä tai epä johdonmukaisuuksista. Tämä järjestelmä ei ainoastaan toista monimutkaisia taitoja korkealla luotettavuudella vaan sopeutuu myös erilaisiin hahmomalleihin ja ympäristöihin.

Järjestelmä onnistuu mallintamaan hahmoja, jotka voivat jäljitellä yli 20 erilaista taitoa vaihtelevilla monimutkaisuustasoilla. Nämä liikkeet ovat sekä syklisiä että epäsyklisiä, joka osoittaa järjestelmän monipuolisuutta.

Fysiikkaan perustuvan animaation merkittävä etu on sen kyky kohdentaa opittuja taitoja erilaisille hahmoille ja ympäristöille, jotka eivät alun perin olleet videodemonstraatioissa. Testissä tätä demonstroidaan esimerkiksi opettamalla simuloitulle Atlas-robotille Youtube-videosta opittuja ihmisen esittämiä taitoja. Mallit pystyvät myös suorittamaan opittuja taitoja vaihtelevissa ympäristöolosuhteissa, kuten esimerkiksi epäsäännöllisessä maastossa.

Järjestelmä kykenee liikkeen täydennykseen ennustamalla uskottavia tulevia liikkeitä hahmolle perustuen yksittäiseen viitteen kuvaan. Tämä mahdollistaa uskottavan käyttäytymisen muodostamisen, jopa silloin kun simuloitun hahmon asento poikkeaa merkittävästi kouluttamiseen käytetyn viitteen liikkeistä. Järjestelmä voi kuitenkin epäonnistua tuottamaan järkeviä liikkeitä kuvasta, jos simuloitun hahmon asento poikkeaa

merkittävästi viitteen asennoista ja nämä ennusteet rajoittuvat olemassa olevien hahmojen kattamiin taitoihin.

Zhang ym. (2023) puolestaan tutkivat realistisella fysiikalla simuloitujen hahmo-ohjainten kehittämistä ja hallintaa käyttäen tennisliikedatan tietokantana ammattilaispelien lähetyksiä. Liikkeen jäljittelyllä ja syvällä vahvistusoppimisella tuotetut simuloitujen hahmojen lähetykset käyttävät ammattilaispelien tallennettuja lähetyksiä datana jäljitelläkseen urheilijoiden liikkeitä. Laadukkaan liikekaappausanimaation hankkiminen suurissa määrin perinteisin keinoin voi olla kallista ja suhteellisen työlästä. Sen sijaan urheilutapahtumien videot ovat laajasti saatavilla ja tarjoavat monipuolisen lähteen liikedatan hankintaan. Pitkäkestoiset videot tarjoavat esimerkkejä urheilijan lajissaan suorittamien taitojen koko kirjosta, eikä vain merkittävistä toiminnoista (esimerkiksi lyönti tenniksessä). Pitkäkestoiset videot sisältävät myös liikkeitä, joita urheilijat käyttävät merkittävien toimintojen välillä siirtymiseen. Lisäksi suuri videomäärä sallii monien toimintojen variaatioiden havainnoinnin (korkean pallon tai matalan pallon lyöminen).

Tutkimuksessa simuloidaan tennispelaajia, jotka voivat lyödä palloa kohdepaikkoihin suurella tarkkuudella ja voivat onnistuneesti simuloida kilpailukykyistä peliä, joka sisältää erilaisia lyöntityyppejä ja kierteitä simuloitujen maila- sekä pallodynamiikkojen kanssa. Simulaatiossa käytetään hierarkkisia malleja, joissa korkean tason liikesuunnittelu ohjaa matalan tason jäljittelykäytäntöä, joka hallitsee pelaajan perusliikkeitä, kuten lyöntejä luodakseen realistista tennispeliä simuloitussa ympäristössä. Prosessiin kuuluu myös kinemaattisesti arvioitujen liikkeiden korjaaminen fysiikkaan perustuvalla simulaatiolla. Liikkeiden korjaaminen fysiikan perusteella johtaa luonnollisempiin liikkeisiin ja parempaan lopputason suorituskykyyn kuin jäljittelykäytännön kouluttaminen suoraan kinemaattisten asentoestimaattorien tuloksista. Tämä tutkimus osoittaa, että dataan perustuvien mallien ja fyysisten simulaatioiden yhdistämisellä voidaan parantaa virtuaalihahmojen realismia ja monipuolisuutta.

Tutkimus "A Survey of Content-Aware Video Analysis for Sports" korostaa, kuinka sisällöntietoinen videoanalyysi voi tuoda merkittäviä mahdollisuuksia urheiluun liittyvien sovellusten kehittämiseen. Näitä sovelluksia ovat esimerkiksi pelaajien ja pallojen seuranta, tapahtumien tunnistaminen ja urheilusuoritusanalysointi. Tutkimuksen

mukaan tulevaisuuden urheiluvideoanalyysi keskittyy kolmeen pääalueeseen: mediapilvessä tapahtuvaan urheiluvideoanalyysiin, suurimittakaavaisten oppimistekniikoiden hyödyntämiseen syvemmän kontekstin löytämiseksi, sekä tarkkojen visuaalisten piirteiden erottelumenetelmien kehittämiseen ihmisten toiminnan tunnistamiseksi.

Mediapilvessä tapahtuvassa urheiluvideosisällön analyysissä keskitytään mobiilivideoiden tuottamaan sisältöön, kuten käyttäjien sosiaalisiin medioihin jakamiin videoihin. Nykyaikaiset kannettavat laitteet ovat tehneet käyttäjistä sisällöntuottajia, jotka jakavat videoita sosiaalisten verkostojen kautta. Tämä on muodostunut kulttuuriseksi ilmiöksi. Tämän seurauksena tutkimusurheiluvideoanalyysin keskittymä on siirtynyt mobiilivideoihin, mukaan lukien urheilulajien luokittelu ja merkittävien tapahtumien tunnistaminen.

Keskeisenä haasteena mediapilvessä tapahtuvassa videokäsittelyssä on kustannusten minimointi. Tämä liittyy puskuroinnin, laskennan ja kaistanleveyden resurssien käyttöön. Esimerkiksi konserttien tallenteiden yhdistämiseksi on kehitetty MoVieUp-järjestelmä, joka yhdistää videoklippejä ääniraidan perusteella. Urheiluvideoiden kohdalla haasteena on, miten yhdistää useiden mobiililaitteiden tallentamat urheilutapahtumat yhdeksi koosteeksi, sillä urheiluvideot eivät yleensä sisällä jatkuvaa ja sileää ääniraitaa videoiden yhdistämiseen. Tulevaisuudessa voisi olla mahdollista luoda synteettinen 3D-kooste nykyisestä urheilukentästä käyttäen tekniikoita videoklippien yhdistämiseen. Tämä avaa ovia esimerkiksi mobiililaitteilla tallennettujen urheilutapahtumien videoiden tehokkaammalle hyödyntämiselle.

Suurimittakaavaiset oppimistekniikat tarjoavat mahdollisuuden syventää ymmärrystä urheiluvideoista, parantaa tapahtumien tunnistusta ja pelaajien toiminnan analysointia. Tekoälyn ja koneoppimisen edistysaskeleet mahdollistavat entistä tarkemman ja monipuolisemman analyysin urheilun kontekstissa, mukaan lukien pelaajien liikkeiden ennustaminen ja joukkuestrategioiden analysointi. Haasteena on soveltaa näitä menetelmiä urheiluvideoihin ottaen huomioon lajin erityispiirteet ja rakenteet.

Tarkat visuaaliset piirteiden erottelumenetelmät mahdollistavat ihmistoiminnan tunnistamisen urheiluvideoissa suurella tarkkuudella. Tämä on erityisen tärkeää, kun halutaan analysoida urheilijoiden suorituksia, tunnistaa erilaisia liikkeitä ja toimintoja sekä

parantaa urheiluanalyysin laatua ja hyödyllisyyttä valmennuksessa sekä suorituskyvyn seurannassa.

3.3 Haasteet syväoppimista hyödyntävän videopohjaisen analyysin käytössä

Zhang ym. sekä Peng ym. kertovat hahmojen kyvyn jäljitellä tarkasti videodemonstraatioita olevan suuresti riippuvainen monokulaarisen videon laadusta. Zhang ym. (2023) tunnistavat haasteita ja rajoituksia, kuten kyvyttömyyden jäljitellä tiettyjä videoklippejä asennon arvioinnin ja liikkeen jäljittelyn monimutkaisuuksien vuoksi johtuen lähteen alhaisesta laadusta. Kuitenkin tekniikat, kuten rotaation ja liikkeen rekonstruointi voivat mahdollistaa eheän hahmomallin luomisen. Nämä prosessit auttavat korjaamaan virheellisiä asentoennusteita ja säilyttämään jatkuvuuden, joka johtaa parempaan suorituskykyyn ja oppimistehokkuuteen (Peng ym., 2018). Lisäksi hahmomalleilla saattaa esiintyä haasteita matkia esimerkiksi ketteriä tanssiliikkeitä ihmismäisesti. Shih (2018) taas listaa urheiluvideoanalyysin haasteiksi mm. datan monimutkaisuuden, eri urheilulajien erityispiirteiden huomioimisen sekä reaaliaikaisen analyysin vaatimukset.

Tutkimuksessa "A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues, Future Trends, and Research Directions" Naik ym. (2022) mainitsevat muun muassa seuraavanlaisia haasteita:

- Samalta näyttävien hahmojen hallinta: Monissa urheilulajeissa, kuten esimerkiksi jalkapallossa ja koripallossa pelaajat voivat näyttää samankaltaisilta erityisesti joukkueuniformujensa vuoksi, joka voi tehdä yksittäisten pelaajien tunnistamisesta ja seurannasta haastavaa.
- Hahmojen vuorovaikutukset: Lähekkäin tapahtuvat pelaajien väliset vuorovaikutukset esimerkiksi, kun pelaajat peittävät toisensa tai pallon voivat vaikeuttaa tarkkaa seuranta.

- Ennakoimattomat liikkeet ja nopeat toiminnot: Urheilussa tapahtuu jatkuvasti nopeita ja ennakoimattomia liikkeitä, jotka vaativat kehittyneitä menetelmiä liikkeiden tarkkaan analyysiin ja ennustamiseen.
- Kameran liike ja videon laatu: Kameran liikkeet kuten zoomaus sekä vaihteleva videon laatu voi vaikuttaa analyysin tarkkuuteen.

Nämä ongelmat liittyvät lähinnä joukkuelajeista tehtävään analyysiin. Tutkimus ehdottaa yhdeksi ratkaisuksi ongelmiin kehittyneempien koneoppimis- ja syväoppimismenetelmien kehittämistä urheiluvideoanalyysiin.

4. Inertianmittausyksikön käyttö LUT yliopiston parapöytätennismaila projektissa

Osana tätä tutkimusta pohditaan inertianmittausyksikön käyttöä para-urheilijan pingismaillassa osana LUT yliopiston projektia. Inertianmittausyksiköiden käytöstä ja lajispesifeistä piirteistä parapöytätenniksessä haastateltiin kahta valmentajaa sekä kahta olympiatason pelaajaa.

4.1. Parapöytätenniksen lajityypilliset piirteet



Kuva 8. Luokan TT1 parapöytätennispeli (Suomen pöytätennisiitto, 2022)

LUT yliopiston pöytätennismaila projekti on suunnattu vammaluokan TT1 urheilijalle. Tässä luokassa pelaajat ovat tetraplegikkoja (toimintarajoitteita sekä ylä- että alaraajoissa

ja vartalon lihakset toimivat heikosti). Nämä rajoitukset vaikuttavat merkittävästi pelin luonteeseen ja täten myös valmentajien sekä pelaajien kannalta hyödylliseen dataan. Valmentajien tekemien laskelmien pohjalta pelattavan pallon keskipituus on noin 1.7 lyöntiä. Pelissä siis syöttö korostuu huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi pöytätenniksessä. Pelaajan pyörätuoli on lisäksi lukittu siten, että liikehdintä sivuttaissuunnassa ja edestakaisin on mahdotonta. Pelaajat hyödyntävät vastapelaajan rajoittunutta liikkuvuutta ja esimerkiksi verkon lähelle oikein sijoitettu lyönti on mahdotonta palauttaa. Pelaajien yksilökohtaisen liikkuvuuden takia vastustajan pelityyliin, heikkouksiin ja vahvuuksiin tutustuminen on huomattavasti suuremmassa roolissa, kuin esimerkiksi pöytätenniksessä. Huolellisella valmistautumisella pelaaja voi harjoitella lyönnejä, joihin vastustaja ei yksinkertaisesti pysty liikkuvuuden takia vastaamaan. Liikkumattomuuden takia parapöytätenniksessä tietyn tyyppiset lyönnit tulevat lähes poikkeuksetta tietyistä kohtaa pöytää. Esimerkiksi oikeakätisen pelaajan rystylyönnit ovat pöydän vasemmalta puolelta ja kämmenlyönnit oikealta puolelta. Kyseessä on siis lyhyistä palloista koostuva peli, joka voitetaan pääasiassa syötöillä tai vastustajalle mahdottomiksi sijoitetuilla palautuksilla sijoitetuilla palautuksilla.

4.2. Valmentajien tämänhetkinen datankeruuprosessi

Tällä hetkellä valmentajien keräämä data saadaan katsomalla nauhoitteita otteluista ja kirjoittamalla halutut tiedot lapulle kuvan 9 mukaisesti. Datankeruu kohdistuu lähinnä pelattujen pallojen pituuksiin ja siihen onko pallo ratkaistu syötössä vai palautuksessa. Lisäksi valmentajat pitävät kirjaa mistä kohdin kenttää on onnistuttu tekemään pisteitä ja mistä kohdin pisteitä on menetetty. Näiden tietojen pohjalta voidaan tunnistaa omia ja vastustajan heikkouksia ja tämän pohjalta muokata omaa harjoittelua. Nykyinen datankeruu on valmentajien mukaan aikaa vievää ja työlästä.

The image shows a handwritten data collection sheet on a spiral-bound notebook. The page is filled with tables and calculations, organized into several sections:

- Top Section:** A list of numbers (1-5) with associated calculations and circled values. For example, "11-5" and "33 = 2.06".
- SVÖTÖT/MOKAT:** A table with columns 1-4 and rows A and B. Below it, calculations for Aino (1+6+4+3+7 = 21) and Buccuuw (1+0+4+2+4 = 11).
- MOKAT SIVOTUUN:** A table with columns 1-7 and rows A and B. Calculations for Aino (3-7) and Buccuuw (11-1) are shown.
- PELIPAIKAT:** A table with columns 1-4 and rows A and B. Calculations for Aino (3-7) and Buccuuw (11-1) are shown.
- NOSSOT:** A table with columns 1-4 and rows A and B. Calculations for Aino (3-7) and Buccuuw (11-1) are shown.
- Bottom Section:** A table with columns 1-4 and rows 0-8. Calculations for Aino (3-7) and Buccuuw (11-1) are shown.

Kuva 9. Esimerkki valmentajan tämänhetkisestä manuaalisesta datankeruusta

4.3. Valmentajien ja pelaajien toiveet liikeanalyysille ja datankeruulle

Kysyttäessä pelaajilta ja valmentajilta ennakkotoiveita liikeanalyysille vastaukset olivat seuraavanlaisia. Valmentajien omat toiveet kohdistuivat lähinnä jo olemassa olevien datankeruumenetelmien automatisointiin. Toivottavaa dataa oli pallojen pituudet ja lyöntien paikat sekä onnistumiset. Pelaajat toivoivat lähinnä, ettei IMU häiritse pelisuoritusta olemalla kevyt ja huomaamaton. Haastateltavilla ei tässä vaiheessa haastattelua ollut minkäänlaisia ennakkotietoja inertianmittausyksiköistä. Pelaajat toivoivat myös keinoja analysoida tulevien vastustajiensa pelityylejä, vahvuuksia ja heikkouksia Youtubesta löytyvistä videoista. Tekoälypohjainen videoanalyysi sopisi tähän toiveeseen mainiosti.

Kuultuaan IMU:jen käytön mahdollisuuksista pelaajat ja valmentajat kiinnostuivat etenkin IMU:jen käytöstä lyönnin suorituskyvyn mittaamiseen.

4.4. Inertianmittausyksiköiden mahdollisuudet parapöytätenniksessä

Inertianmittausyksikön integrointi pöytätennismailaan voisi olla mahdollista toteuttaa hyödyntäen esimerkiksi samanlaista toteutusta, kuin Wang ym. (2018) tekemässään tutkimuksessa. Pienikokoinen MEMS IMU olisi tarpeeksi kevyt ja todistetusti kykenevä tunnistamaan erilaisia lyöntityyppjä sekä näiden kiihtyvyyys ja kulmatietoja. Lisäksi IMU on pakko sijoittaa mailaan johtuen pelaajan käden rajoittuneesta toiminnasta, joka voisi antaa huonoa dataa, jos IMU olisi kiinnitetty esimerkiksi ranteen alapuolelle.

Kilpailutilanteissa peleistä saataisiin luotua reaaliaikainen analyysi lyöntityypeistä ja lyöntien liikeprofiileista. Lyöntityyppien perusteella voitaisiin myös määrittää mistä kohdin pöytää lyönnit ovat lähteneet. Lyönnin tunnistuksen tarkkuutta voitaisiin myös parantaa yhdistämällä IMU ja mikrofoni dataa, kuten Wang ym. (2018) tutkimuksessaan. Tämä voisi myös mahdollistaa lyöntiprofiileihin pallon kontaktihetken, josta voitaisiin tarkastella esimerkiksi, tapahtuuko lyönti hetkellä, jolloin mailan nopeus on suurin. Periaatteessa mikrofoniolla olisi myös mahdollista laskea pallojen pituudet. Jos mikrofoni pystyisi erottamaan mailan lyöntiäännet pelaajalta ja vastustajalta sekä pallon äänen sen osuessa pöytään voitaisiin kehittää ohjelma, joka IMU:n ja mikrofonin datan perusteella voisi tunnistaa pallon pituuden ja päätymissyyn.

Harjoittelussa IMU:ja voitaisiin hyödyntää kilpailutilanteen tapaisen käytön lisäksi esimerkiksi lyöntimäärien automaattiseen luokitteluun ja laskentaan. IMU:jen avulla pelaajat voivat mitata suorituskyykyään esimerkiksi lyöntitehon kautta ja seurata kehittymistään.

Koska luokan 1 parapöytätennistä pelataan pyörätuoleista, on olkapään nivelten ja lihasten rasitus suurempaa, kuin seisaaltaan pelattavissa mailapeleissä. Useammalla IMU:lla olisi mahdollista seurata käden ja olkapään biomekaniikkaa vammojen ehkäisemiseksi. Lyöntimäärien ja tyyppien seurannalla voidaan myös välttää liiallisesta rasituksesta johtuvia vammoja.

4.5. Inertianmittausyksiköiden haasteet parapöytätenniksessä

Mahdollisia haasteita inertianmittausyksikön käytössä ovat mm. MEMS IMU:jen tarve säännölliselle kalibroinnille etenkin pitkäaikaisissa mittauksissa johtuen ajautumisesta, data-algoritmien kehittämisen haastavuus, riittävän kevyt ja kestävä yksikkö sekä selkeä ja helposti käytettävä data valmentajille ja urheilijoille. Etenkin pallojen pituuksien mittaus vaatisi mikrofonin ja IMU datan yhdistämistä, eri äänien tunnistamista tarkasti ja ohjelman, joka sisältäisi logiikan pelin ymmärtämiseksi. Jokainen näistä toiminnoista on haastava toteuttaa ja on mietittävä, onko saatava hyöty suurempi kuin vaiva. Toki samaa kokonaisuutta olisi mahdollista hyödyntää myös pöytätenniksessä. Lisäksi yksikön painon kanssa voi tulla haasteita. Koko yksikön maksimipaino saisi olla maksimissaan 20 grammaa sisältäen energianlähteen ja mahdollisesti BLE-sirun. Jos inertianmittausyksiköitä käytettäisiin lyöntinopeuksien mittauksiin ja lyöntityyppien tunnistamiseen ei ajautuminen sinällään aiheuttaisi suuria ongelmia, mutta esimerkiksi nivelkulmien pitkäaikaisessa mittaamisessa ajautumisesta johtuvat mittausvirheet voivat olla ongelmallisia. IMU:t mahdollistavat joidenkin yksityiskohtien tarkkailun pöytätenniksessä, mutta pelin kokonaisvaltainen analysointi käyttäen pelkästään inertianmittausyksiköitä ei ole järkevää. Esimerkiksi tekoälypohjaisella videoanalyysillä saadaan kattavampi kuva pelistä kokonaisuutena. Videoanalyysistä olisi mahdollista saada esimerkiksi pallon lentoradat, joka ei esimerkiksi IMU:illa olisi mahdollista muuttamatta dramaattisesti pallon painoa ja tätä kautta käyttäytymistä.

5. Yhteenveto

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena oli tutkia inertianmittausyksiköiden (IMU) käyttöä urheilijoiden liikeanalyysissä ja tunnistaa sen potentiaalisia käyttökohteita. Tutkielmassa käytiin läpi IMU-teknologian perusteita, sen soveltuvuutta urheilun liikeanalyysiin, sekä sen mahdollisuuksia ja haasteita urheilijoiden suorituskyvyn seurannassa ja analysoinnissa. Lisäksi tutkielmassa tarkasteltiin videopohjaista tekoälymallinnusta ja sen roolia urheilun liikeanalyysissä. Lisäksi tutkimuksessa haastateltiin parapöytätennispelaajia ja -valmentajia liittyen inertianmittausyksiköiden ja teknologian käyttöön.

Tutkielma osoittaa, että IMU-teknologia tarjoaa merkittäviä etuja urheilun liikeanalyysissä, mukaan lukien kyvyn kerätä tarkkaa kinemaattista dataa urheilijan liikkeistä reaaliajassa. IMU-teknologia on erityisen käyttökelpoista tilanteissa, joissa videopohjaisen analyysin käyttö on haastavaa, kuten esimerkiksi olosuhteissa, joissa kameroiden sijoittelu voi olla rajoitettua tai mahdotonta.

Videopohjainen analyysi, erityisesti tuettuna tekoälyllä, on osoittautunut tehokkaaksi työkaluksi liikkeen visualisoinnissa ja monimutkaisten liikeratojen analysoinnissa. Tekoälyn kyky tunnistaa ja oppia liikekuvioita tarjoaa arvokasta tietoa urheilijoiden tekniikasta ja suorituskyvystä, mahdollistaen yksilöllisen valmennuksen ja tekniikan hienosäädön. Etenkin tekoälypohjaisen videoanalyysin kyky hyödyntää heikkolaatuisia monokulaarisia videoklippejä tekee siitä halvempaa, helpompaa ja käytettävämpää, kuin esimerkiksi perinteinen optinen liikeanalyysi.

Tutkielma myös korostaa, että IMU-teknologia ja muut liikeanalyysin menetelmät eivät sulje toisiaan pois, vaan voivat täydentää toisiaan urheilijoiden suorituskyvyn analysoinnissa. Yhdistämällä molempien teknologioiden vahvuudet voidaan saavuttaa kattavampi ymmärrys urheilijan suorituskyvystä, joka auttaa kehittämään tarkempia valmennusstrategioita ja parantamaan urheilijoiden tekniikkaa.

Tutkielma tunnistaa tarpeen jatkotutkimukselle IMU-teknologiassa ja videopohjaisessa tekoälymallinnuksessa tarkempien ja luotettavampien mittaustulosten saavuttamiseksi. Tulevaisuudessa teknologian kehittyessä ja analyysimenetelmien tarkentuessa on

mahdollista kehittää entistä edistyneempiä järjestelmiä, jotka voivat tarjota yhä syvällisempää tietoa urheilijoiden suorituskykyyn ja liikeanalyysiin. Liikeanalyysin keinojen halpeneminen ja käytön helpottuminen tuo myös analyysin käytettäväksi entistä laajemmalle yleisölle.

Yhteenvedona voidaan todeta, että sekä IMU-teknologia että videopohjainen tekoälymallinnus tarjoavat arvokkaita työkaluja urheilijoiden liikeanalyysiin. Jatkotutkimuksen ja teknologian kehittämisen myötä on mahdollista saavuttaa entistä tarkempia analyysituloksia, jotka tukevat urheilijoiden valmennusta, suorituskyvyn parantamista ja urheiluvammojen ennaltaehkäisyä.

Lähteet

- Abbott, B. & Lyshevski, S.E., (2016). Signal Processing in MEMS Inertial Measurement Units for Dynamic Motional Control. In: 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp.309. Rochester, NY, USA: Harris Corporation; Department of Electrical and Microelectronic Engineering, Rochester Institute of Technology.
- Ahmad, N., Raja Ghazilla, R. A., Khairi, N. M., & Kasi, V. (2013). Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems*.
- Alandry, B., Latorre, L., Maily, F. & Nouet, P. (2011). A Fully Integrated Inertial Measurement Unit: Application to Attitude and Heading Determination. *IEEE Sensors Journal*, **11**(11), pp.2852-2860.
- Alanen, A.M., Räisänen, A.M., Benson, L.C. & Pasanen, K., (2021). The use of inertial measurement units for analyzing change of direction movement in sports: A scoping review. *International Journal of Sports Science & Coaching*.
- Arlotti, J.S., Carroll, W.O., Afifi, Y., Talegaonkar, P., Albuquerque, L., Burch V, R.F., Ball, J.E., Chander, H. & Petway, A. (2022). Benefits of IMU-based Wearables in Sports Medicine: Narrative Review. *International Journal of Kinesiology & Sports Science*, **10**(1).
- Chatterjee, G., Latorre, L., Maily, F., Nouet, P., Hachelef, N. & Oudéa, C. (2015). MEMS based Inertial Measurement Units. In: *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*.
- Cottam, D.S., Campbell, A.C., Davey, P.C., Kent, P., Elliott, B.C. & Alderson, J.A., (2022). Measurement of uni-planar and sport specific trunk motion using magneto-inertial measurement units: The concurrent validity of Noraxon and Xsens systems relative to a retro-reflective system. *Gait & Posture*, **92**, pp.129-134.
- Dahl, K.D., Dunford, K.M., Wilson, S.A., Turnbull, T.L. & Tashman, S., (2020). Wearable sensor validation of sports-related movements for the lower extremity and trunk. *Medical Engineering & Physics*, **84**, pp.144-150.
- DellaSerra, C.L., Gao, Y. & Ransdell, L., (2014). Use of Integrated Technology in Team Sports: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions for Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, **28**(2), pp.556–573.
- Facchinetti, T., Savioli, A. & Goldoni, E. (2010). Design and development of a real-time embedded inertial measurement unit. In: *SAC '10: Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing*.
- Faisal, I.A., Purboyo, T.W. & Ansori, A.S.R. (2020). A Review of Accelerometer Sensor and Gyroscope Sensor in IMU Sensors on Motion Capture. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, **15**(3), pp.826-829.

- Huang, Y.-C., Chen, T.-L., Chiu, B.-C., Yi, C.-W., Lin, C.-W., Yeh, Y.-J. & Kuo, L.-C., (2012). Calculate Golf Swing Trajectories from IMU Sensing Data. In: 41st International Conference on Parallel Processing Workshops. National Chiao Tung University, Hsinchu City, Taiwan: Information and Communications Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Hsinchu, Taiwan.
- Jenkins, L. and Weerasekera, R., (2022). Sport-related back injury prevention with a wearable device. *Biosensors and Bioelectronics*: X, 11.
- Kelly, D., Coughlan, G.F., Green, B.S. & Caulfield, B., (2012). Automatic detection of collisions in elite level rugby union using a wearable sensing device. International Sports Engineering Association.
- Marin, F., Fradet, L., Lepetit, K., Hansen, C. & Ben Mansour, K., (2015). Inertial Measurement Unit in Biomechanics and Sport: Biomechanics: Past, Present, Future. In: F. Colloud, M. Domalain & T. Monnet, eds. 2015. 33rd International Conference on Biomechanics in Sports. Poitiers, France, pp.1422.
- McGinnis, R.S., Perkins, N.C. & King, K., (2011). Miniaturized Wireless IMU Enables Low-Cost Baseball Pitching Training Aid. University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA and 94fifty Sports Technologies, Dublin, OH, USA.
- McNamara, D.J., Gabbett, T.J., Chapman, P., Naughton, G. & Farhart, P., (2014). The Validity of Microsensors to Automatically Detect Bowling Events and Counts in Cricket Fast Bowlers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*.
- Miller, E. J., Sheehan, R. C., & Kaufman, K. R. (2022). IMU filter settings for high intensity activities. *Gait & Posture*, **91**, pp.26-29.
- Myhill, N., Weaving, D., Robinson, M., Barrett, S. & Emmonds, S. (2023) Concurrent validity and between-unit reliability of a foot-mounted inertial measurement unit to measure velocity during team sport activity. *Science and Medicine in Football*.
- Naik, B.T., Hashmi, M.F., Bokde, N.D., (2022). A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues, Future Trends and Research Directions. *Appl. Sci.*, **12**, pp.442
- Peng, X.B., Kanazawa, A., Malik, J., Abbeel, P. and Levine, S., (2018). SFV: Reinforcement Learning of Physical Skills from Videos. *ACM Transactions on Graphics*, **37**(6), Article 178.
- Rana, M., & Mittal, V. (2021). Wearable Sensors for Real-Time Kinematics Analysis in Sports: A Review. *IEEE Sensors Journal*, **21**(2), pp.1187.
- Rawashdeh, S., Rafeldt, D.A. & Uhl, T., (2016). Wearable IMU for Shoulder Injury Prevention in Overhead Sports. Italian National Conference on Sensors.
- Rehder, J., & Siegart, R. (2017). Camera/IMU Calibration Revisited. *IEEE Sensors Journal*, **17**(11).

- Santhiranayagam, B.K., Wei, X., Lai, D.T.H. & Begg, R.K., (2015). Inertial Measurement Units in Gait and Sport Motion Analysis. In: Encyclopedia of Information Science and Technology, **3**.
- Seel, T., Raisch, J. & Schauer, T. (2014). IMU-Based Joint Angle Measurement for Gait Analysis. *Sensors*, 14(4), pp.6891-6909.
- Sharma, M., Anand, A., Srivastava, R. & Kaligounder, L., (2018). Wearable Audio and IMU Based Shot Detection in Racquet Sports. Samsung R&D Institute India, Bangalore.
- Shih, H-C., (2018). A Survey of Content-Aware Video Analysis for Sports. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **28**(5).
- Stoeve, M., Schuldhaus, D., Gamp, A., Zwick, C. & Eskofier, B.M. (2021). From the Laboratory to the Field: IMU-Based Shot and Pass Detection in Football Training and Game Scenarios Using Deep Learning. *Sensors*, **21**(9), pp. 3071.
- Taechajedcadarungsri, S. (2005). MEMS and Microsystems. *Engineering and Applied Science Research*, **32**(3), pp.301–311.
- Wang, J., Qiu, K., Peng, H., Fu, J. & Zhu, J., (2019). AI Coach: Deep Human Pose Estimation and Analysis for Personalized Athletic Training Assistance. In: Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia.
- Wang, Y., Chen, M., Wang, X., Chan, R.H.M. & Li, W.J., (2018). IoT for Next-Generation Racket Sports Training. *IEEE Internet of Things Journal*, **5**(6).
- Wilkerson, G., Gupta, A., Allen, J.R., Keith, C.M. & Colston, M.A., (2016). Utilization of Practice Session Average Inertial Load to Quantify College Football Injury Risk. *Journal of Strength and Conditioning Research*.
- Wylde, M.J., Masismadi, N.A., Yong, L.C., Callaway, A.J. & Williams, J.M., (2021). Placement of inertial measurement units in Racket Sports: Perceptions of coaches for IMU use during training and competition. *International Journal of Racket Sports Science*, **3**(1), pp.45-55.
- Zhang, H., Yuan, Y., Makoviychuk, V., Guo, Y., Fidler, S., Peng, X.B. and Fatahalian, K., (2023). Learning Physically Simulated Tennis Skills from Broadcast Videos. *ACM Transactions on Graphics*, **42**(4).
- Zhu, R., & Zhou, Z. (2004). A real-time articulated human motion tracking using tri-axis inertial/magnetic sensors package. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **12**(2), pp.295-302.

