

**INERTIAMITTAUSYKSIKÖLLÄ MITATTUJEN MELAN VEDON KESKEISTEN
MUUTTUJEN VAIKUTUS KAJAKIN KULKUNOPEUTEEN**

Antti Löppönen

Biomekaniikan pro gradu -tutkielma

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Syksy 2020

Ohjaajat: Vesa Linnamo ja Tomi Vääntinen

TIIVISTELMÄ

Löppönen, A. 2020. Inertiamittausyksiköllä mitattujen melan vedon keskeisten muuttujien vaikutus kajakin kulkunopeuteen. Jyväskylän yliopisto, Biomekaniikan pro gradu -tutkielma, 63 s., 1 liite.

Uudet pienikokoiset inertiamittausyksiköt tarjoavat uusia mahdollisuuksia biomekaniikan tutkimuksiin ja tekniikkavalmennukseen vesiurheilulajeissa. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, kuinka uinnissa käytetty inertiamittausyksikkö kykenee mittaamaan ja analysoimaan melanvedon keskeisiä muuttujia ja millainen yhteys niillä on aluksen nopeuteen. Lisäksi tarkoitus oli selvittää, voidaanko analysoitua tietoa hyödyntää melonnan tekniikkavalmennuksessa.

Mittaukset suoritettiin uima-altaassa. Mittausprotokolla sisälsi normaalia symmetristä melontaa kolmella eri tehoalueella (frekvenssillä) ja kaksi melontasuoritusta, joissa oli erilainen melontatekninen painotus. Tutkimuksessa käytettiin Trainesense SmartPaddle-inertiamittausyksikköä. Laitteen sensorien tallentaman datan perusteella voitiin laskea vedossa käytetty voima, liikerata, nopeus ja suunta. Näitä muuttujia verrattiin laservalokennoilla mitattuun aluksen keskinopeuteen. Lisäksi inertiamittausyksikköä verrattiin venymäliuska-anturitekniikkaan perustuvaan anturivarteeseen.

Tutkimukseen osallistui yhteensä 15 tutkittavaa, joiden keski-ikä oli 40,8 ($\pm 17,2$) vuotta, keskipituus 182,3 ($\pm 7,6$) cm ja keskiarvopaino 81,2 ($\pm 11,6$) kg. Frekvenssi ja voima olivat keskeisiä aluksen kulkunopeuteen vaikuttavia muuttujia. Kun ne kasvoivat, nousi aluksen kulkunopeus. Voimantuottoaika oli yhteydessä nopeuteen vastakkaisella tavalla. Kulkunopeuteen vahvimmin korreloivat frekvenssi ($r=0,857$, $p<0,001$) ja voima ($r=0,786$, $p<0,001$) sekä voimantuottoaika, joka korreloi negatiivisesti ($r=0,755$, $p<0,001$). Inertiamittausyksiköllä voitiin tunnistaa ja erottaa keskeiset tekniikan ajoituksen muuttujat, kuten voimantuottoaika ($p=0,001$), vedon pituus ($p=0,005$) ja voimantuoton alun viive ($p=0,037$), etu- ja takapainotteisessa melontasuorituksessa toisistaan. Inertiamittausyksikön todettiin antavan luotettavaa tietoa keskeisistä melan vedon muuttujista (maksimivoima, keskimääräinen voima, voimantuottoaika ja frekvenssi), kun sitä verrattiin anturivarteeseen ($r > 0,800$, $p<0,001$ ja ICC $> 0,60$, $p<0,001$).

Inertiamittausyksikköä (Trainesense SmartPaddle) voidaan käyttää hyväksi melontavalmennuksessa. Se on helppokäyttöinen ja antaa uutta tietoa erityisesti melonnan tekniikkavalmennuksen tueksi. Inertiamittausyksikkö antaa luotettavaa tietoa melonnan keskeisistä muuttujista, kun sitä verrataan anturivarteeseen. Laitteistoa tulee kuitenkin kehittää entistä paremmin melontaan sopivaksi. Lisäksi tutkimuksia suuremmilla tutkimusjoukoilla melonnan eri alalajien välillä tarvitaan lisää.

Asiasanat: melontatekniikka, urheiluvalmennus, sensori, ratamelonta, kanoottipoolo

ABSTRACT

Löppönen, A. 2020. The effect of paddle stroke variables measured by inertial measurement unit on the speed of the kayak. University of Jyväskylä, Master's thesis, 63 pp., 1 appendix.

New compact inertial measurement units offer new opportunities for coaching and biomechanical studies in water sports. The purpose of this study was to determine how an inertial measurement unit can analyze kayak stroke key variables and what kind of connection they have with the speed of the kayak. In addition, the purpose was to determine whether the analyzed data can be utilized in practice in kayak technique coaching.

Measurements were taken in the swimming pool using canoe polo equipment. The measurement protocol consisted of normal symmetrical paddling at three different speeds (frequency) and two performances with different paddling techniques. The study used the Trainesense SmartPaddle-inertial measurement unit, which calculates stroke force, trajectory, velocity, and direction. These variables were compared to the average speed of the kayak. The speed of the kayak was measured by laser photocells. In addition, data from the inertial measurement unit was compared with a strain gauge paddle shaft.

The average age of the subjects (n=15) was 40.8 (\pm 17.2) years. Their average height was 182.3 (\pm 7.6) cm and average weight was 81.2 (\pm 11.6) kg. Frequency, force and force-time were stroke key variables, which affect the speed of the kayak. Frequency ($r=0.857$, $p<0.001$) and force ($r=0.786$, $p<0.001$) were most strongly correlated to kayak speed. Force-time was negatively correlated ($r=-0.755$, $p<0.001$). The inertial measurement unit could identify and distinguish key paddling technique timing variables such as force-time ($p=0,001$), stroke length ($p=0,005$) and force entry delay ($p=0,037$) for different paddling techniques. The inertial measurement unit could provide reliable information on key paddle stroke variables (maximum force, mean force, force-time and frequency) when compared to a strain gauge paddle shaft ($r > 0,800$, $p<0,001$ and $ICC > 0,60$, $p<0,001$).

Inertial measurement unit (Trainesense SmartPaddle) can be used in kayak coaching. It is easy to use and it provides new information about kayak technique coaching. The inertial measurement unit provides reliable information on stroke key variables when compared to the strain gauge paddle shaft. However, the device should be developed to be more suitable for kayaking. In addition, studies with larger numbers of subjects between different kayaking subspecies are needed.

Key words: IMU, sensor, sprint kayaking, canoe polo, paddling

KÄYTETYT LYHENTEET

CSV	Comma-Separated Values – tiedosto
GPS	Global Positioning System, GPS-satelliittipaikannusjärjestelmä
GUI	Graphical User Interface, graafinen käyttöliittymä
ICF	International Canoe Federation, kansainvälinen kanoottiliitto
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer
IMU	Inertial Measurement Units, inertiamittausyksikkö
LiPo	Lithium-ion Polymer battery, litiumionipolymeeriakku
mAh	milliampere hour, milliampeeritunti
MEMS	Micro-electromechanical systems, mikroelettromekaaninen järjestelmä
WIMU	Wireless Inertial Measurement Units, langaton inertiamittausyksikkö
WLAN	Wireless Network, langaton lähiverkko
VTT	Technical Research Centre of Finland, Teknologian tutkimuskeskus

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

1 JOHDANTO.....	1
2 MELONNAN BIOMEKANIikka.....	3
2.1 Melonnan perustekniikka.....	4
2.2 Melonnassa käytetyt tutkimusmenetelmät.....	6
2.3 Melontasuorituksen vaikuttavat tekijät.....	9
3 INERTIAMITTAUSYKSIKKÖ.....	12
3.1 Inertiamittausyksiköiden oheislaitteisto	14
3.2 Inertiamittausyksiköiden virhelähteet	14
3.3 Datan suodattaminen	15
3.4 Inertiamittausyksiköiden käyttö vesiurheilussa	16
4 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TUTKIMUSKYSYMYKSET.....	18
5 AINEISTO JA MENETELMÄT	20
5.1 Tutkittavat.....	20
5.2 Mittausprotokolla	20
5.3 Mittausmenetelmät.....	21
5.4 Tulosuuttajat	23
5.5 Tilastolliset menetelmät.....	25
6 TULOKSET.....	27
6.1 Anturivarren ja inertiamittausyksikön välinen vertailu.....	27
6.2 Melontanopeuteen vaikuttavat tekijät	29
6.2.1 Keskeisten muuttujien yhteys nopeuteen.....	31

6.2.2 Melan vedon voimaprofiili.....	32
6.2.3 Melan kulkema liikerata.....	33
6.3 Melontateknisen muutoksen tunnistaminen inertiamittausyksiköllä	35
7 POHDINTA.....	37
7.1 Keskeiset melan vedon muuttujat	37
7.2 Melontatekniikan tunnistaminen.....	39
7.3 Inertiamittausyksikön luotettavuus melonnassa	39
7.4 Tulosten hyödynnettävyys	41
7.5 Inertiamittausyksikön käytettävyys.....	42
7.6 Tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet.....	43
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	47
LÄHTEET	48
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Melonta on monipuolinen vesiurheilulaji, joista ratamelonta ja koskislalom ovat olympialajeja (Suomen olympiakomitea 2020). Ratamelonnassa Suomella on pitkät perinteet, sillä jo vuoden 1952 Helsingin olympialaisissa ratamelonta oli yksi lajeista, jossa suomalaiset menestyivät parhaiten voittaen yhteensä kuusi mitalia (International Olympic Committee, 2020a). Ratamelonnassa kilpaillaan MM-tasolla 200m, 500m, 1000m ja 5000m matkoilla kajakkiyksiköillä (K1), kaksikoilla (K2) ja neliköillä (K4). Lisäksi mukana on kanadalaiskanootteja niin yksiköillä (C1) kuin kaksikoilla (C2). Olympiamatkat naisilla ovat 200m ja 500m, miehillä 200m, 500m ja 1000m (International Olympic Committee 2020b). Melonta on fyysisesti raskas laji, sillä veden kulkuvastus aiheuttaa vaatimuksia ylävartalon kestävyys ja voimaominaisuuksille (Mann & Kearney 1980; Limonta ym. 2010; Gomes ym. 2015). Melonnan fyysinen harjoittelu koostuu voima-, nopeus- ja kestävyysominaisuuksien kehittämisestä (García-Pallarés ym. 2009), mutta myös tekniikkavalmennus on oleellinen osa melojan harjoittelua (Csaba 2014).

Melonnan tekniikkavalmennuksessa on perinteisesti käytetty moottoriveneestä tai rannalta annettuja reaaliaikaisia tekniikkaneuvoja ja videovalmennusta. Videovalmennuksen avulla urheilijalle voidaan näyttää, millainen suoritus on ja sen avulla antaa urheilijalle ymmärrystä hänen melontatekniikkansa vahvuuksista ja heikkouksista. Videovalmennuksella ei kuitenkaan päästä käsiksi siihen, millaisia voimia veteen välittyi. Melonnassa voimamittauksen tekee haasteelliseksi hankaimen puuttuminen kajakista (Baker 1998). Aluksessa tai melojassa ei ole kiinteää pistettä, jonka kautta voima välittyy, vaan tekniikka on työntävän- ja vetävän käden sekä lavalla vedestä saatavan pidon yhteisvaikutusta (Baker 1998; Nikonorov 2015). Voimaa melonnassa tuotetaan jalkapuuta ja istuinta vasten (Michael ym. 2009).

Markkinoilla on olemassa venymäliuska-anturitekniikkaan perustuvia anturivarsia, jotka rekisteröivät melontasuorituksen laitteen sisäiseen muistiin ja joita voidaan tarkastella jälkikäteen esimerkiksi tietokoneen avulla (Macdermid ym. 2019). Vastaaventyypinen tekniikka on laa-

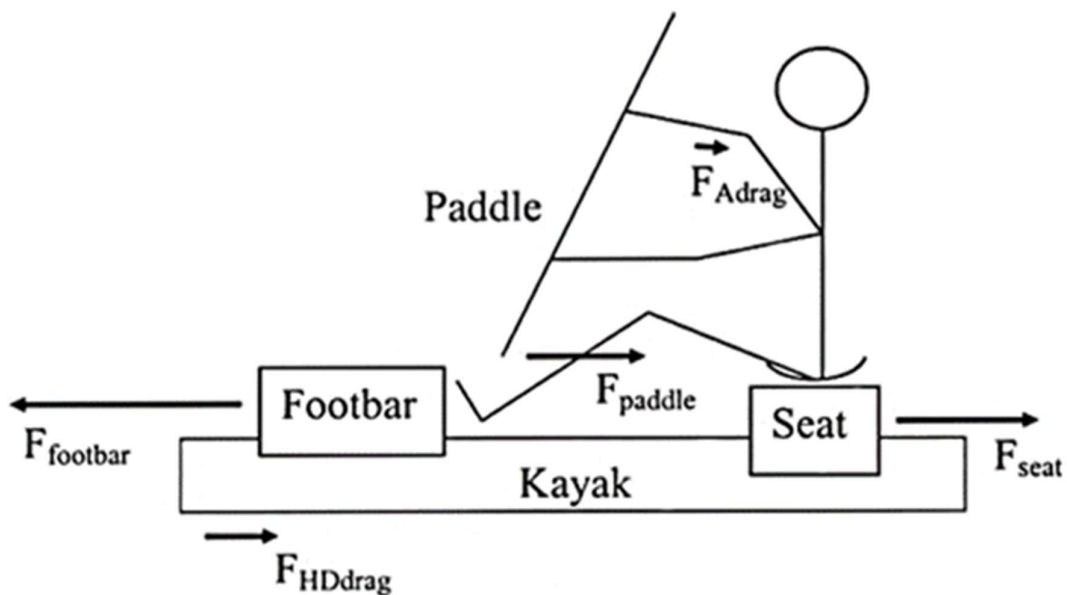
jasti käytössä melonnan sukulaislajissa soudussa (Tessendorf ym. 2011). Anturivarren ongelmana on kuitenkin se, että se ei kykene rekisteröimään melan vedon aikana tuotetun voiman suuntaa vaan, pelkästään varren taipuman perusteella absoluuttista voimaa.

Trainesense SmartPaddle ”älylättäri” on uinnissa käytettävä inertiamittausyksikkö, jonka sensoreiden rekisteröimän datan perusteella voidaan laskea vedossa käytetty voima, mutta myös uimarin käden liikerata, nopeus ja suunta (Auvinen 2017; Hintikka 2017; Rantanen 2017; Trainesense 2020a). SmartPaddle sisältää 3-akselisen kiihtyvyyssanturin ja 3-akselisen gyroskoopin sekä magnetometrin ja siihen voidaan tallentaa 40 minuutin pituinen mittaus. SmartPaddlen tuottama data varastoidaan Trainesensen ylläpitämään Analysis Centeriin, josta sitä voidaan hallinnoida ja analysoida (Trainesense 2020a). Useimmat perinteisemmät biomekaaniset mittausmenetelmät, kuten liikeanalyysi, eivät ole käytännöllisiä valmennustyöhön avovedessä, minkä vuoksi SmartPaddlen mahdollisuuksia melonnassa on perusteltua selvittää.

Tämän tutkimuksen tarkoitus on selvittää, kuinka uinnissa käytetty inertiamittausyksikkö (Trainesense SmartPaddle) kykenee mittaamaan ja analysoimaan melanvedon keskeisiä muuttujia ja millainen yhteys niillä on aluksen nopeuteen. Tämä pro-graduraportti sisältää katsauksen melonnan perustekniikkaan ja melonnan biomekaanisiin tutkimuksiin, erityisesti tutkimusmetodologisesta näkökulmasta. Lisäksi tutustutaan inertiamittausyksikköön ja sen sovellutuksiin vesiuheilussa.

2 MELONNAN BIOMEKANIikka

Melonnassa aluksen eli kanootin tai kajakin kulkua vastustaa veden ja ilmanvastuksen aiheuttamat vastusvoimat, jotka melojan tulee voittaa aluksen kuljettamiseksi eteenpäin (Baker 1998; Seiler 2002; Michael ym. 2009) (kuvio 1). Veden aiheuttamat vastusvoimat ovat huomattavasti suuremmat, sillä ilmanvastuksen osuus on vain noin 10% kokonaisvastusvoimista (Sanderson & Martindale 1986; Seiler 2002). Veden vastusvoimat koostuvat kolmesta eri komponentista: veden kitkasta, veden paineen tuottamasta vastuksesta ja aaltojen muodostukseen eli veden syrjäyttämiseen vaadittavasta voimasta (Mantha ym. 2013; Blazeovich 2017, 154-158). Kitka on veden ja kanootin pohjan välisestä kitkasta johtuvaa vastusvoimaa, kun taas painevoimalla tarkoitetaan voimaa, joka tarvitaan veden siirtämiseen aluksen polun muodostamiseksi. Aaltovoimalla tarkoitetaan puolestaan voimaa, joka tarvitaan, kun alus syrjäyttää kulkiessaan vettä ja siitä syystä tuottaa perässään aaltoja (Mantha ym. 2013; Blazeovich 2017, 154-158; Gomes ym. 2018).



KUVIO 1. Melontasuoritukseen vaikuttavat voimat (F_{HDdrag} = vedenvastus, $F_{footbar}$ = jalkapuuhun kohdistuva voima, F_{seat} = istuimeen kohdistuva voima, F_{paddle} = melanvedon voima, F_{Adrag} = ilmanvastus (Michael ym. 2009)).

Vedessä vastus kasvaa aluksen nopeuden neliössä ja näin ollen kulkuvastus on sitä suurempi mitä korkeampi aluksen kulkunopeus on (Martin & Bernfield 1980; Mantha ym. 2013). Runkonopeus viittaa siihen, että pidempi alus voi kulkea nopeammin kuin lyhyempi alus ja tästä syystä kaikkien melonnan alalajien alusten pituus on rajoitettu säännöin (Mantha ym., 2013). Aluksen kulkuvastus määräytyy yksilöllisesti kanootin rungon muodon, märkäpinta-alan ja nopeuden mukaan (Pendergast ym. 2005; Mantha ym. 2013). Aluksen kulkuvastukseen vaikuttaa myös melojan paino, sillä se muuttaa aluksen rungon märkäpinta-alaa ja sitä kautta hydrodynaamista vastusta (Mantha ym. 2013; Gomes ym. 2018). Urheilijan tulee valita välineensä itselleen sopiviksi. Erityisesti aluksen tulee olla sopivan kokoinen ja valittu urheilijan painon mukaan (Pendergast ym. 2005; Mantha ym. 2013; Gomes ym. 2018).

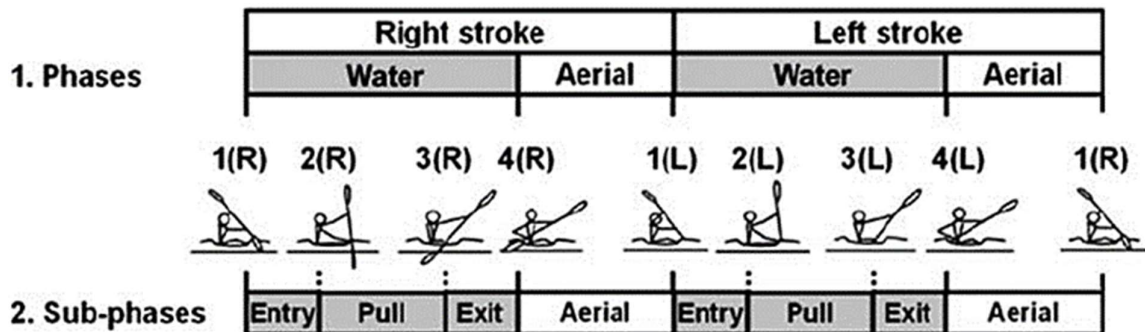
Myös melan valinta on tärkeää ja sen tulee olla erityisesti lavan koon osalta sellainen, että se vastaa melojan omaan lihasvoimaprofiilia (Sprigings ym. 2006). Ratamelonnassa on jo pitkään käytetty kuppimeloja (wingplade). Niiden on todettu matemaattisen mallinnuksen mukaan olevan noin 15 % tehokkaampia kuin perinteisten tasapintaisten lapojen (Jackson, 1995). Tasapintaista melan lapoja ei nykyisin ratamelonnassa ole käytössä enää lainkaan, mutta koskimelonnassa ja kanoottipoolossa niitä käytetään muiden vaatimusten, kuten kanootin ohjailun ja pallon käsittelyn vuoksi.

Melonnassa kilpailukykyä voidaan pääasiassa parantaa kahdella tapaa. Aluksen kulkuvastusta voidaan vähentää tai melonnan suorituskykyä lisätä. Kuten aikaisemmin todettiin, aluksen kulkuvastus on kohtalaisen vakio tarkkojen alukseen liittyvien teknisten kilpailusääntöjen vuoksi, joten melontavalmennus tähtää ensisijaisesti veteen välitetyn tehon kasvattamiseen ja tehopainosuhteen parantamiseen (Michael ym. 2009).

2.1 Melonnan perustekniikka

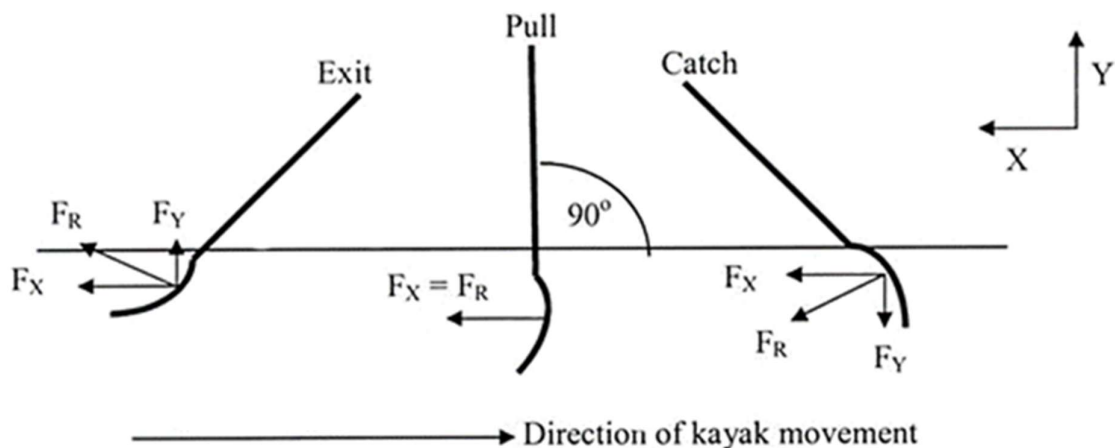
Melonnan perustekniikassa melan veto voidaan jakaa glide/aerial eli liuku/ilma ja stroke/water eli vetovaiheisiin (Michael ym. 2009; McDonnell ym. 2012; Nikonorov, 2015) (kuvio 2). Veto-vaihe voidaan jakaa vielä kolmeen (entry/catch – pull – exit) vaiheeseen (McDonnell ym. 2012;

Nikonorov 2015). Liukuvaiheen aikana ylävartalon lihakset rentoutuvat ja valmistautuvat vetoon (Michael ym. 2009). ”Pre-catch” vaiheessa mela upotetaan veteen ja ”Catch” vaiheessa vedestä haetaan mahdollisimman tukeva ote ennen varsinaista vetoa (Mcdonnell ym. 2012; Nikonorov 2015). Jossain tarkasteluissa ”Pre-catch” ja ”Catch” yhdistetään pelkäksi Catch-vaiheeksi (Michael ym. 2009). ”Pull” eli voimavaiheessa veteen pyritään tuottamaan voimaa tehokkaasti ja nopeasti kiihtyen. Tavoitteena on kammata itseään eteenpäin melan varren ja veteen kiinnittyneen lavan avulla. ”Exit” vaiheessa mela pyritään nostamaan pois vedestä mahdollisimman rennosti ja kajakin kulkua haittaamatta (Michael ym. 2009; Mcdonnell ym. 2012; Nikonorov, 2015).



KUVIO 2. Melonnan vetosyklin pää- ja osavaiheet molemmille puolille esitettynä (Mcdonnell ym. 2012).

Melan lavan tulisi lukittautua veteen ja siitä tulisi saada mahdollisimman tehokas kiinniotto, jolloin voimaa voidaan tuottaa lähes paikallaan olevaa lapaa vastaan (kuvio 3). Tehokkaimmillaan veto on, kun lapa on pystysuorassa veden pintaan nähden (Michael ym. 2009; Nikonorov 2015). Laskennallisen virtausdynamiikan avulla voidaan osoittaa, että vedon alussa paine on melan lavan kärjessä, mutta siirtyy vedon lopussa keskivaiheille lapaa (Morgoch ym. 2016). Melonnassa on tärkeää hallita koko kehoa, sillä melonnassa voima välittyy melojan kautta (Baker 1998). Erityisesti vipuvarsien yhteydet (connections) ovat tärkeitä, jotta voima välittyy tehokkaasti alusta eteenpäin vieväksi voimaksi (Bulgan ym. 2017). Keskivartalon heikkous melonnan voimavaiheen aikana aiheuttaa voiman välittymisessä katkoksen, jolloin voima ei välity tehokkaasti eteenpäin (Nikonorov 2015). Vaikka melonta onkin suorituksena yläraajapainotteinen, on jalkojen merkitys myös tärkeää melonnan suorituskyvyssä (Brown ym. 2011).



KUVIO 3. Melonvedon vaiheet ja lavan asento, sekä vedon voimavektorit F_X = voima x-suuntaan, F_Y = voima y-suuntaan, ja F_R = voiman resultantti (Michael ym. 2009).

Kuten kaikissa kestävyys suorituksissa, myös melonnassa väsymistekijöillä on merkittävä vaikutus melonnan biomekaanisiin muuttujiin kilpailumatkan edetessä. Erityisesti tämä tulee esiin melonnan frekvenssin ja voiman muuttumisena (Baker 1998). Melontasuorituksessa kilpailusuunnitelma (raceplan) tulee olla suunniteltu ja harjoiteltu tarkkaan, jotta riittävää frekvenssiä jaksetaan pitää yllä koko kilpailumatkan (McDonnell 2013).

Melontafrekvenssi vaihtelee melojien välillä, riippuen kilpailumatkasta, voimatasosta ja melojan yksilöllisistä ominaisuuksista, kuten antropometriasta (Baker 2014; Csaba 2014; Nikonorov 2015). Nopeimmat melontafrekvenssit saavutetaan yleensä lyhyimmällä kilpailumatkalla eli 200 metrillä, jossa on miehillä mitattu 145-172 ja naisilla 131-147 vetoa minuutissa (McDonnell 2013), kun taas 1000 metrin kilpailumatkalla frekvenssi on todettu olevan 110-115 vetoa minuutissa (WC Sprint Coaches Technical Group 2001). Melontafrekvenssin kasvaessa voimantuotto profiili muuttuu terävämmäksi ja siten tehokkaan voimantuoton kannalta optimaalisemmaksi (Gomes ym. 2015).

2.2 Melonnassa käytetyt tutkimusmenetelmät

Melonnasta on tehty biomekaanisia tutkimuksia vuosikymmenten varrella paljon. Ensimmäisiä keskeisiä ratamelonnan biomekaniikkaan tarttuneita tutkimuksia oli Mann & Kearneyn vuonna

1980 julkaisema ratamelonnan biomekaaninen analyysi. Se toteutettiin yhdeksälle olympiataison melojalle elokuvaustekniikkaa käyttäen. Metodologisesti melonnan tutkimukset ovat kehittyneet 80- ja 90-luvulta tähän päivään asti merkittävästi. Tutkimustiedon lisääntyessä, ymmärrys lajin biomekaanisista ja fysiologisista vaatimuksista on kasvanut. Seuraavassa kirjallisuuskatsauksessa uusimmat ja merkittävimmät melonnan biomekaaniset tutkimukset jaettiin käytettävän asetelman mukaan kahteen eri luokkaan. Ensimmäisenä luokkana melontaergometrillä laboratorio-olosuhteissa toteutetut tutkimukset ja toisena luokkana todellisissa kilpailuolosuhteissa eli avovedessä toteutetut tutkimukset. Tutkimusten keskeisistä tuloksista on laadittu synteesi kappaleessa 2.3.

Melontaergometrillä tehdyissä tutkimuksissa keskeisiä melan vedon muuttujia mitattiin usein voima-antureilla (taulukko 1). Anturit asetettiin vastusta välittäviin vetonaruihin (Haverinen 2017; Tornberg ym. 2019) tai melan varteeseen (Sturm ym. 2010). Kun haluttiin selvittää tarkemmin voimien suuntia, käytettiin 6-komponenttista anturivartta, joka mahdollisti käden ja melanvarren välisten voimien mittaamisen kolmeen eri suuntaan (Nates & Colloud 2015). Myös 3D-liikeneanalyysiä käytettiin melontatekniikan tutkimisessa (Limonta ym. 2010; Bjerkefors ym. 2019).

TAULUKKO 1. Melontaergometrillä toteutetut melonnan biomekaaniset tutkimukset.

Viite	Laitteisto	Kuvaus
Tornberg ym. 2019	Voima-anturit melassa ja jalkapuussa	Tarkoituksena oli selvittää jalkatukeen kohdistetut voimat ergometrimelonnan aikana eri kilpailutasoilla.
Bjerkefors ym. 2019	3D-liikeneanalyysi	Tarkoituksena oli tutkia tehoa ja kinemaattisia muuttujia yläraajoissa, alaraajoissa ja keskivartalossa
Haverinen 2017	Voima-anturit melan vetonaruissa ja jalkapuussa	Tarkoituksena oli selvittää nuorten ja kokeneempien melojien välisiä biomekaanisia eroja ergometrimelonnessa.
Nates & Colloud 2015	Anturivarsi (6 kpl)	Tarkoituksena oli mitata 6 komponenttisella anturivarrella voimien suuntia.
Nilsson & Rosdahl 2014	Voima-anturit istuimessa ja jalkapuussa	Tarkoituksena oli validoida kannettavia mittauslaitteita, joilla tallennetaan jalkapuun ja istuimen vaakasuoria voimia.
Limonta ym. 2010	3D-liikeneanalyysi ELITE (BTS, Milan, Italy)	Tutkimuksen tavoitteena oli tunnistaa kinemaattiset muuttujat, jotka edistävät onnistunutta suorituskykyä melonnassa.
Sturm ym. 2010	Voima-anturit melassa ja jalkapuussa	Tarkoituksena oli esitellä järjestelmä, jossa anturit varressa sekä jalkapuussa.
Begon ym. 2008	Voima-anturit (piezo) melassa, istuimessa ja jalkapuussa	Tutkimuksen tavoitteena oli mitata melonnan kinematiikka ja kinetiikkaa liukuvapenkkisellä ergometrillä.

Tutkimuksissa mitattiin myös voimien välittymistä kehon läpi, sillä kuten aikaisemmin on mainittu, voimien välittyminen melonnassa on tärkeää. Tätä pyrittiin selvittämään asettamalla voima-anturit melan varren lisäksi myös jalkapuuhan (Sturm ym. 2010; Haverinen 2017; Tornberg ym. 2019). Lisäksi oli kehitetty mittauslaitteisto, joka kykenee mittamaan jalkapuuhan välittyvän voiman lisäksi istuimeen kohdistuvan vaakasuoran voiman (Nilsson & Rosdahl 2014). Tutkimuksissa mitattiin myös kuormitusfysiologisia muuttujia, kuten hengityskaasumuuttujia ja laktaattia (Tornberg ym. 2019).

Avovedessä toteutetuissa tutkimuksissa eniten käytettiin venymäliuska-antureilla varustettua anturivartta (taulukko 2), joka tallensi mittausdatan sisäiseen muistiinsa ja välitti sen telemetriesti tai kaapeleiden avulla tallennusyksikköön (Gomes ym. 2015; Aitken & Neal 2016; Macdermid ym. 2019). Lisäksi tallentavaa anturivartta käytettiin uima-altaassa, kun mitattiin melontasuorituksen ensimmäisiä, kiihdyttäviä vetoja (Gomes ym. 2011a).

TAULUKKO 2. Avovedessä toteutetut melonnan biomekaaniset tutkimukset

Viite	Laitteisto	Kuvaus
Bonaiuto ym. 2020	Anturivarsi, voima-anturit jalkapuuhan sekä IMU aluksessa	Tarkoituksena oli mitata vedon muuttujia, jalkatukeen kohdistuvia voimia ja kanoonin kinemaattisia muuttujia
Niu ym. 2019	Lavoissa valokuituanturit	Tavoitteena oli arvioida melonnan suoritusta uudella anturitekniikalla avovesiolosuhteissa
Macdermid ym. 2019	Anturivarsi vasen & oikea	Tarkoituksena oli mitata anturivarrella slalom-melolan suoritusta kilpailutapahtumassa
Harrison ym. 2019	Hiukkahydrodynamiikka (SPH) malli	Tutkimuksen tarkoituksena oli osoittaa mallin hyödyllisyys tutkittaessa tekniikan ja laitteiden muutoksia
Aitken & Neal 2016	Anturivarsi vasen & oikea	Tutkimuksessa esiteltiin järjestelmä, joka mittaa melan vedon voimaa, impulsseja ja tehoa
Gomes ym. 2015	Anturivarsi vasen & oikea	Tutkimuksessa analysoitiin melan vedon voimaprofiilia eri frekvensseillä ja niiden vaikutusta aluksen kulkunopeuteen
Gomes ym. 2011a	Anturivarsi vasen & oikea	Tarkoituksena oli mitata melanvarteen kohdistuvaa voimaa vasemmalta ja oikealta puolelta erikseen.
Helmer ym. 2011	Anturivarsi vasen & oikea ja kiihtyvyyssmittari aluksessa	Tutkimuksessa tutkittiin lapaan kohdistuvaa hydrodynaamista painetta melontasuorituksen aikana
Brown ym. 2011	Liikeanalyysi	Tutkimuksessa pyrittiin tunnistamaan keskeisiä melanvedon muuttujia kilpailutapahtumassa

Voima-anturit voitiin varren sijaan sijoittaa melan molempiin lapoihin, kuten Helmer ym. (2011) tutkimuksessa, jossa melan lavan vetopuolelle asennettiin voima-anturi. Uudentyyppistä

tekniikkaa edustaa Niu ym. (2019) tutkimus, jossa valokuituantureilla mitattiin mihin kohtaa melanlavan pintaa vedenpaine kohdistuu vedon eri vaiheissa.

Kun mitattiin aluksen kinemaattisia muuttujia, kuten nopeutta ja kiihtyvyyttä, käytettiin inertiamittausyksikköä (IMU) (Bonaiuto ym. 2020) ja kiihtyvyyssantureita (Helmer ym. 2011; Gomes ym. 2015). Uudenlaista näkemystä edustaa Harrison ym. (2019) tutkimus, jossa käytettiin Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) menetelmää, jonka avulla voitiin ennustaa melojan ja aluksen dynaamisen käyttäytymistä.

Melonnan biomekaaniset tutkimukset olivat laadukkaita ja hyvin toteutettuja. Niissä käytetyt mittausten menetelmät vaihtelivat kuitenkin paljon ja vain anturivartta käytettiin laajemmin. Lisäksi osa tutkimuksista olivat pilottiluonteisia ja toteutettu vain muutamalle melojalle, varsinkin silloin, jos mittausmenetelmä oli uusi. Pääasiassa tuloksia voitiin kuitenkin yleistää hyvin, sillä niissä tarkasteltavat muuttujat (frekvenssi, voima, teho, voimantuottoaika) olivat samoja, jolloin tutkimusten välinen vertailu oli mahdollista.

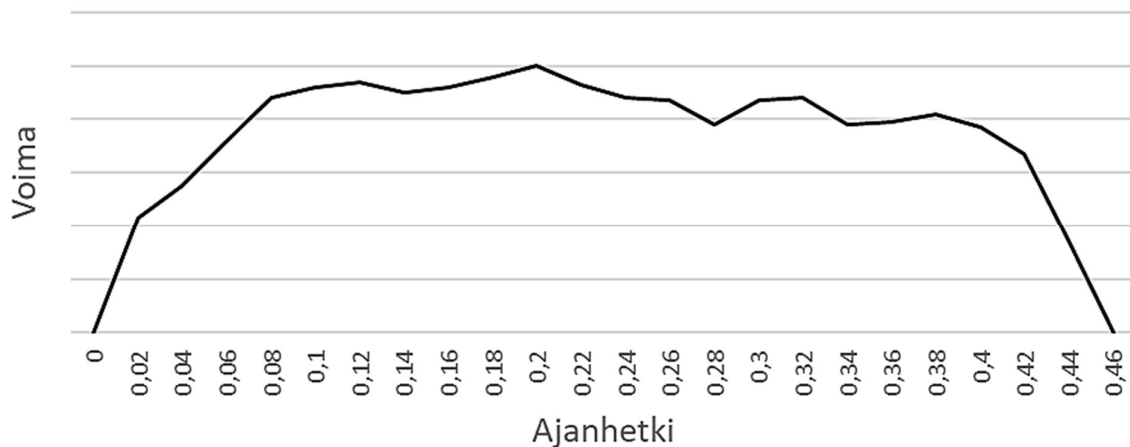
2.3 Melontasuorituksen vaikuttavat tekijät

Melonnan biomekaanisilla tutkimuksilla on pyritty luomaan mahdollisimman kattava ja luotettava käsitys siitä, millaisia vaatimuksia melonta aiheuttaa hermo-lihasjärjestelmälle. Kun kokeneita melojia on verrattu kokemattomampiin melojiin, on voitu todeta, että kokeneemmat melojat kykenevät tuottamaan suuremman frekvenssin, impulssin ja kokonaisvoiman. On niitä mitattu sitten avovesiolosuhteissa (Brown ym. 2011; Niu ym. 2019) tai melontaergometrillä laboratorio-olosuhteissa (Haverinen 2017; Tornberg ym. 2019).

Tutkimuksissa on mitattu voiman suuruutta eri aluksen komponenttien (jalkapuu, penkki, mela) välillä. Jalkapuuhun kohdistuvien voimien on todettu olevan kokeneilla melojille huomattavasti suurempia kuin kokemattomilla melojilla (Tornberg ym. 2019). Alaraajojen työkentelyn on todettu olevan ratkaiseva tekijä melonnan suorituskyvyn kannalta (Nilsson & Rosdahl 2016, 2014; Bjerkefors ym. 2019) mutta, toisaalta on myös vastakkaisia näkemyksiä, joiden mukaan vähäisempikin voimapanos alaraajoista riittäisi (Haverinen 2017). Lisäksi eri

komponenttien välinen voimaprofiili eroaa siten, että melanvedon voimantuotto on luonteeltaan terävää, kun taas jalkatukeen ja penkkiin kohdistuvat voimat ovat enemminkin puristavia (Begon ym. 2008) Suurimmat jalkapuuhun välittyneet voimat on mitattu 120-150 asteen polvikulmalla (Lee & Nam 2012).

Kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että voimantuottoprofiilin tulee olla suorakaiteen muotoinen ja melan vedon tulee olla luonteeltaan terävä (kuvio 4) (Gomes ym. 2015; Macdermid ym. 2019). Heti melojan saadessa veteen riittävän pidon, tulisi voimaa tuottaa nopeasti ja tehokkaasti. Toisaalta veto pitää lopettaa heti lavan siirryttyä pois optimaalisesta voimantuottoasennosta ja vedestä on syytä poistua mahdollisimman nopeasti (Gomes ym. 2015). Suorakaiteen muotoinen voimantuottoprofiili mahdollistaa voiman sujuvan siirtämisen aluksen tasaiseksi kiihtyvyydeksi (Baker 1998). Tehokkaan melanvedon tulee tapahtua mahdollisimman lähellä aluksen pituusakselia, jolloin voimaa tuotetaan eteenpäin ja sivuttaissuuntainen heiluminen vähenee (Kendal & Sanders 1992; Mann & Kearney 1980).



KUVIO 4. Tehokkaan melan vedon voimaprofiili (mukaillen mm. Gomes ym. 2015; Macdermid ym. 2019)

Melan liikerataan keskittyneet tutkimukset ovat osoittaneet, että kokeneemmat melojat kykenevät symmetrisempään melontasuoritukseen (Kendal & Sanders 1992; Limonta ym. 2010; Helmer ym. 2011). Huipputaso melojilla on havaittu vedon alkuvaiheessa ilmassa tapahtuva eteenpäin suuntautuva liike, eräänlainen kurotus, joka lisäsi melonnan vetopituutta (Kendal &

Sanders 1992; Limonta ym. 2010). Vastaavasti on todettu, että kokemattomampien melojien tulisi tuottaa jalkojen avulla suurempaa liikelaajuutta, saaden näin enemmän ulottuvuutta ve-
toon (Brown ym. 2011) .

3 INERTIAMITTAUSYKSIKKÖ

Inertiamittausyksiköiden (IMU, Inertial Measurement Units) käyttö ja niillä tehdyt tutkimukset ovat lisääntyneet viime vuosina paljon (Victorino ym. 2018). Inertiamittausyksiköt ovat tuttuja ilmailusta ja teollisuudesta (Sabatini 2011), mutta kiinnostus niiden käyttöön myös urheilun biomekaanisissa tutkimuksissa on lisääntynyt viime vuosina merkittävästi (Magalhaes ym. 2015). Erityisen tarpeellisia inertiamittausyksiköt ovat sisäurheiluolosuhteissa, joissa ei ole mahdollista käyttää GPS-yhteyttä (Global Positioning System) (Chambers ym. 2015). Inertiamittausyksiköitä on käytetty myös mittaamaan fyysistä aktiivisuutta ja sen eri muotoja, kuten porraskävelyä (Cuzzolin ym. 2017).

Inertiamittausyksiköiden suurin etu on niiden pieni koko, joka mahdollistaa laitteiden käytön todellisissa harjoitus- ja kilpailuolosuhteissa. Inertiamittausyksiköt kykenevät mittaamaan, käsittelemään ja tallentamaan dataa kompaktissa koossa ja ne ovat myös hyvin kevyitä (Espinosa ym. 2015). Inertiamittausyksiköt ovat myös edullisia, sillä niiden hinnat ovat laskeneet voimakkaasti viime vuosikymmeninä käytön yleistyessä matkapuhelimissa ja muissa kannettavissa laitteissa sekä hienomekaanisen tekniikan (MEMS, microelectromechanical systems) kehittyessä (Buke ym. 2015; Passaro ym. 2017).

Inertiamittausyksikkö koostuu kiihtyvyyssanturista (accelerometers), gyroskoopista (gyroscopes) ja usein myös magnetometrillä (magnetometers) (Du ym. 2018; Victorino ym. 2018). Inertiamittausyksikkö mittaa lineaarista kiihtyvyyttä kolmiakselisilla kiihtyvyyssanturilla ja kulma-
muutoksen nopeutta kolmiakselisilla gyroskoopilla. Tämä mittatulos voidaan numeraalisesti integroida, jolloin saadaan mitattavan objektin paikka ja orientaatio kolmiulotteisessa koordinaatistossa (Du ym. 2018; Victorino ym. 2018).

Inertiamittausyksikköä ja kiihtyvyyssanturia kutsutaan yleisellä tasolla inertia-anturiksi, koska ne mittaavat muutoksia omassa koordinaatistossaan, eivätkä ne siten tarvitse ulkoisia referenssejä (IEEE 2000). 6-akselisella inertiamittausyksiköllä tarkoitetaan laitetta, joka sisältää 3-akselisen kiihtyvyyssanturin ja 3-akselisen gyroskoopin. Kun tähän lisätään 3-akselinen magneto-

metri, puhutaan 9-akselisesta inertiamittausyksiköstä. Käytössä on myös 7-akselisia inertiamittausyksiköitä, jolloin kiihtyvyyssanturin ja gyroskoopin lisäksi laitteessa on jokin muu sensori, esimerkiksi paineanturi (InvenSense 2016).

Kiihtyvyyssanturit ovat herkkiä laitteita, jotka mittaavat kappaleen itseis- eli ominaiskiihtyvyyttä (Ahmad ym. 2013; Victorino ym. 2018). Kiihtyvyyssanturit mittaavat kiihtyvyyden G-arvon kerrannaisina. Yksi G-arvo on sama kuin normaaliputoamiskiihtyvyys ($9,81 \text{ m/s}^2$) (IEEE, 2000). Gyroskoopit kykenevät mittaamaan kappaleen pyörimisliikettä (kulmanopeutta). Gyroskoopit voivat mitata pyörimisliikettä, yhden, kahden tai kolmen akselin ympäri ja ne antavat tuloksen asteina per sekunti [$^{\circ}/\text{s}$] (IEEE, 2000). Gyroskoopilla ja kiihtyvyyssantureilla toteutetut mittaukset ovat aina suhteessa anturin omaan koordinaatiojärjestelmään (Buke ym. 2015).

Tarvittaessa inertiamittausyksikkö voi sisältää myös muita antureita, kuten GPS-vastaanottimia (Global Positioning System), magnetometrejä tai ilmanpaineantureita. Tällaista monien anturien sisällyttämistä kutsutaan kirjallisuudessa anturifuusioksi (Razavian ym. 2018). Yleisin inertiamittausyksiköihin lisättävä anturi on magnetometri, joka parantaa yksikön tarkkuutta mittaamalla magneettikentän muutoksia (Ahmad ym. 2013). Magnetometri on kuten kompassi ja se mittaa kappaleen suuntaa geodeettisessa koordinaatiossa (Buke ym. 2015).

Pienet urheilussa käytetyt inertiamittausyksiköt (MEMS) koostuvat kolmesta mikroanturista, jotka ovat asetettu 90-asteen kulmaan toisiinsa nähden, tällöin IMU:n X-, Y- ja Z-akselit ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden ja kiihtyvyyden sekä kulmanopeuden mittaaminen kolmeen eri suuntaan on mahdollista (You 2018). Esimerkkinä voidaan mainita TDK Invensense MPU-9250, joka on 9-akselinen inertiamittausyksikkö. MPU-9250:n gyroskooppi kykenee mittaamaan jopa ± 2000 asteen kulmamutoksen sekunnissa, kiihtyvyyssanturi voi havainnoida 16g:n kiihtyvyyden ja magnetometri $\pm 4800\mu\text{T}$ magneettikentän (InvenSense 2016).

3.1 Inertiamittausyksiköiden oheislaitteisto

Inertiamittausyksiköt saavat käyttöjännitteensä yleensä sisäänrakennetusta akusta. Akut ovat yleensä kapasiteetiltaan 90-140mAh ja akkutyypinä käytetään usein litiumionipolymeeriakua (LiPo, Lithium-ion Polymer battery) (Espinosa ym. 2015). Litiumionipolymeeriakut ovat turvallisia ja tehokkaita akkuja, sillä ne ovat suljettuja ja niissä oleva elektrolyytti on kiinteää. Niitä voidaan käyttää turvallisesti kannettavissa laitteissa, esimerkiksi päälle puettavissa sensoreissa (Manuel Stephan & Nahm 2006). Dataa voidaan siirtää inertiamittausyksiköistä kaapelilla tai langattomasti. Yleisimmät langattomat järjestelmät ovat Bluetooth (Victorino ym. 2018) ja WLAN (Wireless Network) RF-taajuudella 2.4GHz (Espinosa ym. 2015; Figueiredo e Silva ym. 2018). Inertiamittausyksiköt ovat usein koteloitu käyttäen ruiskuvalettua muovia, ja ne ovat helposti muokattavissa monenlaisiin käyttötarkoituksiin (Stamm ym. 2013; Espinosa ym. 2015).

3.2 Inertiamittausyksiköiden virhelähteet

Inertiamittausyksiköissä esiintyy tyypillisiä virhelähteitä, jotka voivat johtua lämpötilan muutoksista, tärinästä tai valmistuksessa tapahtuvista virheistä (Vainio 2016). Tyypillisimmät virhetyypit ovat: vinouma, skaalausvirhe, ristikytkentävirhe, kohina ja kertymävirhe (Vainio 2016; Du ym. 2018). Gyroskoopeissa ja kiihtyvyyssantureissa esiintyvä vakiovirhe on vinouma (bias), jonka takia anturi antaa tulokseksi nollatasosta poikkeavan lukeman, vaikka anturi olisi täysin paikallaan. Vinouman suuruus kertoo inertiamittausyksiköiden tarkkuudesta (Vainio, 2016). Skaalauskerroimen virheellä tarkoitetaan mittausyksikön mittamaan liikkeen ja todellisen liikkeen eroa. Anturien skaalauskerroinvirheen suuruus on suoraan verrannollinen inertiamittausyksikön kokemaan kiihtyvyyden ja pyörimisliikkeen määrään. Mitä suurempia arvot ovat, sitä suurempi osuus anturin antamasta väärästä lukemasta skaalauskerroinvirheellä voidaan selittää (Vainio, 2016).

Ristikytkentävirheellä (engl. cross-coupling error) tarkoitetaan inertiamittausyksikön valmistuksesta johtuvaa epätarkkuutta, jossa antureiden akselit eivät ole kohdistettu oikein ja näin aiheuttaa mittausdataan virhettä. Antureissa voi esiintyä sähköistä kohinaa, joka on tyypillinen

virhetyyppi erityisesti pienissä herkissä ja sähköisissä MEMS-antureissa. Värinä voi myös aiheuttaa kohinaa (Vainio 2016).

Ryömintävirhe (kertymävirhe, drift) heikentää mittaustarkkuutta erityisesti paikkatiedon määrittämisessä ja siksi signaalinkäsittelyalgoritmit/-menetelmät ovat tärkeä osa datankäsittelyä erityisesti MEMS-antureilla (Du ym. 2018). Apollo-avaruusohjelman ajoista lähtien (1960-luvulta) ryömintävirheen korjaamiseen on käytetty Kalman-suodatinta, jolla voidaan estimoida dynaamisen järjestelmän tilaa aikaisempien mittaustulosten perusteella (Kalman 1960; McGee & Schmidt 1985).

3.3 Datan suodattaminen

Inertiamittausyksiköiden tallentama data tulee suodattaa, sillä raakadatassa on hyötydatan lisäksi suuri määrä erilaista kohinaa. Usein suodatuksen seurauksena osa hyötydatasta saattaa kuitenkin kadota, siksi oikean suodattimen valinta on tärkeää (Huttunen 2014; Hintikka 2017). Mediaanisuodin ja MA-suodin (liikkuva-keskiarvo) soveltuvat parhaiten tilanteisiin, joissa signaalista halutaan poistaa teräviä häiriöpiikkejä ja tehdä signaalista tasaisempaa. Tällöin oletetaan, että datapiikit eivät sisällä tarpeellista hyötydataa (Huttunen 2014; Hintikka 2017). Mediaanisuodin, joka valitsee sisäänmenojoukosta keskimmäisen alkion, on tehokkaampi yksittäisten korkeiden piikkien poistamisessa verrattuna MA-suotimeen. Toisaalta jos signaali sisällä yksittäisiä piikkejä, saattaa mediaanisuodin vääristää dataa (Hintikka 2017).

Kolmas inertiamittausyksiköiden datan suodattamiseen käytetty suodin on alipäästösuodin, joka perustuu määriteltyyn rajataajuuteen, jota pienemmät taajuudet suodin päästää läpi. Taajuudet, jotka ovat korkeampia kuin määritelty rajataajuus, suodin vaimentaa. Alipäästösuodin perustuu oletukseen, että rajataajuutta ylemmillä taajuuksilla ei ole olemassa hyötydataa, jota tulisi suodatuksen jälkeen enää käyttää (Huttunen 2014; Hintikka 2017).

3.4 Inertiamittausyksiköiden käyttö vesiurheilussa

Tässä pro-gradu tutkielmassa tutustuttiin kirjallisuuskatsauksen avulla inertiamittausyksiköiden käyttöön vesiurheilulajeissa. Eniten inertiamittausyksiköitä oli käytetty uinnissa, mutta myös olympialuokan soudussa ja melonnassa. Tutkimuksissa oli pyritty löytämään monipuolisesti suoritusta kuvaavia muuttujia, jotka oli mahdollista tunnistaa datasta luotettavasti. Suorituksen intensiteettiä kuvattiin vetojen ja vetosyklien määrällä tietyssä aikayksikössä. Myös uimarin nopeutta oli mitattu tutkimuksissa (Dadashi ym. 2012; Li ym. 2016). Lisäksi inertiamittausyksiköitä oli käytetty uinnissa kuvaamaan vartalon kiertoa (trunk rotation) (Silva ym. 2011; Li ym. 2016; Ramos Félix ym. 2019) ja nivelkulmien muutosta suorituksen aikana (Seifert ym. 2014). Melonnassa ja soudussa oli taas usein mitattu voimaa, frekvenssiä, impulsseja ja kehon osien liikkeitä (Wang ym. 2017; Umek & Kos 2018; Bonaiuto ym. 2020).

Kaikki tutkimuksissa käytetyt protokollat sisälsivät useita eripituisina suorituksia (uinti 25-100 m, melonta/soutu 100-1000 m) ja erityyppisiä painotuksia vauhdillisesti ja teknisesti. Tutkimuksissa käytettävien protokollien suoritusmäärät vaihtelivat kahdesta (Umek & Kos 2018) kahteentoista (Tessendorf ym. 2011; Wang ym. 2017). Uintiin liittyvissä tutkimuksissa tavoitteena oli selvittää ja tunnistaa uintityylien eroja (Silva ym. 2011; Lecoutere & Puers 2016; Ramos Félix ym. 2019). Melontaa (Wang ym. 2017) ja soutuja (Tessendorf ym. 2011) käsittelevissä tutkimuksissa suoritukset oli taas tehty eri intensiteeteillä.

Riippuen lajista ja tutkimuksen tavoitteesta, tutkimuksissa oli käytetty yhdestä kahteentoista inertiamittausyksikköä. Uinnissa käytettiin useimmiten vain yhtä sensoria, jonka avulla oli tutkittu uimarin vartalon asentoa sekä nopeutta eri uinnin vaiheissa ja eri uintitekniikoilla (Li ym. 2016; Ramos Félix ym. 2019). Toisaalta osassa tutkimuksissa oli tutkittu vasemman ja oikean puolen muuttujia erikseen. Tämän oli erityisen tyypillistä soudussa (Tessendorf ym. 2011) ja melonnassa (Wang ym. 2017; Umek & Kos 2018), mutta myös uinnissa (Rantanen 2017).

Laitteistot oli uinnissa sijoitettu pääasiassa tukittavan selkään. Kiinnitys oli toteutettu joko remmillä (Li ym. 2016; Ramos Félix ym. 2019) tai teipillä (Stamm ym. 2013). Lisäksi oli kehitetty erityisvalmisteisia pukuja, jotka sisältävät laitteistolle sitä varten suunnitellun taskun uimarin selkäpuolelle (Dadashi ym. 2012). Tutkimuksissa inertiamittausyksikkö oli kiinnitetty myös

jalkoihin (Moran & Moran 2015) ja kämmeniin (Rantanen, 2017). Melonnassa laitteisto oli kiinnitetty melanvarteen (Umek & Kos, 2018) tai lukuisiin kohtiin melojan anatomisissa pisteissä (kyynärpäätä, olkapäätä, jne.) ja varusteissa (mela, kanootti) (Wang ym. 2017). Soudussa anturit oli kiinnitetty molempiin airoihin ja veneeseen (Tessendorf ym. 2011). Koska kyse oli vesiturheilulajeista, oli luonnollista, että kaikki käytetyt inertiamittausyksiköt olivat rakenteeltaan vesitiiviitä tai ainakin koteloitu vesitiiviisti.

Yleisin keräystaajuus oli 100 Hz, jota oli käytetty suurimmassa osassa tutkimuksia. Myös alempia keräystaajuuksia, kuten 60 Hz (Tessendorf ym. 2011), 40 Hz (Lecoutere & Puers, 2016) ja 10 Hz taajuutta (Li ym. 2016) oli käytetty. Korkein keräystaajuus oli jopa 500 Hz (Dadashi ym. 2012). Datan tallennus suoritettiin tallentamalla data suoraan mikroprosessorin kautta muistikortille. Yleisimmät tallennusmediat olivat erilaiset nopeaan tallennustekniikkaan perustuvat Flash- ja Secure Digital (SD)-muistit. Data voitiin tallentaa myös anturin sisäisen muistin kautta suoraan pilvipalveluun, jossa dataa voitiin tarkastella ja siirtää tietokoneelle tarkempia analyysia varten (Rantanen 2017).

Kun käytössä oli monia inertiamittausyksiköitä, niiden mittaama data tulee synkronoida aikaleiman avulla. Tutkimuksissa tähän oli erilaisia lähestymistapoja. Soudussa käytettiin erillistä Xbus Master-laitteistoa (Context Recognition Network (CRN) Toolbox) (Tessendorf ym. 2011). Uinnissa käytettiin langattomaan radiotekniikkaan perustuvia järjestelmiä, kuten matalaa 433MHz -taajuutta (Li ym. 2016) ja korkeampaa 2,45 GHz -taajuutta (Bluetooth) (Rantanen 2017).

Data-analyysissa käytettiin lähes poikkeuksetta tieteellisen laskennan työkaluja, kuten Matlab-ohjelmistoa (The MathWorks, USA). Tutkimukset inertiamittausyksiköillä tuottivat paljon numerodataa, joka vaati monenlaisia laskennallisia toimenpiteitä. Tästä syystä aineistoa käsiteltiin usein ohjelmoitavien skriptien avulla. Datan käsittelyvaiheessa käytettiin yleisimpiä suodatimia, joskin käytetyt rajataajuuden vaihtelivat. Suosittu oli alipäästösuodatin, jonka rajataajuutena käytettiin 5 Hz:ä (Multasuo 2019) tai matalampaa 0,5 Hz:ä (Hamming window) (Ramos Félix ym. 2019). Lisäksi käytettiin liikkuvan keskiarvon suodatinta (moving average filter) (Wang ym. 2017) ja DC-suodatinta (Silva ym. 2011).

4 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TUTKIMUSKYSYMYKSET

Melonnassa on tehty biomekaanisia tutkimuksia niin liikeanalyysin kuin suorien voimamittausten avulla. Pääasiassa ne on toteutettu ergometrimelontana laboratorio-olosuhteissa, mutta myös avovedessä tehdyt tutkimukset ovat lisääntymässä. Niissä on usein vertailtu huipputasoin melojia matalamman tason melojiin ja näin pyritty saamaan käsitys siitä, millainen melontasuoritus tuottaa menestystä.

Nykyään onkin olemassa kohtalaisen hyvä käsitys siitä, millaisia biomekaanisia vaatimuksia laji asettaa melojalle ja millaisia ominaisuuksia vaaditaan huippusuoritukseen. Melan liikeraataan ja vedon voiman suuntautumiseen liittyviä mittauksia todellisissa avovesiolosuhteissa ei ole kuitenkaan juuri tehty. Lisäksi monet menetelmät eivät sovellu suoraan siirrettäväksi avovesiolosuhteisiin, puhumattakaan siitä, että niitä voisi käyttää käytännön valmennustyössä päivittäin.

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää, kuinka uintivalmennuksessa käytetty inertiamittausyksikkö (Traineseense SmartPaddle) kykenee mittaamaan ja analysoimaan melanvedon keskeisiä muuttujia ja millainen yhteys niillä on aluksen nopeuteen.

Tutkimuskysymyksiksi ja hypoteeseiksi asetettiin:

KYSYMYS I

Onko inertiamittausyksiköllä mitattujen keskeisten melan vedon muuttujien välillä yhteys anturivarrella mitattuihin muuttujiin?

Hypoteesi: Inertiamittausyksiköllä mitatut keskeiset melan vedon muuttujat korreloivat vahvasti anturivarrella mitattuihin muuttujiin. Inertiamittausyksikkö voidaan pitää luotettava mittarina melonnassa (mukaillen uinnista Dadashi ym. 2012; Seifert ym. 2014)

KYSYMYS II

Miten inertiamittausyksiköllä mitatut keskeiset melanvedon muuttujat, kuten voima, frekvenssi ja voimantuottoaika ovat yhteydessä kanootin kulkunopeuteen?

Hypoteesi: Korkeampi voima ja frekvenssi sekä lyhyempi voimantuottoaika tuottavat suuremman kulkunopeuden (Kendal & Sanders 1992; Brown ym. 2011; Haverinen 2017; Tornberg ym. 2019).

KYSYMYS III

Voiko inertiamittausyksikön avulla havaita melontateknisen muutoksen?

Hypoteesi: Inertiamittausyksikkö pystyy havaitsemaan melontatekniikan eri painotukset ja kuvaamaan sen siten, että sitä voidaan käyttää hyväksi melonnan tekniikkavalmennuksessa (mukaillen uinnista Lecoutere & Puers, 2016).

5 AINEISTO JA MENETELMÄT

5.1 Tutkittavat

Tutkimukseen osallistui yhteensä 15 tutkittavaa, joiden ikä oli keskimäärin 40,8 ($\pm 17,2$) vuotta. Heidän keskiarvopituutensa oli 182,3 ($\pm 7,6$) cm ja keskiarvopaino 81,2 ($\pm 11,6$) kg. Tutkittavista kaksi oli naisia ja 13 miehiä. Tutkittavat rekrytoitiin avoimin tiedottein melonnan tiedotuskanavissa. Kaikki tutkittavat olivat täysi-ikäisiä ja aktiivisia melonnan harrastajia. Tutkittavat osallistuivat tutkimukseen vapaaehtoisesti ja heillä oli oikeus keskeyttää tutkimus missä vaiheessa tahansa. Tutkittavilla tuli olla vähintään kolmen vuoden kokemus melontaharrastuksesta. Heidän tuli olla perusterveitä ja heillä ei saanut myöskään olla melontasuoritusta häiritseviä vammoja tai muita terveydellisiä ongelmia. Tutkimus sai Jyväskylän Yliopiston eettisen toimikunnan puoltavan lausunnon kesäkuussa 2019. Tiedote tutkittaville on liitteessä 1.

5.2 Mittausprotokolla

Mittausprotokolla A koostui melonnasta pelkästään inertiamittausyksiköllä varustetulla mellalla. Protokollan B mittauksissa melonta suoritettiin anturivarren ja inertiamittausyksikön yhdistelmällä eli normaali melontavarsi korvattiin anturivarrella ja lapoina käytettiin samoja inertiamittausyksiköllä varustettuja lapoja kuin protokollassa A.

Molempien protokollien melontasuoritukset olivat identtisiä (taulukko 3). Suorituksia oli yhteensä viisi ja ne jaettiin kahteen osioon. Osio 1 sisälsi normaalia symmetristä melontaa kolmella eri tehoalueella (frekvenssillä). Tutkittavia ohjeistettiin melomaan ensin peruskestävyysnopeutta (PK), jota kuvattiin hitaaksi ja rauhalliseksi, mutta vahvasti eteenpäin vieväksi matkavauhdiksi, jota jaksaa ylläpitää kauan. Toisena nopeutena oli vauhtikestävyys (VK), jota kuvattiin reippaaksi, mutta voimakkaaksi ja tekniikaltaan hyväksi melonnaksi. Viimeisenä oli maksimikestävyys (MK), jota kuvattiin lähes maksimaaliseksi suoritukseksi, jossa nopeus on lähes maksimissa, mutta tekniikka pysyy silti kasassa viimeiseen vetoon asti. Tämä eri melonnan suoritustehoja kuvaava terminologia on yleisesti käytössä melontavalmennuksesta, joten niitä käytettiin myös tässä tutkimuksessa.

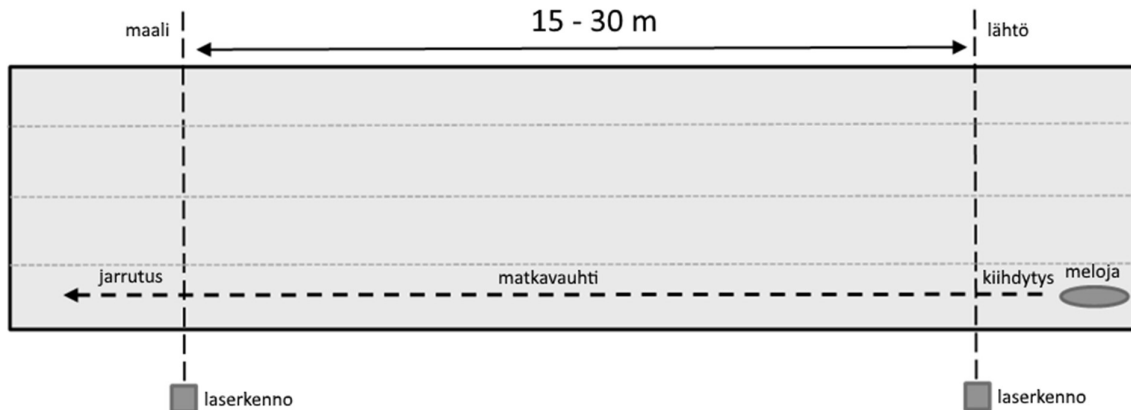
TAULUKKO 3. Tutkimuksen mittausten melontasuoritus lämmittelyineen ja jäähdyttelyineen.

vaihe	suoritus
1.	Lämmittelyt altaan reunalla 5-10 minuuttia
2.	Lämmittelyt vedessä, tuntuman hakeminen välineisiin 5-10 min
3.	Kajakkiin istuutuminen, mittausmelan säätö
4.	Varsinainen suoritus
a.	15 tai 30 metriä vauhdilla PK
b.	15 tai 30 metriä vauhdilla VK
c.	15 tai 30 metriä vauhdilla MK
d.	15 tai 30 metriä vauhdilla VK etupainotteinen iskevä voimantuotto
e.	15 tai 30 metriä vauhdilla VK takapainotteinen viipyvä voimantuotto
5.	Loppujäähdyttely altaan reunalla 5-10 minuuttia

Toinen osio koostui kahdesta melontasuorituksesta, joissa oli erilainen melontatekninen painotus. Toisen osion ensimmäisessä suorituksessa tutkittavalle painotettiin tekniikkaa, jossa on kova iskevä alkuveto (voimantuotto). Toisessa suorituksessa melan vedoissa painotettiin viipyvää ja pitkää voimantuottoa. Mela upotettiin veteen normaalisti, mutta voimantuoton huippua viivästettiin ja veto vedettiin liian pitkälle. Toisen osion molemmat suoritukset melottiin samalla intensiteetillä kuin ensimmäisen osion VK – suoritukset. Melontasuoritusten välinen palautusaika oli 1-2 minuuttia, jonka aikana tutkittavat meloivat rauhallisesti takaisin aloituspaikalle.

5.3 Mittausmenetelmät

Mittaukset suoritettiin kolmessa eri uima-altaassa, joista kaksi oli pituudeltaan 25 metriä ja yksi 50 metriä. Mittausmatka oli 25 metrin altaassa 15 metriä ja 50 metrin altaassa 30 metriä. Altaiden syvyys oli yli kanoottipoolosääntöjen vaatiman 90 cm (ICF 2020). Mittauksen aikana altaassa ei ollut muuta toimintaa, mikä olisi voinut aiheuttaa aaltoja ja vaikuttaa siten melojan suoritustekniikkaan (kuvio 5).



KUVIO 5. Mittausjärjestely, jossa on kuvattuna laservalokennojen sijainti ja suorituksen reitti.

Kanootin kulkunopeus määritettiin altaan reunoille asetettujen laser-valokennojen avulla (omavalmiste ”Laseg”, Kilpa- ja Huippu-urheilun tutkimuskeskus, Jyväskylä, [Suomi](#)), jotka rekisteröivät melojan suoritusajan sekunnin tuhannesosan (ms) tarkkuudella. Valokennojen välinen etäisyys mitattiin mittanauhalla. Melontasuorituksen keskinopeus laskettiin jakamalla melottu matka siihen kuluneella ajalla ($v = s/t$, missä v = nopeus, s = matka ja t = aika). Valokennot oli asetettu reunoille siten, että alus saatiin kiihdytettyä matkanopeuteen ennen ajanoton aloittavaa valokennoporttia ja sitä voitiin ylläpitää ajanoton lopettavalle valokennoportille asti.

Inertiamittausyksikkönä käytettiin Trainesense SmartPaddlea (Trainesense Oy, Tampere, Suomi), joka on uinnissa käytettävä ”älylättäri”. SmartPadden sensorien rekisteröimän datan perusteella voidaan laskea vedossa käytetty voima, liikerata, liikkeen nopeus ja suunta (Auvinen, 2017; Rantanen, 2017). Laitteeseen voidaan tallentaa 40 minuutin pituinen mittaus. SmartPaddle sisältää 3-akselisen kiihtyvyysanturin, 3-akselisen gyroskoopin, 3-akselisen magnetometrin ja paineanturin. Sen keräystaajuutena käytettiin 100 Hz. SmartPadden tallentama data siirrettiin Trainesensen ylläpitämään Analysis Center -pilvipalveluun, jossa sitä analysoitiin Trainesensen kehittämällä tietokanta- ja analyysijärjestelmällä (Auvinen 2017; Hintikka 2017; Rantanen 2017; Trainesense 2020a). SmartPaddle -älylättäri asennettiin lavan (Braca Sport Polo Kinetic max) selkäpuolelle silikoniremmien avulla ja paineanturia varten melan laipan porattiin halkaisijaltaan 15 mm reikä, jota kautta paineanturi rekisteröi vedenpaineen. Älylättäri peitti reiän tiiviisti. Ennen tutkimusta suoritetuissa pilottimittauksissa ei tällä asettelulla todettu olevan haittavaikutuksia melontatekniikkaan (kuva 1).



KUVA 1. Anturivarren venymäliuska-anturi (vasen), kalibrointijärjestely (keskellä) ja SmartPaddlen kiinnitys (oikea).

Anturivartena käytettiin hiilikuituvartta, johon oli kiinnitetty venymäliuska-anturit (omavalmiste, liikuntabiologian laitos, Jyväskylän Yliopisto, Jyväskylä, Suomi). Venymäliuska-anturien tuottama data vahvistettiin kahdella vahvistimella (TRtesti Oy, Suomi) ja tallennettiin tallentavalle AD-muuntimelle (omavalmiste ”LIIKE-kortti”, liikuntateknologia, Jyväskylän yliopisto, Vuokatti) 250 Hz taajuudella. Data siirrettiin tallentimelta tietokoneelle purkuohjelmalla CSV-muodossa, jonka jälkeen dataa voitiin käsitellä Matlabilla (R2019b, The MathWorks, Yhdysvallat). Anturivarsi kalibroitiin käyttäen 0 kg, 4 kg ja 10 kg painoja, joiden avulla määritellyn lineaarisuoran avulla laskettiin vahvistuskerroin. Vahvistuskerroin annettiin LIIKEgoesVISUAL-ohjelmistolle (omavalmiste, liikuntabiologian laitos, Jyväskylän Yliopisto, Jyväskylä, Suomi), joka tallensi raakadatan oikein skaalattuna CSV-muotoon. Anturivarren johtojen vaikutus pyritään minimoimaan ja asettamaan ne niin, etteivät ne haitanneet melontasuoritusta.

5.4 Tulosuuttajat

Inertiamittausyksikkö tuottaa käsiteltyä dataa Trainesensen kehittämän Matlab GUI (Graphical User Interface) kautta. Laskenta-algoritmi on omisteinen ja sitä ei ole julkaistu. Tässä tutkimuksessa käytettiin vedoista koostuvaa keskiarvolaskentaa eli kaikki arvot olivat koko melontasuorituksen aikaisten vetojen keskiarvoja. Dataa käsiteltiin oikean ja vasemman lavan osalta erikseen ja tutkimuksen tulosuuttajat on esitetty taulukossa 4. Tutkimuksessa käsiteltiin vain melonnan matkanopeutta, joten analyyseistä jätettiin pois ensimmäiset vetoparit kokonaan.

Keskiarvovoima määriteltiin keskimääräiseksi kokonaisvoimaksi siltä ajalta, kun lapa on vedessä, kun taas maksimivoimaksi määriteltiin suurin voima, joka havaittiin suorituksen aikana. Voimantuottoaika määriteltiin keskimääräiseksi kestoksi, jonka aikana lapa tuottaa voimaa yli 30 % osuudella vedon maksimivoimasta. Laskenta-algoritmi raportoi myös vedon pituuden, joka on arvio aluksen (tai uimarin) etenemisestä yhden syklin aikana. Inertiamittausyksikkö kykenee tuottamaan dataa myös melan lavan suunnasta, josta laskenta-algoritmi laskee suhteelliset impulssit kaikkiin kolmeen suuntaan (vertikaali, lateraali, forward) ja eteenpäin tuotetun absoluuttisen kokonaisvoiman. Traineesen data on normalisoitu uimarin käden pinta-alalle (100 cm²) (Traineesense 2020a), joka tulosten analyysivaiheessa muutettiin vastaamaan tässä tutkimuksessa käytetyn melan lavan 735 cm² pinta-alaa kertomalla arvot käden ja lavan pinta-alan osamäärällä (7,35).

TAULUKKO 4. Tutkimuksessa käytetyt muuttujat yksikköineen ja kysymyksittäin.

muuttuja [yksikkö]	selite	tutkimuskysymys
frekvensi [1/min]	toistot minuutissa per puoli	1, 3
vedon pituus [m]	arvio etenemisestä melan vedon aikana	1, 2
voima [N]	keskimääräinen kokonaisvoima	1, 2, 3
voima eteen [N]	keskimääräinen kokonaisvoima eteen	1
voima maksimi [N]	maksimi kokonaisvoima	3
impulssi [Ns]	kokonaisimpulssi	1
voimantuottoaika [s]	voimantuottoaika (yli 30% maksimivoimasta)	1, 3
impulssi suunta [%]	osuus kokonaisimpulssista (eteen, lateraali, vertikaali)	1, 2

Anturivarren ja sen tiedonkeruuyksikön (LIIKE-kortti) avulla mitattu ja tallennettu raakadata käsiteltiin Matlab:n avulla. Anturivarren mittaamasta raakadatasta laskettiin keskeiset melan vedon muuttujat (frekvensi, voima, maksimivoima ja voimantuottoaika) samoilla reunaehdoilla kuin inertiamittausyksikön laskenta-algoritmissa.

Ensin anturivarrella mitatusta yhtenäisestä raakadatasta eriteltiin melontasuoritukset ja ne jaettiin omiin csv-tiedostoihin. Tämän jälkeen data suodatettiin käyttäen liikkuvaan-keskiarvon suodatinta, jossa suodatimen ikkunan (window) leveytenä käytettiin arvoa kymmenen (Smith 2003, 277-287; Hintikka 2017). Tämän jälkeen suodatetusta datasta määriteltiin melan vedon maksimivoima ja keskiarvovoima sekä voimantuottoaika. Vasenta ja oikeaa puolta käsiteltiin skriptissä erikseen, jolloin molemmat puolet muodostivat tilastollisessa analyysissä omat datapisteensä.

Muuttujien arvot ilmoitettiin SI-järjestelmän mukaisina yksiköinä (Knight 2016). Voiman yksikkönä käytettiin Newtonia [N] ja absoluuttisen impulssin Newton sekuntia [Ns]. Suhteelliset osuudet ilmoitetaan prosentteina [%], aikamuuttujat sekunteina [s] ja vedon pituuden yksikkönä metriä [m]. Frekvenssin eli tahdin yksikkönä käytettiin vetoa minuutissa [vetoa/60s].

Melan liikerataa ja voimaprofiilia kuvaavat kuviot laadittiin web-pohjaisen Trainesense Analysis Centerin avulla. Melan vedon voimaprofiilien vertailu nopeiden ja hitaiden melojien välillä tehtiin yhdistämällä Analysis Centerin antamat voimantuotto profiilit käsin taulukkolaskentaohjelmassa (Excel, Microsoft Corporation, Yhdysvallat) ja laskemalla niille keskiarvo sekä keskihajonta. Vertailussa melojat jaettiin kahteen ryhmään testiprotokollan nopeimman melontasuorituksen (MK) mediaanin perusteella.

Melan lavan liikerataa kuvaavat kuviot laadittiin vastaavalla menetelmällä. Kuitenkin melan lavan liikeradan tarkastelu koko aineistosta ei ollut mahdollista, sillä luotettavaa dataa ei ollut saatavilla Analysis Centeristä erityisesti korkeimmilla nopeuksilla. Lisäksi upotusprofiilia, eli melan liikeradan kulkua sivuperspektiivistä ei kuvattu veden pintaan asti, sillä osassa tarkasteltavissa tapauksissa radan laskenta ja visualisointi onnistuivat vain osittain.

5.5 Tilastolliset menetelmät

Tuloksien esityksessä keskilukuna käytetään (aritmeettista) keskiarvoa (\bar{x}) ja hajontalukuna keskihajontaa (s & \pm). Lisäksi käytetään 95 % luottamusväliä (lv) määrittämään parametriesitimaatin luotettavuutta. Aineiston tilastolliset analyysit toteutettiin Excel-, R- ja SPSS-ohjelmistoilla. Voimaprofiilia tarkasteltiin visuaalisesti ja sitä verrattiin aikaisempaan tutkimuskirjallisuuteen melonnan biomekaniikasta ja suoritustekniikasta. Laitevalmistaja Trainesense toimi tutkimuksessa teknisenä tukena. Tutkimuksen tilastolliset menetelmät ja muuttujat on esitetty taulukossa 5. Tutkimusasetelma sisälsi kolme eri kysymystä. Ensimmäisessä tutkimuskysymyksessä tarkasteltiin aluksen kulkunopeutta ja melan vedon muuttujia, jolloin tilastollisena menetelmänä käytettiin Spearmannin korrelaatiokerrointa (r), koska data ei ollut kaikilta osin normaalisti jakautunut ja otoskoko oli sopiva Spearmannin järjestyskorrelaatiokertoimen käyttöön (Karhunen 2010; Heikkilä 2014). Aineiston normaalijakautuneisuus tarkastettiin Shapiron-Wilkin testillä (Karhunen, 2010; Metsämuuronen, 2011; Heikkilä, 2014).

Toisessa tutkimuskysymyksessä tarkasteltiin etu- ja takapainotteisten melontasuoritusten keskeisten muuttujien tilastollista eroa Wilcoxonin merkkitestin avulla. Wilcoxon on sopiva testi tämän eron tarkasteluun, sillä aineisto ei ole normaalisti jakautunut ja otoskoko on alle 30, jolloin tulee käyttää ei-parametrisia testejä (Karhunen, 2010; Metsämuuronen, 2011; Heikkilä, 2014). Kolmannessa tutkimuskysymyksessä käytettiin myös Spearmannin korrelaatiokerrointa, jonka avulla tarkasteltiin, millainen suhde oli inertiamittausyksiköllä ja anturivarrella mitatun datan välillä. Wilcoxonin merkkitesteissä (single rank) ja korrelaatiokertoimissa käytettiin 5 % ($p=0.05$), 1% ($p=0,01$) ja 0,1% ($p=0,001$) merkitsevyystasoja. Voimakkaaksi riippuvuudeksi tulkittiin korrelaatiokertoimet, jotka olivat yli 0,7 ($r > 0,7$), kohtalaiseksi, jotka olivat alle 0,7 mutta, yli 0,3 ($0,3 > r > 0,7$) ja heikoksi korrelaatiot, jotka olivat alle 0,3 ($r < 0,3$) (Agresti 2006; Ketokivi 2009; Törmäkangas 2010).

Lisäksi kolmannessa tutkimuskysymyksessä anturivarren ja inertiamittausyksikön laitteistojen välistä eroavaisuutta arvioitiin Bland—Altman analyysin (Martin Bland & Altman 1986) avulla, jossa yhtäpitävyysrajat (limits of agreement) esitettiin 95 % luottamusvälillä. Graafisen esitystavan lisäksi mittauslaitteistojen tulosten yhtäpitävyyttä (absolute agreement) arvioidiin kaksisuuntaisen sisäkorrelaation (two-way random intra-class correlation coefficients, ICC) avulla (Shrout & Fleiss 1979; Koo & Li 2016). Sisäkorrelaatiolla tulosten yhtäpitävyyttä tulkittiin seuraavasti: heikko (< 0.40), kohtalainen ($0.40 - 0.60$), hyvä ($0.60 - 0.75$) tai erinomainen (≥ 0.75) (Cicchetti 1994).

TAULUKKO 5. Tutkimuksen muuttujat, otoskoko ja tilastollinen analyysimenetelmä.

kysymys	1 (nopeus)	2 (etu vs. taka)	3 (IMU vs. anturivarsi)
n	14	14	6
datapisteet	2 (vas/oik) x 3 (nopeutta) x 14 hlö = 84 datapistettä	2 (vas/oik) x 2 (tekniikkaa) x 14 hlö = 56 datapistettä	2 (vas/oik) x 3 (nopeutta) x 6 hlö = 36 datapistettä
muuttujat	frekvenssi [1/min], voima [N], voima eteen [N], vedon pituus [m], voimantuottoaika [s], suhteellinen impulssi [%]	vedon pituus [m], voimantuottoaika [s], 'entry' aika [s], suhteellinen impulssi [%]	maksimivoima [N], keskiarvo voima [N], frekvenssi [1/min], voimantuottoaika [s]
tilasto	Spearmannin järjestyskorrelaatio Wilcoxonin merkkitesti	Wilcoxonin merkkitesti	Spearmannin järjestyskorrelaatio Bland-Altman analyysi Sisäkorrelaatio (ICC)

6 TULOKSET

Taulukossa 6 on kuvattu tutkimusprotokollan mukaisten melontasuoritusten nopeudet. Kolmessa ensimmäisessä suorituksessa nopeus nousi toisiinsa nähden ja erot olivat tilastollisesti merkitseviä ($p=0,001$). Kahdessa viimeisessä suorituksessa, jossa melottiin etupainotteisesti (iskevä voimantuotto) ja takapainotteisesti (pitkä-viipyvä voimantuotto) nopeudet olivat lähellä nopeutta VK ja ne eivät eronneet toisistaan tilastollisesti ($p=0,152$). Tutkimusprotokolla onnistui siis nopeuksien osalta suunnitelmien mukaan.

TAULUKKO 6. Mitattujen nopeuksien keskiarvot, keskihajonnat ja luottamusvälit ($n=14$).

Melontasuoritus	ka [m/s]	kh [m/s]	95 % lv	p-arvo ¹
PK (peruskestävyys)	2,11	0,21	1,98 2,22	} $p = 0,001$ ($Z = -3,184$)
VK (vauhtikestävyys)	2,38	0,11	2,31 2,44	
MK (maksimikestävyys)	2,68	0,28	2,51 2,85	} $p = 0,001$ ($Z = -3,180$)
Etupainotteinen (VK)	2,39	0,18	2,28 2,51	
Takapainotteinen (VK)	2,29	0,16	2,20 2,38	} $p = 0,152$ ($Z = -1,434$)

¹Wilcoxonin merkkitesti, ka = keskiarvo, kh = keskihajonta, lv = luottamusväli

6.1 Anturivarren ja inertiamittausyksikön välinen vertailu

Inertiamittausyksikkö mittasi korkeampi maksimivoima arvoja kuin anturivarsi ($p>0,001$) (taulukko 7). Maksimivoimassa anturivarren keskiarvo oli $125,4 \pm 34,2$ N, kun taas inertiamittausyksikön maksimivoiman keskiarvo oli $152,1 \pm 57,5$ N. Korrelaatio oli kuitenkin vahva 0,84 ($p<0,001$) ja sisäkorrelaatio hyvä 0,64 (LV 95 % 0,21, 0,82) ($p<0,001$). Keskimääräisen voiman osalta, anturivarsi antoi keskiarvoksi $85,4 \pm 25,3$ N ja inertiamittausyksikkö $83,3 \pm 30,3$ N, korrelaation ollessa vahva 0,88 ($p<0,001$) ja sisäkorrelaatiokertoimen ollessa erinomainen 0,86 (0,78, 0,92) ($p<0,001$). Tämä ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä ($p = 0,578$).

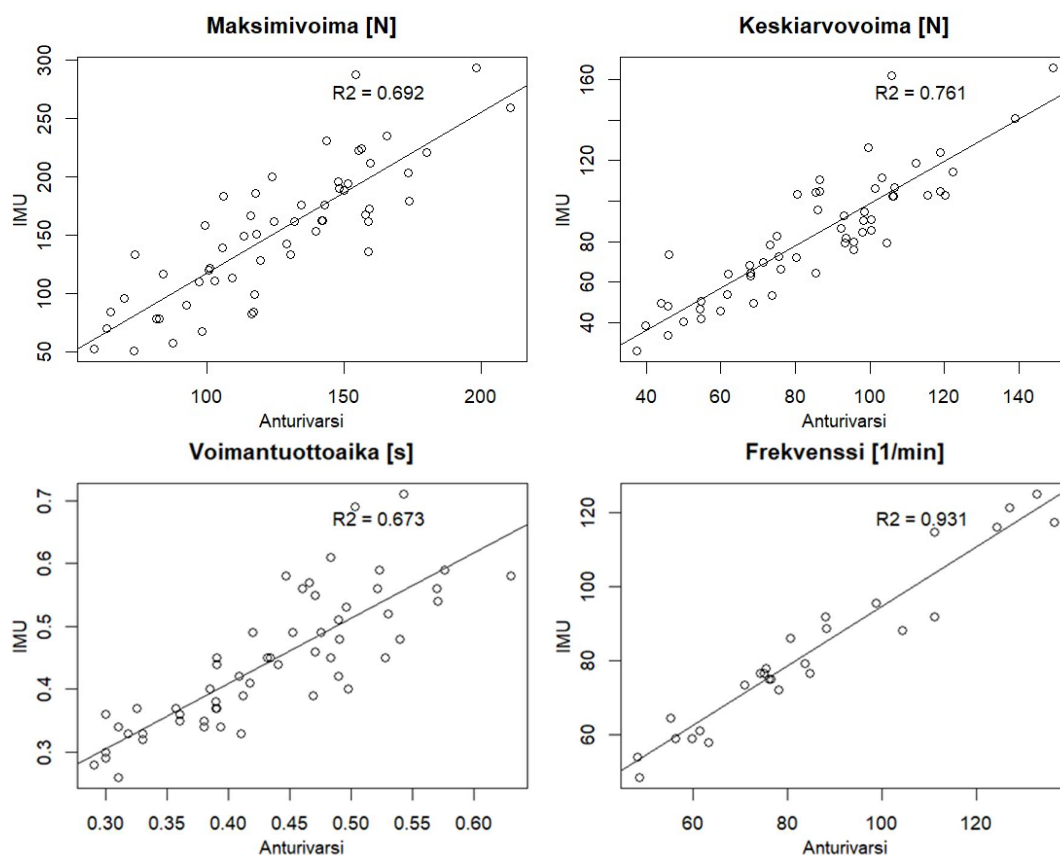
Voimantuottoaika korreloi anturivarren ja IMU:n välillä vahvasti 0,86 ($p<0,001$) eikä eroa keskiarvillisesti ollut kuin 0,01 s. Myös sisäkorrelaatio oli erinomainen 0,80 (0,68, 0,88) ($p<0,001$). Kaikista muuttujista vahvin korrelaatio löytyi melonnan frekvenssistä, jossa se oli 0,95 ($p<0,001$) (kuvio 6). Keskiarvillisesti tulokset frekvenssissä eivät eronneet tilastollisesti ($p=0,750$) ja sisäkorrelaatio oli erinomainen 0,95 (0,89, 0,98) ($p<0,001$).

TAULUKKO 7. Anturivarren ja inertiamittausyksikön (IMU) välinen vertailu keskeisissä melan vedon muuttujissa (n = 6).

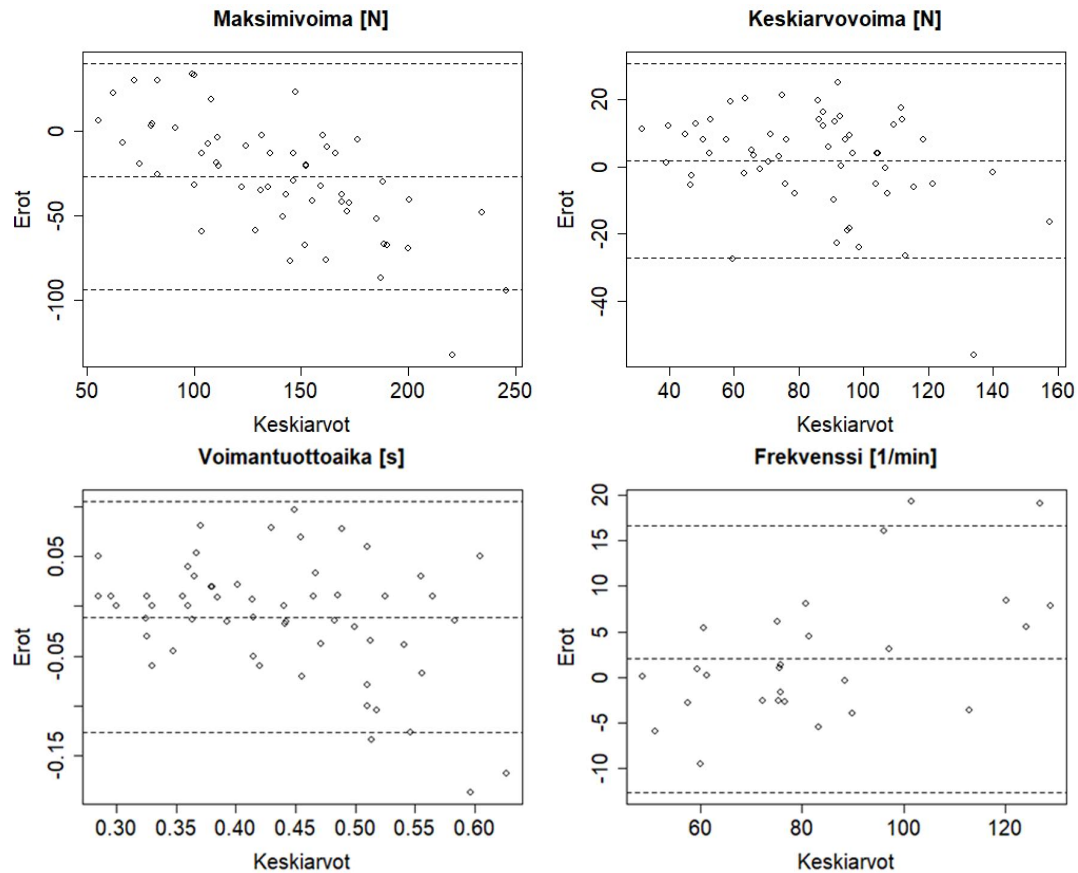
muuttuja	Anturivarsi		IMU		p-arvo ¹	r ²	ICC ³
	ka	kh ±	ka	kh ±			
Maksimivoima [N]	125,4	34,2	152,1	57,5	>0,001	0,84**	0.64**
Keskimääräinen voima [N]	85,4	25,3	83,3	30,3	0,578	0,88**	0.86**
Voimantuottoaika [s]	0,43	0,08	0,44	0,10	0,849	0,86**	0.80**
Frekvenssi [1/min]	83,7	25,7	80,2	20,9	0,750	0,95**	0.95**

ka = keskiarvo, kh = keskihajonta, ¹Wilcoxonin merkkitesti, ²Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin, ³ICC = Intraclass Correlation Coefficient (sisäkorrelaatiokerroin), **Korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä 0,01 tasolla (2-tailed)

Kahden eri laitteiston väliset eroavaisuudet on esitetty Bland-Altman analyysissä (kuvio 7). Analyysin perusteella voidaan todeta yhtäpitävyysrajojen (95%) ulkopuolella ei ole kuin muutamia tapauksia. Systemaattista eroa kahden eri laitteiston välillä on havaittavissa erityisesti maksimivoimassa, muissa muuttujissa systemaattista virhettä eroa ei ole havaittavissa, sillä mitaustulokset ovat jakautuneet tasaisesti 0-tason molemmille puolille.



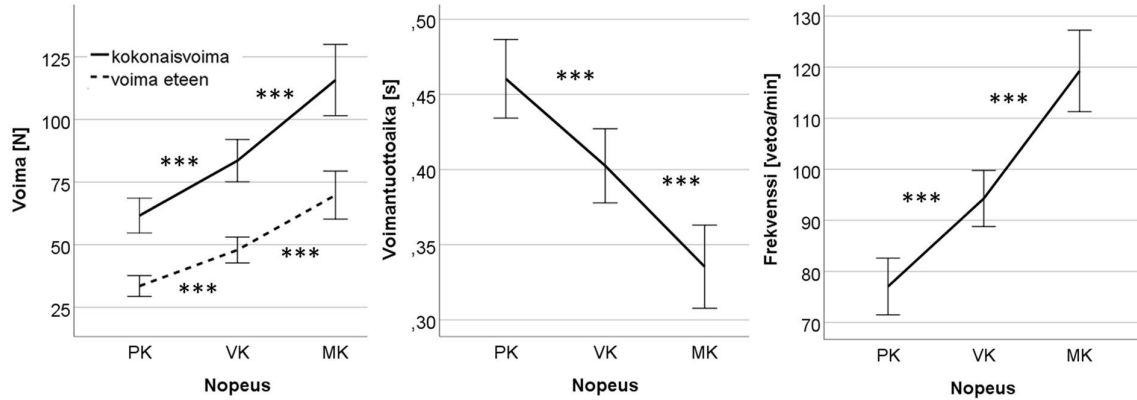
KUVIO 6. Inertiamittausyksikön ja anturivarren väliset hajontakuviot ja R2 arvo.



KUVIO 7. Inertiamittausyksikön ja anturivarren välinen Bland–Altman-analyysi. Keskimäinen viiva kuvaa keskiarvoa ja apuviivat satunnaisvirhettä 95 % luottamusvälillä.

6.2 Melontanopeuteen vaikuttavat tekijät

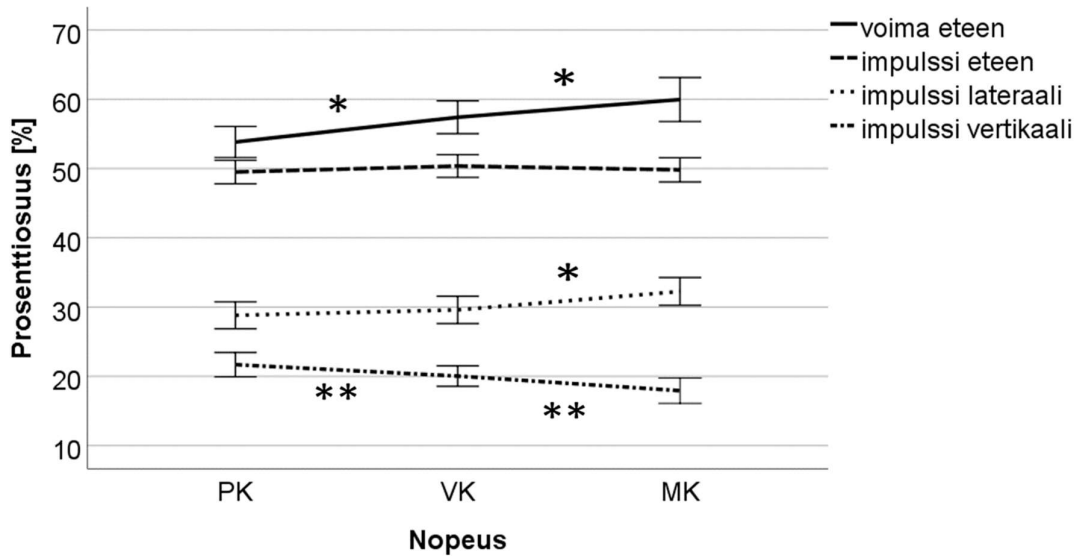
Aluksen nopeuden noustessa melontasuorituksen voima nousi. Matalin voima mitattiin PK-nopeudella (ka $61,6 \pm 17,9$ N), joka erosi tilastollisesti ($Z=-4,62$, $p<0,001$) korkeammasta VK-nopeuden voimasta (ka $83,6 \pm 21,8$ N) ja niin ikään MK-nopeudella (ka $115,8 \pm 32,2$ N) voima oli tilastollisesti suurempi ($Z=-4,29$, $p<0,001$) kuin VK-nopeudella (kuvio 8). Samansuuntaisia tuloksia saatiin myös eteenpäin tuotetun absoluuttinen voiman osalta, joka oli PK-nopeudella (ka $33,5 \pm 10,7$ N) tilastollisesti matalampi ($Z=-4,60$, $p<0,001$) kuin VK-nopeudella (ka $47,9 \pm 13,3$ N), ja vastaavasti MK-nopeudella (ka $73,4 \pm 24,6$ N) tilastollisesti korkeampi ($Z=-4,32$, $p<0,001$) kuin VK-nopeudella.



KUVIO 8. Melontasuoritusten keksimääräinen ja eteenpäin tuotettu voima, voimantuottoaika ja frekvenssi eri nopeuksilla kuvattuna keskiarvona ja 95 % luottamusvälillä.

Voimantuottoaika käyttäytyi päinvastoin (kuvio 8). PK-nopeudella voimantuottoaika (ka $0,46 \pm 0,07$ s) oli tilastollisesti pidempi ($Z=-3,40$, $p<0,001$) kuin VK-nopeudella (ka $0,40 \pm 0,06$ s). MK-nopeuden voimantuottoaika (ka $0,34 \pm 0,07$ s) oli VK-nopeuden voimantuottoaikka tilastollisesti lyhyempi ($Z=-4,38$, $p<0,001$). Frekvenssi taas kasvoi nopeuden noustessa ja frekvenssi PK-nopeudella (ka $75,7 \pm 14,3$ vetoa/min) oli tilastollisesti matalampi ($Z=-4,62$, $p<0,001$) kuin VK-nopeudella (ka $93,5 \pm 13,4$ vetoa/min) ja vastaavasti MK-nopeudella (ka $119,3 \pm 19,8$ vetoa/min) frekvenssi oli tilastollisesti korkeampi ($Z=-4,33$, $p<0,001$) kuin VK-nopeudella (kuvio 8).

Eteenpäin tuotetun voiman ja impulssien suhteelliset osuudet on esitetty kuviossa 9. PK-nopeudella (ka $54,3 \pm 6,0$ %) suhteellinen eteenpäin tuotettu voima oli tilastollisesti matalampi ($Z=-2,37$, $p=0,018$) kuin VK-nopeudella (ka $57,4 \pm 6,1$ %) ja sama suunta jatkui myös MK-nopeudella (ka $60,0 \pm 7,3$ %) ($Z=-2,56$, $p=0,011$). Eteenpäin tuotettu suhteellisen impulssin osuudessa ei tapahtunut muutosta melontanopeuden noustessa. Impulssissa eteenpäin PK-nopeuden (ka $49,5 \pm 4,3$ %) ja VK-nopeuden (ka $50,4 \pm 4,2$ %) välillä ei havaittu eroa ($Z=-0,87$, $p=0,387$), eikä myöskään VK-nopeuden ja MK-nopeuden (ka $49,8 \pm 4,1$ %) välillä ($Z=-0,29$, $p=0,770$).



KUVIO 9. Eteenpäin tuotetun voiman ja eri suuntaisten impulssien suhteellinen vertailu eri melontasuorituksissa kuvattuna keskiarvona ja 95% luottamusvälillä.

Suhteellisessa impulssissa lateraalisuuntaan ei PK-nopeuden (ka $28,7 \pm 4,9$ %) ja VK-nopeuden (ka $29,6 \pm 5,1$ %) välillä havaittu eroa ($Z=-1,71$, $p=0,088$), mutta VK-nopeuden ja MK-nopeuden (ka $32,1 \pm 5,1$ %) lateraalisuunnan suhteellisissa impulssissa havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero ($Z=-2,10$, $p=0,036$). Suhteellisen impulssin osuuden vertikaalisuuntaan havaittiin tilastollisesti vähenevän ($Z=-2,67$, $p=0,008$) PK-nopeuden (ka $21,4 \pm 4,7$ %) ja VK-nopeuden (ka $20,0 \pm 3,8$ %) välillä, kuten myös VK-nopeuden ja MK-nopeuden (ka $18,2 \pm 4,2$ %) välillä ($Z=-2,60$, $p=0,009$).

6.2.1 Keskeisten muuttujien yhteys nopeuteen

Keskeisten melan vedon muuttujien yhteyttä melontasuorituksien nopeuteen tarkasteltiin Spearmannin järjestyskorrelaatiokertoimen avulla. Korrelaatiokertoimet on kuvattu taulukossa 8. Kun tarkastellaan korrelaatiokertoimia siten, että kaikki suoritusnopeudet huomioidaan, voidaan todeta, että lähes kaikki melan vedon muuttujat korreloivat vahvasti tai kohtalaisesti aluksen nopeuden kanssa. Nopeuteen vahvimmin positiivisesti korreloivat frekvenssi ($r=0,857$, $p<0,001$), voima ($r=0,786$, $p<0,001$) ja voima eteen ($r=0,781$, $p<0,001$). Negatiivisesti korreloi voimantuottoaika ($r=-0,755$, $p<0,001$).

TAULUKKO 8. Keskeisten muuttujien korrelaatiokerroimet eri suoritusten nopeuksilla.

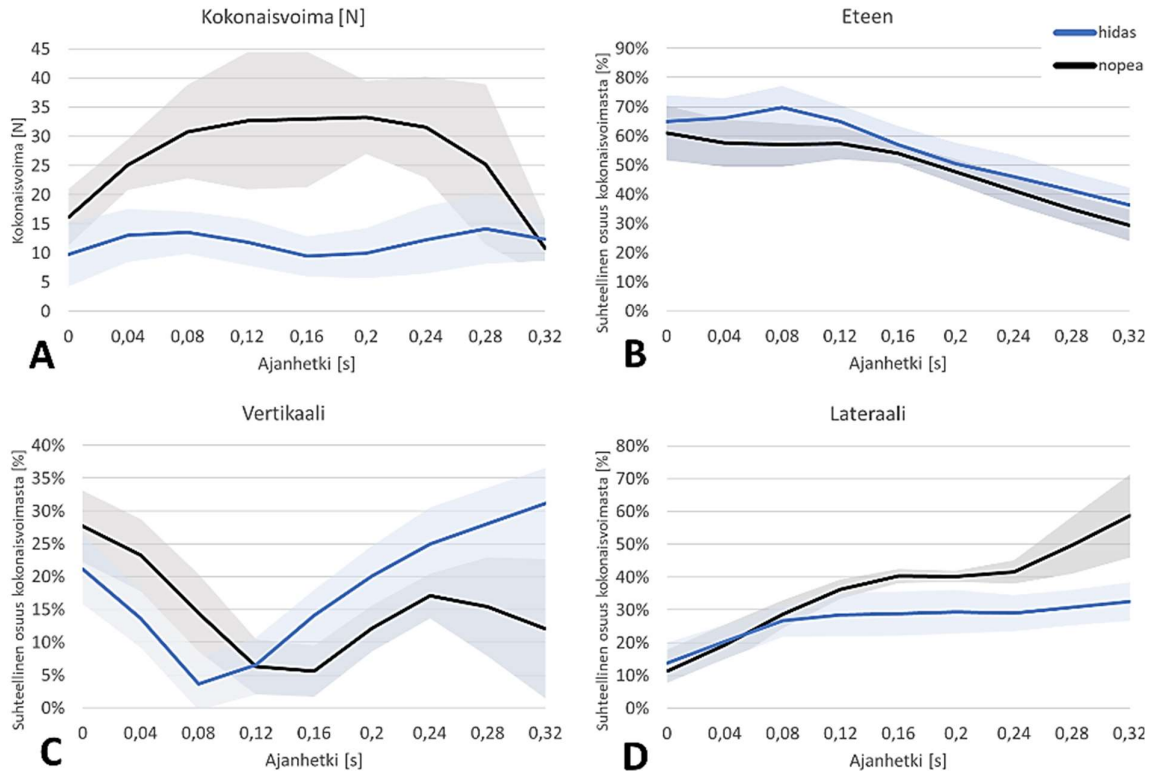
Muuttuja	PK	VK	MK	KAIKKI
Voima [N]	0,605**	0,470*	0,733**	0,786**
Voimantuottoaika[s]	-,539**	-0,404*	-0,558**	-0,755**
Frekvenssi [1/min/puoli]	0,820**	0,337	0,762**	0,857**
Voima eteen [N]	0,495**	0,493*	0,555**	0,781**
Vedon pituus [m]	-0,308	0,126	-0,009	-0,333**
Impulssi abs [Ns]	0,427*	0,521**	0,744**	0,699**
Eteen suhteellinen [%]	-0,148	-0,074	-0,097	0,215
Impulssi lateraali [%]	0,478*	0,108	0,584**	0,433**
Impulssi vertikaali [%]	-0,142	-0,073	-0,459*	-0,365**
Impulssi eteen [%]	-0,149	-0,005	-0,182	-0,091

Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin: korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä **0.01 tasolla (2-tailed) ja *0.05 tasolla (2-tailed)

Kun tarkastellaan nopeinta suoritusta (MK), huomataan, että vahvimmin nopeuteen korreloivat frekvenssi ($r=0,762$, $p<0,001$), voima ($r=0,733$, $p<0,001$) ja absoluuttinen impulssi ($r=0,744$, $p<0,001$). Kun tarkastellaan impulssien suhteellisia osuuksia eri suuntiin, huomataan, että eteenpäin tuotettu impulssi ei korreloinut nopeuden kanssa millään nopeudella, kun taas vertikaalisen ($r=0,584$, $p<0,001$) ja lateraaliset ($r=-0,459$, $p<0,001$) impulssit korreloivat vastakkain erityisesti MK-nopeudella.

6.2.2 Melan vedon voimaprofiili

Vetoja tarkasteltiin keskiarvostetuilla ja ajan suhteen esitetyillä voimaprofiileilla nopeiden ja hitaiden tutkittavien välillä. Tutkittavat jaettiin ryhmiin tutkimusjoukon mediaanin molemmin puolin nopeiden ja hitaiden tasoryhmään (6 suoritusta/ryhmä). Kuviossa 10 on esitetty nopeiden ja hitaiden melojien kokonaisvoimaprofiilit (A) ja suhteelliset voimaprofiilit eriteltynä kolmeen eri voimantuottosuuntaan (B-C) nopeimmassa MK-suorituksessa. Voimantuottoprofiili oli nopeilla tutkittavilla lähellä suorakaiteen muotoa, kun se taas hitailla tutkittavilla oli keskivaiheelta notkolla (kuvio 10. A-kohta).



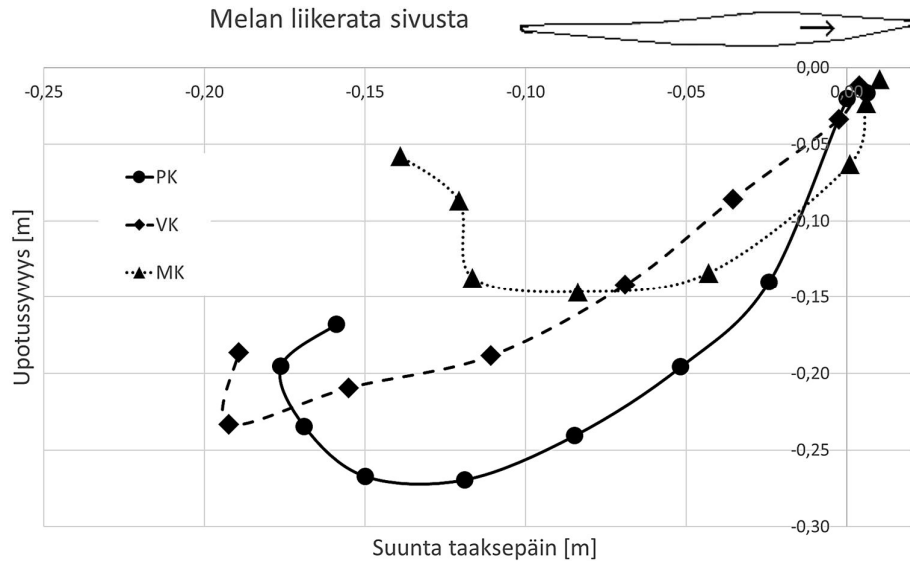
KUVIO 10. Melan vedon voimaprofiili (A) ja suhteelliset osuudet etusuuntaan (B), vertikaalisuuntaan (C) ja lateraalisuuntaan (D) nopeiden ja hitaiden melojien välillä (MK-suorituksessa). Viiva kuvaa joukon keskiarvoa ja haalea alue keskihajontaa (6 suoritusta/tasoryhmä).

Kun tarkastellaan eri voimantuoton suhteellisiä osuuksia nopeimmassa MK-suorituksessa, voidaan todeta, että eteenpäin tuotettu voima (B) ei eronnut nopeilla ja hitailla tutkittavilla vedon eri ajanjaksoina. Suurimmat erot huomattiin vertikaalisuunnassa (C), jossa nopeat melojat tuottivat voimaa vedon alkuvaiheessa suhteellisesti enemmän, mutta 0,12 sekunnin kohdalla tilanne kääntyi vastakkain. Lateraalisuuntaan (D) nopeat melojat tuottivat voimaa suhteellisesti enemmän lähes koko vedon ajan (kuvio 10).

6.2.3 Melan kulkema liikerata

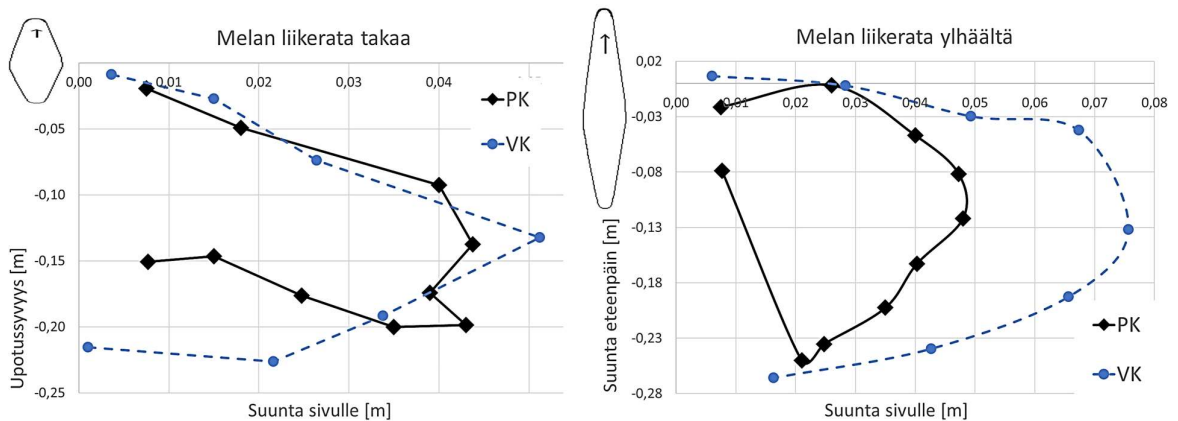
Melan kulkema liikerata vedessä on kuvattu kolmesta eri perspektiivistä: sivusta, takaa ja ylhäältä (mukana 8 suoritusta). Kuviossa 11 on esitetty melan upotusprofiili, jossa on kuvattu

melan liikerata vedessä sivuperspektiivistä siten, että kuvion yläreunassa on vedenpinta. Kuviosta voidaan todeta, että mitä nopeampi melontasuoritus oli, sitä vähemmän melaa upotettiin veteen ja että nopeimmalla MK-nopeudella veto oli selvästi lyhyempi kuin hitaammilla nopeuksilla.



KUVIO 11. Melan lavan upotusprofiili kolmella eri nopeudella (8 suoritusta/nopeus).

Kun tarkastellaan lavan kulkurataa takaa, huomataan, että merkittävää eroa ei ole havaittavissa PK- ja VK-nopeuksien välillä, sillä lapa käy vain noin 1 cm verran ulompana VK-nopeudella. Kun tarkastellaan melan lavan liikerataa yläperspektiivistä, voidaan huomata, että VK-nopeudella melan lapa kulkee lähes 3 cm ulompana kanootin kyljestä kuin PK-nopeudella (kuvio 12).



KUVIO 12. Lavan liikerata vedessä kuvattuna melojan taka- ja yläperspektiivistä kahdella eri melontanopeudella (8 suoritusta/nopeus).

6.3 Melontateknisen muutoksen tunnistaminen inertiamittaussyksiköllä

Melontateknistä muutosta tarkasteltiin keskeisten vedon aikamuuttujien ja suhteellisten impulssin avulla. Voimantuottoaika oli etupainotteisessa melonnassa (ka. $0,35 \pm 0,05$ s) lyhyempi kuin takapainotteisessa melonnassa (ka. $0,41 \pm 0,06$ s) ($Z=-3,66$, $p=0,001$). Etupainotteisessa melonnassa veto oli lyhyempi (ka. $1,43 \pm 0,22$ m) kuin takapainotteisessa (ka. $1,58 \pm 0,29$ m) ($Z=-2,80$, $p=0,005$) ja myös voimantuoton alun viive ('entry') oli lyhyempi ($Z=-2,01$, $p=0,037$) etupainotteisen (ka. $0,035 \pm 0,03$ s) ja takapainotteisen (ka. $0,07 \pm 0,066$ s) melonnan välillä (taulukko 9).

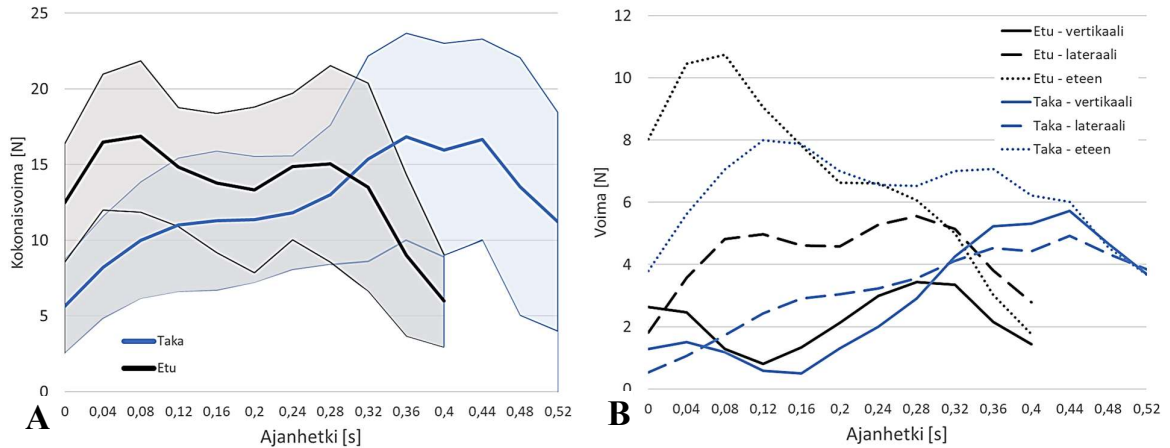
TAULUKKO 9. Vedon muuttujien vertailu etu- ja takapainotteisessa suorituksessa (n = 14).

muuttuja	etupainotteinen		takapainotteinen		p-arvo ¹
	ka	kh	ka	kh	
vedon pituus [m]	1,43	$\pm 0,22$	1,58	$\pm 0,26$	$p=0,005$
voimantuottoaika [s]	0,35	$\pm 0,05$	0,41	$\pm 0,06$	$p=0,001$
'entry' aika [s]	0,04	$\pm 0,03$	0,07	$\pm 0,07$	$p=0,037$
impulssi lateraali [%]	33,0	$\pm 6,0$	29,0	$\pm 5,0$	$p=0,001$
impulssi eteen [%]	51,2	$\pm 4,8$	50,4	$\pm 4,8$	$p=0,376$
impulssi vertikaali [%]	15,9	$\pm 2,6$	21,2	$\pm 4,8$	$p=0,001$

¹Wilcoxonin merkkitesti, ka = keskiarvo, kh = keskihajonta (\pm)

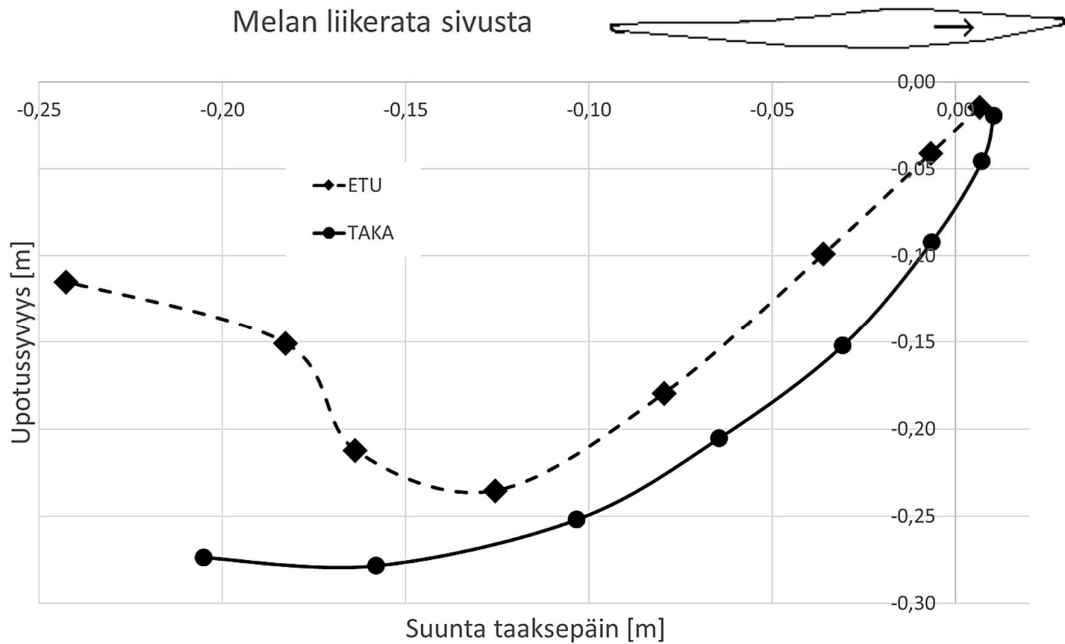
Kun tarkasteltiin impulssien eroja, huomattiin, että eteenpäin tuotetun impulssin suhteellinen osuus etupainotteisessa melonnassa (ka. $51,2 \pm 4,8$ %) ei eronnut ($Z=-0,89$, $p=0,376$) takapainotteisesta (ka. $50,4 \pm 4,8$ %). Lateraalisuunnassa impulssi erosi ($Z=-3,35$, $p=0,001$) etu- (ka. $33,0 \pm 6,0$ %) ja takapainotteisen (ka. $29,0 \pm 5,0$ %) melonnan välillä kuin myös vertikaalisuunnan impulssit erosivat ($Z=-4,11$, $p<0,001$) etu- (ka. $15,9 \pm 2,6$) ja takapainotteisen (ka. $21,2 \pm 4,8$) melonnan välillä.

Melan vedon voimaprofiilista voidaan ensinnäkin todeta, että veto takapainotteisessa melonnassa oli pidempi kuin etupainotteisessa (kuvio 13). Voiman jakautumisesta aikajanelle nähdään myös, että etupainotteisessa melonnassa suurin voima tuotettiin vedon alussa ja takapainotteisessa vedon loppupuolella. Sama trendi nähdään kahden eri tekniikkapainotuksen välillä myös silloin kun verrataan tuotettujen voimien suuntia toisiinsa. Etupainotteisessa voimaa tuotettiin vedon alussa eteen ja lateraalisuuntaan, kun taas takapainotteisessa vedossa voimaa tuotettiin vasta vedon loppupuolella, tosin silloin kaikkiin suuntiin suhteellisen samankaltaisesti.



KUVIO 13. Melanvedon kokonais- (A) ja osittaisvoimaprofiilit (B) etu- ja takapainotteisessa melonnassa kuvattuna keskiarvona (paksu viiva) ja keskihajontana (alue) (7 suoritusta/tekniikkapainotus).

Melan liikerataa sivuperspektiivistä tarkasteltaessa huomataan ero upotussyvydessä kahden eri tekniikkapainotuksen välillä. Takapainotteisessa melonnassa melan veto kulki 3-5 cm syvemmällä kuin etupainotteisessa melonnassa (kuvio 14).



KUVIO 14. Melan lavan upotusprofiili etu- ja tapainotteisessa melontasuorituksessa (8 suoritusta/tekniikkapainotus).

7 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää, kuinka uintivalmennuksessa käytetty inertiamittausyksikkö (Traineseense SmartPaddle) kykenee mittaamaan ja analysoimaan melonnan vedon keskeisiä muuttujia ja millainen yhteys niillä on aluksen nopeuteen. Tutkimuksen hypoteesia vahvistaen frekvenssin ja voiman todettiin olevan keskeisiä aluksen kulkunopeuteen vaikuttavia muuttujia. Kun ne kasvavat, nousee myös aluksen kulkunopeus. Voimantuottoaika on puolestaan yhteydessä nopeuteen vastakkaisella tavalla. Inertiamittausyksikön avulla voidaan tunnistaa ja eritellä erilaiset melontatekniset painotukset vedon ajoitusta kuvaavien muuttujien avulla. Inertiamittausyksikkö antaa luotettavaa tietoa keskeisistä melon vedon muuttujista (maksimivoima, keskimääräinen voima, voimantuottoaika ja frekvenssi), kun sitä verrataan venymäliuska-antureilla varustettuun anturivarteeseen ($r > 0,800$, $p < 0,001$ ja $ICC > 0,60$, $p < 0,001$).

7.1 Keskeiset melon vedon muuttujat

Täysin vastaavalla asetelmalla toteutettuja tutkimuksia ei ole aikaisemmin raportoitu, mutta soveltaen tuloksia voidaan verrata aikaisempaan kirjallisuuteen. Tässä tutkimuksessa anturivarrella mitattiin $125,4 \pm 34,2$ N ja inertiamittausyksiköllä $152,1 \pm 57,5$ N maksimivoima, kun frekvenssi oli noin 85 vetoa minuutissa. Gomes ym. (2015) raportoivat ratamelojille avovedessä toteutetussa tutkimuksessaan maksimivoimaksi miehillä 234 ± 32 N ja naisilla 130 ± 8 N, kun frekvenssi oli 80 vetoa minuutissa ja nopeus 13,6-15,0 km/h. Vastaavasti Nates & Colloud (2015) raportoivat naisratamelojilla melontaergometrillä oikealle kädelle 248 ± 15 N ja vasemalle kädelle 237 ± 15 N. Tornberg ym. (2019) raportoivat niin ikään naismelojien melontaergometrisuorituksessa maksimivoiman vaihtelevan 145-197 N välillä. Voidaan todeta, että aikaisemmin raportoidut maksimivoima-arvot ovat huomattavasti korkeampia kuin tässä tutkimuksessa mitatut. Se voi selittyä erityisesti sillä, että tässä tutkimuksessa käytettiin poolomelontakalustoa ratamelontakaluston sijaan. Lisäksi tässä tutkimuksessa melojat olivat pääasiassa harrastajia, eivätkä ammattiurheilijoita, kuten ratamelontaan keskittyvissä tutkimuksissa usein on. Syy voi olla myös metodologinen, sillä esimerkiksi raaka-datan suodattimen valinta saattaa aiheuttaa merkittäviä eroja. (Huttunen 2014; Hintikka 2017).

7.2 Melontatekniikan tunnistaminen

Melan veto koostuu monista eri vaiheista (entry/catch – pull – exit) ja on olemassa kohtalaisen hyvä käsitys siitä mitä vaiheiden aikana tulisi tapahtua (Michael ym. 2009; McDonnell ym. 2012; Nikonorov 2015). Valmennus tähtääkin ensisijaisesti näiden erittelemiseen, sillä tekniikkavalmennus voi olla vaikeaa hallita liian suurena kokonaisuutena. Uinnissa inertiamittausyksiköllä voidaan tavoitella tarkkaa tietoa juuri tekniikan vaiheista ja pyrkiä erittelemään ne toisistaan (Lecoutere & Puers 2016). Tässä tutkimuksessa pyrittiin luomaan luotettava skenaario kahdesta selkeästi erilaisesta melonnan tekniikkapainotuksesta ja erittelemään niissä keskeisiä vedon aikamuuttujia. Siinä onnistuttiin hyvin, sillä kaikki melanvedon aikamuuttujat erosivat toisistaan eri tekniikkapainotusten välillä. Lisäksi voimantuotto-profiilista voitiin huomata, että takapainotteinen melan veto oli pidempi ja suhteellinen voimapanos korostui erityisesti vedon loppuvaiheessa.

Vaikka inertiamittausyksikön perusteella voitiin tunnistaa erilaiset melontatekniset painotukset, on kuitenkin epäselvää, miten pieniä muutoksia sillä voidaan tunnistaa ja eritellä. Lisäksi on syytä kriittisesti pohtia, millaiset melan vedon ajoitusta kuvaavat muuttujat ovat tekniikkavalmennuksen kannalta tärkeimpiä. Tässä tutkimuksessa muuttujien valikoitumiseen vaikutti selkeästi se, millaista dataa oli käytettävissä. Ainakin ”voimantuoton viive” on mielenkiintoinen uusi muuttuja, jota voidaan hyödyntää melonnan tekniikkavalmennuksessa, sillä vedon aloittaminen edestä on tehokkaan melanvedon kannalta tärkeää (Kendal & Sanders 1992; Limonta ym. 2010).

7.3 Inertiamittausyksikön luotettavuus melonnassa

Melonnan biomekaanisissa tutkimuksissa on laajasti käytetty voimaa mittavia anturivarsia (mm. Gomes ym., 2015; Bonaiuto ym., 2020). Tiedossa on vain yksi tutkimus, jossa käytettiin kaupallista anturivartta (One Giant Leap, Gisborne, New Zealand) (Macdermid ym. 2019; Hogan ym. 2020), muissa tutkimuksissa laitteistot olivat tutkimuslaboratorioiden tai tutkimuslaitosten omavalmisteita. Tässä tutkimuksessa käytetty laitteisto oli kehitetty Suomessa 1990-luvun alussa ja sitä on käytetty kansainvälisesti julkaistuissa melontatutkimuksissa (Mononen

& Viitasalo 1995). Tämän tutkimuksen mittausprotokollassa vertailu laitteistojen välillä tehtiin siten, että molemmat laitteistot olivat käytössä samassa melontasuorituksessa, jolloin inertiamittausyksikön ja anturivarren mittaamia tuloksia voitiin verrata luotettavasti toisiinsa.

Traineesen laskenta-algoritmi on omisteinen, kuten useat muutkin kaupallisten inertiamittausyksiköiden ohjelmistot ja laskenta-algoritmit. Inertiamittausyksiköiden luotettavuuteen vaikuttaa merkittävästi datan käsittely ja esimerkiksi oikean suodattimen valinta (Huttunen 2014; Hintikka 2017). Omisteisen laskenta-algoritmin vuoksi, datan käsittelyn luotettavuuteen ei voida tässä tutkimuksessa ottaa kantaa laajasti. Traineesense Smart Paddle on käytetty uinnissa paljon, ja sillä on mitattu yli 25 000 uintisuoritusta (Traineesense 2020b). Lisäksi uinnissa laitteen reliabiliteetin on osoitettu olevan hyvä, mutta validiteetin osalta lisätutkimuksia tarvitaan (Rantanen 2017).

Tässä tutkimuksessa inertiamittausyksikön antama raakadataa käsiteltiin ja analysoitiin keskiarvallisesti, eli melontasuoritusta käsiteltiin kokonaisuutena. Vertailua ei tehty täten veto-vedosta vaan koko suorituksen keskiarvona. Tähän päädyttiin erityisesti siitä syystä, että Traineesen käyttämä ohjelmisto ilmoittaa tulokset oletuksena keskiarvallisesti, vaikkakin veto-vedolta tarkastelu on myös mahdollista. Lisäksi tutkimuksessa keskityttiin erityisesti valmennukselliseen näkökulmaan, jossa on mielekästä tarkastella melontasuoritusta kokonaisuutena eikä yksittäisinä vetoina, joita melonnan kilpailusuorituksessa on satoja.

Traineesense SmartPaddlen ehdoton vahvuus on inertiamittausyksikköön lisätty paine-anturi (Auvinen 2017; Hintikka 2017; Rantanen 2017; Traineesense 2020a). Tiedossa ei ole vastaavaa laitteistoa. Paine-anturilla on keskeinen merkitys vesiurheilulajeissa, sillä sen avulla voidaan tunnistaa luotettavasti hetki, jolloin melojan mela tai uimarin käsi painuu veteen. Lisäksi sen avulla voidaan tunnistaa upotussyvyys vedenpaineen kasvaessa mitä syvemmälle mennään (Sicilia ym. 2019). Inertiamittausyksikön käyttö ilman paineanturia tuottaisi merkittäviä haasteita laskenta-algoritmile, koska tällöin algoritmin tulisi pystyä tunnistamaan veteen upottamishetki toisella tavalla. Se voi olla erityisen haastavaa myös siksi, että oikeaoppisessa melan vedossa ei pyritä iskemään lapaa veteen (Michael ym. 2009; Nikonorov 2015), joka tuottaisi kaivattua signaalia tunnistusalgoritmile.

Melan liikerataa kuvaavat kuviot eivät tuottaneet kaikilla nopeuksilla riittävän luotettavia tuloksia ja siitä syystä tuloksissa esitetään valikoidusti vain luotettavimmat kuvaajat. Mahdollisia syitä tähän voi olla turbulenti virtaus paine-anturin edessä, joka saattaa häiritä mittaustarkkuutta (Riikonen 2017) tai inertiamittausyksikön liikkuminen, joka voi vääristää mittaustuloksia (Fong & Chan 2010). Inertiamittausyksikön kiinnitystä ja SmartPaddlen laskentaa tulee vielä kehittää tulevaisuudessa paremmin melontaan soveltuvaksi, jotta melan liikerataa voidaan analysoida luotettavasti.

Tuloksista voidaan todeta, että keskiarvovoima, voimantuottoaika ja frekvenssi korreloivat erittäin hyvin inertiamittausyksikön ja anturivarren välillä. Lisäksi niiden absoluuttiset arvot eivät eronneet toisistaan. Sen sijaan anturin ja inertiamittausyksikön mittaamat maksimivoimat erosivat ($p < 0,001$), mutta niiden välinen korrelaatio olikin korkea ($r = 0,84$). Tämä ero maksimivoimassa voi johtua muun muassa anturivarren raakadatan suodattimen valinnasta. Anturivarren raakadataa käsiteltiin Matlab-skriptien avulla, jossa dataa käsiteltiin liikkuvan keskiarvon (movmean) (MathWorks 2020) suodattimen avulla, joka leikkaa maksimiarvoja. Suodatin on kuitenkin valittu kokonaisuus huomioiden siten, että mahdollisimman paljon hyötydataa säästyy ja suuria häiriöpiikkejä ei esiinny (Huttunen 2014; Arenhart ym. 2015; Hintikka 2017).

7.4 Tulosten hyödynnettävyys

Melonta on monipuolinen vesiurheilulaji, joka sisältää paljon alalajeja. Tutkimuskirjallisuus on valtaosin keskittynyt ratamelontaan, joka on olympialaji. Tässä tutkimuksessa käytettiin pääasiassa poolo- ja koskimelonnassa harrastajia sekä poolomelontakalustoa. Tähän päädyttiin siksi, että mittausjärjestely oli luotettavaa toteuttaa uimahalliolosuhteissa ja tutkimukseen saatiin riittävä määrä tutkittavia (vähintään 12) (Julious 2005). Kanoottipoolo on koskimelojien harjoittelumuoto ja harrastajat ovat usein samoja. Ratamelonta eroaa poolo/koskimelonnasta merkittävästi monella tapaa, mutta erityisesti välineistön kannalta (Busta ym. 2018; Michael ym. 2009). Vaikka eroja melontalajien välillä on, poolo/koskimelonta ja ratamelonta ovat kuitenkin samanlaisia perusmelontatekniikan ja melontavalmennuksen osalta. Tästä syystä tässä tutkimuksessa havaittuja tuloksia voidaan hyvin yleistää kaikkiin melonnan alalajeihin.

Melontaa voidaan kuvata keskeisillä melan vedon muuttujilla, joita ovat frekvenssi, maksimi-voima ja/tai impulssi (Baker, 1998). Myös tässä tutkimuksessa keskityttiin näihin muuttujiin. Inertiamittausyksikkö tarjoaa kuitenkin melonnan tekniikan mittaamiseen uusia mahdollisuuksia. Onkin aiheellista pohtia, mitä uutta inertiamittausyksikön käyttö tuo melontavalmennukseen ja melonnan biomekaanisiin tutkimuksiin verrattuna aikaisempaan. Mielenkiintoisimpia näistä ovat uudet muuttujat, joihin päästään käsiksi inertiamittausyksikön avulla, joista tärkeimpiä ovat melan vedon suunta ja melan lavan liikeradan selvittäminen. Tässä tutkimuksessa näistä keskityttiin erityisesti melan vedon suunnan impulssien tarkasteluun. Eri suuntaan tuotettujen impulssien tarkastelusta löytyikin mielenkiintoisia tuloksia, kuten esimerkiksi se, että aluksen nopeuden kasvaessa lateraalisen impulssin suhteellinen osuus kasvaa ja vertikaalisen vähenee. Tämä havainto viittaa siihen, että nopeuden noustessa melan veto suuntautuu entistä enemmän lateraaliseen (aluksen kyljestä ulospäin) suuntaan. Tiedossa ei ole vastaavia tutkimuksia edes melontaergometrillä ja laboratorio-olosuhteissa liikeanalyysin avulla toteutettuna.

Melan lavan liikerataan keskittyvä analyysi oli tässä tutkimuksessa lähinnä kuvaileva, sillä vain noin 50% suorituksista oli saatavissa luotettava melan lavan kulkukaavio. Tässä vaiheessa ne ovatkin melonnan osalta pilottiluonteisia ja niiden hyödyntämistä tulee vielä kehittää. On myös syytä soveltaa kriittisesti melan vedon aikamuuttujia kuten, vedon aloituksen viivettä, käytännön valmennustyössä. On kuitenkin selvää, että melan liikerataan liittyvä analyysi tarjoaa uusia mahdollisuuksia melonnan tekniikkavalmennukseen, kunhan laskentaa melonnan osalta vielä kehitetään.

7.5 Inertiamittausyksikön käytettävyys

Melonta asettaa aina turvallisuusriskin, erityisesti avovesiolosuhteissa. Laitteiston onkin oltava sellainen, että se ei aiheuta kaatumisia. Varteen tehdyt kiinteät laitteistot voivat rikkoutuessaan aiheuttaa varren katkeamisen kovalla suoritusteholla, kun taas lapaan sijoitettu erillinen inertiamittausyksikkö ei aiheuta lapaan erityistä rakennemurtuman riskiä. Lisäksi lapaan kiinnitettyä inertiamittausyksikköä ei tarvitse operoida vesillä, vaan ohjaus voidaan tehdä täysin etänä Bluetooth yhteyden kautta, sillä teoreettinen kantomatka Bluetooth yhteydelle on jopa 100m (Frenzel 2018). Inertiamittausyksikön avulla kokonaista pitkää melontaharjoitusta ei kannata

tallentaa valtavan datamäärän vuoksi. SmartPaddlen avulla voidaan tallentaa harjoituksesta analysoitavia jaksoja veneestä käsin. Jaksot voivat olla esimerkiksi suorituksen alusta sekä lopusta ja näin valmentaja saa käsityksen siitä, millainen vaikutus urheilijan väsymisellä on suoritukseen. Samaa toimintamallia voidaan käyttää myös esimerkiksi 2000 m harjoitusvedossa, jossa voidaan tallentaa ensimmäinen 100 m ja verrata sitä viimeiseen 100 m jaksoon ja näin kehittää tärkeää kilpailusuunnitelmaa (McDonnell 2013).

Laitteistoa voidaan käyttää hyväksi myös miehistöseulonnassa eli melojien valinnassa miehistökanootteihin. Miehistömelonnassa olennaista on erityisesti joukkueen melojien tuottamien voimien synkronointi (Tay & Kong 2018), jota on vaikea havaita videoanalyysistä tai tarkkailemalla veneestä. Laitteiston avulla voidaan tukea miehistömelojien tuntemuksia voiman synkronista. Ongelmana useiden inertiamittausyksiköiden käytössä on kuitenkin niiden keskinäinen synkronointi, joka tulisi toteuttaa jonkin erillisen järjestelmän avulla, kuten soudussa on tehty erillisen synkronointilaitteiston avulla (Tessendorf ym. 2011). SmartPaddlen osalta tämä vaatii vielä kehitystyötä.

Urheilijan kehittymisen seuranta on tärkeää urheilijan polun aikana (Kilpa- ja huippu-urheilun tutkimuskeskus 2020). Inertiamittausyksikkö tarjoaa helppokäyttöisen objektiiviseen mittausdataan perustuvan menetelmän, lajitekniisten biomekaanisten muuttujien seuraamiseen lajissa, jossa tekniikka ja voima ovat tärkeitä (Csaba 2014). Inertiamittausyksiköiden käyttäminen melonnan päivittäisvalmennuksessa voidaan tulevaisuudessa yhdistää myös suuren aineiston hankintaan. Suuren aineiston hankinta esimerkiksi maajoukkueen urheilijoista pitkällä aikavälillä eri matkoilla, eri kalustolla, eri vesiolosuhteissa, antaa valmennukselle ainutlaatuista tietoa lajinvaatimuksista, kilpailuolosuhteiden vaikutuksesta ja melojien suorituskyvyn kehityksestä.

7.6 Tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet

Tämän tutkimuksen hypoteesien määrittämisessä käytettiin hyväksi uinnissa raportoituja tutkimuksia, koska inertiamittausyksiköiden käyttöön melonnassa

tutkimuksia ei ollut tiedossa. Se osaltaan vaikeutti myös tutkimuksen suunnittelua ja rajaamista sekä selkeiden tutkimushypoteesien valintaa. Rajauksessa pyrittiinkin nimenomaan keskittymään keskeisiin melonnan muuttujiin, unohtamatta inertiamittausyksikön tuoman datan uutuusarvoa. Tasapainoilua luotettavien mittaustulosten ja hallittavan työmäärän kanssa jouduttiin kuitenkin tekemään, jonka vuoksi kaikkia muuttujia kuten, puolieroja, ei tarkasteltu. Tutkimuksen luotettavuuden tarkastelua lähestytään kolmesta eri näkökulmasta, jotka ovat tutkimusasetelma, mittauslaitteisto ja tutkimusjoukko.

Tutkimusasetelma. Tutkimuksen ehdottomiin vahvuuksiin lukeutuu inertiamittausyksikön ja venymäliuska-antureilla varustetun varren yhteismittaukset, joissa voitiin kahdella eri menetelmällä mitata samaa suoritusta, samalla koehenkilöllä ja täysin vastaavissa olosuhteissa. Tutkimuksen vahvuuksiin lukeutuu allasmittaukset. Vaikka melontaergometriä on todettu toimivan hyvänä harjoitusvälineenä (Campagna ym., 1986), on niiden käyttö melonnan biomekaanisissa tutkimuksissa ongelmallista. Kanootti on kiikkerä alus ja vesi on elementtinä haastava, joten allasvesimittaukset ovat perusteltuja.

Tutkimusasetelmassa tutkittavia pyydettiin suorittamaan kolme nousevan intensiteetin suoritusta ja tämän jälkeen etu- ja takapainotteinen suoritus. Kahden jälkimmäisen suorituksen onnistumista ei tässä tutkimuksessa kontrolloitu, vaan tutkimuksessa luotettiin siihen, että tutkittavat osaavat tutkijan ohjeiden mukaan suorittaa tekniikkapainotukset. Tämä saattoi osan kohdalla johtaa virheelliseen suoritukseen tai ainakin suoritukseen, joka ei vastannut täysin odotettua lopputulosta. Toisaalta visuaalisella tarkastelulla ei ole mahdollista täysin luotettavasti arvioida melanvedon voimaprofiilia, joten tässä tutkimuksessa voidaan hyväksyä oletamus, että tutkittavat suorittivat melan vedon oman parhaan kykynsä mukaan etu- ja takapainotteisesti. Vaikka melonnan perusvälineistö oli kaikille melojille ennestään tuttu, on mahdollista, että totuttelu-aika muokattuun mittausvälineistöön olisi voinut olla pidempi. Tutkimusmelassa oli kuitenkin melanpituus- ja kulmasäätömahdollisuus, joten jokainen koehenkilö pystyi säätämään melan itselleen sopivaksi.

Tässä tutkimuksessa ei aiheen rajauksen vuoksi tarkasteltu oikean ja vasemman käden eroja, joten tulevaisuudessa tutkimuksissa puolierojen tarkastelu melontavalmennuksen kehittämisen näkökulmasta on suositeltavaa. Melonnassa aluksen kulkunopeuteen vaikuttaa monet eri tekijät kuten kanootin rungonmuoto ja märkäpinta-ala (Pendergast ym. 2005; Mantha ym. 2013; Gomes ym. 2018). Tästä syystä pelkästään nopeusmuuttujan käyttäminen oli ongelmallista ja olisikin voinut olla mielekäästä tarkastella aluksen kiihtyvyyksimuuttujia nopeusmuuttujien lisäksi, kuten uusimissa julkaisuissa on tehty (Bonaiuto ym. 2020). Valitettavasti tässä tutkimusasetelmassa ei käytetty alukseen kiinnitettäviä kiihtyvyyssantureita tai inertiamittausyksiköitä.

Mittauslaitteisto. Toisena tarkasteltavana näkökulmana on käytetty mittauslaitteisto. Tutkimus koostui kolmesta mittausmenetelmästä: nopeutta mittaavista laservalokennoista, inertiamittausyksiköistä (SmartPaddle) ja venymäliuskoilla varustetusta anturivarresta. Inertiamittausyksikön luotettavuutta on käsitelty jo aikaisemmin. Suoritusaikaa mittaavat valokennot oli sijoitettu altaan reunoille ja niiden välinen etäisyys mitattiin keskinopeuden laskemista varten. Valokennot pyrittiin sijoittamaan niin, että kanootin kiihdyttäminen matkanopeuteen onnistuu ennen ensimmäistä valokennoa ja jarruttaminen turvallisesti toisen valokennon jälkeen. Allasolosuhteet kuitenkin aiheuttivat sen, että lähestyvä pääty saattoi vaikuttaa viimeisiin vetoihin. Toisaalta kaikki mittauskanootit olivat puskureilla varustettuja poolokanootteja, joten vaaratilanteita tai liiallista päädyn varomista ei mittausten aikana havaittu.

Tässä tutkimuksessa käytettyä venymäliuskoilla varustettua anturivartta on käytetty aikaisemmin Monosen ja Viitasalon (1995) julkaisemassa tutkimuksessa, jossa se todettiin luotettavaksi. Luotettavuutta lisää se, että käytössä oli mittauslaitteiston raaka-data. Raaka-datan avulla voidaan varmistua siitä, että käytössä on todellinen mittausdata, jota ei ole esimerkiksi suodatettu ja jota voitiin käsitellä numeeriseen laskentaan tarkoitetuilla tietokoneohjelmistoilla. Laitteiston kalibraatio tarkastettiin ennen jokaista mittaustapahtumaa, sillä vahvistimien nollatasoissa oli havaittavissa pientä vaihtelu.

Tutkimusjoukko. Luotettavuuden tarkastelun kolmantena ja viimeisenä näkökulmana on tutkimusjoukko. Tutkimuksen tutkimusjoukoksi valittiin kokeneita melonnan harrastajia, joilla oli

vahva tuntuma tutkimuksessa käytettävästä kalustosta. Käytännössä kaikki tutkittavat olivat aktiivisia koski- ja poolomelajia, jotka harjoittelevat lajia viikoittain. Heidän melontatekniikkansa oli riittävän hyvä ja he pystyivät toistamaan sitä luotettavasti. Voidaan siis olettaa, että tutkittavat kykenivät melomaan suoritustekniikalla, joka oli vakiintunutta ja toistettavaa.

Tutkittavien keski-ikä oli aikaisempaan tutkimuskirjallisuuteen verrattuna korkeahko (40,8 vuotta) ja hajonta suuri ($\pm 17,2$ vuotta), joten mukana oli niin maajoukkue-tason kuin kansainvälisen tason kilpaurheilijoita. Tässä tutkimuksessa sen ei kuitenkaan todettu olevan ongelma, sillä jokainen meloja oli suorituskyylyltään vähintään hyvällä kansallisella tasolla. Melontanopeuksien kontrollointi melojan omaan tuntemukseen perustuen ei olisi onnistunut kokemattomien melojien kanssa. Kuten tämän tutkimuksen nopeusvertailu osoittaa, tutkimusprotokolla onnistui hyvin. Kaikki kolme nousujohteisesti nopeutuvaa suoritusta olivat keskiarvallisestikin toisiaan nopeampia ja tekniikkapainotus suoritukset eivät eronneet nopeudeltaan toisistaan.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tärkeimmät johtopäätökset olivat:

1. Inertiamittausyksikkö antoi luotettavaa tietoa melonnan keskeisistä muuttujista (maksimi-voima, keskimääräinen voima, voimantuottoaika ja frekvenssi), kun sitä verrattiin anturivarteen ($r > 0,800$, $p < 0,001$ ja $ICC > 0,60$, $p < 0,001$).
2. Inertiamittausyksiköllä mitattu korkeampi voima ja frekvenssi sekä lyhyempi voimantuottoaika tuottivat alukselle suuremman kulkunopeuden melonnassa, joka oli suoritettu poolomelontakalustolla uima-altaassa.
3. Inertiamittausyksiköllä voitiin tunnistaa ja erottaa etu- ja takapainotteisen melonnan keskeiset melontatekniikan ajoitusta kuvaavat muuttujat.

Yhteenvetona voidaan todeta, että inertiamittausyksikköä (Traineseense SmartPaddle) voidaan käyttää hyväksi melontavalmennuksessa. Se on helppokäyttöinen ja antaa uutta tietoa erityisesti melonnan tekniikkavalmennuksen tueksi. Laitteistoa tulee kuitenkin kehittää entistä paremmin melontaa palvelevaksi.

Seuraavaksi suositellaan tutkimuksia suuremmilla joukoilla, joissa keskitytään myös muihin melonnan alalajeihin, kuten ratamelontaan. Lisäksi suositellaan vastemuuttujien kuten aluksen kiihtyvyyden laajempaa hyödyntämistä. Tulevaisuuden tavoitteeksi suositellaan melonnan biomekaanisen mallin mittaamista. Näin voidaan ymmärtää koko melanvedon biomekaniikka, alkaen melan lavan veteen kiinnittymisestä, päättyen alusta eteenpäin kuljettavaksi kiihtyvyydeksi.

LÄHTEET

- Agresti, A. 2006. *An Introduction to Categorical Data Analysis: Second Edition*. Teoksessa *An Introduction to Categorical Data Analysis: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/0470114754>.
- Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., & Kasi, V. 2013. Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 1, 256–262. <https://doi.org/10.12720/ijsp.1.2.256-262>.
- Aitken, D. A., & Neal, R. J. 2016. An On-Water Analysis System for Quantifying Stroke Force Characteristics during Kayak Events. *International Journal of Sport Biomechanics*, 8, 165–173. <https://doi.org/10.1123/ijsb.8.2.165>.
- Arenhart, F. A., Certi, G. D., Nardelli, V. C., & Donatelli, G. D. 2015. *Measurement in Research and Industry*. Viitattu 10.6.2020. <https://www.researchgate.net/publication/281641643>.
- Auvinen, A. 2017. *Analysis of swimming technique*. Viitattu 13.6.2020. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017081372>.
- Baker, J. 1998. The Evaluation of Biomechanic Performance Related Factors and On-Water Tests. *International seminar on kayak-canoe coaching and science*, November, 50–66.
- Begon, M., Colloud, F., & Lacouture, P. 2008. Measurement of contact forces on a kayak ergometer with a sliding footrest-seat complex. *Sports Engineering*, 11, 67–73. <https://doi.org/10.1007/s12283-008-0011-2>.
- Bjerkefors, A., Rosén, J. S., Tarassova, O., & Arndt, A. 2019. Three-Dimensional Kinematics and Power Output in Elite Para-Kayakers and Elite Able-Bodied Flat-Water Kayakers. *Journal of Applied Biomechanics*, 35, 93–100.
- Blazevich, A. 2017. *Sports biomechanics: the basics: optimising human performance* (3rd edition). Bloomsbury.
- Bonaiuto, V., Gatta, G., Romagnoli, C., Boatto, P., Lanotte, N., & Annino, G. 2020. A pilot study on the e-kayak system: A wireless DAQ suited for performance analysis in flatwater sprint kayaks. *Sensors (Switzerland)*, 20 (2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s20020542>.
- Brown, M. B., Lauder, M., & Dyson, R. 2011. Notational analysis of sprint kayaking: Differentiating between ability levels. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 11(1), 171–183. <https://doi.org/10.1080/24748668.2011.11868538>.

- Buke, A., Gaoli, F., Yongcai, W., Lei, S., & Zhiqi, Y. 2015. Healthcare algorithms by wearable inertial sensors: A survey. *Teoksessa China Communications*, 12, 1–12. Editorial Department of China Communications. <https://doi.org/10.1109/CC.2015.7114054>.
- Bulgan, C., Ersoz, G., Bingul, B. M., Mengutay, S., & Aydin, M. 2017. Three- Dimensional angular kinematics of 200m flat-water sprint kayaking. *Acta Medica Mediterranea*, 33 (2), 291–294. https://doi.org/10.19193/0393-6384_2017_2_043.
- Busta, J., Tufano, J. J., Suchý, J., & Bílý, M. 2018. Anthropometric, physiological and performance profiles of Elite and Sub-Elite Canoe Slalom Athletes. 12, 9–17.
- Campagna, P.D., Holt, L.E. & Alexander, A.B. 1986. Conference Proceedings Archive. 108-114.
- Chambers, R., Gabbett, T. J., Cole, M. H., & Beard, A. 2015. The Use of Wearable Microsensors to Quantify Sport-Specific Movements. *Sports Medicine*, 45, 1065–1081. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0332-9>.
- Cicchetti, D. V. 1994. Guidelines, Criteria, and Rules of Thumb for Evaluating Normed and Standardized Assessment Instruments in Psychology. *Psychological Assessment*, 6, 284–290. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.6.4.284>.
- Csaba, S. 2014. Canoe sprint coaching manual. Teoksessa Level 1. International Canoe Federation, ICF.
- Cuzzolin, F., Sapienza, M., Esser, P., Saha, S., Franssen, M. M., Collett, J., & Dawes, H. 2017. Metric learning for Parkinsonian identification from IMU gait measurements. *Gait and Posture*, 54, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.02.012>.
- Dadashi, F., Crettenand, F., Millet, G. P., & Aminian, K. 2012. Front-Crawl Instantaneous Velocity Estimation Using a Wearable Inertial Measurement Unit. *Sensors*, 12 (10), 12927–12939. <https://doi.org/10.3390/s121012927>.
- Du, J., Gerdtnan, C., & Lindén, M. 2018. Signal quality improvement algorithms for MEMS gyroscope-based human motion analysis systems: A systematic review. *Sensors*, 18. <https://doi.org/10.3390/s18041123>.
- Espinosa, H. G., Lee, J., & James, D. A. 2015. The Inertial Sensor: a Base Platform for Wider Adoption in Sports Science Applications. *Journal of Fitness Research*, 4, 13–20. <https://www.researchgate.net/publication/277598266>.
- International Canoe Federation. ICF. 2020. Canoe Sprint Competition Rules. Viitattu 10.6.2020. www.canoeicf.com.

- Ramos Félix, E., Silva, H.P., Olstad, B.H., Cabri, J. & Lobato Correia, P. 2019. SwimBIT: A Novel Approach to Stroke Analysis During Swim Training Based on Attitude and Heading Reference System (AHRS). *Sports*, 7, 238. <https://doi.org/10.3390/sports7110238>.
- Figueiredo e Silva, P., Richter, P., Talvitie, J., Laitinen, E., & Lohan, E. S. 2018. Challenges and solutions in received signal strength-based seamless positioning. *Teoksessa Geographical and Fingerprinting Data for Positioning and Navigation Systems: Challenges, Experiences and Technology Roadmap*, 249–285. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813189-3.00013-7>.
- Fong, D. T. P., & Chan, Y. Y. 2010. The use of wearable inertial motion sensors in human lower limb biomechanics studies: A systematic review. *Sensors (Switzerland)*, 10, 11556–11565. <https://doi.org/10.3390/s101211556>.
- Frenzel, L. E. 2018. Networking: Wired and Wireless. *Teoksessa Electronics Explained*, 217–242. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811641-8.00009-6>.
- García-Pallarés, J., Carrasco, L., Díaz, A., & Sánchez-Medina, L. 2009. Post-season detraining effects on physiological and performance parameters in top-level kayakers: Comparison of two recovery strategies. *Journal of Sports Science and Medicine*, 8 (4), 622–628.
- Gomes, B., Machado, L., Ramos, N., Conceição, F., Sanders, R., Vaz, M., Vilas-Boas, J. P., & Pendergast, D. R. 2018. Effect of wetted surface area on friction, pressure, wave and total drag of a kayak. *Sports Biomechanics*, 17, 453–461. <https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1357748>.
- Gomes, B., Ramos, N., Conceição, F., Sanders, R., Vaz, M., & Vilas-Boas, J. P. 2015. Paddling force profiles at different stroke rates in elite sprint kayaking. *Journal of Applied Biomechanics*, 31 (4), 258–263. <https://doi.org/10.1123/jab.2014-0114>.
- Gomes, B., Viriato, N., Sanders, R., Conceição, F., & Vaz, M. 2011a. Analysis of single and team kayak acceleration. *Portuguese Journal of Sport Sciences*, 11 (2), 255–257.
- Gomes, B., Viriato, N., Sanders, R., Conceição, F., & Vaz, M. 2011b. Analysis of the on-water paddling force profile on an elite kayaker. *Portuguese Journal of Sport Sciences*, 11, 259–262.
- Harrison, S. M., Cleary, P. W., & Cohen, R. C. Z. 2019. Dynamic simulation of flat water kayaking using a coupled biomechanical-smoothed particle hydrodynamics model. *Human Movement Science*, 64, 252–273. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.02.003>.
- Haverinen, M. 2017. Jalkojen voima, iskun voima ja melonnan ajoitus nuorilla ja kokeneilla

- melojilla melontaergometrissa. Biomekaniikan Pro gradu -tutkielma. Liikuntabiologia. Liikuntatieteellinen tiedekunta. Jyväskylän yliopisto.
- Heikkilä, T. 2014. Tilastollinen tutkimus. Edita.
- Helmer, R. J. N., Farouil, A., Baker, J., & Blanchonette, I. 2011. Instrumentation of a kayak paddle to investigate blade/water interactions. *Procedia Engineering*, 13, 501–506. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.121>.
- Hintikka, T. 2017. Uimatyylien luokittelu sensoridatasta. Kandidaatintyö. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Hogan, C., Binnie, M. J., Doyle, M., Lester, L., & Peeling, P. 2020. Comparison of training monitoring and prescription methods in sprint kayaking. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15, 654–662. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0190>.
- Huttunen, H. 2014. Signaalinkäsittelyn perusteet. *Opetusmoni*, 8, 33. Tampereen teknillinen yliopisto. Signaalinkäsittelyn laitos.
- IEEE. 2000. IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology. Conference Record of the 2012 Ieee International Symposium on Electrical Insulation 27. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6754111>.
- International Olympic Committee. 2020a. Canoe sprint. Viitattu 10.6.2020. <https://www.olympic.org/canoe-sprint>.
- International Olympic Committee. 2020b. Olympic results. Viitattu 10.6.2020. <https://www.olympic.org/canoe-sprint>.
- InvenSense. 2016. MPU-9250 Product Specification Revision 1.1. Viitattu 10.4.2020. www.invensense.com.
- Jackson, P. S. 1995. Performance prediction for olympic kayaks. *Journal of Sports Sciences*. 13. 239-245.
- Julious, S. A. 2005. Sample size of 12 per group rule of thumb for a pilot study. *Pharmaceutical Statistics*, 4, 287–291. <https://doi.org/10.1002/pst.185>.
- Kalman, R. E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 82, 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>.
- Karhunen, V. 2010. IBM SPSS statistics : perusteet : päivitetty versiolle 18 (PASW Statistics). Oulun yliopisto, tietohallinto.
- Kendal, S. J., & Sanders, R. H. 1992. The Technique of Elite Flatwater Kayak Paddlers Using

- the Wing Paddle. *International Journal of Sport Biomechanics*, 8(3), 233–250.
<https://doi.org/10.1123/ijsb.8.3.233>.
- Ketokivi, M. 2009. Tilastollinen päättely ja tieteellinen argumentointi. *Gaudeamus*.
- Kilpa- ja huippu-urheilun tutkimuskeskus, KIHU. 2020. Urheilijan polku. Viitattu 12.7.2020.
<https://kihuenergia.kihu.fi/urapolku/>.
- Knight, R. D. 2016. *Physics for Scientists and Engineers: A Strategic Approach with Modern Physics*. Pearson Education Limited.
- Koo, T. K., & Li, M. Y. 2016. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15, 155–163.
<https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>.
- Lecoutere, J., & Puers, R. 2016. Tracking Elite Swimmers in Real Time with Wearable Low-power Wireless Sensor Networks. *Procedia Engineering*, 147, 627–631.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.259>.
- Lee, C. H., & Nam, K. J. 2012. Analysis of the kayak forward stroke according to skill level and knee flexion angle. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 4, 41–48.
- Li, R., Cai, Z., Lee, W., & Lai, D. T. H. 2016. A wearable biofeedback control system based body area network for freestyle swimming. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, October, 1866–1869. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591084>.
- Limonta, E., Squadrone, R., Rodano, R., Marzegan, A., Veicsteinas, A., Merati, G., & Sacchi, M. 2010. Tridimensional kinematic analysis on a kayaking simulator: Key factors to successful performance. *Sport Sciences for Health*, 6, 27–34.
<https://doi.org/10.1007/s11332-010-0093-7>.
- Macdermid, P. W., Gilbert, C., & Jayes, J. 2019. Using a kayak paddle power-meter in the sport of whitewater slalom. *Journal of Human Sport and Exercise*, 15.
<https://doi.org/10.14198/jhse.2020.151.10>.
- Magalhaes, F. A. de, Vannozzi, G., Gatta, G., & Fantozzi, S. 2015. Wearable inertial sensors in swimming motion analysis: a systematic review. *Journal of Sports Sciences*, 33, 732–745.
<https://doi.org/10.1080/02640414.2014.962574>.
- Mann, R. V., & Kearney, J. T. 1980. A biomechanical analysis of the olympic-style flatwater kayak stroke. *Teoksessa Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12, 3, 183–188.

- <https://doi.org/10.1249/00005768-198023000-00010>.
- Mantha, V. R., Silva, A. J., Marinho, D. A., & Rouboa, A. I. 2013. Numerical simulation of two-phase flow around flatwater competition kayak design-evolution models. *Journal of Applied Biomechanics*, 29, 270–278. <https://doi.org/10.1123/jab.29.3.270>.
- Manuel Stephan, A., & Nahm, K. S. 2006. Review on composite polymer electrolytes for lithium batteries. *Teoksessa Polymer* 47, 16, 5952–5964. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.05.069>.
- Martin Bland, J., & Altman, D. G. 1986. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327, 307–310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8).
- Martin, T. P., & Bernfield, J. S. 1980. Effect of stroke rate on velocity of a rowing shell. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12, 250–256. <https://doi.org/10.1249/00005768-198024000-00004>.
- MathWorks. 2020. Moving mean filter. Viitattu 25.7.2020. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/movmean.html>.
- McDonnell, L. 2013. The effect of stroke rate on performance in flat-water sprint kayaking. Doctoral Thesis. Auckland University of Technology. <http://aut.researchgateway.ac.nz/handle/10292/6028>.
- Mcdonnell, L. K., Hume, P., & Nolte, V. 2012. An observational model for biomechanical assessment of sprint kayaking technique. *Sports Biomechanics*, 11:4, 507-523, <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.724701>.
- McGee, L. A., & Schmidt, S. F. 1985. Discovery of the Kalman Filter as a Practical Tool for Aerospace and Industry. NASA Technical Memorandum, November, 21. Viitattu 25.7.2020. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19860003843_1986003843.pdf.
- Metsämuuronen, J. 2011. Tutkimuksen tekemisen perusteet ihmistieteissä (2. uud. p.). Methelp.
- Michael, J. S., Smith, R., & Rooney, K. B. 2009. Determinants of kayak paddling performance. *Sports Biomechanics*, 8, 167–179. <https://doi.org/10.1080/14763140902745019>.
- Mononen, H., & Viitasalo, J. 1995. Stroke parameters and kayak speed during 200m kayaking. Research Institute for Olympic Sports, Jyväskylä, Finland.
- Moran, K., & Moran, D. 2015. Inertial measurement units (IMUs) in drowning prevention: An exploratory study. *International Journal of Aquatic Research and Education*, 9, 257–272.

- <https://doi.org/10.1123/ijare.2015-0031>.
- Morgoch, D., Galipeau, C., & Tullis, S. 2016. Sprint Canoe Blade Hydrodynamics-Modeling and On-water Measurement. *Procedia Engineering*, 147, 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.295>.
- Multasuo, J.-P. 2019. Menetelmän kehitys ja uinnin päivittäisvalmennukseen soveltuvuuden testaaminen. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, Biomekaniikan pro gradu –tutkielma.
- Nates, F., & Colloud, F. 2015. A 6-Component Paddle Sensor To Estimate Kayaker’s Performance: Preliminary Results. 33rd International Conference on Biomechanics in Sports, 683–686.
- Nikonorov, A. 2015. Paddling technique for 200m sprint kayak. Teoksessa M. Isorna, F. & Alacid, J.J. (toim.). 2015. Training sprint canoeing. Progress in improving the physical, technical, tactical, psychological, nutritional and technological preparation. 2.0 Editoria. Espanja.
- Nilsson, J. E., & Rosdahl, H. G. 2014. New devices for measuring forces on the kayak foot bar and on the seat during flat-water kayak paddling: A technical report. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9, 365–370. <https://doi.org/10.1123/IJSP.2012-0333>.
- Nilsson, J. E., & Rosdahl, H. G. 2016. Contribution of leg-muscle forces to paddle force and kayak speed during maximal-effort flat-water paddling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11, 22–27. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0030>.
- Niu, L., Kong, P. W., Tay, C. S., Lin, Y., Wu, B., Ding, Z., & Chan, C. C. 2019. Evaluating on-water kayak paddling performance using optical fiber technology. *IEEE Sensors Journal*, 19, 11918–11925. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2927304>.
- Suomen Olympiakomitea. 2020. Melonta. Viitattu 1.3.2020. <https://www.olympiakomitea.fi/huippu-urheilu/olympiahistoria/olympialajit/kesalajit/melonta/>.
- Passaro, V. M. N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., & Campanella, C. E. 2017. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective. *Sensors* 17, 10. <https://doi.org/10.3390/s17102284>.
- Pendergast, D., Mollendorf, J., Zamparo, P., Termin, A., Bushnell, D., & Paschke, D. 2005. The influence of drag on human locomotion in water. *Undersea and Hyperbaric Medicine*,

32, 45–57.

- Rantanen, A. 2017. Käsivedon muuttujien yhteys viidenkymmenen metrin vapaauintiin aikaan: uuden anturitekniikkaan perustuvan tehomittarin testaus. *Liikuntabiologia*, Jyväskylän yliopisto, Biomekaniikan kandidaatintutkielma.
- Razavian, R. S., Greenberg, S., & McPhee, J. 2018. Biomechanics imaging and analysis. Teoksessa *Encyclopedia of Biomedical Engineering*, 1–3, 488–500. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.99961-6>.
- Riikonen, L. 2017. Neulalämmönsiirrinputkien ja lämmönsiirtokertoimen painehäviön määrittäminen. Diplomityö. LUT-yliopisto
- Sabatini, A. M. 2011. Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing. *Sensors*, 11, 1489–1525. <https://doi.org/10.3390/s110201489>.
- Sanderson, B., & Martindale, W. 1986. Towards optimizing rowing technique. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 18, 454–468. <https://doi.org/10.1249/00005768-198608000-00016>.
- Seifert, L., L’Hermette, M., Komar, J., Orth, D., Mell, F., Merriaux, P., Grenet, P., Caritu, Y., Héroult, R., Dovgalecs, V., & Davids, K. 2014. Pattern recognition in cyclic and discrete skills performance from inertial measurement units. *Procedia Engineering*, 72, 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.033>.
- Seiler, S. 2002. A biomechanical review of factors affecting rowing performance: Commentary. *British Journal of Sports Medicine*, 36, 402.
- Shrout, P. E., & Fleiss, J. L. 1979. Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychological bulletin*, 86, 420–428.
- Sicilia, I., Aparicio, S., Frutos, B., Muñoz, E., González, M., & Anaya, J. J. 2019. A multisensor system for the characterization of the field pressure in terrain. Accuracy, response, and adjustments. *Sensors*, 19, 3942. <https://doi.org/10.3390/s19183942>.
- Silva, A. S., Salazar, A. J., Borges, C. M., & Correia, M. V. 2011. Wearable Monitoring Unit for Swimming Performance Analysis. *Communications in Computer and Information Science*, 273, 80–93. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29752-6>.
- Smith, S. W. 2003. Moving Average Filters. Teoksessa *Digital Signal Processing*, 277–284. Newnes. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7444-7/50052-2>.
- Sprigings, E., McNair, P., Mawston, G. 2006. A method for personalising the blade size for competitors in flatwater kayaking. *Sports Eng* 9, 147–153.

<https://doi.org/10.1007/BF02844116>

- Stamm, A., James, D. A., & Thiel, D. V. 2013. Velocity profiling using inertial sensors for freestyle swimming. *Sports Engineering*, 16, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12283-012-0107-6>.
- Sturm, D., Yousaf, K., & Eriksson, M. 2010. A wireless, unobtrusive kayak sensor network enabling feedback solutions. 2010 International Conference on Body Sensor Networks, BSN 2010, 159–163. <https://doi.org/10.1109/BSN.2010.24>.
- Tay, C. S., & Kong, P. W. 2018. A video-based method to quantify stroke synchronisation in crew boat sprint kayaking. *Journal of Human Kinetics*, 65, 45–56. <https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0038>.
- Tessendorf, B., Gravenhorst, F., Arnrich, B., & Troster, G. 2011. An IMU-based sensor network to continuously monitor rowing technique on the water. Proceedings of the 2011 7th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, ISSNIP 2011, 253–258. <https://doi.org/10.1109/ISSNIP.2011.6146535>.
- Törmäkangas, T. 2010. Tutkimusaineiston analyysi: tilastollis-empiirinen tutkimus. Viitattu 25.6.2020. <http://users.jyu.fi/~tatima/TER/KTE139.htm>.
- Tornberg, B., Håkansson, P., Svensson, I., & Wollmer, P. 2019. Forces applied at the footrest during ergometer kayaking among female athletes at different competing levels - A pilot study. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 11 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1186/s13102-018-0113-5>.
- Trainese. 2020a. SmartPaddle Data Explained Trainese. Viitattu 22.7.2020. https://smartpaddle.trainese.com/documentation_category/manuals/
- Trainese. 2020b. What is Trainese about? Viitattu 20.6.2020. <https://smartpaddle.trainese.com/about-us/>.
- Umek, A., & Kos, A. 2018. Wearable sensors and smart equipment for feedback in watersports. *Procedia Computer Science*, 129, 496–502. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.03.030>.
- Vainio, T. 2016. Inertiamittausjärjestelmä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Victorino, M. N., Jiang, X., & Menon, C. 2018. Wearable Technologies and Force Myography for Healthcare. *Teoksessa Wearable Technology in Medicine and Health Care*, 135–152. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811810-8.00007-5>.
- Wang, Z., Wang, J., Zhao, H., Yang, N., & Fortino, G. 2017. CanoeSense: Monitoring canoe sprint motion using wearable sensors. 2016 IEEE International Conference on Systems,

- Man, and Cybernetics, SMC 2016 - Conference Proceedings, 644–649.
<https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844313>.
- WC Sprint Coaches Technical Group. 2001. Canoe Racing Training Zones. Viitattu 10.6.2020.
<http://www.kayaksport.net/downloads/TrainingZones.pdf>.
- You, Z. 2018. Miniature Inertial Measurement Unit. Teoksessa Space Microsystems and Micro/nano Satellites, 233–293. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812672-1.00007-2>.