

**TUTKALLA MITATUN LÄHTÖNOPEUDEN VALIDITEETTI PÄÄN YLI ETEEN
-KUNTOPALLONHEITTOTESTISSÄ**

Liisa Rannikko

Biomekaniikan kandidaatintutkielma

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Syksy 2023

TIIVISTELMÄ

Rannikko, L. 2023. Tutkalla mitatun lähtönopeuden validiteetti pään yli eteen -kuntopallonheitotestissä. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, biomekaniikan kandidaatintutkielma, 29 s.

Heiton lähtönopeus on tärkeä suorituskykymuuttuja yliolanheittolajeissa. Suurnopeuskameroilla toteutettu liikeanalyysi on tarkin menetelmä mittaamaan lähtönopeutta, mutta harjoittelu- ja kilpailuolosuhteissa käytetään käytännöllisyyden vuoksi useimmiten tutkalaitetta. Mittalaitteen validiteettia voidaan arvioida tarkastelemalla mittalaitteen tulosten korrelaatiota ilmiötä parhaiten kuvaavan mittalaitteen eli kriteeristandardin kanssa. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää tutkalaitteen mittaaman lähtönopeuden validiteettia pään yli eteen -kuntopallonheitotestissä, kun kriteeristandardina oli markkeriton 3D-liikeanalyysi.

Kandidaatintutkielma suoritettiin osana Jyväskylän yliopiston ja Suomen huippu-urheilun instituutti KIHU:n ”keihäänheittäjien terveys ja suorituskyky” -poikkileikkaustutkimusta. Tutkittavat olivat aikuisten ja nuorten maajoukkueen sekä kansallisen tason kilpailevia keihäänheittäjiä. Kuntopallonheitotestiin osallistui yhteensä 30 keihäänheittäjää, 17 naista ja 13 miestä. Kuntopallon lähtönopeutta analysoitiin Stalker AS5 -tutkalaitteella ja SIMI Motion -liikeanalyysiohjelmistolla. Osallistujat suorittivat kolme maksimaalista heittoa, joista suurimman nopeuden tutkalla saavuttanutta käytettiin jatkoanalyyseissä ($n = 30$). Tutkan mittaamaa nopeutta verrattiin liikeanalyysin x-suuntaiseen ja absoluuttiseen nopeuteen eri ajanhetkillä.

Kahden riippuvan otoksen testit havaitsivat merkitsevän eron tutkalaitteen ja kaikkien liikeanalyysien nopeuksien ($p \leq 0,001$), paitsi tutkan ja liikeanalyysin irrotushetken ($v(x)_0$) nopeuden välillä ($p = 0,105$). Korrelaatiot tutkan ja liikeanalyysin x-suuntaisten nopeuksien välillä olivat $r, \rho = 0,980-0,985$, ja tutkan ja liikeanalyysin absoluuttisten nopeuksien välillä $r = 0,974-0,979$. Kaikki korrelaatiot olivat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0,001$). Bland-Altmanin testit eivät havainneet suhteellista harhaa tutkalaitteen ja kaikkien liikeanalyysien nopeuksien välillä ($p > 0,05$).

Tutkalaite systemaattisesti aliarvioi absoluuttista nopeutta, mutta harha oli suuruudeltaan triviaali ja käytännössä merkityksetön. Tutkimuksen perusteella tutkalaite mittaa lähtönopeutta validisti, kun kosinikulma tutkalaitteen ja esineen välillä pysyy maltillisena (alle 15°). Tutkaa voidaan siis käyttää heittosuorituskyvyn mittaamiseen ja seurantaan esimerkiksi harjoitteluolosuhteissa, ottaen huomioon laitteen oikea asettelu liikkeen suuntaisesti. Jatkotutkimusta tutkalaitteen validiteetista suuremmilla lähtökulmilla ja nopeammin liikkuvilla esineillä kuitenkin tarvitaan.

Asiasanat: liikeanalyysi, lähtönopeus, tutka, validiteetti, yliolan heittäminen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

1 JOHDANTO.....	1
2 YLIOLAN HEITTÄMINEN.....	2
2.1 Yliolan heittämisen biomekaniikka.....	3
2.2 Pään yli heittäminen.....	4
3 YLIOLAN HEITTÄMISEN LÄHTÖNOPEUDEN MITTAUSMENETELMIÄ.....	6
3.1 Liikeanalyysi.....	6
3.2 Tutka.....	7
4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESIT.....	10
5 TUTKIMUSMENETELMÄT.....	11
5.1 Tutkittavat, tutkimusasetelma ja aineiston keräys.....	11
5.2 Mittalaitteisto ja -ohjelmisto.....	12
5.3 Aineiston analysointi ja tilastolliset menetelmät.....	13
6 TULOKSET.....	15
7 POHDINTA.....	20
7.1 Tutkalaitteen validiteetti.....	20
7.2 Tutkimusmenetelmien tarkastelu.....	22
7.3 Yhteenveto ja johtopäätökset.....	23
LÄHTEET.....	24

1 JOHDANTO

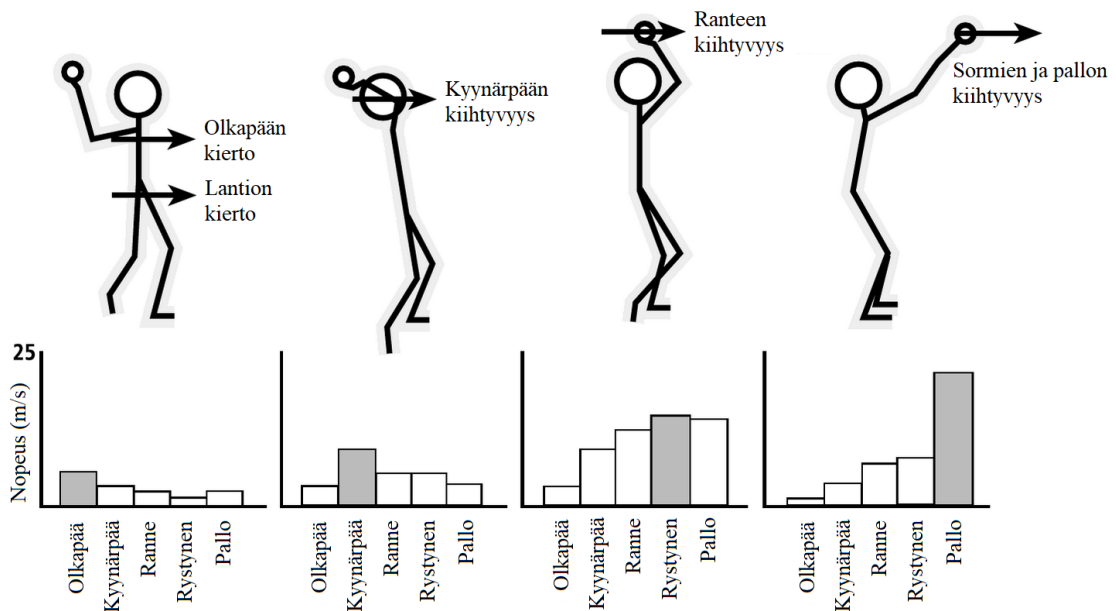
Laadukkaan mittaustuloksen kannalta on tärkeää, että mittaaminen on validia ja reliaabelia. Validiteetilla eli pätevyydellä tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin mittaus edustaa sitä ilmiötä, jota sen on tarkoitus mitata. Se myös kertoo, missä määrin saadut mittaustulokset ovat totuudenmukaisia. Validiteetti edellyttää sen käyttämältä mittarilta, esimerkiksi mittalaitteelta, reliabiliteettia. Reliabiliteetti tarkoittaa mittatulosten luotettavuutta, eli missä määrin samalla mittalaitteella päädytään samoihin tuloksiin, kun mittaukset toistetaan samoissa olosuhteissa eri kerroilla. Validiteettia voidaan arvioida esimerkiksi tarkastelemalla mittarin tulosten korrelaatiota muiden samaa ilmiötä mittaavien mittareiden kanssa. Ideaalitulanteessa mittaukset suoritetaan samanaikaisesti, ja vertailukohteenä on ilmiötä parhaiten kuvaava mittari eli kriteeristandardi (*golden standard*). (Kimberlin & Winterstein 2008)

Pään yli heitto on yliolanheiton tyyppi, jossa heitto suoritetaan kahdella kädellä pään yli hyödyntäen vastaliikkeen avulla lihasten venymis-lyhenemissykliä (Bartlett 2000, 371). Pään yli heitoilla voidaan esimerkiksi testata tai seurata heittosuorituskyvyn kehittymistä mittaamalla heiton lähtönopeutta (Stockbrugger & Haennel 2001; van den Tillaar & Marques 2011; van den Tillaar & Marques 2013). Kyky tuottaa suuria lähtönopeuksia heittäessä onkin keskeinen suorituskyvyn mittari monessa yliolanheittolajissa. Lähtönopeus korreloi esimerkiksi keihäänheiton tuloksen kanssa (Viitasalo ym. 2003), ja tenniksessä nopeammin liikkuva pallo vähentää vastustajan aikaa reagoida syöttöön (Goulet ym. 1989). Siksi joko heittojen, syöttöjen tai lyöntien lähtönopeudet ovat urheilijoita ja valmentajia kiinnostavia muuttujia.

Lähtönopeuden mittausten menetelmistä tarkin on suurnopeuskameroilla toteutettu 3D-liikeanalyysi (Windolf ym. 2008), mutta aineiston keruu edellyttää useimmiten vaativia laboratorio-olosuhteita ja tulosten analysointi huomattavan määrän aikaa (van der Kruk & Reijne 2018). Harjoitus- ja kilpailuolosuhteissa lähtönopeuden mittaamiseen käytetäänkin käytännöllisyyden ja edullisuuden vuoksi useimmiten tutkalaitetta, vaikka tutkalaitteiden tiedetään lähes aina aliarvioivan todellista nopeutta (Robinson & Robinson 2016). Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää tutkalla mitatun lähtönopeuden validiteettia suhteessa videokameroiden avulla tehtävään markkerittomaan 3D-liikeanalyysiin, kun testattavana liikkeenä oli pään yli eteen -kuntopallonheitto.

2 YLIOLAN HEITTÄMINEN

Tässä luvussa käsitellään yliolanheittoa, joka on yleisimmin käytetty heittotyyli urheilussa. Näitä urheilulajeja ovat esimerkiksi keihäänheitto, baseball, käsipallo ja kriketti. Yliolanheitto- liike vaatii kaikissa lajeissa huolellista lihasten koordinaatiota ja voimaa koko liikeketjun alu- eella, kun suuremmista ja hitaammin liikkuvista vartalon osista (proksimaaliset segmentit) siir- retään voimaa suhteellisesti pienempiin käsivarren ja käden osiin (distaaliset segmentit) (Bart- lett 2000, 371; Hirashima ym. 2002). Eri nivelten oikea-aikainen kiihdyttäminen ja hidastami- nen on onnistuneen heittosuorituksen kannalta ratkaisevan tärkeää, ja voimien optimaalinen siirtyminen distaalsiin segmentteihin tapahtuu, kun proksimaalisten segmenttien kulmanopeus on suurimmillaan. Tällöin kulmamomentin avulla liike-energia saadaan siirrettyä aina seuraa- vaan segmenttiin ja lopulta esineeseen (Bartlett 2000, 371; Hirashima ym. 2007; Neal ym. 1991) (kuva 1). Tehokkaassa heitossa hyödynnetään myös aktiivisesti lihasten venymis-lyhe- nemissykliä. Vastaliikkeen avulla agonistilihas venytetään optimaaliseen pituuteensa ennen voimakasta lihastyötä, jolloin kyetään hyödyntämään lihaksen venytysrefleksiä ja lihakseen va- rastonoitunutta elastista energiaa heittoon. (Bartlett 2000, 371)

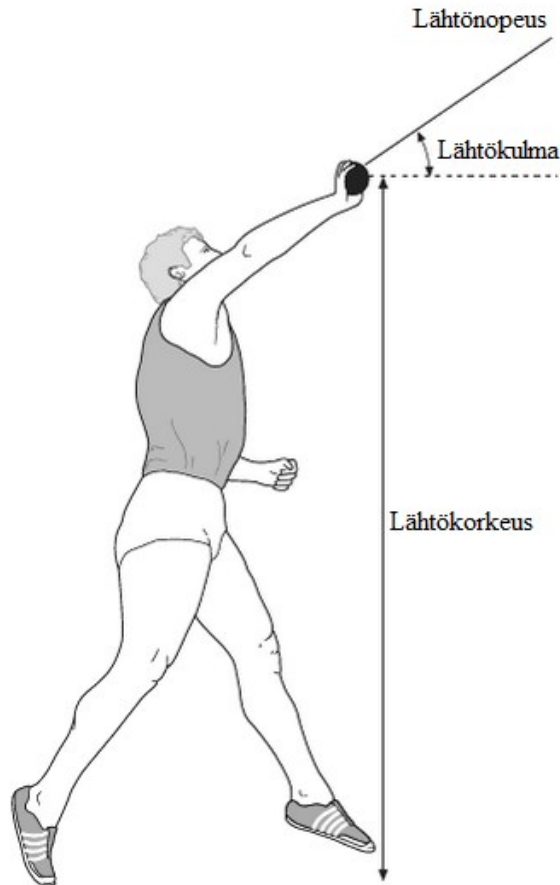


KUVA 1. Liikeketjun segmenttien oikea-aikainen liike mahdollistaa liike-energian siirtymisen kehon proksimaalisista osista distaalsiin osiin ja heitettävään esineeseen. Mukailtu Blazeovich (2017, 199).

2.1 Yliolan heittäminen biomekaniikka

Yliolan heittäminen voidaan jakaa biomekaanisesti kolmeen vaiheeseen eli valmistelu-, toiminta- ja saattovaiheeseen. Jokaisella vaiheella on oma tunnistettava roolinsa motorisesti moinutkaisessa liikkeessä. Valmisteluvaiheessa vartalo asetetaan edulliseen asemaan toimintavaihetta varten ja maksimoidaan sekä heitettävän esineen että heittäjän massakeskipisteen liikerata. Sen aikana kehon suuremmat segmentit aloittavat heittoliikkeen ja agonistilihakset aloittavat venytyksen. Toimintavaiheessa kehon eri osat tulevat liikeketjuun mukaan sarjamaisesti oikeaan aikaan samalla, kun liikenopeus kasvaa siirryttäessä proksimaalisista kehon osista distaalisia osia ja lopulta heitettävää esinettä kohti. Viimeisessä vaiheessa eli saattovaiheessa heittoliike hidastetaan kontrolloidusti lihasten oikea-aikaisella eksentrisellä supistumisella, jotta liike-energia siirtyy tehokkaasti esineeseen. (Bartlett 2000, 374–375) Yliolan heittäminen yleinen kinematiikka on vertailtavissa eri lajien välillä, vaikka heiton vaiheiden yksityiskohdat vaihtelevat riippuen lajin säännöistä ja heitettävän esineen mittasuhteista. Esimerkiksi keihäänheitossa yliolanheiton vaiheet voidaan jakaa tarkemmin alkuvauhtiin, ristiaskelvaiheeseen, vetovaiheeseen ja saattovaiheeseen (Bartlett 2000, 375), ja baseballissa sekä käsipallossa vastaavasti lataus-, tukiaskel-, viritys-, kiihdytys-, hidastus- ja saattovaiheeseen (Fleisig ym. 1996; van den Tillaar & Ettema 2003; Werner ym. 1993).

Heiton lähtöparametrit. Heitettävän esineen lentorataan vaikuttavat lähtönopeus, -kulma ja -korkeus irrotushetkellä, eli sillä hetkellä, kun heittäjän käsi vielä osuu heitettävään esineeseen (kuva 2). Lähtökulma (θ) määritellään esineen nopeusvektorin ja horisontaalitasoon välisenä kulmana esineen irrotushetkellä. Lähtökulman suuruus vaikuttaa parabolisen lentoradan kaarevuuteen, kun esineeseen ei vaikuta aerodynaamisia voimia. Lähtökorkeus on esineen korkeus irrotushetkellä suhteessa maan tasoon. Se vaikuttaa jonkin verran esineen lentoon, sillä tietyllä lähtökulmalla ja -nopeudella suurempi suhteellinen lähtökorkeus lisää lentoaikaa ja -matkaa. Lähtönopeus taas määritellään esineen irrotushetken nopeusvektorin suuruutena, ja se voidaan jakaa vertikaali- ja horisontaalisuuntaisiin komponentteihin. Lähtökulman ja -korkeuden ollessa vakioita, pelkkä lähtönopeus määrittää heiton kaaren vertikaali- ja horisontaalisuuntaisen maksimiiritymän. Lähtönopeus onkin yksi onnistuneen suorituksen kannalta tärkeimmistä lähtöparametreista, sillä esineen lentomatka on suoraan verrannollinen lähtönopeuden neliöön. (Bartlett 2000, 368–369) Lähtönopeus määrittää käytännössä esimerkiksi keihäänheiton tuloksen (Morriss & Bartlett 1996; Viitasalo ym. 2003) tai sen ajan, joka vastustajalla on reagoida pallon syöttöön (Goulet ym. 1989; Laffaye ym. 2012; van den Tillaar & Ettema 2003).



KUVA 2. Heitettävän esineen lähtöparametrit eli lähtönopeus, -kulma ja -korkeus. Mukailtu Bartlett (2000, 368).

2.2 Pään yli heittäminen

Pään yli heitto on yliolanheiton muoto, jossa heitto toteutetaan molemmilla käsillä. Se eroaa hieman yliolan heittämisestä liikemalliltaan ja voimantuotoltaan. Pään yli heitoissa korostuu molempien jalkojen ja keskivartalon voimantuotto, joka siirtyy lantion ja vartalon kautta heitokäsiin ilman kiertoliikkeitä, toisin kuin yliolanheitossa, jossa vartalon kierto liike taas on voimantuoton kannalta hyvin olennaista. Lisäksi pään yli heitto vaatii vähemmän tehoa verrattuna yliolanheittoon, ja voimantuottoajat ovat yleensä pidempiä. (Bartonietz 2000, 411) Pään yli heitoilla voidaan testata ylävartalon lihasten voimia (Harasin ym. 2006) tai seurata heittosuorituskyvyn ja räjähtävän voimantuoton kehittymistä mittaamalla heiton lähtönopeutta tai heitettyä matkaa (Stockbrugger & Haennel 2001; van den Tillaar & Marques 2011; van den Tillaar & Marques 2013). Heitoissa voidaan käyttää vastuksena esimerkiksi eri painoisia kuulia tai kuntopalloja.

Kuten aiemmin todettiin, on heiton lähtönopeus yksi tärkeimmistä heitettävän esineen lento-
matkaa määrittävistä tekijöistä (Bartlett 2000, 369), joten sen kehittäminen on heittosuoritus-
kyvyn kannalta olennaista. Yliolanheittonopeutta voidaan kehittää tehokkaasti joko yleisellä
voimaharjoittelulla (Cherif ym. 2016; Martínez-García ym. 2021; Newton & McEvoy 1994) tai
spesifimmillä, lajinomaisilla heittoliikkeillä. Lajispesifejä harjoitteita voivat olla esimerkiksi
lisäpainolla, kuten kuntopallolla tai kuulalla, toteutetut pään yli heitot. Kuntopallovastuksella
toteutettu heittoharjoittelu näyttäisi aikaisempien tutkimusten perusteella parantavan heittono-
peutta esimerkiksi baseballissa, käsipallossa ja kriketissä (Caldwell ym. 2019; Szymanski 2012;
van den Tillaar & Marques 2011), mutta ei välttämättä yhtä paljon kuin yleinen voimaharjoi-
telu (Newton & McEvoy 1994). Lajispesifi voimaharjoittelu kuitenkin toimii heittosuoritusky-
vyn parantamisen lisäksi myös loukkaantumisia ennaltaehkäisevänä tekijänä (Bartlett 2000,
377). Yliolan heittämisen tiedetään aiheuttavan äärimmäistä rasitusta erityisesti olkapää- ja
kynärnivelleille, jolloin koko yliolanheiton liikeketjun lihasten vahvuus ja hyvä hallinta koros-
tuvavat (Mayes ym. 2022).

3 YLIOLAN HEITTÄMISEN LÄHTÖNOPEUDEN MITTAUSMENETELMIÄ

Yliolan heittolajeissa heiton lähtönopeus on tärkeä suorituskykymuuttuja, jonka mittaamiseen harjoittelu- ja kilpailuolosuhteissa voidaan käyttää tutkalaitteita, inertiamittareita, satelliittipaikannukseen perustuvia laitteita tai videokuvaamiseen perustuvaa markkereilla tai ilman tehtävää liikeanalyysiä. Tutkalaitteiden, inertiamittareiden ja satelliittipaikannuslaitteiden etuina ovat niiden helppokäyttöisyys, kannettavuus, edullisuus ja suoraan laitteesta tai sovelluksesta saatu välitön palaute. Liikeanalyysien tekeminen taas edellyttää useimmiten laboratorio-olosuhteita, ja tulosten analysointi on aikaa vievää ja vaatii ammattitaitoa. (van der Kruk & Reijne 2018) Liikeanalyysiä pidetään usein muiden menetelmien vertailukohteena ja kriteeristandardina, sillä menetelmän pätevyys ja tarkkuus on havaittu aikaisemmissa tutkimuksissa erittäin hyväksi (Carse ym. 2013; Windolf ym. 2008). Tutkalaitteiden taas on havaittu hieman aliarvioivan todellisia nopeuksia (Halliday ym. 2013; Robinson & Robinson 2016; Weisberg ym. 2020). Samaan tapaan inertiamittalaitteista lineaarista kiihtyvyyttä mittaavat kiihtyvyyssanturit aliarvioivat esineen todellista nopeutta (Phomsoupha ym. 2022). Satelliittipaikannukseen perustuvien laitteiden, kuten GPS-mittareiden, luotettavuus ja toistettavuus taas riippuu paljolti laitteen mittaustaajuudesta (Beato ym. 2018). Seuraavissa alaluvuissa perehdytään tarkemmin vain tässä tutkielmassa käytettyihin lähtönopeuden mittaamenetelmiin, joita ovat videokuvien avulla toteutettava liikeanalyysi ja tutkalaite.

3.1 Liikeanalyysi

Videoiden avulla tehtävä liikeanalyysi on useassa urheilulajissa käytetty tutkimusmenetelmä, jonka avulla voidaan arvioida urheilijan suoritusta. Liikeanalyysin avulla saadaan tietoa erilaisista kinemaattisista ja kineettisistä muuttujista, kuten raajojen liikkeistä ja nivelkulmien muutoksista sekä urheilijan käsittelemän välineen nopeudesta ja sijainnista. Liikeanalyysijä voidaan tehdä perinteisesti markkereiden avulla tai ilman. Kuvattu videomateriaali voidaan analysoida joko manuaalisesti tai automaattisesti esimerkiksi koneoppimisalgoritmeja hyödyntäen. (Blazevich 2017, 38–39) Liikeanalyysijä voidaan toteuttaa videokameroiden määrästä ja sijoittelusta riippuen joko kahdessa (2D) tai kolmessa (3D) ulottuvuudessa. 2D-liikeanalyysissä mitavirheitä ja tulosten vaihtelua tapahtuu enemmän verrattuna 3D-liikeanalyysiin (Allard ym. 1995). 2D-liikeanalyysi ei kuvaa riittävän tarkasti 3D-tasossa tapahtuvia nivelten kiertoliikkeitä, vaikka onkin riittävän tarkka kuvaamaan yhdessä tasossa tapahtuvaa liikettä (Maykut ym.

2015). 3D-liikeanalyysijärjestelmiä taas käytetään hyvin usein tutkimuksissa ja myös muiden menetelmien vertailukohteena, sillä 3D-liikeanalyysillä saatujen mittausten tarkkuus ja pätevyys on aikaisemmin havaittu erittäin hyväksi (Eichelberger ym. 2016; Nagymáté ym. 2018; Windolf ym. 2008). 3D-liikeanalyysiä pidetäänkin kriteeristandardina arvioitaessa urheilijan suorituskykyä kinemaattisten ja kineettisten muuttujien avulla.

Liikeanalyysien tarkkuuteen vaikuttavat olennaisesti käytettyjen videokameroiden määrä ja kuvanopeus (Nagasawa ym. 2012). Käytettyjen videokameroiden riittävä kuvanopeus korostuu etenkin kuvattaessa nopeita liikkeitä, sillä liian hitaalla kuvanopeudella kahden kuvan välinen aikaero on suuri, eikä esimerkiksi sulkapallon irrotushetkeä saada videolle (Phomsoupha 2022). Perusteellinen kalibrointi ja mittausten valvonta ennaltaehkäisee liikeanalyysin virheitä tai ne jäävät hyvin pieneksi suurillakin videomäärillä (Carse ym. 2013; Windolf ym. 2008). Käytännössä tämä tarkoittaa kalibroitikehikon tai -pylväiden käyttöä, joiden mitat tai etäisyys videokameroista tiedetään tai mitataan ennen jokaista kuvaustapahtumaa esimerkiksi takymetrilla. Videokameroiden asettelua tulisi myös valvoa niin, että ne eivät liiku kuvattavien suoritusten välillä tai kalibroinnin jälkeen. Siirrettäessä kalibroitikoordinaatteja videokameroista käytettävään liikeanalyysiohjelmistoon olisi hyvä käyttää DLT (*direct linear transformation*) -algoritmia, joka vähentää kameran linssin vääristymää muunnettaessa etäisyyksiä 2D-videokuvasta 3D-koordinaateiksi (Abdel-Aziz & Karara 2015).

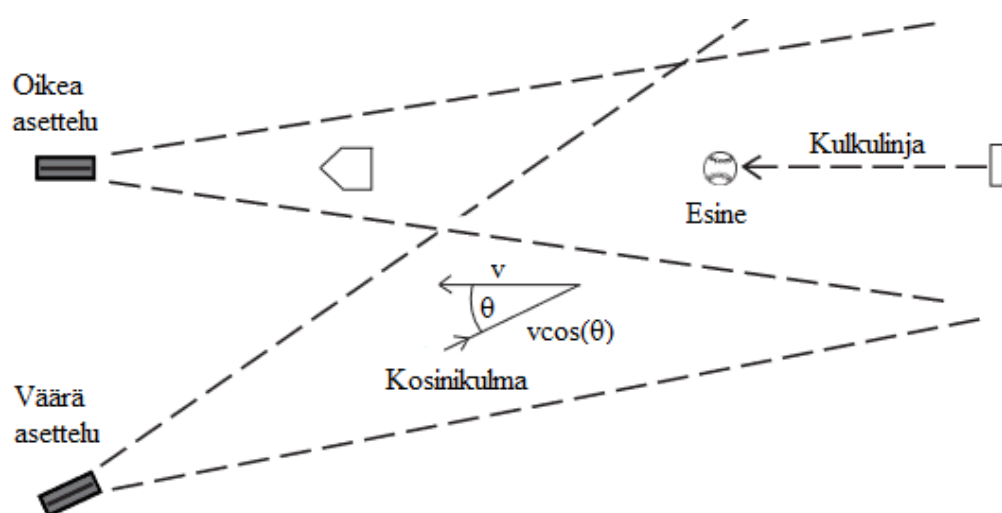
Haasteina liikeanalyysin käytössä ovat esimerkiksi hyvin tekninen ja aikaa vievä datan keruu ja analysointi. Myös tutkimusympäristö ja tutkittavan liikkeen laatu tuovat oman haasteensa – esimerkiksi kilpailuolosuhteissa tai vesiympäristössä kuvatessa kameroita ei aina saada aseteltua optimaalisesti ja markkereiden käyttö voi olla vaikeaa. Lisäksi laadukkaaseen kuvaamiseen vaadittava laitteisto on kallista. (van der Kruk & Reijne 2018)

3.2 Tutka

Tutka on sähkömagneettinen laite, jota käytetään havaitsemaan tai seuraamaan ympäristössä olevia kohteita. Tutka toimii säteilemällä sähkömagneettista energiaa ja havaitsemalla kohteesta takaisin palaavaa signaalia eli kaikua. Liikkuvasta esineestä palaavan kaiun frekvenssi eli taajuus (ja aallonpituus) muuttuu johtuen Dopplerin ilmiöstä. Dopplerin ilmiö tarkoittaa aaltoliikkeen taajuuden riippuvuutta lähteen ja havaitsijan välisestä nopeudesta. (Skolnik 2001)

Vertailemalla signaalin frekvenssin muutoksia alkuperäiseen signaaliin voidaan laskea liikku-
van esineen nopeus. Urheilussa käytettävät esineen nopeutta mittaavat tutkalaitteet perustuvat
kaksiulotteiseen pitkittäiseen Dopplerin ilmiöön, eli ne mittaavat sitä nopeuden komponenttia,
joka on suoraan tutkan näkölinjan suuntaainen. Tällöin esineen nopeus saadaan kaavasta $v =$
 $c \times \frac{f_1 - f_0}{f_0}$, missä c on valonnopeus, f_0 tutkan lähettämä taajuus ja f_1 tutkan mittaama taajuus.
(Halliday ym. 2013)

Tutkalaitteet aliarvioivat tutkattavan kohteen absoluuttista nopeutta, koska ne mittaavat ylei-
sesti vain näköyhteyden suuntaista säteittäistä nopeutta (Robinson & Robinson 2016). Tutka-
laitteen mittaustarkkuus siis heikkenee kosinivaikutuksen vuoksi, kun sen näköyhteys ei ole
täysin samassa linjassa tutkattavaan esineen lentoradan kanssa (Castro ym. 2012). Mitä suu-
rempi esineen lentoradan ja tutkan välinen poikkeava kulma on, sitä suuremmaksi kosinivaiku-
tus kasvaa (kuva 3). Mitattu nopeus on siis riippuvainen poikkeavan kulman kosinista. (Halli-
day ym. 2013) Ilmiötä kutsutaan myös kosinivirheeksi, sillä tutkalaitteen nopeusmittauksen
tarkkuus laskee, kun tutkalaitteen ja kohteen välinen kosinikulma kasvaa. Yksittäisen tutkalait-
teen näkökenttä ei siis voi olla esimerkiksi kaarevaa rataa lentävän esineen kanssa samalla lin-
jalla, vaan tällaisen liikkeen tarkempaan mittaamiseen tarvitaan useampaa tutkalaitetta (Robin-
son & Robinson 2016). Useimmat tutkavalmistajat ottavat kosinivirheen mahdollisuuden huo-
mioon käyttöohjeissa ohjeistaen tutkalaitteen oikeaan asetteluun. Käyttäjän tulee kuitenkin ym-
märtää, minkä suuruisilla kosinikulmilla mittaustulokset ovat luotettavia ja päteviä.



KUVA 3. Kosinivaikutus. θ , tutkan ja nopeusvektorin välinen kulma; v , esineen nopeusvektori; $v \cos(\theta)$, kosinisuuntainen nopeusvektori. Mukailtu Stalker AS5 -tutkalaitteen mittaushjeista.

Tutkalaitteiden etuina voidaan pitää niiden edullisuutta, helppokäyttöisyyttä ja niiden noninvasiivisuutta. Tutkalaitetta voidaan käyttää esimerkiksi kilpailuolosuhteissa puuttumatta peliin, ja niiden avulla mitatut tulokset saadaan yleensä välittömästi. Esimerkiksi Štirn ym. (2017) havaitsivat, että käsipallon pelaajien saadessa välitöntä palautetta heitonopeudestaan, heidän heitonopeutensa parani verrattuna verrokkiryhmään. Tutkalaitteita käyttäessä ja sen asettelussa tulee kuitenkin ottaa huomioon sen mittausteknologian perustuminen Dopplerin ilmiöön, joka on herkkä aliarvioimaan todellista nopeutta kosinivirheen vuoksi.

Tutkalaitteen validiteetti nopeuden mittaamisessa. Aikaisempi tutkimustulos tutkalaitteiden luotettavuudesta nopeuden mittaamisessa on ristiriitaista. Useissa pallon tai muun esineen lähtönopeutta mittaavissa tutkimuksissa on käytetty pelkkää tutkalaitetta ja siten pidetty sitä luotettavana menetelmänä, mutta otettu huomioon myös kosinivirheen mahdollisuus joko tutkalaitteen asettelussa (Alcaraz ym. 2011; Buscà ym. 2012; Gamage ym. 2016; Martin ym. 2016; Schwesig ym. 2016) tai ohjeistuksessa heittää esine mahdollisimman tutkan näkökentän suuntaisesti (Freeston ym. 2016; Freeston & Rooney 2014). Vain harvoissa tutkimuksissa on tutkan tuottamia tuloksia verrattu sellaisenaan muihin mittausten menetelmiin, kuten 3D-liikeanalyysiin (Smith & Burke 2021). Esimerkiksi Okholm Kryger ym. (2019) havaitsivat tutkimuksessaan tutkan aliarvioivan jalkapallon nopeutta keskimäärin 0,4 m/s verrattaessa liikeanalyysiin. Weisberg ym. (2020) tutkimuksessa tutka aliarvioi pesäpallon nopeutta verrattaessa 3D-liikeanalyysiin 0,36 m/s aseteltaessa tutka joko heittokäden puolelle ja 0,92 m/s aseteltaessa se vastakkaisen käden puolelle, jolloin kosinikulma oli noin 10 °. Phomsoupha ym. (2022) totesivat tutkan aliarvioivan sulkapallon nopeutta keskimäärin 9,7 % suurnopeuskameroihin verrattuna. Smith ja Burke (2021) tutkivat myös kosinikulman vaikutusta tutkan mittatarkkuuteen, ja he havaitsivat tutkan tuottavan luotettavia mittatuloksia, kun kosinikulma oli 0–20 °. Tässä tutkimuksessa aikaisemmista tutkimustuloksista poiketen tutka yliarvioi krikettipallon nopeutta verrattuna 3D-liikeanalyysiin.

4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESEIT

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla pään yli eteen -kuntopallonheittotestin tutkalla mitattuja lähtönopeuksia ja niiden pätevyyttä verrattuna liikeanalyysillä saatuihin lähtönopeuden tuloksiin.

Tutkimuskysymys. Onko tutka validi mittauslaite mittaamaan pään yli eteen heitetyn kuntopallon lähtönopeutta?

Hypoteesi ja perustelut. Kyllä, tutkalaite on validi mittauslaite mittaamaan heitetyn esineen lähtönopeutta. Tutkalaitteiden tiedetään hieman aliarvioivan todellista nopeutta, mutta esineen liikkeen suuntaan aseteltuna ja kosinikulman pysyessä alle 20° tutkalaitteet tuottavat valideja tuloksia (Okholm Kryger ym. 2019; Robinson & Robinson 2016; Smith & Burke 2021; Weisberg ym. 2020). Tutkalaitteen mittaamat nopeudet korreloivat parhaiten esineen tutkan näkökentän suuntaisen nopeuden kanssa, sillä tutka mittaa esineen säteittäistä nopeutta (Robinson & Robinson 2016).

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämä tutkimus toteutettiin osana Jyväskylän yliopiston ja Suomen huippu-urheilun instituutti KIHU:n poikkileikkaustutkimusta ”Keihäänheittäjien terveys ja suorituskyky”. Tutkimuksen tarkoituksena oli verrata tutkimuksen pään yli eteen -kuntopallonheittotestin kuntopallon lähtönopeuksien arvoja, kun lähtönopeudet mitattiin Stalker AS5 -tutkalaitteen ja SIMI Motion -liikeanalyysiohjelmiston avulla.

5.1 Tutkittavat, tutkimusasetelma ja aineiston keräys

”Keihäänheittäjien terveys ja suorituskyky” -tutkimusjaksoon osallistui yhteensä 35 keihäänheittäjää, jotka koostuivat aikuisten ja nuorten maajoukkueryhmiin kuuluvista sekä kansallisella tasolla aktiivisesti kilpailevista heittäjistä (taulukko 1). Tutkimusjakson mittaukset toteutettiin kevään 2023 aikana. Suorituskykytestejä keihäänheittäjille tehtiin kahtena mittauspäivänä. Ensimmäisenä mittauspäivänä osallistujat suorittivat erilaisia lajinomaisia toiminnallisia liikkuvuus- ja voimatestejä sekä yhden ja kahden jalan hyppy- ja voimatestejä. Ensimmäiseksi testeistä suoritettiin toiminnalliset liikkuvuustestit, toiseksi suorituskykytestit ja viimeiseksi toiminnalliset voimatestit. Toisena mittauspäivänä osallistujat suorittivat yleisurheiluhallissa pään yli eteen -kuntopallonheittotestin sekä kilpailutilannetta simuloivan keihäänheittotestin. Molemmat heittotestit kuvattiin myöhemmin tehtäviä liikeanalyysyjä varten. Tutkimuksessa kartoitettiin myös keihäänheittäjien terveyttä muun muassa heittökäden ultraäänikuvantamisen, paastoverikokeiden ja terveystestien avulla.

TAULUKKO 1. Tutkimukseen osallistuneiden taustatiedot. Tulokset muodossa keskiarvo \pm keskihajonta (95 % luottamusväli).

	Miehet	Naiset
n	15	20
Ikä (v)	23,4 \pm 3,45 (21,5–25,3)	23,4 \pm 4,61 (21,3–25,6)
PB (m)	76,3 \pm 6,45 (72,8–79,9)	55,0 \pm 6,83 (51,8–58,2)

PB, keihäänheiton henkilökohtainen ennätys.

Kuntopallonheitto pään yli eteen. Kuntopallonheittotestiin osallistui 30 keihäänheittäjää, 13 miestä ja 17 naista. Ennen testiä osallistujat tekivät omatoimisen lämmittelyn, mikä vastasi heidän tyypillistä valmistautumistaan kovatehoisiin heittoharjoituksiin tai kilpailuihin. Testin aikana osallistujat seisoivat hartianlevyisessä asennossa kantapäät noin viisi senttimetriä korkean levyn päällä pitäen päkiät maassa. Osallistujia ohjeistettiin nostamaan kuntopallo (miehillä 2 kg, naisilla 1 kg) pään yläpuolelle suorille käsille. Liike aloitettiin nojaamalla ensin taaksepäin, jonka jälkeen kuntopallo tuli heittää räjähdysmäisesti eteenpäin vastaliikettä hyödyntäen. Osallistujat suorittivat ensin kaksi lämmittelyheittoa 50 % ja 75 % intensiteeteillä. Näiden jälkeen suoritettiin kolme maksimaalista heittoa noin minuutin palautuksilla. Ohjeistuksena oli heittää kuntopalloa mahdollisimman laakaan, jotta kuntopallo lentäisi tutkan näkökentän suuntaisesti. Tutka asetettiin noin kolmen metrin päähän heittäjän taakse heiton lakipisteen korkeudelle jalustan avulla. Jokaisesta heitosta mitattiin tutkalla huippunopeus, ja kolmesta heitosta suurimman nopeuden saavuttanutta käytettiin jatkoanalyysiin (n = 30).

5.2 Mittalaitteisto ja -ohjelmisto

Kuntopallonheittotestin kuntopallon lähtönopeuden mittaamiseen käytettiin tutkalaitetta ja videoiden avulla tehtävää liikeanalyysiä. Kuntopallon lähtönopeuden mittaamiseen suoritusten aikana käytettiin Stalker AS5 -tutkalaitetta (Applied Concepts Inc., Plano, Teksas, Yhdysvallat). Tutkan toimintataajuudeksi valmistaja on ilmoittanut 25 Hz ja toimintatarkkuudeksi $2,22-111,1 \pm 0,045$ m/s.

Videoiden kuvaamiseen liikeanalyysiä varten käytettiin kahta Panasonic Lumix DC-GH5s järjestelmäkameraa (Panasonic Corporation, Osaka, Japani), joiden kuvanopeudeksi asetettiin 240 Hz, suljinajaksi 1/1000 s ja resoluutioksi 1920 x 1080 pikseliä. Ensimmäinen kamera oli sijoitettu heittäjän oikealle puolelle noin 18 metrin päähän heittoviivasta, kohtisuoraan heittosuuntaan nähden. Toinen kamera oli sijoitettu heittäjän taakse noin 18 m päähän heittoviivasta, ja se oli suunnattu heiton suuntaisesti. Molemmat kamerat oli varustettu jalustalla ja kameroiden korkeudeksi määritettiin liikkeen taso. Kameroiden välisten tapahtumien synkronointiin käytettiin erikoisvalmisteista LED-valolaitetta, jossa oli viisi LED-valoa (Suomen huippu-urheilun instituutti KIHU, Jyväskylä, Suomi). Nämä valot asetettiin syttymään yhden millisekunnin välein sekunnin ajaksi joka toinen sekunti. Ennen jokaista kuvauspäivää ja niiden jälkeen suoritettiin kuvausalueen kalibrointi. Kalibrointiin käytettiin neljää säädettävää tolppaa, joiden

päissä oli pyöreät heijastavat pinnat, sekä Nikon DTM-A20LG takymetria (Nikon Corporation, Tokio, Japani). Takymetrin avulla saatiin kahdeksan tunnettua kolmiulotteista koordinaattia kuvausalueelta.

Videomateriaalin analyysiin ja kineettisten muuttujien tarkasteluun käytettiin SIMI Motion -liikeanalyysiohjelmiston versiota 9.2.1 (Simi Reality Motion Systems GmbH, Unterschleissheim, Saksa). Koordinaatisto määritettiin niin, että x-akseli oli tutkan näkökentän ja kuntosallin liikkeen suuntainen, y-akseli horisontaalisuuntainen ja z-akseli vertikaalisuuntainen. Kalibrointiin käytettiin kummankin kameran x- ja y-kuvakoordinaatteja, jotka muutettiin globaaleiksi kolmiulotteisiksi koordinaateiksi DLT-algoritmin avulla. Videokuvista digitoitiin manuaalisesti yksi piste kuntosallin keskeltä pallon irrotushetkellä (kun heittäjän sormet koskevat viimeisen kerran kuntosallin) ja sen jälkeen viidestä seuraavasta kuvasta. Kaikkien videoiden digitoinnin suoritti sama henkilö. Tulokset vietiin sellaisenaan analysoitavaksi ilman suodattamista. Liikeanalyysistä saatiin kuntosallin lähtökulma irrotushetkellä, kaikkien kuvien x, y ja z-suuntaiset nopeudet sekä niiden summat eli absoluuttiset nopeudet.

5.3 Aineiston analysointi ja tilastolliset menetelmät

Liikeanalyysistä saatujen kuntosallin irrotushetken (v_0) ja seuraavan neljän kuvan keskiarvon (v_{0-4}) ja irrotushetken jälkeisten neljän kuvan keskiarvon (v_{1-4}) laskemiseen ja datan taulukoimiseen käytettiin Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, Yhdysvallat) -ohjelmistoa. Tilastolliset analyysit toteutettiin avoimen lähdekoodin ohjelmistolla Jamovi versio 2.4 (The jamovi project, Sydney, Australia & R Core Team, Wien, Itävalta). Muuttujien normaalijakautuneisuus testattiin Shapiro-Wilkin testillä, sillä muuttujia oli alle 50. Normaalisti jakautuneista muuttujista määritettiin keskiarvo ja keskihajonta. Ei-normaalijakautuneesta irrotushetken jälkeisen neljän kuvan x-suuntaisen nopeuden keskiarvosta ($v(x)_{1-4}$) määritettiin mediaani ja kvartiiliväli. Normaalijakautuneita tuloksia analysoitiin Pearsonin korrelaatiokertoimella ja kahden riippuvan otoksen Student's t-testillä. Ei-normaalijakautuneen lähtönopeuden korrelaation laskemiseen käytettiin Spearmanin järjestyskorrelaatiokerrointa ja kahden riippuvan otoksen vertailuun Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testiä. Molempien mittausmenetelmien tuloksia vertailtiin toisiinsa Bland-Altmanin testillä. Luottamusväli oli kaikissa 95 %.

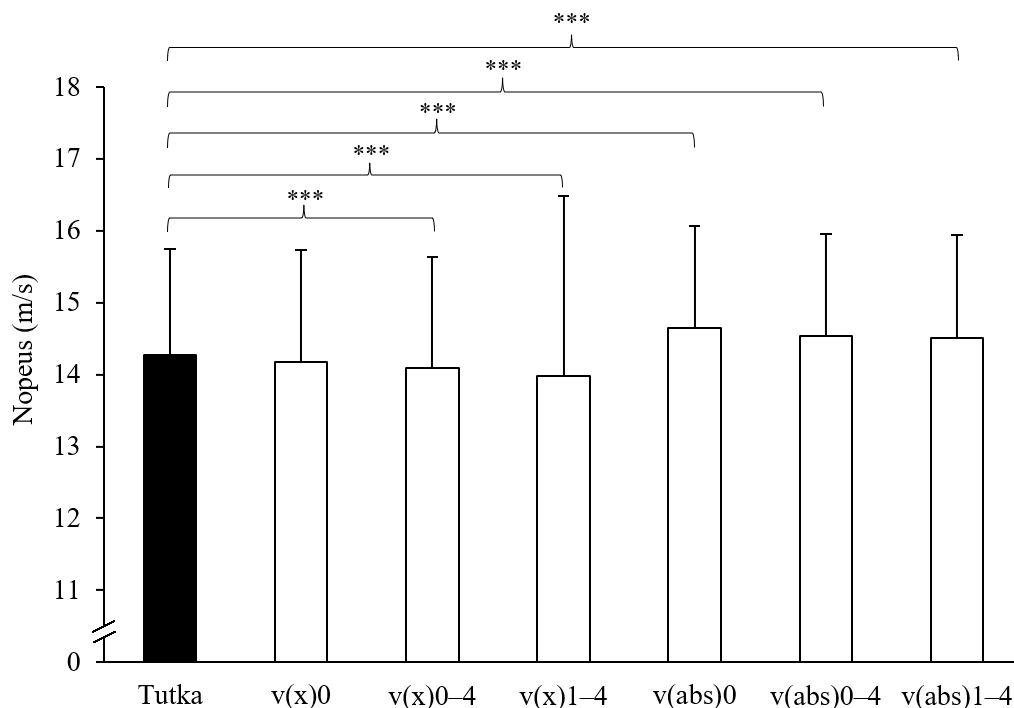
Tutkalla saatua dataa vertailtiin kuntopallon irrotushetken (v_0), kuntopallon irrotushetken ja seuraavien neljän kuvan keskiarvon (v_{0-4}) sekä irrotushetken jälkeisten neljän kuvan keskiarvon (v_{1-4}) x-suuntaisten ja absoluuttisten nopeuksien arvoihin. Kahden riippuvan otoksen normaalijakautuneisuus testattiin Shapiro-Wilkin testillä. Kahden riippuvan otoksen Student's- t-testiä käytettiin vertailemaan niitä tutkalla ja liikeanalyysillä saatuja kuntopallon lähtönopeuksia keskenään, jotka olivat normaalijakautuneita (Kerby 2014). Ei-normaalijakautuneiden tulosten analyysiin käytettiin kahden riippuvan otoksen Wilcoxonin merkittävien sijalukujen testiä (Sainani 2012). Tilastollisen merkitsevyyden rajana oli $p < 0,05$ luottamusvälin ollessa 95 %.

Pearsonin korrelaatiokerrointa (r) käytettiin kuvastamaan kahden suoraviivaisen muuttujan välistä lineaarista suhdetta eli tutkalla ja liikeanalyysistä saatujen nopeuksien välistä suhdetta. Korrelaatiokerroimen arvon ollessa +1, sijaitsevat kaikki hajontakaavion pisteet nousevalla suoralla, ja arvon ollessa -1 taas laskevalla suoralla. Arvon ollessa 0 muuttujien välillä ei ole lainkaan suoraviivaista riippuvuutta. Spearmanin järjestyskorrelaatiokerrointa (ρ) käytettiin kuvastamaan ei-normaalijakautuneen liikeanalyysin ja tutkan välisen nopeuden välistä suhdetta. Kuten Pearsonin korrelaatiokerroin, myös Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin vaihtelee -1 ja +1 välillä, jotka molemmat kuvastavat monotonista yhteyttä. (Schober ym. 2018) Tilastollisen merkitsevyyden rajana oli $p < 0,05$. Korrelaatioiden rajoina olivat r ja $\rho \geq 0,8$ voimakas, r ja $\rho \geq 0,5$ keskikokoinen ja r ja $\rho \geq 0,2$ heikko korrelaatio (Cohen 1988).

Bland-Altmanin testiä käytettiin vertailemaan tutkan ja liikeanalyysin eri lähtönopeuksien toistettavuutta keskenään. Bland-Altmanin kuvaaja saadaan vertailemalla kahden eri mittaustavan erotuksia (y-akseli) ja keskiarvoja (x-akseli) keskenään, joiden avulla määritetään 95 % luottamusväli (CI, *confidence interval*) keskiarvon (μ , *mean*) ja keskihajonnan (SD, *standard deviation*) avulla eli $CI = \mu \pm 1,96 SD$. Lisäksi määritetään keskiarvojen erotus eli systemaattinen harha (*bias*). Harhan ollessa lähellä arvoa 0, ovat myös testin tulokset lähellä toisiaan. Kuvaaja muodostuu keskiarvojen harhasta sekä luottamusvälien ylä- ja alarajasta. (Bland & Altman 2010) Tilastollisen merkitsevyyden rajana oli $p < 0,05$.

6 TULOKSET

Kuntopallon lähtökulman keskiarvo ja keskihajonta olivat $13,6 \pm 5,51$ °. Tutkalla mitattu lähtönopeus oli keskiarvoltaan ja keskihajonnaltaan $14,3 \pm 1,47$ m/s, ja liikeanalyysistä saadut normaalisti jakautuneet lähtönopeudet x-suunnassa $14,2 \pm 1,55$ m/s ($v(x)_0$), $14,1 \pm 1,55$ m/s ($v(x)_{0-4}$) ja absoluuttiset lähtönopeudet vastaavasti $14,6 \pm 1,42$ m/s ($v(abs)_0$), $14,5 \pm 1,42$ m/s ($v(abs)_{0-4}$) ja $14,5 \pm 1,42$ m/s ($v(abs)_{1-4}$). Ei-normaalijakautuneen x-suuntaisen irrotushetken neljän kuvan jälkeisen lähtönopeuden ($v(x)_{1-4}$) mediaani ja kvartiiliväli olivat $14,0 \pm 2,50$ m/s. Vertailtaessa liikeanalyysien lähtönopeuksien keskiarvoja tutkalla mitattuun lähtönopeuden keskiarvoon, oli kaikissa tilastollisesti merkitsevä ero mittausmenetelmien välillä ($p \leq 0,001$), paitsi liikeanalyysin kuntopallon irrotushetken x-suuntaiseen nopeuden ($v(x)_0$) keskiarvossa ($p = 0,105$). Tutkalla ja liikeanalyysillä mitatut nopeudet ja kahden riippuvan otoksen tulokset näkyvät kuvassa 4.



KUVA 4. Kuntopallon lähtönopeus muodossa keskiarvo \pm keskihajonta tai mediaani \pm kvartiiliväli tutkalla ja liikeanalyysillä mitattuna yksikössä m/s sekä kahden riippuvan otoksen erojen vertailu. *** $p \leq 0,001$, tilastollisesti merkitsevä ero mittausmenetelmien välillä; $v(x)$, x-suuntainen nopeus; $v(abs)$, absoluuttinen nopeus; v_0 , nopeus kuntopallon irtoamishetkellä; v_{0-4} , nopeus kuntopallon irrotushetken ja neljän seuraavan kuvan keskiarvosta; v_{1-4} , kuntopallon nopeus irrotushetken jälkeisten neljän kuvan keskiarvosta.

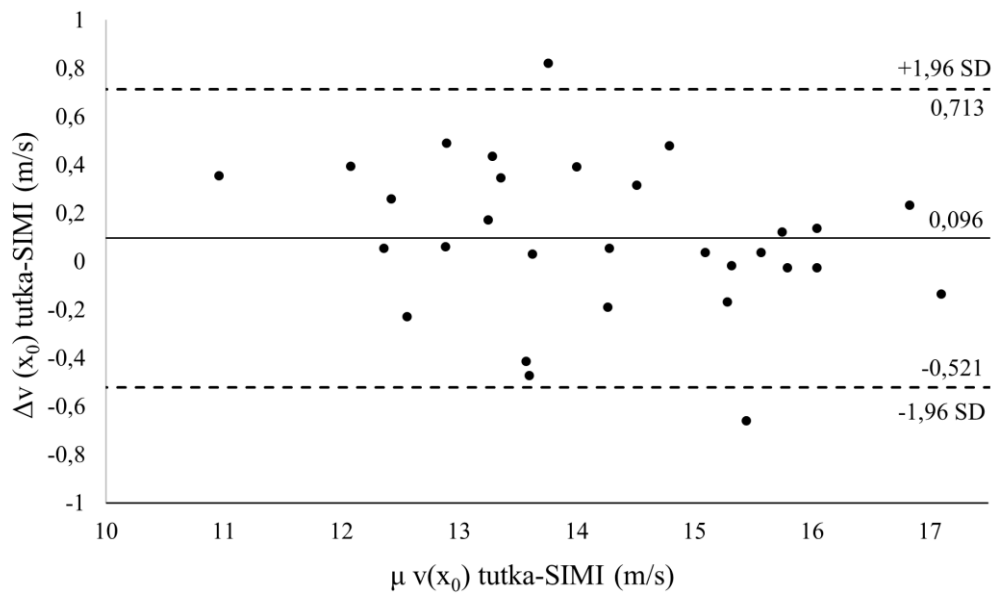
Tutkalla saatuja kuntopallon lähtönopeuksien arvoja vertailtiin liikeanalyyseistä saatuihin lähtönopeuksiin Pearsonin ja Spearmanin korrelaatiokertoimien avulla (taulukko 2). Kaikkien korrelaatiokertoimien tulokset olivat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0,001$).

TAULUKKO 2. Pearsonin ja Spearmanin korrelaatiokertoimien tulokset verrattaessa tutkan mittaamaa nopeutta liikeanalyysien nopeuksiin.

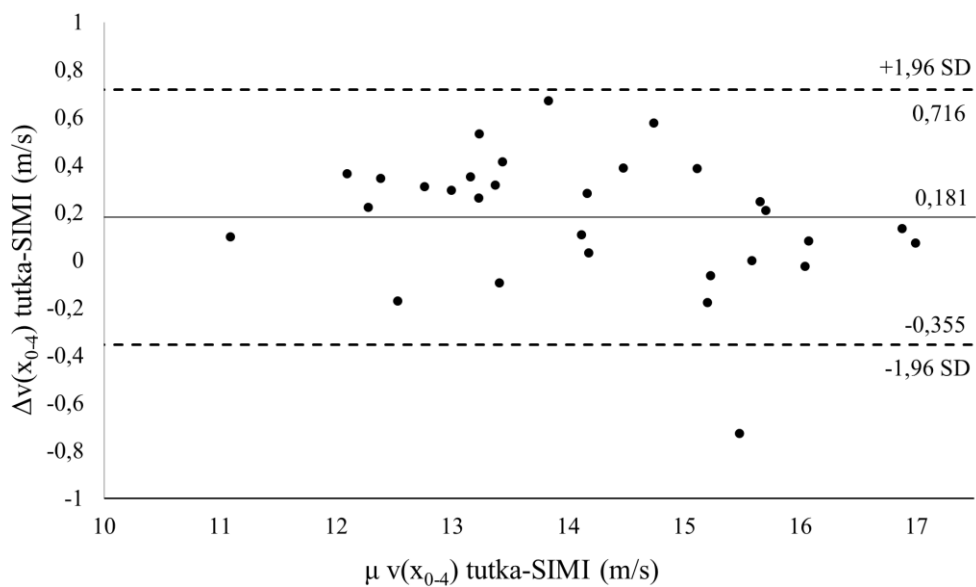
	$v(x)_0$	$v(x)_{0-4}$	$v(x)_{1-4}$	$v(abs)_0$	$v(abs)_{0-4}$	$v(abs)_{1-4}$
r	0,980 ***	0,985 ***		0,974 ***	0,979 ***	0,976 ***
ρ			0,981 ***			
CI	0,958–0,990	0,968–0,993	0,964–0,992	0,946–0,988	0,956–0,990	0,950–0,989

*** $p < 0,001$, tilastollisesti merkitsevä korrelaatio mittausmenetelmien välillä; r, Pearsonin korrelaatiokerroin; ρ , Spearmanin korrelaatiokerroin; CI, 95 % luottamusväli; $v(x)$, x-suuntainen nopeus; $v(abs)$, absoluuttinen nopeus; v_0 , nopeus kuntopallon irtoamishetkellä; v_{0-4} , nopeus kuntopallon irrotushetken ja neljän seuraavan kuvan keskiarvosta; v_{1-4} , kuntopallon nopeus irrotushetken jälkeisen neljän kuvan keskiarvosta.

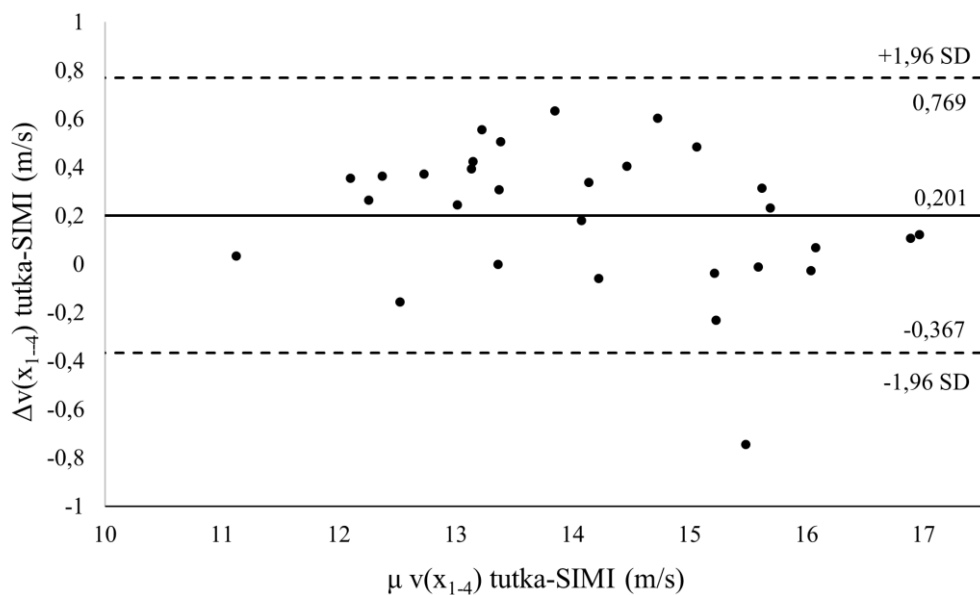
Bland-Altmanin testien keskiarvojen erotusten harhat vaihtelivat 0,096–0,201 m/s välillä vertailtaessa tutkan lähtönopeuksia liikeanalyysien x-suuntaisiin lähtönopeuksiin ja –0,374–(–241) m/s välillä vertailtaessa tutkan lähtönopeuksia liikeanalyysien absoluuttisiin lähtönopeuksiin. Harhojen arvot ja luottamusvälien tulokset tutkan ja liikeanalyysin eri nopeuksien välillä näkyvät kuvissa 5, 6, 7, 8, 9 ja 10.



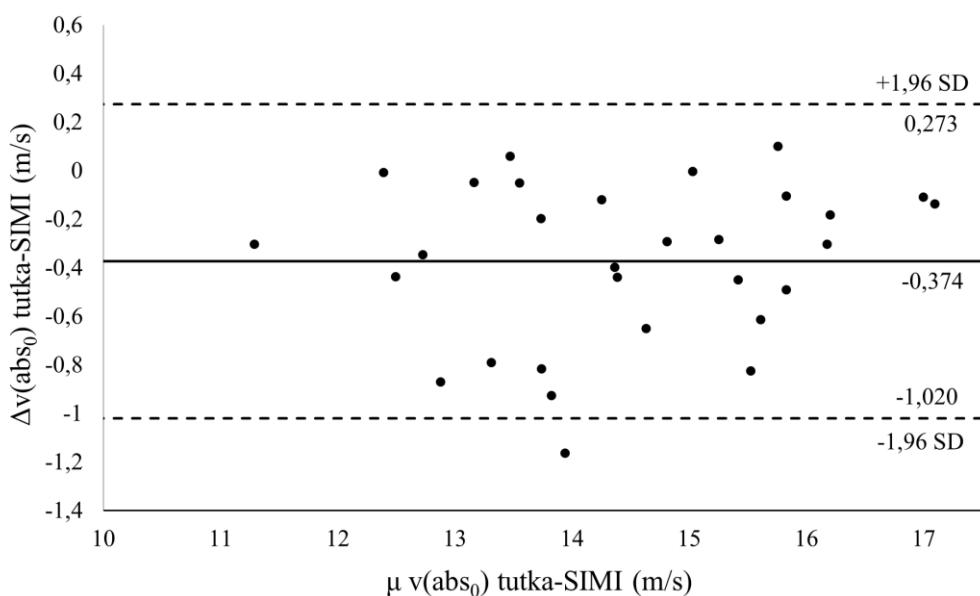
KUVA 5. Bland-Altmanin kuvaaja tutkan ja liikeanalyysien x-suuntaisten lähtönopeuksien arvoista m/s kuntopallon irtoamishetkellä ($v(x)_0$). X-akselilla nopeuksien keskiarvot ja y-akselilla nopeuksien erotukset. Keskiarvojen harha 0,096 m/s ($p = 0,147$) ja luottamusvälien yläraja 0,713 m/s ja alaraja $-0,521$ m/s.



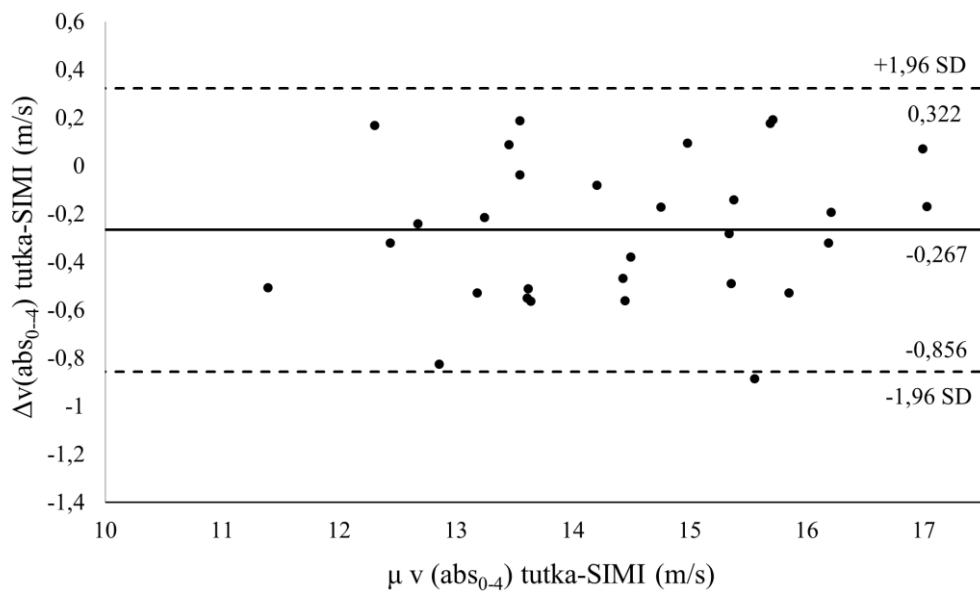
KUVA 6. Bland-Altmanin kuvaaja tutkan ja liikeanalyysien x-suuntaisten lähtönopeuksien arvoista m/s kuntopallon irtoamishetken ja seuraavan 4 kuvan keskiarvosta ($v(x)_{0-4}$). X-akselilla nopeuksien keskiarvot ja y-akselilla nopeuksien erotukset. Keskiarvojen harha 0,181 m/s ($p = 0,114$) ja luottamusvälien yläraja 0,716 m/s ja alaraja $-0,355$ m/s.



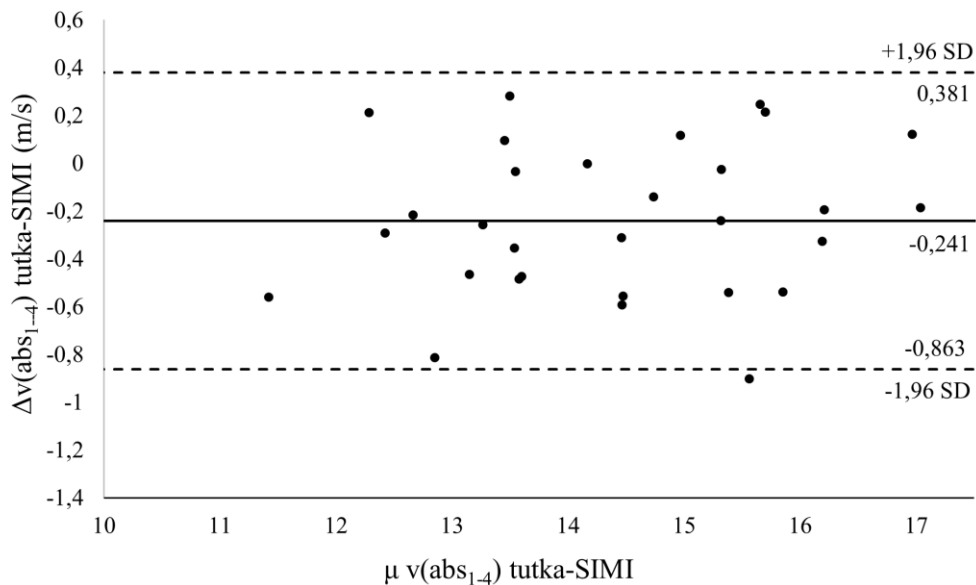
KUVA 7. Bland-Altmanin kuvaaja tutkan ja liikeanalyysien x-suuntaisten lähtönopeuksien arvoista m/s kuntopallon irtoamishetkestä seuraavien 4 kuvan keskiarvosta ($v(x)_{1-4}$). X-akselilla nopeuksien keskiarvot ja y-akselilla nopeuksien erotukset. Keskiarvojen harha 0,201 m/s ($p = 0,120$) ja luottamusvälien yläraja 0,769 m/s ja alaraja $-0,367$ m/s.



KUVA 8. Bland-Altmanin kuvaaja tutkan ja liikeanalyysien absoluuttisten lähtönopeuksien arvoista m/s kuntopallon irtoamishetkellä ($v(abs)_0$). X-akselilla nopeuksien keskiarvot ja y-akselilla nopeuksien erotukset. Keskiarvojen harha $-0,374$ m/s ($p = 0,413$) ja luottamusvälien yläraja 0,273 m/s ja alaraja $-1,020$ m/s.



KUVA 9. Bland-Altmanin kuvaaja tutkan ja liikeanalyysien absoluuttisten lähtönopeuksien arvoista m/s kuntopallon irtoamishetken ja seuraavan 4 kuvan keskiarvosta ($v(\text{abs})_{0-4}$). X-akselilla nopeuksien keskiarvot ja y-akselilla nopeuksien erotukset. Keskiarvojen harha $-0,267$ m/s ($p = 0,391$) ja luottamusvälien yläraja $0,322$ m/s ja alaraja $-0,856$ m/s.



KUVA 10. Bland-Altmanin kuvaaja tutkan ja liikeanalyysien absoluuttisten lähtönopeuksien arvoista m/s kuntopallon irtoamishetkestä seuraavien 4 kuvan keskiarvosta ($v(\text{abs})_{1-4}$). X-akselilla nopeuksien keskiarvot ja y-akselilla nopeuksien erotukset. Keskiarvojen harha $-0,241$ m/s ($p = 0,474$) ja luottamusvälien yläraja $0,381$ m/s ja alaraja $-0,863$ m/s.

7 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli arvioida Stalker AS5 -tutkalaitteen validiteettia lähtönopeuden mittaamisessa pään yli eteen -kuntopallonheittotestissä. Vertailukohteena käytettiin videokuvaamiseen perustuvaa markkeritonta 3D-liikeanalyysiä. Tutkan luotettavuutta arvioitiin tarkastelemalla tutkan ja liikeanalyysin x-suuntaisten ja absoluuttisten nopeuksien välistä eroa, korrelaatiota ja mahdollista harhaa. Hypoteesina oli, että tutkalaite olisi validi laite mittaamaan lähtönopeutta, kun kosinikulma pysyy alle 20 °.

7.1 Tutkalaitteen validiteetti

Vertailtaessa kahden riippuvan otoksen Student's t-testiä tai Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testiä kaikkien liikeanalyysin mittausten välillä oli tilastollisesti merkitsevä ero verrattuna tutkaan ($p \leq 0,001$), paitsi tutkan ja liikeanalyysin irrotushetken x-suuntaisen nopeuden ($v(x)_0$) välillä ($p = 0,105$). Korrelaatiokertoimien tulosten mukaan mittausmenetelmät vastasivat hyvin toisiaan, sillä korrelaatiot olivat voimakkaita ja tilastollisesti merkitseviä ($p < 0,001$). Korrelaatio oli suurinta tutkan ja liikeanalyysin x-suuntaisen nopeuden irrotushetken ja seuraavan neljän kuvan keskiarvon ($v(x)_{0-4}$) välillä ($r = 0,985$) ja pienintä tutkan ja liikeanalyysin irrotushetken absoluuttisen nopeuden ($v(abs)_0$) välillä ($r = 0,974$). Tutkan ja liikeanalyysin x-suuntaisten nopeuksien korrelaatiot olivat hieman parempia kuin tutkan ja liikeanalyysin absoluuttisten nopeuksien väliset, mikä selittyy lähtökulman suuruudella (0 ° vs. $13,6 \pm 5,51$ °). Näitä tuloksia tukee aikaisempi tutkimustulos ja ymmärrys siitä, että tutka mittaa esineen säteittäistä (tässä tutkimuksessa x-suuntaista) nopeutta, ja tuottaa tarkempia tuloksia kosinikulman pienentyessä (Robinson & Robinson 2016; Smith & Burke 2021; Weisberg ym. 2020). Korrelaatio oli myös hieman vahvempaa, kun liikeanalyysin nopeutta tarkasteltiin pidemmältä aikaväliltä, sen ollessa voimakkainta irrotushetken ja siitä seuraavan neljän kuvan ajalta (v_{0-4}). Liikeanalyysin lähtönopeus on luotettavampi, kun nopeutta tarkastellaan useamman kuvan ajalta (Okholm-Kryger 2019; Smith & Burke 2021; Weisberg ym. 2020).

Tarkasteltaessa Bland-Altmanin testin tuloksia, ei mikään menetelmä antanut tilastollisesti merkitsevää eroa tutkan ja liikeanalyysien välillä ($p > 0,05$). Suurin osa tuloksista asettuikin 95 % luottamusvälille muutamaa yksittäistä poikkeusta lukuun ottamatta. Harha oli tutkan ja lii-

keanalyysin x-suuntaisten nopeuksien välillä 0,096–0,201 m/s, ja tutkan ja absoluuttisten nopeuksien välillä –0,374– (–241) m/s. Tutka antoi siis hieman korkeampia x-suuntaisen nopeuden arvoja verrattuna liikeanalyysiin, harhan ollessa pienintä tutkan ja liikeanalyysin irrotushetken aikaisen nopeuden välillä ($v(x)_0$, 0,096 m/s), ja suurinta tutkan ja irrotushetkestä seuraavien neljän kuvan keskiarvon nopeuden välillä ($v(x)_{1-4}$, 0,201 m/s). Liikeanalyysin absoluuttisiin nopeuksiin verrattuna tutka antoi alhaisempia nopeuden arvoja, harhan ollessa pienintä tutkan ja liikeanalyysin irrotushetken neljän seuraavan kuvan ($v(abs)_{1-4}$, –0,241 m/s) ja suurinta tutkan ja liikeanalyysin irrotushetken nopeuden välillä ($v(abs)_0$, –0,374 m/s). Nämä tulokset ovat linjassa Weisbergin ym. (2020) ja Okholm-Krygerin ym. (2019) aikaisempien tutkimustulosten kanssa, joissa tutka aliarvioi absoluuttista nopeutta 0,4 m/s ja 0,36 m/s vastaavasti, joskin tässä tutkimuksessa absoluuttisen nopeuden harha oli kaikilla menetelmillä keskimäärin näitä tutkimuksia pienempi (noin –0,27 m/s). Mikään Bland-Altmanin testin tuloksista ei kuitenkaan ollut merkitsevä ($p > 0,05$), joten suhteellista harhaa menetelmien välillä ei ollut. Tähän tulokseen on voinut vaikuttaa kuntopallonheittotestin ohjeistus heittää kuntopalloa mahdollisimman laakaan, jonka seurauksena kuntopallon lähtökulmat jäivät myös pienemmiksi ja lentorata vähemmän kaarevaksi. Suurempi lähtökulma ei kuitenkaan selittänyt yksittäisiä 95 % luottamustasoisia poikkeavia tuloksia kaikissa tapauksissa, vaikka suurempi lähtökulma ja siten kosinikulma johtaakin suurempaan kosinivirheeseen tutkan mittaaman nopeuden ja absoluuttisen nopeuden välillä (Robinson & Robinson 2016; Smith & Burke 2021; Weisberg ym. 2020).

Tutkan mitaamat lähtönopeudet siis vastasivat hyvin niin liikeanalyysin x-suuntaisia kuin absoluuttisia nopeuksia korrelaatioiden tulosten ollessa merkitseviä. Bland-Altmanin testit eivät havainneet suhteellista harhaa menetelmien välillä, mutta kahden riippuvan otoksen testit havaitsivat merkitsevän eron kaikkien menetelmien välillä, paitsi tutkan ja liikeanalyysin irrotushetken x-suuntaisen ($v(x)_0$) nopeuden välillä. Kahden riippuvan otoksen eroavaa tulosta selittää se, että kummassakin mittausmenetelmässä tulokset olivat samansuuntaisia. Korrelaatio on siis vahvaa, vaikka tutkalaite systemaattisesti aliarvioi lähtönopeutta. Toisaalta suhteellista harhaa ei löytynyt, oletettavasti johtuen siitä syystä, että kosinikulma pysyi tutkimuksessa mallillisena (lähtökulma $13,6 \pm 5,51^\circ$). X-suunnassa kosinikulmaa ei ole, joka näkyy siinä, ettei merkitsevää eroa tutkan ja x-suuntaisen irrotushetken nopeuden välillä löytynyt. Koska menetelmien välillä löytyi merkitsevä ero, mutta merkitsevää suhteellista harhaa ei löytynyt, voidaan systemaattisen harhan suuruutta pitää pienenä ja käytännössä merkityksettömänä. Tämän tutkimuksen ja aikaisempien tutkimusten perusteella (Smith & Burke 2021; Weisberg 2020), tutka mittaa nopeutta riittävän pätevästi, kun kosinikulma pysyy alle 15° .

7.2 Tutkimusmenetelmien tarkastelu

Tutkimuksen vahvuuksina voidaan pitää hyvin suunniteltuja mittauksia ja tarkoin valittuja mittausmenetelmiä. Mittaukset eri laitteilla toteutettiin samanaikaisesti eli samoista suorituksista, ja validoitavan menetelmän eli tutkalaitteen vertailukohteena oli kriteeristandardi eli liikeanalyysi. Lisäksi mittausalue kalibroitiin tarkasti takymetrillä ja mittauksia valvottiin tarkasti. Huolellinen kalibrointi varmisti tehdyn liikeanalyysin luotettavuuden ja pätevyyden. Tutkan mittaamia tuloksia myös verrattiin useisiin liikeanalyysistä saatuihin nopeuksiin ja eri ajanhetkillä, kuten irrotushetkellä, mitä ei aikaisemmissa tutkimuksissa ole tarkasteltu.

Suurimpana rajoitteena tutkimuksessa voidaan pitää vanhaa tutkalaitetta, jonka mittaustaajuus oli 25 Hz ja siten huomattavasti pienempi, kuin vertailukohteena olleiden järjestelmäkameroiden kuvanopeus (240 Hz). Esimerkiksi tutkan mittaamat hieman suuremmat lähtönopeudet suhteessa liikeanalyysin x-suuntaisiin nopeuksiin todennäköisesti selittyvät sillä, että tutkan mittaus tapahtui pidemmältä, 40 ms ajalta. Käytettyjen järjestelmäkameroiden kuvanopeuden seurauksena irrotushetken ($v(x)_0$) nopeus oli 4,2 ms ajalta, irrotushetken ja sitä seuraavien neljän kuvan ($v(x)_{0-4}$) keskiarvon nopeus 21 ms ajalta, ja irrotushetken jälkeisten neljän kuvan ($v(x)_{1-4}$) keskiarvon nopeus 17 ms ajalta. Tällöin tutkan mittaama nopeus voi olla myös ajalta ennen kuntopallon irrotushetkeä, ja siten todellista irrotusnopeutta hieman suurempi. Ennen irrotushetkeä heittäjän distaalisten segmenttien eli käsien (ja esineen) liike on nopeampaa, sillä kaikkea liike-energiaa ei saada tehokkaasti siirrettyä esineeseen (Blazevich 2017, 199; Stodden ym. 2005). Tutkan mittaama nopeus oli liikkeen aikainen huippunopeus, jonka tutka on siis voinut mitata ennen varsinaista irrotushetkeä. Tuloksia ei myöskään voida yleistää suuremmalla nopeudella liikkuviin esineisiin, sillä lähtönopeudet pysyivät tässä tutkimuksessa alle 20 m/s.

Virheitä tuloksiin on voinut tulla esimerkiksi videokuvan analysointivaiheessa. Järjestelmäkameroiden 240 Hz kuvanopeudella kuvien välinen aikaero oli 4,2 ms, jolloin videon tapahtumia synkronoitaessa on voinut tapahtua muutaman millisekunnin synkronointivirhettä eli tapahtumien ajoitusten ristiriitaisuutta. Videomateriaalin digitointi myös tehtiin manuaalisesti, jolloin irrotushetken ja kuntopallon keskipisteen tulkinnassa on voinut tapahtua inhimillisiä virheitä. Lisäksi kuntopalloa ohjeistettiin heittämään mahdollisimman laakaan tutkan näkökentän suuntaisesti, eikä mahdollisimman pitkää lentomatkaa, kuten joissakin heittosuorituskyvyn testeissä. Tämän seurauksena kuntopallon lähtökulman suuruudet ja siten z-suuntaiset nopeudet pysyivät pieninä, mikä saattoi vaikuttaa korrelaatiokertoimien ja Bland-Altmanin testien tuloksiin.

7.3 Yhteenveto ja johtopäätökset

Kokonaisuudessaan tutkan mittaamat lähtönopeudet vastasivat hyvin liikeanalyysin x-suuntaisia ja absoluuttisia nopeuksia eri ajanhetkillä. Kuten aikaisemmissakin tutkimuksissa, tutka hieinan aliarvioi absoluuttista nopeutta, vaikkakin suhteellinen harha ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Erot tutkalaitteen ja liikeanalyysin absoluuttisten nopeuksien tulosten välillä olivat lopulta pienet, vaikka kahden riippuvan otoksen testeissä löytyikin merkitsevä ero. Koska suhteellista harhaa ei löytynyt ja mittausmenetelmien välillä oli vain triviaali systemaattinen ero, ei tutkalaitteen mittaama nopeus käytännössä eroa todellisesta lähtönopeudesta merkittävästi. Tutkalaitetta voidaan siis pitää lähtönopeutta validisti mittaavana laitteena, kun kosinikulma tutkalaitteen ja mitattavan esineen nopeuden välillä pysyy alle 15° .

Tulevat tutkimusaiheet. Jatkotutkimusta uudempien tutkalaitteiden luotettavuudesta vaaditaan, sillä muun muassa tutkalaitteiden mittaustajuuksien ja -tarkkuuksien paranevat uuden teknologian myötä. Tässä tutkimuksessa käytetystä tutkalaitteesta on olemassa uudempia malleja, joissa on suurempi mittataajuus ja -tarkkuus. Olisi myös mielekästä testata tutkalaitteen mittaaman nopeuden tarkkuutta pienemmällä ja nopeammin liikkuvalla esineellä. Tutkimisen arvoista olisi myös tarkastella useamman tutkalaitteen käyttöä ja niiden parhainta asettelua, sillä useamman tutkalaitteen käyttö saattaa tuottaa luotettavamman mittatuloksen. Kosinivirheen vaikutusta voisi tarkastella myös heitettävän esineen lähtökulman ja z-suuntaisen nopeuden kasvaessa, jos palloa heitettäisiin mahdollisimman pitkälle laakasuuntaisen heiton sijaan.

Käytännön sovellutukset. Tämän tutkimuksen perusteella tutkalaite on validi mittalaite käytettäväksi lähtönopeuden mittaamiseen harjoittelu- ja kilpailuolosuhteissa, kun tutka on aseteltu liikkeen suuntaisesti ja kosinikulmat pysyvät maltillisina (alle 15°). Näin ollen sen tuloksia voidaan käyttää heittosuorituskyvyn mittaamiseen ja kehittymisen seurantaan sekä reaaliaikaisen palautteenannon tukena. Käytännössä on tärkeää muistaa asettaa tutkalaite liikkeen suuntaisesti, sekä käyttää aina samaa mittausmenetelmää, jotta mittaustulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia.

LÄHTEET

- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. (2015). Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 81 (2), 103–107. doi:10.14358/PERS.81.2.103.
- Alcaraz, P. E., Abalde, J. A., Ferragut, C., Rodríguez, N., Argudo, F. M. & Vila, H. (2011). Throwing Velocities, Anthropometric Characteristics, and Efficacy Indices of Women's European Water Polo Subchampions. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 25 (11), 3051. doi:10.1519/JSC.0b013e318212e20f.
- Allard, P., Stokes, I. & Blachi, J-P. (1995). *Three-Dimensional Analysis of Human Movement*. 1. painos. Champaign, Illinois: Human Kinetics.
- Bartlett, R. (2000). *Principles of Throwing*. Teoksessa V. M. Zatsiorsky (toim.) *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention*. International Olympic Committee. 1. painos. Cambridge: University Press, 368, 371, 374–375.
- Bartonez, K. (2000). *Javelin Throwing: An Approach to Performance Development*. Teoksessa V. M. Zatsiorsky (toim.) *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention*. 1. painos. Cambridge: University Press, 411.
- Beato, M., Devereux, G. & Stiff, A. (2018). Validity and Reliability of Global Positioning System Units (STATSports Viper) for Measuring Distance and Peak Speed in Sports. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 32 (10), 2831. doi:10.1519/JSC.0000000000002778.
- Bland, J. M. & Altman, D. G. (2010). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *International Journal of Nursing Studies* 47 (8), 931–936. doi:10.1016/j.ijnurstu.2009.10.001.
- Blazevich, A. J. (2017). *Sports Biomechanics: The Basics: Optimising Human Performance*. 3. painos. Lontoo, Iso-Britannia: Bloomsbury. 38–39, 199.
- Buscà, B., Moras, G., Peña, J. & Rodríguez-Jiménez, S. (2012). The influence of serve characteristics on performance in men's and women's high-standard beach volleyball. *Journal of Sports Sciences* 30 (3), 269–276.
- Caldwell, J-M. E., Alexander, F. J. & Ahmad, C. S. (2019). Weighted-Ball Velocity Enhancement Programs for Baseball Pitchers: A Systematic Review. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 7 (2), 2325967118825469. doi:10.1177/2325967118825469.

- Carse, B., Meadows, B., Bowers, R. & Rowe, P. (2013). Affordable clinical gait analysis: An assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3D motion analysis system. *Physiotherapy* 99 (4), 347–351. doi:10.1016/j.physio.2013.03.001.
- Castro, M., Iglesias, L. & Sánchez, J. A. (2012). Vehicle speed measurement: Cosine error correction. *Measurement* 45 (8), 2128–2134. doi:10.1016/j.measurement.2012.05.022.
- Cherif, M., Chtourou, H., Souissi, N., Aouidet, A. & Chamari, K. (2016). Maximal power training induced different improvement in throwing velocity and muscle strength according to playing positions in elite male handball players. *Biology of Sport* 33 (4), 393–398. doi:10.5604/20831862.1224096.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2. painos. New York, Yhdysvallat: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 82.
- Eichelberger, P., Ferraro, M., Minder, U., Denton, T., Blasimann, A., Krause, F. & Baur, H. (2016). Analysis of accuracy in optical motion capture – A protocol for laboratory setup evaluation. *Journal of Biomechanics* 49 (10), 2085–2088. doi:10.1016/j.jbiomech.2016.05.007.
- Fleisig, G. S., Barrentine, S. W., Escamilla, R. F. & Andrews, J. R. (1996). Biomechanics of Overhand Throwing with Implications for Injuries: *Sports Medicine* 21 (6), 421–437. doi:10.2165/00007256-199621060-00004.
- Freeston, J., Carter, T., Whitaker, G., Nicholls, O. & Rooney, K. B. (2016). Strength and Power Correlates of Throwing Velocity on Subelite Male Cricket Players. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 30 (6), 1646. doi:10.1519/JSC.0000000000001246.
- Freeston, J. & Rooney, K. (2014). Throwing Speed and Accuracy in Baseball and Cricket Players. *Perceptual and Motor Skills* 118 (3), 637–650. doi:10.2466/30.PMS.118k25w4.
- Gamage, J. P., Silva, A. P. D., Nalliah, A. K. & Galloway, S. D. R. (2016). Effects of Dehydration on Cricket Specific Skill Performance in Hot and Humid Conditions. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism* 26 (6), 531–541. doi:10.1123/ijsnem.2016-0015.
- Goulet, C., Bard, C. & Fleury, M. (1989). Expertise Differences in Preparing to Return a Tennis Serve: A Visual Information Processing Approach. *Journal of Sport and Exercise Psychology* 11 (4), 382–398. doi:10.1123/jsep.11.4.382.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2013). *Fundamentals of Physics*. 10. painos. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 498–511.

- Harasin, D., Dizdar, D. & Markovic, G. (2006). High reliability of tests of maximum throwing performance. *Journal of Human Movement Studies* 51, 63–76.
- Hirashima, M., Kadota, H., Sakurai, S., Kudo, K. & Ohtsuki, T. (2002). Sequential muscle activity and its functional role in the upper extremity and trunk during overarm throwing. *Journal of Sports Sciences* 20 (4), 301–310. doi:10.1080/026404102753576071.
- Hirashima, M., Yamane, K., Nakamura, Y. & Ohtsuki, T. (2008). Kinetic chain of overarm throwing in terms of joint rotations revealed by induced acceleration analysis. *Journal of Biomechanics* 41 (13), 2874–2883. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.06.014.
- The Jamovi Project. (2023). Jamovi (versio 2.4). Ohjelmisto. Noudettu 22.8.2023. <https://jamovi.org>.
- Kerby, D. S. (2014). The Simple Difference Formula: An Approach to Teaching Nonparametric Correlation. *Comprehensive Psychology* 3, 11.IT.3.1. doi:10.2466/11.IT.3.1.
- Kimberlin, C. L. & Winterstein, A. G. (2008). Validity and reliability of measurement instruments used in research. *American Journal of Health-System Pharmacy* 65 (23), 2276–2284. doi:10.2146/ajhp070364.
- Laffaye, G., Debanne, T. & Choukou, A. M. (2012). Is the ball velocity dependent on expertise? A multidimensional study in handball. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 12 (3), 629–642. doi:10.1080/24748668.2012.11868624.
- Martin, C., Kulpa, R., Ezanno, F., Delamarche, P. & Bideau, B. (2016). Influence of Playing a Prolonged Tennis Match on Shoulder Internal Range of Motion. *The American Journal of Sports Medicine* 44 (8), 2147–2151. doi:10.1177/0363546516645542.
- Martínez-García, D., Chiroso Ríos, L., Rodríguez-Perea, A., Ulloa-Díaz, D., Jerez-Mayorga, D. & Chiroso Ríos, I. (2021). Strength training for throwing velocity enhancement in overhead throw: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Sports Science & Coaching* 16 (5), 1223–1235. doi:10.1177/17479541211002977.
- Mayes, M., Salesky, M. & Lansdown, D. A. (2022). Throwing Injury Prevention Strategies with a Whole Kinetic Chain-Focused Approach. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 15 (2), 53–64. doi:10.1007/s12178-022-09744-9.
- Maykut, J. N., Taylor-Haas, J. A., Paterno, M. V., DiCesare, C. A. & Ford, K. R. (2015). Concurrent Validity and Reliability of 2D Kinematic Analysis of Frontal Plane Motion During Running. *International Journal of Sports Physical Therapy* 10 (2), 136–146.

- Morriss, C. & Bartlett, R. (1996). Biomechanical Factors Critical for Performance in the Men's Javelin Throw: *Sports Medicine* 21 (6), 438–446. doi:10.2165/00007256-199621060-00005.
- Nagasawa, M., Hatori, Y., Kakuta, M., Hayashi, T. & Sekine, Y. (2012). Smash Motion Analysis for Badminton from Image. *IIEEJ Image Electronics and Visual Computing Workshop* 2012, Kuching, Malaysia. <http://www.iieej.org/trans/IEVC/IEVC2012/PDF/5A-1.pdf>
- Nagymáté, G., Tuchband, T. & Kiss, R. M. (2018). A novel validation and calibration method for motion capture systems based on micro-triangulation. *Journal of Biomechanics* 74, 16–22. doi:10.1016/j.jbiomech.2018.04.009.
- Neal, R. J., Snyder, C. W. & Kroonenberg, P. M. (1991). Individual differences and segment interactions in throwing. *Human Movement Science* 10 (6), 653–676. doi:10.1016/0167-9457(91)90021-O.
- Newton, R. U. & McEvoy, K. I. (1994). Baseball Throwing Velocity: A Comparison of Medicine Ball Training and Weight Training. *The Journal of Strength and Conditioning Research* 8 (3), 198–203.
- Okholm Kryger, K., Mitchell, S. & Forrester, S. (2019). Assessment of the accuracy of different systems for measuring football velocity and spin rate in the field. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* 233 (2), 324–330. doi:10.1177/1754337119830249.
- Phomsoupha, M. (2022). Reliability and validity of motion sensor and radar for measuring shuttlecock velocity in badminton. *Reliability and validity to measure velocity in badminton. International Journal of Racket Sports Science.* doi:10.30827/Digibug.80314.
- R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing (versio 4.1). Ohjelmisto. Noudettu 22.8.2023. <https://cran.r-project.org>.
- Robinson, G. & Robinson, I. (2016). Radar speed gun true velocity measurements of sportsballs in flight: application to tennis. *Physica Scripta* 91 (2), 023008. doi:10.1088/0031-8949/91/2/023008.
- Sainani, K. L. (2012). Dealing With Non-Normal Data. *PM&R* 4 (12), 1001–1005. doi:10.1016/j.pmrj.2012.10.013.
- Schober, P., Boer, C. & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia* 126 (5), 1763. doi:10.1213/ANE.0000000000002864.

- Schwesig, R., Hermassi, S., Wagner, H., Fischer, D., Fieseler, G., Molitor, T. & Delank, K.-S. (2016). Relationship Between the Range of Motion and Isometric Strength of Elbow and Shoulder Joints and Ball Velocity in Women Team Handball Players. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 30 (12), 3428. doi:10.1519/JSC.0000000000001450.
- Skolnik, M. I. (2001). *An Introduction to Radar Systems*. 3. painos. New York: McGraw-Hill, 1–14.
- Smith, N. D. W. & Burke, D. J. (2021). Influence of angular position on radar gun peak cricket ball speed measurements. *Sports Biomechanics* 0 (0), 1–14. doi:10.1080/14763141.2021.1887343.
- Štirn, I., Carruthers, J., Šibila, M. & Pori, P. (2017). Frequent Immediate Knowledge of Results Enhances the Increase of Throwing Velocity in Overarm Handball Performance. *Journal of Human Kinetics* 56, 197–205. doi:10.1515/hukin-2017-0037.
- Stockbrugger, B. A. & Haennel, R. G. (2001). Validity and Reliability of a Medicine Ball Explosive Power Test. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 15 (4), 431.
- Stodden, D. F., Fleisig, G. S., McLean, S. P. & Andrews, J. R. (2005). Relationship of Biomechanical Factors to Baseball Pitching Velocity: Within Pitcher Variation. *Journal of Applied Biomechanics* 21 (1), 44–56.
- Szymanski, D. J. (2012). Effects of Various Resistance Training Methods on Overhand Throwing Power Athletes: A Brief Review. *Strength & Conditioning Journal* 34 (6), 61. doi:10.1519/SSC.0b013e31826dc3de.
- van den Tillaar, R. & Ettema, G. (2003). Influence of instruction on velocity and accuracy of overarm throwing. *Perceptual and Motor Skills* 96 (2), 423–434. doi:10.2466/pms.2003.96.2.423.
- van den Tillaar, R. & Marques, M. C. (2011). A Comparison of Three Training Programs with the Same Workload on Overhead Throwing Velocity with Different Weighted Balls. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 25 (8), 2316. doi:10.1519/JSC.0b013e3181f159d6.
- van den Tillaar, R. & Marques, M. C. (2013). Reliability of Seated and Standing Throwing Velocity Using Differently Weighted Medicine Balls. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 27 (5), 1234. doi:10.1519/JSC.0b013e3182654a09.
- van der Kruk, E. & Reijne, M. M. (2018). Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *European Journal of Sport Science* 18 (6), 806–819.

- Viitasalo, J., Mononen, H. & Norvapalo, K. (2003). Release parameters at the foul line and the official result in javelin throwing. *Sports Biomechanics* 2 (1), 15–34. doi:10.1080/14763140308522805.
- Weisberg, A., Gall, J. L., Stergiou, P. & Katz, L. (2020). Comparison of Two Methods to Estimate the Maximal Velocity of a Ball during an Overhand Throw. *Proceedings* 49 (1), 43. doi:10.3390/proceedings2020049043.
- Werner, S. L., Fleisig, G. S., Dillman, C. J. & Andrews, J. R. (1993). Biomechanics of the elbow during baseball pitching. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 17 (6), 274–278. doi:10.2519/jospt.1993.17.6.274.
- Windolf, M., Götzen, N. & Morlock, M. (2008). Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems—exemplified on the Vicon-460 system. *Journal of Biomechanics* 41 (12), 2776–2780. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.06.024.