

**KIIHTYVYYSANTURIEN KÄYTTÖ MÄKIHYPYN  
PONNISTUSNOPEUDEN MÄÄRITYKSESSÄ**

Pauli Mikkonen

Biomekaniikan Pro gradu -tutkielma

Kevät 2006

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän Yliopisto

Työn ohjaaja: Vesa Linnamo

## TIIVISTELMÄ

Pauli Mikkonen. 2006. Kiihtyvyyssanturien käyttö mäkihypyn ponnistusnopeuden määrittämisessä. Biomekaniikan pro gradu -tutkielma. Liikuntabiologian laitos. JYVÄSKYLÄN yliopisto. s. 68.

Tutkielman tavoitteena oli selvittää kiihtyvyyssanturien soveltuvuutta mäkihypyn ponnistusnopeuden mittaamiseen. Kiihtyvyyssantureilla voitaisiin mahdollisesti vähentää mittauksiin ja analysointiin kuluva aikaa ja taloudellisia resursseja verrattuna aiemmin käytettyihin menetelmiin. Ensimmäisessä vaiheessa mitattiin yhden koehenkilön kelkkaergometrissa suoritettujen hyppyjen (14 kpl) ponnistusnopeudet kiihtyvyyssanturilta ja vertailunopeudet ponnistusetäisyyden ja voimasignaalin avulla. Anturilta laskettiin lineaarisen kiihtyvyyden kuvaaja liikesuuntaan ja integroitiin se lähtönopeuden selvittämiseksi. Toisessa vaiheessa nuoren maajoukkueen hyppääjän suorituksia tallennettiin 3 kappaletta Vuokatin K-90 hyppyrimäessä. Lonkkapiste kuvattiin sagittaalitasossa digitaalisella videokameralla (50 Hz) vertailunopeuden laskemiseksi sekä lonkka-olkapää -segmentti anturin kallistuskulman selvittämiseksi vartalon kallistuksen avulla. Kummassakin testissä koehenkilön alaselkään kiinnitettiin VTT:ltä lainassa ollut mittalaite, jossa oli kapasitiiviset yksiakseliset kiihtyvyyssanturi ja kallistusanturi. Keräystaajuus oli 500 Hz ja signaaleja ei suodatettu. Kelkkaergometrissa kiihtyvyyssanturi antoi hieman alhaisemmat nopeudet, mutta eri menetelmillä saadut nopeudet korreloivat hyvin ( $r = 0,934$ ), eikä tilastollisesti merkitsevää eroa nopeuksien välille syntynyt. Mäkihypyissä käytetty menetelmä ei soveltunut sellaisenaan ponnistusnopeuden mittaamiseen. Anturilla ei pystytty mittaamaan kallistusta ja kiihtyvyyden suuntaa dynaamisessa mäkihypytilanteessa, joita lineaarisen kiihtyvyyden muodostamiseksi tarvitaan, eikä myöskään videoanalyysillä saatu riittävän tarkkoja tietoja näistä muuttujista. Ponnistussuunnan mittaamiseksi sagittaalitasossa tarvitaan kaksi kohtisuoraan toisiinsa nähden sijaitsevaa mittausakselia. Tarvitaan lisäksi vähintään yksi erillinen kiihtyvyyssanturi tai gyroskooppi selvittämään anturin kallistuskulmaa tarkempien lineaaristen kiihtyvyyksien laskemiseksi. Tämän lisäksi kiinnitysmenetelmään täytyy tehdä parannuksia.

Avainsanat: mäkihyppy, kiihtyvyyssanturit, vertikaalinopeus

## **ABSTRACT**

Pauli Mikkonen. 2006. The use of accelerometers in the measurement of ski-jumping take-off velocity. Department of biology of physical activity. University of Jyväskylä. Pages: 68.

The main purpose for this study was to find out measuring possibilities of accelerometers to resolve ski-jumpers take-off velocity. With accelerometers it might be possible to reduce the need of time and resources compared to previously used methods. The acceleration measuring device consisted of a capacitive uniaxial accelerometer and inclinometer. The measurements were done in two parts. At first one subject performed 14 jumps with inclined sledge ergometer to test the measuring device and analyzing methods. Take-off velocities were calculated by integration after removing gravitational component. Reference velocities based on displacement signal and ground reaction forces were calculated. The second test took place at K-90 hill in Vuokatti. A young national team level jumper performed jumps and three of them were analyzed. In the ski-jumps a 50 Hz digital video camera was used for reference data (hip) and also for determination of inclination of the acceleration-measuring device (hip-shoulder angle). In both tests the measuring device was attached to lower back of the subject. Signals were gathered at 500 Hz frequencies and no filtering was applied. In the inclined sledge ergometer jumps the accelerometer gave comparable results with intra class correlation of .934 ( $P < 0.01$ ) with no significant differences between the classes. However, in the ski-jumps the take-off measured with accelerometer showed much smaller velocities than video analysis. Video analysis could not provide data needed on inclination and direction of acceleration of the measuring device. The measuring device itself could not measure those variables needed to calculate vertical velocity of jumper. Instead, a two-axis orthogonal setup is needed to determine direction of acceleration and also one additional separate accelerometer, or a gyroscope, is needed to solve inclination angle of measuring device in order to calculate accelerations in greater precision in sagittal plane. Also improvements in mounting of sensors need to be done for elimination of relative movements.

Keywords: ski-jumping, accelerometers, vertical velocity

# SISÄLTÖ

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1 JOHDANTO .....	6
2 KESKEISET KÄSITTEET JA LYHENTEET .....	8
3 MÄKIHYPY SUORITUKSENA .....	9
4 MÄKIHYPYN MITTAUSMENETELMIÄ .....	11
5 NOPEUDEN MITTAAMINEN BIOMEKANIIKASSA .....	13
6 KIIHTYVYYSANTURIT BIOMEKAANISESSA TUTKIMUKSESSA .....	17
6.1 Taustaa .....	17
6.2 Anturien rakenne ja toimintaperiaatteet .....	19
6.3 Anturien ominaisuuksia .....	22
6.4 Kiihtyvyyssignaali ja sen analysointi .....	23
6.5 Kiihtyvyyssignaalin näytteistys ja suodatus .....	27
6.6 Anturien kalibrointi .....	29
7 TUTKIMUKSEN TARKOITUS .....	30
8 MENETELMÄT .....	31
8.1 Kelkkaergometrihypyt .....	31
8.1.1 Kiihtyvyyden mittausjärjestelmä .....	32
8.1.2 Kiihtyvyyssanturin kalibrointi .....	34
8.1.3 Tutkimuksen kulku .....	35
8.1.4 Nopeuden laskeminen kiihtyvyyssignaalista .....	37
8.1.5 Tilastollinen analyysi .....	40

8.2 Mäkihypy	40
8.2.1 Mittausasetelma ja tutkimuksen kulku	40
8.2.2 Nopeuden laskeminen kiihtyvyyssignaalista	43
9 TULOKSET	47
9.1 Hyppy kelkkaergometrissa	47
9.1.1 Ponnistusnopeudet	47
9.1.2 Tilastollinen analyysi	49
9.2 Mäkihypy	49
10 POHDINTA	51
10.1 Hyppy kelkkaergometrissa	51
10.1.1 Anturin asennon vaikutus	51
10.1.2 Anturin suhteellisen liikkeen vaikutus	52
10.2 Mäkihypy	54
10.2.1 Kiihtyvyyden suunnan vaikutus	55
10.2.2 Anturin asennon vaikutus	56
10.2.3 Rotaatiokomponenttien vaikutus	58
10.2.4 Muut tekijät	59
11 YHTEENVETO JA JATKOKEHITYSTARPEET	61
11.1 Yhteenveto tuloksista	61
11.2 Menetelmälliset rajoitukset	61
11.3 Huomioita kiihtyvyyden mittalaitteistosta	63
12 LÄHTEET	65

# 1 JOHDANTO

Tässä tutkimuksessa haluttiin selvittää kokeellisesti testaamalla kiihtyvyyssanturien käyttömahdollisuuksia mäkihypyn ponnistusnopeuden mittaamisessa. Ponnistusvaihetta on pidetty kaikkein tärkeimpänä vaiheena, koska se vaikuttaa lähtönopeuteen ja -kulmaan, kiertomomenttiin sekä hyppääjän ja suksien asentoon hypyn aikana (Virmavirta 1993). Mäkihypyn ponnistusnopeuden mittaamiseen on käytetty menetelmiä liikeanalyseistä erilaisiin ponnistusvoiman mittaamenetelmiin. Aiemmin käytetyt menetelmät ovat toimivia ja tarkkoja, mutta joko tulokset voivat olla hitaita analysoida (videoanalyysi) tai menetelmä on resurssija sitova ja kallis (voimalevyt). Kiihtyvyyssantureilla voidaan saada tietoa ponnistuksen muuttujista langattomasti ja reaaliajassa. Niiden etuna on monipuoliset mittaushetköt ja kohtalaisen edullinen hinta.

Kiihtyvyyssanturien näennäinen käytön helppous voi antaa liian optimistisen kuvan kiihtyvyyssanturien soveltuvuudesta erilaisiin biomekaanisiin mittauksiin. Erona etämittaamenetelmiin kiihtyvyyssanturi mittaa omaa liikettään ja on näin vahvasti riippuvainen kiinnityksestään tutkittavaan kappaleeseen sekä kappaleen ominaisuuksista. Niggin ja Herzogin (1999) mukaan kiihtyvyyssanturien käyttö on yksi vaikeimmista mittaustekniikoista biomekaniikassa. Vaikeus muodostuu seuraavista asioista: kuinka hyvin mitattu kiihtyvyys vastaa kiinnostuksen kohteena olevaa kiihtyvyyttä, vastaako mitattu kiihtyvyys tutkimusongelmaan ja mitä mitattu kiihtyvyys tarkoittaa mekaanisesti ja biologisesti. (Nigg & Herzog 1999.) Kiihtyvyyssanturien käyttö ihmisen liikuttamisen tutkimisessa on vaativaa sekä analyttisesti että numeerisesti (Morris 1973).

Kiihtyvyyssantureilla suoritetuissa biomekaanisissa mittauksissa mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä on useita. Näitä ovat mm. kiihtyvyyssanturin sijaintipaikka ja kiinnitystiukkuus tutkittavassa kappaleessa, anturin ominaisuudet, tarkkuus jolla eri kiihtyvyyssanturien komponentit pystytään erottamaan toisistaan ja integroinnin aiheuttama mitta-arvojen ryömiminen nopeus- tai sijaintitiedon ratkaisemisessa. Lisätietoa tarvittiin kiihtyvyyssanturien käyttäytymisestä tästä mittausteknisesti haastavasta mäkihypyn ponnistusvaiheesta. Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia kiihtyvyyssanturien ponnistusnopeu-

den mittausmahdollisuuksia todellisissa mäkihyppyolosuhteissa ja selvittää mahdollisia kiihtyvyyssanturien käyttöä rajoittavia tekijöitä.

## 2 KESKEISET KÄSITTEET JA LYHENTEET

Jäykkä kappale	Ideaalinen rajoitetun kokoinen kiinteä kappale, joka ei altistu muodonmuutoksille. Kappaleen kahden valitun pisteen välinen etäisyys on aina vakio.
Kinematiikka	Kappaleiden liikkeiden kuvaamista ilman voimia
Kinetiikka	Kappaleiden liikkeiden kuvaamista voimien kanssa
Rotationaalinen	Pyörähtävä
Translationaalinen	Suoraviivainen
$a_{\text{anturi}}$	Anturin mittausakselin suuntainen lineaarinen kiihtyvyys
$a_{\text{kelkka}}$	Kelkan liikeradan suuntainen kiihtyvyys
$a_{\text{pysty}}$	Pystysuuntainen kiihtyvyys gravitaatiokentässä
$g$	Maanvetovoiman kiihtyvyys, putoamiskiihtyvyys ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )
$\beta$	Anturin mittausakselin ja kelkan liikesuunnan välinen kulma
$\gamma$	Oletettu (=hyppyripöydälle kohtisuora) anturin kiihtyvyyden suunta gravitaatiokenttään nähden mäkihyppyissä
$\varphi_k$	Anturin kallistuskulma gravitaatiokenttään nähden



### 3 MÄKIHYPY SUORITUKSENA

Mäkihyppy suorituksena voidaan jakaa eri osiin: vauhdinotto, ponnistus, lento ja laskeutumiseen valmistautuminen. Jokainen vaihe vaikuttaa osaltaan hypyn pituuteen. Ponnistusvaihetta on pidetty kaikkein tärkeimpänä vaiheena, koska se vaikuttaa lähtönopeuteen ja -kulmaan, kiertomomenttiin sekä hyppääjän ja suksien asentoon hypyn aikana. (Virmavirta 1993.)

Mäkihyppysuorituksessa hypyn pituus on suuri osa tuloksesta. Onnistunut ponnistus ja sen jälkeinen lentovaihe määrittävät hypyn pituuden ja onnistunut ponnistus tähtää maksimaaliseen pystysuoraan nopeuteen menettämättä liikenopeuttaan (Virmavirta 2000). Hypyn pituuteen vaikuttavia tekijöitä ovat: saavutettu nopeus vauhdinottomässä, nopeus jolla hyppääjä ponnistaa kohtisuoraan vauhdinottomäestä poispäin, nostovoima ja ilmanvastus hyppyhetkellä ja ilmalennossa, sekä hyppääjän massa varusteineen (Schmölzer & Müller 2005). Mäkihypyssä on ominaista nopea lentoasennon hakeminen ponnistuksen jälkeen. Virmavirta, Isolehto, Komi, Brüggeman, Müller ja Schwameder (2005) löysivätkin suurimman korrelaation hypyn pituuteen suksien ja kehon välisestä kulmasta hypyn alkuvaiheessa. Tveit ja Pedersen (1981) totesivat, että nopeuden säilyttämisen ja pystykiihtyvyyden välillä tulee aina olemaan ristiriitaisuus, ja onkin tärkeää päästä nopeasti hyvään aerodynaamiseen lentoasentoon ponnistuksen jälkeen. On kiinni hyppääjän taidosta kuinka hän onnistuu tässä vaativassa suorituksessa vieläpä vaihtelevissa olosuhteissa.

Ohuempi ilmanalakin vaikuttaa hypyn muuttujiin. Silloin ilmanvastus ei aiheuta niin suurta taaksepäin kiertävää momenttia hyppääjään ja tasapainon säilyttääkseen hyppääjä ei voi nojata niin paljon eteenpäin. Lentoasento, joka voi olla toiselle hyppääjälle optimaalinen, voikin olla toiselle epäedullinen riippuen hyppääjän antropometriasta ja käytetyistä välineistä. (Schmölzer & Müller 2005.) Mäkihypyn suorituksena vaikuttaa monta muuttujaa. Schwameder ym. (2005) totesivat yksittäisten muuttujien pienen korrelaation suoritukseen ja nostivat esiin hyppääjän henkilökohtaisten optimaalisten ratkaisujen etsimisen.

Vauhdinottomässä hyppääjään vaikuttaa maanvetovoiman kiihtyvyyden lisäksi vauhdinottomäen kaarevuus ja epätasaisuus, ladun ja suksen välinen kitka sekä ilmanvastuksen aiheuttamat vastusvoima ja noste. Ponnistus suoritetaan vaikuttavia voimia vastaan ja osittain niitä hyödyntäen. Ilmanvastuksen aiheuttama noste mahdollistaa hyppääjän tekemään ponnistuksensa lyhyemmässä ajassa kuin ilman tätä aerodynaamista nostetta (Virmavirta, Kivekäs & Komi 2001). Ensimmäiset ponnistukseen tähtäävät liikkeet alkavat vauhdinottomäen kaarevalta osalta tultaessa suoralle hyppyripöydälle. Tällöin keskipakovoiman loppuminen aiheuttaa omat vaikeutensa ponnistuksen ajoituksen ja liikkeiden koordinaation suhteen. (Virmavirta 2000.) Mäkiprofiilit on laadittu niin, että tutkimuksessaan Virmavirta, Perttunen ja Komi (2001) sai kolmessa eri kokoisessa hyppyrimässä kaarevalla osalla hyppääjän normaalikihtyvyyden aiheuttamaksi keskipakovoimaksi noin 60 %:a kehon massasta, joka vastaa kehoon kohdistuvana kiihtyvyytenä 1,6 G:tä.

## 4 MÄKIHYPYN MITTAUSMENETELMIÄ

Mäkihyppyä on tutkittu eri menetelmillä simuloituissa laboratorio-olosuhteissa, todellisissa mäkihyppyolosuhteissa, sekä tietokonesimulaatioilla. Straumannia pidetään ensimmäisenä mäkihypyn tutkijana sillä hän julkaisi fyysisen analyysin mäkihypystä jo 1920-luvulla suorittaen tuulitunnelikokeita (Smölzer & Müller 2002, 2005; Müller & Schwameder 2003). Mittausmenetelmät kehittyivät lähinnä laboratorio-olosuhteisiin soveltuviksi, kunnes voimantuottoa todellisissa hyppyolosuhteissa päästiin tutkimaan latuelementin alle sijoitetuilla voimalevyantureilla 70-luvulta alkaen Sobotkan ja Kastnerin toimesta (Sägesser, Neukomm, Nigg, Rüegg & Troxler 1981; Virmavirta 1993, 2000; Pelkonen 2000). Voimalevyantureilla on saatu luotettavia tuloksia mäkihyppääjän voimantuotosta todellisissa hyppytilanteissa. Etenkin pystysuuntaisia voimia on pystytty mittaamaan tarkasti, mutta voimalevyantureiden suuntaisille voimille ongelmia on aiheuttanut lämpölaajenemisen seurauksena latuelementtien pituuden muutos (Virmavirta 1993). Talvella myös latu-uraan pakkautuneen lumen tiedetään aiheuttaneen ongelmia (Virmavirta & Komi 1989). Voimalevyanturit eivät haittaa hyppääjää suorituksen aikana ja niitä voidaan käyttää myös kilpailuissa, mutta kiinteiden voimalevyanturien käyttö on rajoittunut pääosin hyppyripöydän alueelle (Müller & Schwameder 2003). Toisaalta vauhdinottomäen kaarevan osan alueelta on myös pystytty mittaamaan reaktiovoimia voimalevyantureilla (Virmavirta 1993). Tveit ja Pedersen (1981) tutkivat voimantuottoa ensimmäisenä suksen ja monon välissä suksen siteeseen kiinnitettävillä voima-antureilla päkiän ja kantapään alta. Näin voitiin tutkia voimantuottoa koko vauhdinottomäen matkalta, mutta menetelmä ei soveltunut kilpailuolosuhteisiin. Myöhemmin myös horisontaalivoimia on tutkittu vastaavalla menetelmällä (Pelkonen 2000). Painepohjallisia on käytetty mm. hyppääjän painonjakauman tutkimiseen vauhdinotto- ja ponnistusvaiheessa (Virmavirta & Komi 2000; Virmavirta ym. 2001). Tietokonemallinnuksella on tutkittu erityisesti lentovaiheen eri muuttujien vaikutusta hypyn pituuteen, joita ei pystyttäisi tutkimaan oikeilla koehenkilöillä (Virmavirta ym. 2001; Müller & Schwameder 2003; Schmölzer & Müller 2005). Lihasktiivisuuden mittauksilla on tutkittu mm. hermolihaskäytön adaptaatiota erilaisten hyppyrimäkien vaatimukseen (Virmavirta ym. 2001) ja hyppymonojen vaikutusta ponnistuksen rajoittavana tekijänä (Virmavirta & Komi 2001). Videoanalyysi on vakiintu-

nut menetelmä ja sitä on käytetty runsaasti. Esimerkiksi Komi, Nelson ja Pulli (1974) videoivat maailmanluokan hyppääjiä kilpailuolosuhteissa ja selvittivät laajasti erilaisia nopeus- ja kulmamuuttujia ponnistuksesta laskeutumiseen asti. Viimeaikoina on tutkittu myös kolmiulotteista dataa aikaisemman sagittaalitasoon kuvauksen lisäksi (Schwameder ym. 2005). Jopa GPS:n (Global Positioning System) käyttöä on testattu (Blumenbach 2005).

Kilpailutilanteissa vain kinemaattisia parametreja koko suorituksen ajalta ja kineettisiä parametreja ponnistuksen ajalta voidaan mitata. Kaikkia muita menetelmiä voidaan käyttää ainoastaan harjoitteluolosuhteissa. Tärkeää on kehittää sellaisia palautejärjestelmiä, joilla voidaan arvioida suoritusta välittömästi sen jälkeen käyttäen kinemaattisia ja kineettisiä parametreja (Müller & Schwameder 2003.)

## 5 NOPEUDEN MITTAAMINEN BIOMEKANIIKASSA

Biomekaanisessa tutkimuksessa kappaleen suoraviivaista nopeutta voidaan selvittää usealla eri menetelmällä. Seuraavassa on esitetty menetelmiä joita on käytetty, tai jotka voisivat sopia, hyppääjän nopeuden mittaamiseen.

Kappaleen keskinopeuden mittaamiseen kahden pisteen välillä voidaan käyttää valokennoja, jotka sijoitetaan edeltä sovituille paikoille kappaleen oletetulle reitille. Rakenteellisesti valokennoportti koostuu lähettimestä ja vastaanottimesta. Valokennon toimintaperiaatteena on, että lähtin lähettää valosäteen valoaktiiviseen komponenttiin heijastavan pinnan kautta ja kappale estää ohi mennessään valosignaalin kulun. Muodostuu tunnettu signaali, josta tiedetään kappaleen ohittaneen valokennon. Kappaleen ohittaessa valokennoja syntyy signaaleja, joiden välisestä aikaerosta ja tunnetusta välimatkasta voidaan laskea kappaleen keskinopeus. Menetelmän tarkkuuteen vaikuttaa kappaleen muoto ja valokennoportin sijainti. Valokenno ei erottele mikä valokennoportin signaalin katkaisee, vaan katkaisusignaali syntyy kun kappaleen jokin osa katkaisee valokennon säteen, mikä on huomioitava valokennoporttien sijoittamisessa tarkkuuden säilyttämiseksi. Luotettavuutta voidaan parantaa lähettämällä sellaista valoallonpituutta, joka erottuu muusta valaistuksesta. Menetelmä ei pysty antamaan tietoa siitä minkälaista liikettä kahden valokennoportin välillä tapahtuu vaan ainoastaan keskinopeuden, mikä määrää sen käyttömahdollisuuksien rajat. Menetelmää on usein käytetty mäkihypyssä hyppääjän vauhdinottomäen suuntaisen nopeuden mittaamisessa. Nopeuden mittaamisen lisäksi toinen merkittävä sovellus on eri mittausten aikasykronointi valokennospulssin avulla (esim. *Virmavirta ym. 2001*).

Toinen keino mitata nopeutta on käyttää tutka- tai lasermittausperiaatetta, vastaavasti kuten liikenteen nopeuden valvonnassa. Kummassakin menetelmässä lähetetään signaali, joka heijastuu mitattavasta kappaleesta. Tutkaperiaatteessa käytetään radioaaltoa ja lasertekniikassa koherenttia valoaaltoa. Tutkaperiaatteessa tutkitaan heijastuneen signaalin taajuuden muutosta, joka on suhteellinen kappaleen nopeuteen. Lasermittauksessa mitataan signaalin lähettämisestä sen takaisinheijastumaan kulunutta aikaa, josta saadaan signaalin kulkema matka, ja perättäisten näytteiden avulla voidaan laskea kap-

paleen nopeus. Mittausetäisyyden ollessa suuri laserin kohdentaminen pieniin kappaleisiin voi olla vaikeaa. Lisäksi kaikki lähettimen ja kohteen välissä oleva lumi, vesi, pöly tms. vaikuttavat signaalin kulkuun ja mittauksen luotettavuuteen. Pienessä tai epätasaisessa kohteessa heijastuma voi tulla eri kohdasta kuin on tarkoitus mikä tietenkin vaikuttaa nopeusmittaukseen. Menetelmät ovat rajoittuneet mittaussuunnan suhteen, koska mittavirhe kasvaa kohteen liikesuunnan ja mittaussuunnan välisen kulman kasvaessa. Ne sopivatkin parhaiten suoraviivaisen liikkeen mittaamiseen, jossa ne ovat sopivissa olosuhteissa tarkkoja ja luotettavia. Tutkamittausta on käytetty esimerkiksi pallon heitonopeuden ja lyöntinopeuden mittaamiseen (Hore & Watts 2005; Forthomme, Croisier, Ciccarone, Crielaard & Cloes 2005).

Edelliset menetelmät eivät juurikaan sovellu ponnistusnopeuden ts. pystysuoran nopeuden mittaamiseen. Eräs keino mitata kappaleen nopeutta on käyttää voimalevyantureita, joiden toiminta perustuu reaktiivoimien mittaamiseen. Kappaleella täytyy olla kontakti voimalevyanturin kanssa, joka luonnollisesti rajoittaa mittaukset niiden sijaintipaikkaan. Newtonin kolmannen lain mukaan kahden kappaleen vuorovaikutuksessa kappaleet vaikuttavat yhtä suurilla, mutta vastakkaisilla, voimilla toisiinsa. Esimerkiksi mäkihypyssä näitä reaktiivoimia on mitattu myös niin päin, että voima-anturit ovat olleet tutkittavassa kappaleessa kiinni (Tveit & Pedersen 1981; Pelkonen 2000), mikä hieman laajentaa mittausmahdollisuuksia. Kappaleen saama kiihtyvyys voidaan laskea siihen kohdistuvan voimaimpulssin ja massansa avulla Newtonin toisen lain mukaan. Voimasignaalista voidaan laskea kappaleen kiihtyvyys, kun kappaleen massa tunnetaan

$$F + mg = ma \quad (1)$$

eli kappaleeseen kohdistuva voimien resultantti aiheuttaa kappaleeseen massasta riippuvan kiihtyvyyden painovoimakentässä. Nopeus saadaan kiihtyvyyden avulla kaavalla

$$v = v_0 + a_{\text{avg}} t, \quad (2)$$

jossa  $v_0$  on kappaleen alkunopeus,  $a_{\text{avg}}$  on keskimääräinen kiihtyvyys tarkastelun aikavälillä ja  $t$  on kiihtyvyyden vaikutusaika.

Videoanalyysillä tarkoitetaan video/filmikameroilla kuvattua liikeanalyysiä. Kamera muodostaa kaksiulotteisen kuvan kolmiulotteisesta maailmasta. Kun käytetään useamman kameran kaksiulotteista kuvatietoa kohteen kolmiulotteisen tilakoordinaattien selvittämiseksi, käytetään usein Abdel-Azizin ja Kararan 1971 esittämää menetelmää, DLT:tä (direct linear transformation) (Allard, Stokes & Blanche 1995; Nigg & Herzog 1999). Kameroiden käyttö vaatii ennen mittauksia suoritettavaa kalibrointia. Kalibrointiin käytetään usein kalibroitikehystä, jossa on kiinnitettynä markkereita tunnetuissa paikoissa. Kameran kohdennetaan kalibroitikehykseen ja mitataan kameroiden ja kehyksen sijainti. Näin markkerien sijainti maailmankoordinaatistossa tunnetaan. Kameranalta saadaan tieto kuvan koordinaateista ja optisesta keskipisteestä. Lisäksi on ehdottoman tärkeää että kameroita ei liikuteta kalibroinnin jälkeen mittausten aikana. (Allard ym. 1995.) Kalibroitikehyksen sijaan voidaan käyttää kalibroitisauvoja, joilla voidaan helposti määrittää kalibroitialueen tilavuus (Nigg & Herzog 1999). Useampaa kameraa käytettäessä kalibrointiin kuuluu myös kameroiden aikakalibrointi eli synkronointi. Synkronoidut kamerrat toimivat samassa vaiheessa ts. jokaisen kameran ottama kuva pystytään identifioimaan samaan ajan hetkeen ja yhdistämään toisten kameroiden kuvainformaatioon. Mitä suurempi on kameroissa käytetty kuvanottoaajuus, sitä pienempi on kahden peräkkäisen kuvan välinen aika jolloin myös liikkeen analysointi on tarkempaa. Liikkeen luonne ja analysointitarkkuuden vaatimus vaikuttavat kuvanottoaajuuden valintaan. Staattisten kamerakulmien lisäksi voidaan käyttää kohdetta seuraavaa kameraa (panning/tilting camera), jolla saavutetaan laajempi kuvausala. Samoin kuin voimalevymittaukset videoanalyysimenetelmän on rajoittunut tilavuudeltaan. Mayagoitia, Nene ja Veltink (2002) toteavat optisten liikeanalyysimenetelmien sallivan mittaukset vain rajoitetussa tilavuudessa ja markkerien peittyvän helposti kameroilta johtaen vaillinaiseen dataan.

Markkerien digitoinnissa voidaan työ tehdä käsin tai antaa liikeanalyysiohjelman suorittaa niiden tunnistus automaattisesti (Nigg & Herzog 1999). Kaikissa liikeanalyysissä ei käytetä markkereita ja mm. kilpailuolosuhteiden vuoksi niiden käyttö ei onnistuisikaan (Virmavirta 2005; Schmölzer & Müller 2005). Tyypillinen kameramenetelmän tarkkuus on 0,1% näkökentästä. Kävelyn tutkimiseen käytetyssä laboratorioissa kameramenetelmän erottelukyky on tyypillisesti 1 mm metrin näkökentässä. Esimerkiksi 1 g:n suuruinen 15 Hz:n taajuinen sinimuotoinen kiihtyvyyden vastaa 1,1 mm:n sijainnin muutosta. (van den Bogert, Read & Nigg 1996.) Mitä pidemmän matkan tark-

kailtava kohde liikkuu kameran näkökentän ohitse sitä useampi staattinen kamera vaaditaan tai käytetään kohdetta seuraavaa kameraa. Vaihtoehtoisesti voidaan kasvattaa kameran ja kohteen välistä etäisyyttä näkökentän kasvattamiseksi, mutta silloin tarkkuus heikkenee.

Videoanalyysissä kappaleen nopeus lasketaan sijainnin muutoksen avulla. Videoanalyysillä kinemaattisen tiedon selvittäminen altistaa suuritaajuiselle kohinalle. Kun kappaleen sijainnille suoritetaan ajan suhteen ensimmäisen asteen [nopeus] tai toisen asteen derivointi [kiihtyvyys], korkeammilla taajuuksilla esiintyvä kohina lisääntyy huomattavasti huonontaan signaali-kohina -suhdetta. Ongelmaa voidaan helpottaa signaalin [alipäästö]suodatuksella. (Morris 1973.) Virnavirta ym. (2005) käyttivät kameradatan suodattamiseen neljännen asteen Butterworth-suodatinta rajataajuudella 8 Hz tutkiesaan mäkihypyn lennon alkuvaiheen muuttujia.

Optisissa kameramenetelmissä virhettä tulee useista lähteistä. Linssin vääristymä, kameroiden sijoittelu ja kalibroinnin epätarkkuus, markkerien liikkuminen suhteessa toisiinsa ja kiinnitysalustaan nähden ja niiden digitointi tietokoneelle aiheuttavat kaikki jonkin verran virhettä mittauksiin. Lisäksi markkerin näkyminen kameralle voi estyä hetkellisesti, jolloin sen sijainti voidaan määrittellä tarkasti vain niiden kameroiden avulla jotka näkevät sen. Tämä asettaa omat vaatimuksensa kameroiden määrälle ja sijoittelulle. (Nigg & Herzog 1999.)



## 6 KIIHTYVYYSANTURIT BIOMEKAANISESSA TUTKIMUKSESSA

### 6.1 Taustaa

Kiihtyvyyssantureilla mitattaessa on pidettävä mielessä se, mitä tulokset varsinaisesti kertovat tarkasteltavan kappaleen liikkeistä ja pystytäänkö tuloksilla vastaamaan tutkimusongelmaan. Lisäksi on huomioitava mekaaniset ja biologiset ongelmat, joita niiden käyttöön liittyy. (Nigg & Herzog 1999.) Morrisin (1973) mukaan ihmisen liikkumisen tutkiminen kiihtyvyyssantureilla on vaativaa sekä analyyttisesti että numeerisesti. Tämä pätee siitä huolimatta, että tehtäisiin approksimaatioita mm. jäykästä kappaleesta tai gravitaatiokentän muuttumattomuudesta etäisyyden funktiona.

Kiihtyvyyssanturien käytöstä ihmisen liikkeiden mittaajana on tehty lukuisia tutkimuksia ja viime vuosina trendi on ollut lisääntymään päin. Morrisin (1973) mukaan joitain onnistuneita mittauksia on tehty jo 1950-luvulta alkaen, mutta useimmat ovat epäonnistuneet, joista suurimpana syynä on ollut vääränlaisen anturin käyttäminen. On käytetty pietsosähköisiä antureita, jotka ovat soveltuneet paremmin tärinän mittaamiseen, ja joilla on huono herkkyys sekä vasteettomuus vakiokiihtyvyydelle. Anturit ja analysointimenetelmät ovat toki parantuneet vuosien varrella. Oikein käytettynä kiihtyvyyssanturien käyttömahdollisuudet ovat laajat. Kiihtyvyyssantureita voidaan käyttää erilaisten kappaleen liikkeiden, kuten kiihtyvyyden, törmäyksen, vibraation sekä kallistuksen mittaamiseen. Lisäksi kiihtyvyyssignaaleista voidaan laskea kappaleen nopeus, sijainti, kulmakiihtyvyys ja kulmanopeus. Liikuntatieteissä kiihtyvyyssantureiden sovelluskohteina on ollut mm. energian kulutuksen ja aktiivisuuden arviointi (Chen & Ming 1997; Eston, Rowlands & Ingledeu 1998), erilaisten suoja- ja turvavarusteiden vaimennusominaisuuksien testaaminen (Newman, Beusenbergh, Shewchenko, Withnall & Fornier 2005) ja vammoja aiheuttavien törmäyksien tutkiminen (Yogonandan, Zhang, Pintar & Liu 2006), kehon liikkeen analysointi segmenttien voimantuoton ja momenttien avulla (van den Bogert ym. 1996), kehon segmenttien välisten kulmien ja kulmanopeuksien mittaaminen (Boonstra ym. 2006) sekä lihasten tuottaman tehon

mittaus (Thompson & Bembien 1999). Lisäksi kolmiakselisen kiihtyvyyssanturin ominaisuutta on käytetty hyväksi tasapainon tutkimisessa (Moe-Nilssen 1998). Kolmiakselinen kiihtyvyyssanturi on valmistettu kolmesta anturielementistä, joiden mittausakselit on sijoitettu ortogonaalisesti eli kohtisuoraan toisiinsa nähden. Tällaisella anturilla segmentin asento voidaan selvittää suhteessa maailmankoordinaatistoon staattisessa tilassa. Usein kiihtyvyyssantureita on käytetty biomekaanisessa tutkimuksessa kävelyn, juoksun tai kohtalaisen hitaiden liikuntasuoritusten kinematiikan tai tasapainon analysointiin. Suuria kiihtyvyyksiä tai jatkuvaa värinää sisältäviä liikuntasuorituksia on tutkittu vähemmän.

Ziljstra & Bisseling (2004) näkevät kiihtyvyyssanturien käytössä selvää etua voimalevy-/kamerajärjestelmiin nähden, koska niitä voidaan käyttää pitkäkestoisissa mittauksissa ja luonnollisissa olosuhteissa ilman kalliita ja monimutkaisia laboratoriolaitteita. Mayagoitia ym. (2002) tutkivat optisen järjestelmän korvaamista kävelytestissä neljällä yksiakselisella kiihtyvyyssanturilla ja yhdellä gyroskoopilla yhtä alaraajan segmenttiä kohden. Alaraajan kallistuskulmat, kulmanopeudet ja -kiihtyvyydet sekä polven lineaarinen kiihtyvyys määritettiin sagittaalitasossa. Testi suoritettiin viidellä eri kävelynopeudella, ja tutkijat totesivat sen olevan tarkkuudeltaan samaa luokkaa optisen järjestelmän kanssa. Kuitenkin suuremmilla kävelynopeuksilla, kantaiskujen voimakkuuden kasvaessa kiihtyvyyssanturien signaalien huippuarvot vääristyivät todennäköisesti kantaiskun tai sitä seuranneen värinän seurauksesta. Gyroskoopit eivät reagoineet vastaavalla tavalla. Tutkijat totesivatkin, että pelkät kiihtyvyyssanturit eivät olleet kovin tarkkoja mittaamaan kulmanopeuksia, vaan gyroskooppien käyttö kiihtyvyyssanturien ohella antaa luotettavampia tuloksia vastaavissa mittauksissa. Boonstra ym. (2006) päätyivät vastaavanlaiseen johtopäätökseen tutkiessaan tuoilta seisomaan nousun kinematiikkaa yksittäisillä kiihtyvyyssantureilla ja gyroskoopeilla.

Kiihtyvyyssanturit ovat melko edullisia verrattuna muihin menetelmiin. Ne ovat pieniä kooltaan ja keveitä. Siitä on selvää etua liikuntasuoritusten analysoinnissa, sillä kiihtyvyyssanturit eivät juurikaan haittaa liikkumista ja suorituksista saadaan luonnollisempia. Mittaukset voidaan tallentaa langattomasti tietokoneelle tai dataloggerille erilaisissa ympäristöissä.

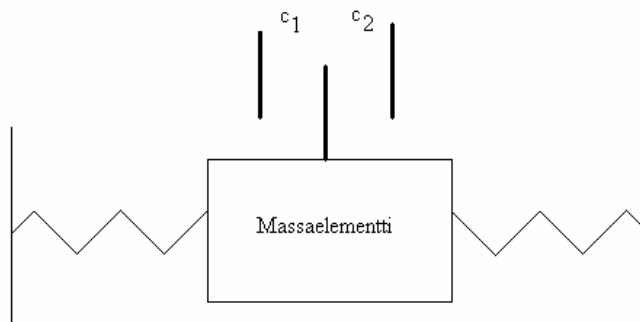
Kiihtyvyyssanturien käytössä omat hankaluutensa aiheuttaa tutkittavan kappaleen ominaisuudet. Kiihtyvyyssanturit kiinnitetään tutkittavaan kappaleeseen (koehenkilö, liikuntasuorituksen apuväline) ja silloin on otettava huomioon kiinnityskohdan merkitys mittasignaaliin. Boyerin ja Niggin (2006) mukaan anturin kiinnittäminen pehmytkudokseen voi vaikuttaa kiihtyvyyssmittauksiin. Anturin kiinnityskohdassa voi ilmentyä paikallisia värinöitä, jotka riippuvat kiinnityskohdasta sekä anturin kiinnitystiukkuudesta (Yoganandan ym. 2006). Lisäksi anturi pyrkii liikkumaan pois paikoiltaan suhteessa kiinnityskohtaansa massansa takia, mikä voi aiheuttaa vääristyneitä mittaustuloksia (Kuivalainen 1992). Antureista pyritäänkin tekemään mahdollisimman keveitä (Vihriälä 2002). Mittauskohdan merkitys kiihtyvyyssignaaliin tulee ilmi myös toisella tavalla. Esimerkiksi tutkittaessa kantaiskuja suurimmat kiihtyvyyden arvot saadaan kontaktialueen läheltä eikä ylävartalosta (Nigg & Herzog 1999). Tällöin keho toimii silloin tavallaan iskunvaimentimena kontaktialueen ja anturin välissä.

Potentiaaliset kiihtyvyyssanturien kiinnityskohdat sijaitsevat sellaisissa paikoissa, joihin anturi on helppo kiinnittää tukevasti. Jos anturi laitetaan kehoon, Niggin ja Herzogin (1999) mukaan se pitäisi mieluiten laittaa kohtaan jossa ihonalaiskudoksen määrä on vähäinen. Näin vähennetään anturin suhteellista liikkumista kehon segmenttiin nähden. Anturin suhteellinen liikkuminen ja sen aiheuttama vaste on kiusallinen signaalinkäsittelyn kannalta siinä mielessä, että sitä on hyvin hankala poistaa signaalista jälkikäteen. Tutkimuksen kohteena voi olla myös pehmytkudoksen värähtelyominaisuudet kuten Boyerin ja Niggin tutkimuksessa (2006), jossa tutkittiin kantaiskuilla lihasten värähtelyominaisuuksia. Anturit kiinnitettiin tukevasti lääketieteelliseen käyttöön soveltuvalla liimalla ja teipillä ihoon kiinni. Kiihtyvyyssanturit voidaan kiinnittää esimerkiksi koehenkilölle puettavaan valjaisiin tai vyöhön (van den Bogert ym. 1996; Moe-Nilssen 1998). Tutkimuksessaan Mayagoitia ym. (2002) kiinnittivät kiihtyvyyssanturit kevytrakenteisiin ja jäykkiin alumiinitankoihin, jotka kiinnitettiin alaraajaan elastisilla nauhoilla.

## **6.2 Anturien rakenne ja toimintaperiaatteet**

Kiihtyvyyssanturi on Gardnerin (1994) mukaan käytännössä jousivaimenteinen massa - systeemi. Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyden massa aiheuttamaa voimavaikutusta.

Kiihtyvyyssanturin massaelementin liikettä voidaan mitata erilaisilla menetelmillä, jotka muuntavat sijainnin tai sen muutoksen sähköiseksi vasteeksi. Kuvassa 1 on esitetty esimerkki vaimennettuun jousi-massasysteemiin perustuvan kapasitiivisen kiihtyvyyssanturin periaatteellisesta rakenteesta. Kolme elektrodia, joista yksi on kiinni massaelementissä ja kaksi anturin rungossa, muodostavat kaksi kondensaattoria  $c_1$  ja  $c_2$ . Massaelementin liikkua kiihtyvyyden vaikutuksesta kondensaattorien kapasitanssi muuttuu. Tällöin voidaan mitata kapasitanssien suhdetta kiihtyvyyden määrittämiseksi.



KUVA 1. Erään kapasitiivisen jousi-massasysteemin periaatteellinen rakenne.

Vakiokiihtyvyys (voimavaikutus  $F$ ) kohdistuu massaelementtiin aiheuttaen massan sijainnin muutoksen  $\Delta x$ . Tämän materiaalin venymän laskemiseen voidaan soveltaa harmonisen voiman kaavaa, joka on riippuvainen jousivakiosta  $k$ ,

$$F = -k\Delta x. \quad (3)$$

Miinusmerkki korostaa venymän suuntaa. Massaan  $m$  kohdistuvaa kiihtyvyyttä voidaan mitata venymän avulla. Lineaarisuus riippuu muotoa muuttavan materiaalin ominaisuuksista (Johnson 2006)

$$a = -\frac{k}{m}\Delta x. \quad (4)$$

Kaavat pätevät vakiokiihtyvyydessä, mutta dynaamisessa tilanteessa kiihtyvyys ja venymä eivät vastaa jokaisella ajanhetkellä toisiaan. Siihen vaikuttaa erityisesti kiihtyvyyden muutosnopeus.

Kiihtyvyyssantureilla toteutettu mittausjärjestelmä koostuu tyypillisesti mittausantureista, signaalinkäsittelyelektroniikasta sekä tiedon tallennusvälineestä. Käytettävällä elektroniikalla suodatetaan ja vahvistetaan signaalia, huolehditaan lämpötilakompensoinnista ja suoritetaan analogia-digitaalimuunnoksia, sekä tallennetaan signaali tai lähetetään se eteenpäin analysoitavaksi. (Gardner 1994.) Kiihtyvyyssanturien rakenne voi vaihdella samoin kuin menetelmät sähköisen kiihtyvyyssignaalin muodostamiseksi. Seuraavassa on esitetty joitakin anturiratkaisuja.

*Vastusvenymäliuska-anturi* koostuu kappaleeseen kohtisuoraan kiinnitetystä palkista, johon on kiinnitetty tyypillisesti neljä venymäliuskaa, kaksi palkin yläreunaan ja kaksi alareunaan. Silloin kun toiset venymäliuskat mittaavat palkin venymistä, vastakkaiset mittaavat puristumista. Palkin taipuessa kiihtyvyyden vuoksi venymäliuskan pituus ja resistanssi muuttuu. Vastusvenymäliuskat valmistetaan ohuesta metallikalvosta tai -langasta. Venymäliuskat kytketään Wheatstonen siltaan. (Nigg & Herzog 1999.) Wheatstonen sillasta saadaan ulostulo, joka on suhteellinen anturin mittaussuureen kanssa ja samalla parannetaan lämpötilakompensointia.

*Pietsoresistiivisessä* anturissa käytetään pietsoresistiivistä piikidettä, jonka resistanssi muuttuu mekaanisen voiman aiheuttamasta piikiteen muodon muutoksesta. Piikide on anturin valmistuksessa yhdistetty massaelementin ja anturin rungon yhdistävään varreen. Sen rakenne vastaa venymäliuska-anturin rakennetta. (Nigg & Herzog 1999.)

*Pietsosähköinen* anturi hyödyntää myös piikidettä. Piikiteen vastakkaisiin pintoihin syntyy pieni polarisoitunut sähkövaraus mekaanisen muodonmuutoksen seurauksena. Kuivalaisen (1992) mukaan syntyvä sähköinen varaus on suoraan verrannollinen vaikuttavaan voimaan ja riippumaton kiteen paksuudesta. Pietsosähköiset anturit ovat hyviä nopeissa dynaamisissa kiihtyvyyssmittauksissa, mutta niiden käyttö on rajoittunutta staattisissa mittauksissa, sillä ne eivät anna vastetta vakiokiihtyvyydelle (Allard ym. 1995). Anturilla on tyypillisesti laaja toiminta-alue.

*Kapasitiivisessa* anturissa kiihtyvyyden aiheuttama palkin taipuma mitataan kapasitanssin muutoksena. Rakenteellisesti kapasitiivinen sensorielementti koostuu kahdesta johdimesta ja massaelementin varresta niiden välissä. (Kuivalainen 1992; Gardner 1994; Vihriälä 2002.) Kiihtyvyyden aiheuttama massaelementin varren taipuminen muuttaa

sensorielementin kapasitanssia. Mittaamalla johtimien kapasitanssien suhdetta samalla voidaan eliminoida anturin lämpötilariippuvuutta (Gardner 1994).

*Induktiivinen* anturi koostuu rakenteeltaan sähköä johtavasta massaelementistä, joka on kahden käämin välissä. Kun massa pääsee liikkumaan kiihtyvyyden vaikutuksesta, magneettinen kytkentä muuttuu ja samalla käämien induktiivinen virta muuttuu. Induktiivinen kiihtyvyyssanturi on selvästi muita antureita painavampi ja harvoin käytetty biomekaanisissa sovelluksissa. Induktiivisten anturien luonnollinen taajuus on alhainen, mikä rajoittaa niiden käyttöä. Toisaalta niillä on hyvä herkkyys eli suuri vaste pienelle kiihtyvyyden muutokselle. (Nigg & Herzog 1999.)

### 6.3 Anturien ominaisuuksia

Nigg ja Herzog (1999) luettelevat muutamia kiihtyvyyssanturien tärkeitä ominaisuuksia: massa, luonnollinen värähtelytaajuus, taajuusvaste, iskunkestävyys ja toiminta-alue. Mitoittamalla värähtelevä massa ja sitä kiinnittävä varsi voidaan anturin värähtelyominaisuuksiin vaikuttaa (Gardner 1994). Kiihtyvyyden suuruus ei ole ainoa suure, joka vaikuttaa kiihtyvyyssanturin vasteeseen sillä myös kiihtyvyyden muutosnopeus vaikuttaa anturilta saatavaan vasteeseen. Luonnollinen värähtelytaajuus mm. on merkittävä anturin ominaisuus, koska se vaikuttaa anturin vasteeseen kiihtyvyysherätteen taajuudesta riippuen. Seuraavassa on esitelty tarkemmin olennaisimpia kiihtyvyyssanturien ominaisuuksia, jotka voivat vaikuttaa anturin valintaan. Jos ei ole erikseen toisin ilmoitettu, määritelmät on Vihriälältä (2002).

**Herkkyys** Herkkyys kuvaa anturin antamaa vastetta kiihtyvyydelle anturin toiminta-alueella vakioherätteen avulla. Voidaan tutkia myös jaksollisen herätteen avulla.

**Luonnollinen värähtelytaajuus** Luonnollinen värähtelytaajuus  $f_N$  voidaan määrittää harmonisen värähtelijän kaavalla  $k:n$  ollessa anturin jousivakio ja  $m:n$  seisminen massa,  $f_N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ . Luonnollinen värähtelytaajuus ilmaisee anturin värähtelyn taajuutta, kun seisminen massa on poikkeutettu lepotilastaan (kiihtyvyyden poissa ollessa) ja päästetään oskilloi-

maan vapaasti. Ainoastaan kitka jarruttaa värähtelyä. Pääsääntöisesti kiihtyvyyssantureita ei käytetä lähellä luonnollista värähtelytaajuutta johtuen suurista epälineaarisuuksista anturin vasteessa. (Johnson 2006.)

Poikittaisherkkyyys	Suhteellinen poikittaisherkkyyys kuvaa kuinka paljon mittausakselille poikittaiset kiihtyvyydet vaikuttavat mitattuun kiihtyvyyteen. Se voidaan määritellä jaksollisen herätteen avulla.
Suorituskyky	Suorituskykyä voidaan arvioida suhteellisen virheen avulla. Mitä pienempi suhteellinen virhe, sitä parempi suorituskyky anturilla on.
Symmetria	Symmetria voidaan määrittää mittaamalla mittausakselin maksimi- ja minimivasteita vastaavat vasteet poikittaisakseleilta. Jos symmetria on täydellinen, on poikittaisakselin vaste sama mittausakselin maksimi- ja minimiasentoihin liittyen.
Toiminta-alue	Kiihtyvyyden maksimi- ja minimiarvot, joiden välillä mittaus voidaan suorittaa. Määritelmä on eri kuin maksimaalinen käyttöalue, joka määrittelee absoluuttisen maksimikiihtyvyyden, jonka anturi kestää.

## 6.4 Kiihtyvyyssignaali ja sen analysointi

Niggin ja Herzogin (1999) mukaan kiihtyvyyssanturiin voi kohdistua kiihtyvyyttä useammasta komponentista; maanvetovoiman aiheuttamasta kiihtyvyydestä (gravitational), lineaarisesta kiihtyvyydestä (translational) ja kulmakiihtyvyydestä (rotational)

$$a_{tot} = a_{gra} + a_{tra} + a_{rot} . \quad (5)$$

Kulmakiihtyvyyden komponentit ovat epälineaarisia ja sisältävät termejä, jotka johtuvat segmentin kulmanopeudesta ja -kiihtyvyydestä. Maanvetovoiman aiheuttama kiihtyvyyttä voidaan pitää luonteeltaan staattisena eli muuttumattomana kiihtyvyytenä tässä yhteydessä.

Van den Bogertin ym. (1996) mukaan yksiakselisen kiihtyvyyssanturin ollessa kiinnittyneenä jäykkään kehon segmenttiin (rigid body segment) tunnetussa kohdassa  $r$  ja orientaatiossa  $u$  segmentin mukaisessa koordinaatistossa (segment fixed coordinate system), se tuottaa seuraavanlaisen signaalin  $s$ :

$$s = u \cdot \left( R^{-1}(a - g) + \dot{\omega} \times r + \omega \times (\omega \times r) \right), \quad (6)$$

jossa  $u$  on yksikkövektori, joka osoittaa kiihtyvyyssanturin mittaussuuntaa segmentin koordinaatistossa

$R$  on kappaleen segmentin rotaatiomatriisi suhteessa maahan,  $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$

$a$  on segmentin koordinaatiston origon kiihtyvyyssvektori suhteessa maahan

$g$  on gravitaatiokenttävektori

$\omega$  on segmentin kulmanopeusvektori kehon koordinaatistossa

$\dot{\omega}$  on segmentin kulmakiihtyvyyssvektori

$r$  on vektori, joka määrittää massakeskipisteen ja tunnetun pisteen välisen etäisyyden.

Van den Bogertin ym. (1996) mukaan lineaarisen kiihtyvyyden ja gravitaation anturiin aiheuttamia voimavaikutuksia ei voida erottaa, joten kaava voidaan edelleen kirjoittaa muotoon:

$$s = u \cdot \left( s_0 + \dot{\omega} \times r + \omega \times (\omega \times r) \right). \quad (7)$$

Mitattu signaali sisältää vektorisumman maanvetovoiman kiihtyvyydestä ja lineaarisesta kiihtyvyydestä (vektori  $s_0$ ). Tarvitaan lisätieto segmentin asennosta suhteessa gravitaatiokenttään komponenttien erottamiseksi (Morris 1973; Allard ym. 1995).  $S_0$  voidaan ilmaista kaavalla 8 tai 9, kun segmentin muoto ja anturin mittaussuunta ovat oleellisesti yhteydessä toisiinsa. Mayagoitian ym. (2002) mukaan jäykkään kappaleeseen (kuva 2) kiinnitetty kappaleen pinnalle kohtisuoraan mittaava kiihtyvyyssanturi antaa seuraavan signaalin  $s^t$ :

$$s^t = g \sin(\varphi_k) + a^t \quad (8)$$



ja vastaavasti kappaleen pinnan suuntaisesti  $s^r$ :

$$s^r = g \cos(\varphi_k) + a^r, \quad (9)$$

joissa  $g$  on gravitaatiokerroin

$\varphi_k$  on gravitaatiokentän ja jäykän kappaleen välinen kulma

$a^t$  on kappaleen pinnalle kohtisuora lineaarisen kiihtyvyyden komponentti

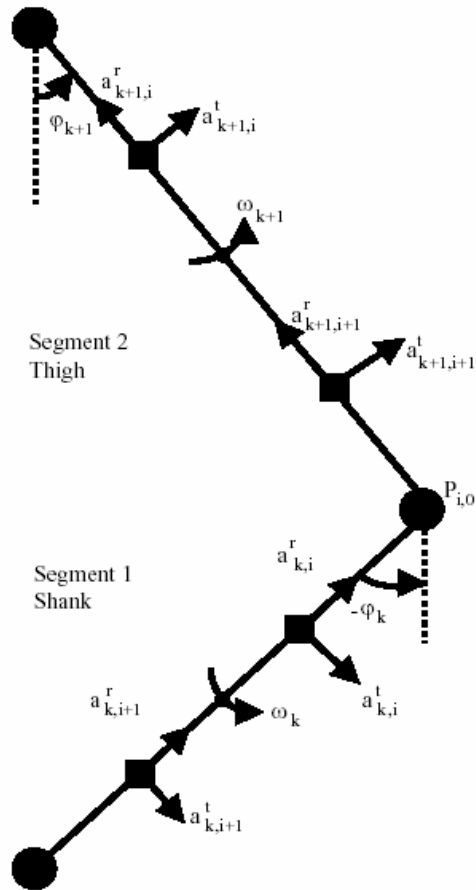
$a^r$  on kappaleen pinnan suuntainen lineaarisen kiihtyvyyden komponentti.

Jos kulma  $\varphi_k$  tunnetaan, on mahdollista selvittää lineaarisen kiihtyvyyden komponentit  $a^t$  ja  $a^r$ . Referenssikulma  $\varphi_{off}$  voidaan laskea staattisessa tilanteessa esimerkiksi kahden kohtisuorassa toisiinsa nähden olevan kiihtyvyyssanturin signaalista (Mayagiotia ym. 2002)

$$\varphi_{off} = \arctan \frac{s_{ki}^t}{s_{ki}^r}. \quad (10)$$

Referenssikulmaa tarvitaan selvitettäessä kappaleen asentoa kiihtyvyyssanturisignaaleista dynaamisessa tilanteessa. Kuvassa 2 on esitetty Mayagoitian ym. (2002) tutkimuksessaan käyttämä kiihtyvyyssanturien ja gyroskooppien sijoittelu alaraajaan. Anturit oli kiinnitetty alumiinitankoihin, jotka kiinnitettiin alaraajan segmentteihin.

Segmentin sijainti ja asento kolmiulotteisessa avaruudessa voidaan määrittää kuuden vapausasteen (degree of freedom) avulla. Tarvitaan kolme vapausastetta kuvaamaan sijaintia ja toiset kolme asentoa. (Nigg & Herzog 1999). Yhdestä segmentin pisteestä mitatun kiihtyvyyden perusteella ei voi muodostaa kaikkia segmentin kiihtyvyyden kuvaamiseksi tarvittavia kiihtyvyyksiä. Tarvitaan useampia kiihtyvyyssantureita eri kohdissa segmenttiä mittaamaan kaikki segmentin liikkeen kuvaamiseksi vaadittavat kiihtyvyydet. (Allard ym. 1995.)



KUVA 2. Kaaviokuva anturien sijoittamisesta alaraajaan Mayagoitian ym. (2002) tutkimuksessa.

Mayagoitian ym. mukaan segmentin kulmakiihtyvyys ( $\alpha_k$ ) voidaan laskea kahden tangentiaalisesti mittaavan kiihtyvyyssanturin avulla, jotka ovat kiinnittyneinä jäykän kappaleen  $k$  kohtiin  $i$  ja  $i+1$

$$\alpha_k = \frac{s_{k,i+1}^t - s_{k,i}^t}{r_{k,i+1} - r_{k,i}}, \quad (11)$$

jossa  $s_{k,i+1}^t$  ja  $s_{k,i}^t$  ovat mitatut kiihtyvyyssignaalit  
 $r_{k,i+1}$  ja  $r_{k,i}$  ovat anturien paikat segmentissä.

Koska maanvetovoiman kiihtyvyys ja lineaarinen kiihtyvyys ovat riippumattomia segmentin paikasta,  $s_{k,i+1}$ :n ja  $s_{k,i}$ :n erotus on suoraan suhteessa segmentin kulmakiihtyvyyteen. (Mayagoitia ym. 2002.) Kulmakiihtyvyydestä voidaan kaksinkertaisella integ-

raalilla ja referenssikulman avulla selvittää anturin asento. Anturisignaaliin vaikuttaa kulmanopeuden lisäksi piste, jonka suhteen kappale pyörii. Se lisätieto tarvitaan kaikkien kiihtyvyysskomponenttien ratkaisemiseksi.

Kaavan 11 perusteella sekä Morrisin (1973) mukaan tarvitaan teoreettisesti kuusi lineaarista [yksiakselista] kiihtyvyyssanturia mittaamaan täydellisesti jäykän kappaleen liikettä kolmiulotteisessa avaruudessa. Käytännön syistä käytetään myös useampia antureita. Teoreettisesti riittävien kolmen kolmiakselisen kiihtyvyyssanturin [tai kuuden yksiakselisen] käyttö jäykän kappaleen kinematiikan mittaamiseen saattaisi synnyttää korkean herkkyyden mittavirheille (singularities), kun rotaatioakseli on lähes kahden kiihtyvyyssanturin yhdistävän suoran suuntainen (van den Bogert ym. 1996). Sen sijaan käyttämällä useampaa kiihtyvyyssanturia, kuten neljää kolmiakselista (van den Bogert ym. (1996)) tai yhdeksää yksiakselista kiihtyvyyssanturia (Yogonandan ym. (2006)), jotka mittaavat eri tasoissa (non-coplanar) olevalla konfiguraatiolla, saadaan riittävästi redundanssia, jotta mittavirheitä voidaan estää tehokkaasti.

Kiihtyvyyssantureilla segmentin kinematiikan ratkaiseminen altistaa mittavirheelle (low frequency error, integration drift), joka ilmenee segmentin asennon ryömimisena, kun segmentin asento on riippuvainen määrittelystä lähtötilanteesta (Wu 1997). Ongelma ilmenee etenkin pitkäaikaisissa mittauksissa, mutta siitä ei ole haittaa, jos tulokset ilmoitetaan segmentin koordinaatiston mukaan [segmenttien suhteellisena asentona toisiinsa nähden] eikä maailmankoordinaatistossa (van den Bogert ym. 1996).

Kiihtyvyyssantureilla segmentin nopeuden ja paikan määrittäminen maailmankoordinaatistossa vaatii aikaisempaa tietoa näistä muuttujista. Koska näitä arvoja ei voida mitata kiihtyvyyssantureilla, täytyy käyttää erillistä mittausjärjestelmää tai vain päätellä nopeuden tai paikan alkuarvot. (Allard ym. 1995.)

## 6.5 Kiihtyvyyssignaalin näytteistys ja suodatus

Shannonin näytteenottoteoreeman mukaan laskostumisen estämiseksi ja jatkuvan signaalin täydellisesti uudelleen muodostamiseksi näytteistään näytteenottotaajuuden täytyy olla yli kaksi kertaa suuremman kuin signaalissa oleva suurin taajuuskomponentti

( $\omega_s > 2\omega_M$ ). Taajuus  $2\omega_M$  tunnetaan Nyquistin kriteerinä. (Phillips & Parr 1999). Mitä suurempia oleellisia kiihtyvyyksiä signaalissa oletetaan olevan, sitä suurempi täytyy keräystaajuuden olla. Käytännössä pyritään selvästi suurempiin näytteenottotaajuuksiin, kuin kaksi kertaa näytteistettävän signaalin korkein oleellinen taajuus.

Dynaamisessa liikkeessä anturin asento ja lineaarisen kiihtyvyyden komponentti on vaikea erottaa toisistaan. Taajuusalueeltaan tunnetusta liikkeestä komponentit pitäisi kuitenkin pystyä erottamaan alipäästösuodatuksella (Boonstra ym. 2006). He kokeilivat alipäästösuodattaa yhdestä pisteestä mitattuja kiihtyvyyssignaaleja komponenttien erottamiseksi tuoilta seisomaan nousussa. Erilaisia suodattimia kokeiltiin kiihtyvyyssignaaleihin ja se suodattimen parametrien yhdistelmä, joka antoi pienimmän RMS-virheen videoanalyysin asentosignaalin ja kiihtyvyyssanturin asentosignaalin välille valittiin optimaaliseksi suodattimeksi. Kehon eri osille löydettiin erilaiset optimaaliset suodattimen asetukset. He vertasivat sagittaalitasossa videoanalyysistä laskettua asentosignaalia, alipäästösuodatetuista yhdestä pisteestä mitatuista kiihtyvyyssanturisignaaleista laskettua asentotietoa ja yhdistettyä kiihtyvyyssanturi-gyroskooppisignaalista muodostettua asentotietoa. Kiihtyvyyssignaaleista muodostettu asentotieto antoi suuremman virheen ja pienemmän korrelaation videoanalyysiin verrattuna kuin yhdistetty kiihtyvyyssanturi-gyroskooppisignaaleista laskettu asentotieto. (Boonstra ym. 2006.) Tutkimus kyseenalaistaa osittain käsityksen, että yhdestä mittauspisteestä ei voida muodostaa kaikkia anturin liikkeen kuvaamiseksi tarvittavia muuttujia [dynaamisessa tilanteessa] (mm. Allard ym. 1995). Menetelmä on kuitenkin edelleen riippuvainen liikkeen luonteesta sillä kiihtyvyyden komponenttien täytyy sijaita eri taajuuksilla.

Kiihtyvyyssanturin rekisteröimiä suuritaajuuksisia kiihtyvyyssignaalin komponentteja (mm. mittalaitteiston kohinaa) voi suodattaa pois erilaisilla alipäästösuodattimilla, mutta silloin pitää varmistua ettei menetä signaalista jotain oleellista tietoa. Yksi tapa löytää sopiva suodatin on kokeilla erilaisia rajataajuuksia ja tutkia kunkin rajataajuuden vaikutusta kiihtyvyyssignaalin huipusta huippuun arvoihin ja rajata suodatin mahdollisimman tarkasti niin ettei se leikkaa amplitudia (Webber & Kriellaars 2004). Eräs kohinaongelma ilmenee, kun kiihtyvyys mitataan ja siitä selvitetään integroimalla nopeus ja sijainti. Silloin merkittävin kohinataajuus esiintyy matalilla taajuuksilla. (Morris 1973.)

## 6.6 Anturien kalibrointi

Kiihtyvyyssantureita voidaan kalibroida joko staattisesti tai dynaamisesti. Pietsosähköinen anturi ei anna vastetta vakioherätteelle, joten se kalibroidaan aina dynaamisesti. Staattinen kalibrointi tehdään anturin ollessa paikoillaan maan vetovoiman kiihtyvyyden avulla. Kiihtyvyyssanturin kalibrointi vakioherätteen avulla suoritetaan siten, että jokainen mittaava akseli asetetaan vuorollaan maan vetovoiman suuntaisesti ja mitataan vaste, käännetään anturi ylösalaisin ja toistetaan mittaus (Mayagoitia ym. 2002). Käydään kaikki akselit läpi niin, että ne mittaavat  $1g:n$  ja  $-1g:n$  suuruista kiihtyvyyttä ja anturilta saadaan kiihtyvyyttä vastaava signaalin arvo. Vihriälän (2002) mukaan dynaaminen kalibrointi tehdään vastaavasti, mutta käytetään värähtelevää laitetta synnyttämään eritaajuisia jaksollisia kiihtyvyysherätteitä, joiden kiihtyvyys tunnetaan. Dynaaminen kalibrointi mahdollistaa anturien ominaisuuksien tarkemman tutkimisen.

Kappaleen koordinaatiston origo sijaitsee tavallisesti massa-/gravitaatiokeskipisteessä. Massakeskipiste on kappaleen massojen keskipiste ja gravitaatiokeskipiste on kappaleeseen vaikuttavien gravitaatiovoimien keskipiste. Ainoa ero on, että gravitaatiokeskipiste toimii etäisyyden funktiona. Ihmisen mittakaavassa gravitaatio on oletettu vakioksi, joten käsitteillä ei sinänsä ole käytännön eroa. Mittauksissa ei ole yleensä mahdollista asettaa kiihtyvyyssanturia kappaleen massakeskipisteeseen ja yksi mittauspiste ei riittäisikään lineaarisella kiihtyvyyssanturilla kaikissa tilanteissa kaikkien kappaleen kiihtyvyyksien kuvaamiseen. Kiihtyvyyssantureiden koordinaatiston origo voidaan siirtää kappaleen massakeskipisteeseen eli suorittaa kiihtyvyyssanturien ”koehenkilökalibrointi”. Tutkimuksessaan van den Bogert ym. (1996) määrittivät koehenkilön vartalon massakeskipisteen sekä kiihtyvyyssanturien sijainnin massakeskipisteeseen nähden. Paikoillaan seisovan koehenkilön vartaloon kiinnitettiin kiihtyvyyssanturit ja antureihin kiinnitettiin markkerit tunnettuihin paikkoihin. Markkerien sijainti määritettiin 3D-videoanalyysilaitteistolla omassa koordinaatistossaan. Lisäksi koehenkilön tiettyihin anatomisiin paikkoihin kiinnitettiin markkereita vartalon massakeskipisteen selvittämiseksi. Segmentin origo siirrettiin massakeskipisteeseen vähentämällä massakeskipisteen koordinaatit kaikista kiihtyvyyssanturien mitta-arvoista. (van den Bogert ym. 1996.)

## 7 TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Mäkihypyn ponnistusnopeuden mittaamiseen on käytetty menetelmiä liikeanalyyseistä erilaisiin ponnistusvoiman mittausmenetelmiin. Aiemmin käytetyt menetelmät ovat toimivia ja tarkkoja, mutta kiihtyvyyssantureilla voitaisiin saada etua säästyneillä resursseilla, nopeutuneella analysoinnilla ja langattomalla mittauksella, joka mahdollistaa keskitetyn tietojen keräämisen. Toisaalta kiihtyvyyssanturien käyttö on yksi vaikeimmista mittaustekniikoista biomekaniikassa.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin kiihtyvyyssanturin mahdollisuuksia mitata ponnistusnopeutta todellisissa mäkihyppyolosuhteissa. Tutkimuksessa käytettiin VTT:ltä lainattua langattoman mittauksen mahdollistavaa kiihtyvyyssmittalaitetta, jossa oli kapasitiivisella periaatteella toimivat yksiakseliset kiihtyvyyssanturi ja kallistusanturi. Tutkimus suoritettiin kaksivaiheisena siten, että ensin testattiin anturia ja analysointimenetelmiä kelkkaergometrissa suoritetuilla hyppyillä. Toisessa vaiheessa nuorten maajoukkueetason hyppääjä suoritti talvisissa olosuhteissa hyppyjä Vuokatin K-90 mäestä, joista 3 analysoitiin pystysuoran ponnistusnopeuden laskemiseksi. Tutkimus tehtiin yhteistyössä Jyväskylän yliopiston, Oulun yliopiston Kajaanin mittalaitelaboratorion ja VTT:n (Oulu) kanssa.

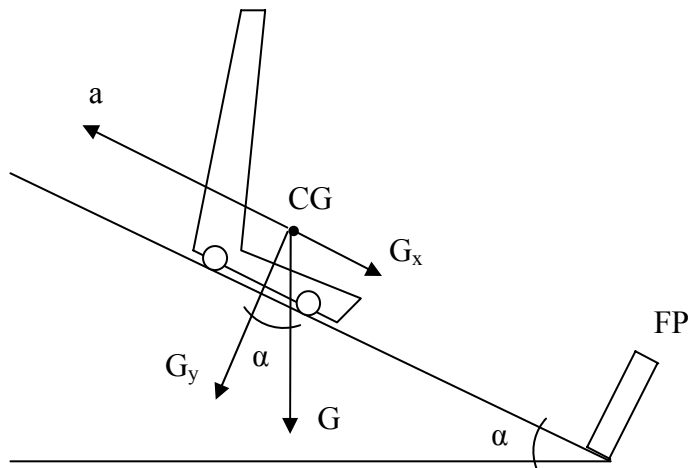
Kiihtyvyyssanturien mittaustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä on useita. Tutkimusongelmana oli selvittää voidaanko kiihtyvyyssanturilla mitata ponnistusnopeutta riittävän tarkasti todellisissa mäkihyppyolosuhteissa ja toisaalta mitä parannuksia menetelmään pitää mahdollisesti tehdä tarkempien tuloksien saamiseksi.

## 8 MENETELMÄT

### 8.1 Kelkkaergometrihyppyt

Kelkkaergometrissa suoritettavat hyppyt tehtiin kiihtyvyyssanturin ja signaalianalysointimenetelmien testaamiseksi. Yksi koehenkilö (185 cm, 90 kg, 28 vuotta) suoritti 14 yksittäistä esikevennettyä hyppyä kelkkaergometrissa laboratorio-olosuhteissa. Esikevennettyt hyppyt valittiin, koska ajateltiin hyppyjen aloittamiskohdan määrittelyn olevan helpompaa, kun hyppyyn lähtö tapahtuu aina suorilta jaloilta. Näin koehenkilö sai lähteä vapaasti ponnistamaan haluamansa suuruisen esikevennyksen jälkeen ilman, että tarvitsi keskittyä olemaan paikoillaan jalat koukistettuina juuri ennen ponnistusta, kuten ilman esikevennystä suoritetuissa hyppyissä olisi pitänyt menetellä.

Kelkkaergometri koostui neljällä laakeroidulla pienellä pyörällä varustetusta penkistä ja putkirunkoisesta kaltevuuden säädöllä varustetusta alustasta, jota pitkin penkki liikkui. Kaltevan alustan alemmassa päädyssä oli kiinni voimalevy, jonka pinta oli aina kohtisuorassa liikesuuntaan nähden riippumatta alustan kallistuskulmasta, ja jota vasten koehenkilö ponnisti jaloillaan. Penkki oli varustettu säädettävillä nelipisteturvavöillä koehenkilön kiinnittämistä varten. Ponnistuksen aiheuttaman reaktiovoiman mittauksen lisäksi laitteella voitiin mitata kelkan etäisyyttä voimalevystä. Ponnistusetäisyyden mittaamisen mahdollisti integroitu mittalaite, joka antoi sähköisen voimalevyn pinnan etäisyydelle suhteellisen signaalin. Kuvassa 3 on kaaviokuva kelkkaergometrin toimintaperiaatteesta.



KUVA 3. Koehenkilö ponnistaa voimalevyä (FP) vasten aiheuttaen kiihtyvyyden  $a$  koehenkilön ja liikkuvan penkin muodostamaan systeemiin.

### 8.1.1 Kiihtyvyyden mittausjärjestelmä

Kaikki kiihtyvyyden mittaamiseen tarvittavat laitteet ja ohjelmistot saatiin lainaan Valtion teknillisestä tutkimuskeskuksesta (VTT, Oulu). Kiihtyvyyden mittausanturi, joka on nähtävissä kuvassa 4, koostui kahdesta erillisestä lineaarisesta kiihtyvyydanturista, jotka oli koteloitu muoviseen kulmista pyöristettyyn koteloon ulottuvuuksiltaan 31 mm x 55 mm x 25 mm (leveys x pituus x korkeus). Yhtä anturia käytettiin kiihtyvyyden mittaamiseen ( $\pm 12$  g) ja toista mittalaitteen staattiseen asennon tunnistamiseen ( $\pm 1$  g /  $\pm 90^\circ$ ). Anturit olivat VTI Technologiesin tuotantoa rakenteeltaan vaimennettuja jousimassasysteemejä ja toimintaperiaatteeltaan kapasitiivisia (tyyppimerkinnät SCA320-CDCV1G ja SCA610-CA1H1G). Koteloidut anturit oli kiinnitetty alumiiniseen levyyn (159 mm x 44 mm x 3 mm), jonka tarkoitus oli tukevoittaa anturin kiinnitystä kohteessa. Levyyn oli porattu reikiä painon keventämiseksi ja sitten se oli päällystetty kangasteipillä. Mittalaitteessa olleiden anturien ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1.

Anturi oli ajateltu kiinnitettäväksi alaselkään ja kiihtyvyyden mittaussuunnaksi oli tarkoitettu alumiinilevyn pinnalle kohtisuora suunta. Anturilta lähtevä johto yhdisti anturin lähettimeen (60 mm x 100 mm x 25 mm + antenni n. 100 mm), joka lähetti mittasignaaleja langattomasti vastaanottiin. Tietokoneelle signaalit siirtyivät vastaanottimelta ristiinkytkettyä kierrettyä parikaapelia pitkin ja ne tallennettiin VTT:n käyttämällä signaalinkeräysohjelmalla. Keräystaajuus kummallekin anturisignaalille oli 500

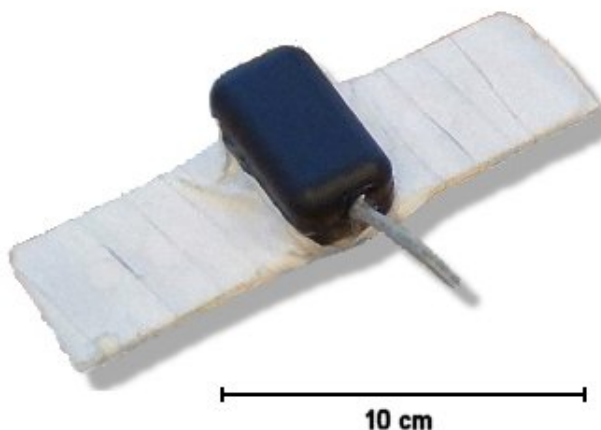


Hz. Lisäksi laitteisto tallensi juoksevaa numerointia näytteistä, jolloin oli helppo tarkistaa tallentuvatko signaalit täydellisinä. Vastaanottimeen oli kytketty valokenno ja kappaleen ”katkaistaessa” valokennosignaalin koaksiaalikaapelia pitkin saatiin ulos +5 V jännitepulssi sekä lediltä valosignaali kiihtyvyyssmittauksen ja mahdollisten referenssimittausten synkronointia varten. Samanaikaisesti synkronointipulssin kanssa kiihtyvyyssignaaleihin tuli kaksi peräkkäistä lyhyttä maksimiarvoista piikkiä, joista ensimmäinen vastasi valokennosignaalin katkeamista.

TAULUKKO 1. Poimintoja VTI:n anturien ominaisuuksista valmistajan mukaan.

	Olosuhde	SCA320- CDCV1G	SCA610- CA1H1G	Yksikkö
<b>Mittausalue</b>	Nimellis-	± 12	± 1	G
<b>Herkkyys</b> <sup>1)</sup>	Huonelämpötila	0,15	2	V/g
<b>Virhe nollassa</b> <sup>2)</sup>	Huonelämpötila	± 450		mg
	-20 ... 85 °C	± 700		mg
<b>Herkkyysvirhe</b>	-40 ... 125 °C	± 1000	± 50	mg
	Huonelämpötila	± 3 <sup>3a)</sup>		%
	-20 ... 85 °C	± 4 <sup>3a)</sup>	± 2,5 <sup>3b)3c)</sup>	%
<b>Tyypillinen epälineaarisuus</b> <sup>4)</sup>	-40 ... 125 °C	± 5 <sup>3a)</sup>	± 4 <sup>3b)</sup>	%
	Mittausalueella	± 200	± 10 <sup>3c)4b)</sup>	mg
<b>Poikittaisherkkyyks</b> <sup>5)</sup>		5	5	%
<b>Taajuusvaste</b>	-3 dB:n pisteessä <sup>6)</sup>	400 ± 150	18 ± 10	Hz
<b>”Ratiometric error”</b> <sup>7)</sup>	Vdd=4,75 ... 5,25 V	2	2	%

1) Määritellään  $[V_{out}(+1g) - V_{out}(-1g)]/2$  [V/g]  
2) Määritellään  $(V_{out}(+0g) - V_{dd}/2)/V_{sens}$  [g],  $V_{sens}$  on nimellisherkkyyks  
3a) Määritellään  $([V_{out}(-1g)]/2) \cdot V_{sens} \times 100$  [%]  
3b) Määritellään  $(([V_{out}(+1g) - V_{out}(-1g)]/2) - V_{sens})/V_{sens} \times 100$  [%] (huonelämpötilan virhe huomioitu)  
3c) Tyypillinen toleranssi, ei 100 % testattu  
4) Suhteellinen suoraan viivaan välillä ±1g  
4b) Kallistusanturikäytössä poikittaisherkkyydestä aiheutuvan kulmavirheen korjaaminen vähentää epälineaarisuutta  
5) Mittausakselille kohtisuorasta suunnasta tulevia kiihtyvyyksiä summautuu ulostuloon  
6) Ulostulossa on todellinen DC (0 Hz) vaste  
7) Käyttöjännitteen kohina summautuu myös ulostuloon (ulostulo suhteellinen käyttöjännitteeseen)

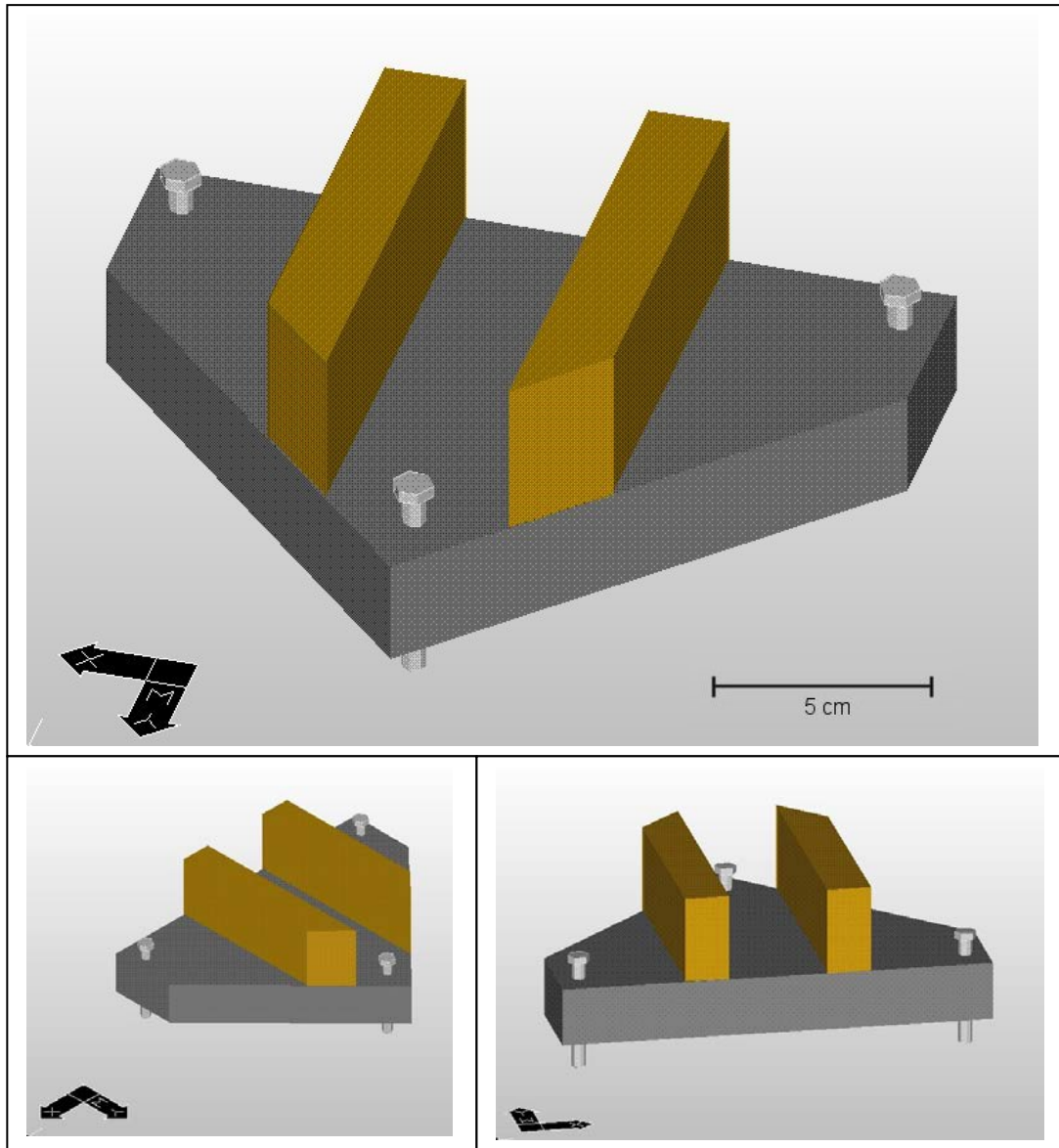


KUVA 4. Kiihtyvyyden mittausanturi.

### 8.1.2 Kiihtyvyyssanturin kalibrointi

Kiihtyvyyssanturi kalibroidiin maanvetovoiman kiihtyvyyden avulla ennen hyppyjä sekä niiden jälkeen. Kalibrointi suoritettiin anturin  $90^\circ$  asennon muutoksin siten, että "kiihtyvyyssanturilta" saatavat kiihtyvyyssignaalin arvot vastasivat kiihtyvyyksiä 0 g, + 1 g, 0 g ja -1 g. Vaaka- ja pystysuorat asennot tarkistettiin vesivaa'an ja suorakulman avulla ja kiihtyvyyssignaalit tallennettiin anturin pysyessä liikkumatta reilusti yli sekunnin kussakin asennossa. Tunnettua asentoa vastaava signaali keskiarvoistettiin sekunnin ajalta. Ennen hyppyjä ja niiden jälkeen suoritetuista kalibroinneista saatiin hyvä vastaavuus raakasignaaleissa, mutta niistä laskettiin kuitenkin keskiarvot, joita käytettiin kiihtyvyyden ja kallistuksen skaalauskerroimina. Esimerkiksi kelkkatestin yhteydessä suoritettujen kalibrointien perusteella kiihtyvyyssanturilla +1 g:tä (mittausakseli ylöspäin) vastasi 32875 ja -1 g:tä 28919, jolloin 0 g:tä vastaavaksi signaalin arvoksi saatiin laskettua  $30897 ((32875 + 28919) / 2)$  ja 1 g:n muutokseksi saatiin  $1978 ((32875 - 28919) / 2)$ . Symmetrian havaittiin olevan hyvä. Vastaavasti "kallistusanturille" määritettiin signaalin arvo kussakin tunnetussa asennossa ja laskettiin kuinka paljon signaali muuttuu tunnetun kulman muutoksen ( $90^\circ$ ) johdosta. Kalibroinnista saatuja lukuarvoja voitiin käyttää anturin staattisen kallistuksen määrittämiseen (kts. kuva 7 ja kaava 12) sekä kiihtyvyyden skaalauskerroimina.

Apuna kalibroinnissa käytettiin varta vasten rakennettua kalibrointialustaa, jossa oli kolme säädettävää tukijalkaa (kuva 5). Sillä voitiin varmistua anturin vaakasuorasta asennosta kunhan sitä käytettiin kohtalaisen joustamattomalla alustalla. Kalibrointialusta oli suunniteltu käytettäväksi juuri kyseisen anturin kanssa, sillä sen tuet olivat tarkoitettu vastaamaan anturissa kiinni olevaan alumiinilevyyn. Kalibrointialustan runko oli taipumatonta laminoitua IKI-levyä.



KUVA 5. Kalibrointialusta, jota käytettiin apuna anturin kalibroinnissa.

### 8.1.3 Tutkimuksen kulku

Anturi kokeiltiin kiinnittää teipillä kelkan runkopalkkiin anturin mittaussuunnan ollessa kelkan liikeradan suuntainen. Valitettavasti kiihtyvyyssanturi rekisteröi kelkan rungon kautta johtuvaa erittäin voimakasta värinää ja tärähdyksiä, joita ei olisi saatu suodatettua kokonaan pois vaikuttamatta kiihtyvyyssignaaliin liikaa. Häiriöitä ei saatu vaimennettua riittävästi edes anturin ja kelkan rungon välissä kahta erilaista vaimentavaa eristemattoa käyttämällä. Sen sijaan, että olisi yritetty parantaa anturin runkokiinnitystä tärinää vaimentavammaksi, anturin paikaksi vaihdettiin koehenkilön alaselkä, johon se kiinnitettiin kangaskiinnelaastarilla sekä 8 cm leveällä joustavalla itseensä tarttuvalla

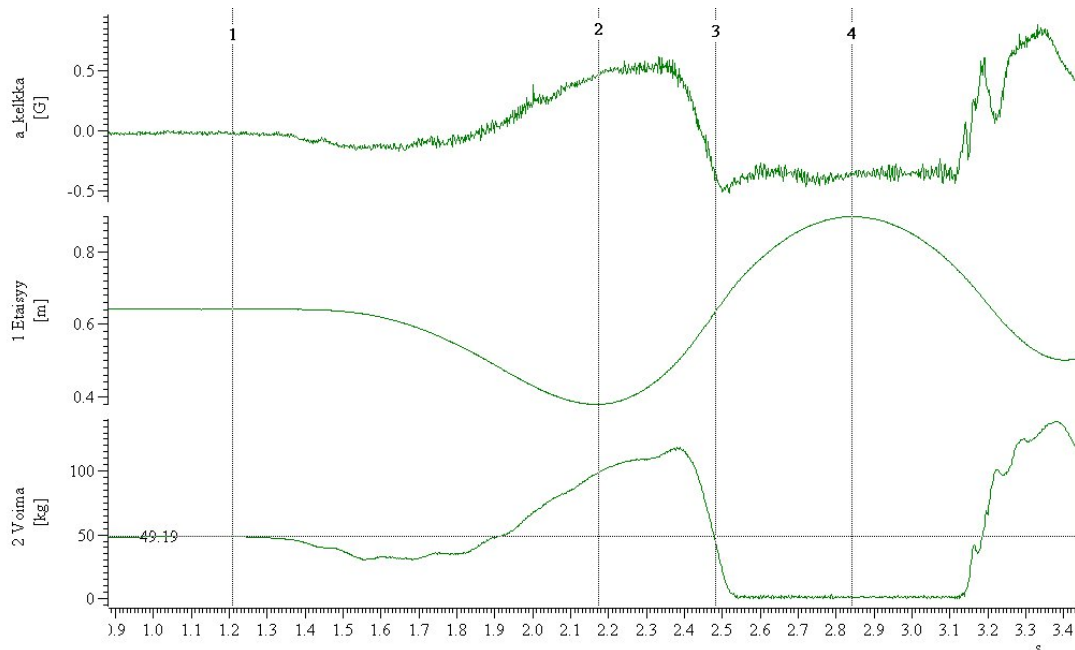
tukisiteellä. Side kieritettiin anturin yli ja vartalon ympäri pari kertaa, sekä varmistettiin sen pysyvyys teipillä. Koehenkilö istui kelkan penkkiin ja hänet kiinnitettiin nelipisteturvavöillä paikoilleen.

Hyppääjän ponnistuksen aiheuttamaa reaktivoimaa voimalevyssä sekä kelkan sijaintia ilmaisevaa etäisyysignaalia tallennettiin Spike 5.07 signaalin keräys- ja analysointiohjelmalla. Ennen tallennusta signaalit muutettiin digitaaliseen muotoon CED 1401 -A/D-muuntimella. Kiihtyvyyssignaaleja taltioitiin VTT:n signaalinkeräysohjelmalla ja siirrettiin taulukkolaskentaohjelmaan käsittelyä varten. Kaikkien signaalien keräystaajuutena oli 500 Hz. Signaaleja ei suodatettu. Koehenkilön ja kelkan muodostaman systeemin massa selvitetiin voimalevyn avulla ennen testin aloittamista ja toisen kerran suoritettujen hyppyjen jälkeen voimalevyn kalibrointitason tarkistamiseksi. Samalla mitattiin voimalevyysignaalit ilman kuormaa voiman offset-tason määrittämiseksi. Kiihtyvyy-, voima- ja etäisyysignaalit synkronoitiin valokennoportin avulla manuaalisesti annetun merkin perusteella ennen kunkin hypyn aloittamista. Voimalevyn z-akseli mittasi kelkkasysteemin liikesuunnan mukaista ponnistusvoimaa.

Koehenkilöä ohjeistettiin aloittamaan pienellä ponnistusvoimalla ja kasvattamaan ponnistusvoimaa asteittain jokaisella hypyllä kunnes ei enää pystynyt kasvattamaan ponnistuskorkeuttaan. Tavoitteena oli saada analysoitavaksi erikorkuisia hyppyjä aina koehenkilön saavuttamaan maksimikorkeuteen asti kiihtyvyyssanturilta saatujen ponnistusnopeuksien lineaarisuuden testaamiseksi.

Kelkan liikeradan kallistukseksi määritettiin 23,6 astetta. Tarkistusmittaus digitaalisella kulmamittaimella kahdessa eri asennossa antoi lukemat 23,2° ja 23,7°, mittaustarkkuudella  $\pm 0,3^\circ$  ja näytön tarkkuudella  $\pm 0,1^\circ$ . Keskimääräinen konsentrinen voimantuottoaika mitattiin etäisyysignaalista kelkan alhaisimman sijainnin ja voimantuoton loppumisen kohdalta eli silloin kun voimalevyn rekisteröimä voimantuotto laski kelkan ja koehenkilön yhteistä massaa pienemmäksi. Kuvassa 6 esitetään havainnollisesti mitasuuret kiihtyvyys, etäisyys ja massan voimavaikutus liikesuuntaan. Samassa kuvassa on lisäksi osoitettu hypyn eri vaiheet: 1) esikevennyksen alku, 2) kelkan pienin etäisyys voimalevystä, 3) voimantuoton lasku tasoon, jonka alla ponnistusnopeutta ei voida enää kasvattaa tai ylläpitää ja 4) hypyn lakipiste. Vaakakursori kuvaa voiman lepotasoa. Kohdassa 3 on teoreettisesti suurin nopeus ja se määritettiin lähtönopeudeksi, vaikka

kontakti irtoaakin kuvan mukaan aavistuksen myöhemmin. Kohtien 2 ja 3 välistä etäisyyden muutosta ja kulunutta aikaa käytettiin referenssinopeuden määrittämiseksi kiihtyvyyssanturille. Kelkkalaitteen penkin ja kaltevan tason välistä kitkaa ei määritetty, ja sen oletettiin olevan hyvin pieni.

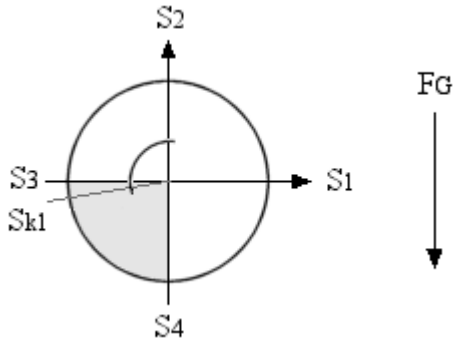


KUVA 6. Kelkkahypyn suuret ylhäältä alas: kiihtyvyys, etäisyys ja voimantuotto (massa).

#### 8.1.4 Nopeuden laskeminen kiihtyvyyssignaalista

Koska kiihtyvyyttä mitattiin ainoastaan yhdestä mittauspisteestä, ei pystytty mittaamaan segmentin kallistuskulmaa itse suorituksen aikana vaan ainoastaan staattisessa tilanteessa (Allard ym. 1995). Kallistuskulman ratkaisemiseksi Mayagoitian ym. (2002) mukaan kahdella erillisellä samansuuntaisesti mittaavalla kiihtyvyyssanturilla voidaan segmentin kulmakiihtyvyys selvittää dynaamisessa liikkeessä. Anturisignaalien ja anturien sijaintien perusteella saadaan tuplaintegroinnilla kallistuskulman muutos, jonka avulla kallistuskulma voidaan määrittää ajan funktiona. Rajoituksen takia täytyi tehdä oletamus siitä, että anturin kallistuskulma pysyi vakiona koko suorituksen ajan. Anturin asento saatiin kallistusanturin signaalista ennen kutakin hyppyä, kun koehenkilö oli paikoillaan valmiusasennossa jalat suorana odottamassa lupaa hyppyyn. Kallistusanturin signaali staattisessa tilassa keskiarvoistettiin sekunnin ajalta ja käytettiin saatua arvoa kallistuskulman määrittämisessä. Kuvassa 7 on malli kuinka kalibrointidataa

voitiin hyödyntää anturin kallistuskulman määrittämiseen staattisessa tilassa ainoastaan gravitaatiokentän voimavaikutuksen  $F_G$  kohdistuessa anturiin.  $S_1, \dots, S_4$  esittävät kalibrointisignaaleja tunnetuissa asennoissa ja  $S_{k1}$  signaalia välillä  $S_2 - S_3$ , josta anturin kallistuskulma halutaan selvittää. Signaali  $S_2$  on vaste pystysuoraan suuntaan ylöspäin.



KUVA 7. Staattisesta anturivasteesta  $s_{k1}$  voidaan laskea anturin kallistuskulma gravitaatiokentässä kalibrointidatan perusteella.

Staattisen kallistuskulman laskemiseen kuvan 7 tapauksessa voidaan käyttää kaavaa

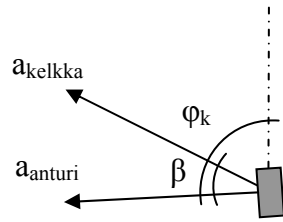
$$\varphi_k = 180^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{S_4 - S_{k1}}{S_4 - S_3} \right). \quad (12)$$

Kaavaa  $s^r = g \cos(\varphi_k) + a^r$  (9) soveltamalla voitiin kiihtyvyyssignaalista ratkaista lineaarinen kiihtyvyys  $a_{\text{anturi}}$  (kaavan  $a^r$ ) poistamalla siitä gravitaation vaikutus, kun anturin asento suhteessa gravitaatiokenttään oli ensin määritetty. Kiihtyvyyssignaalit ja niistä lasketut lineaariset kiihtyvyydet ovat luonnollisesti ajan funktiota, vaikkei sitä ole kaavojen yhteydessä erikseen mainittu.

Anturin ja kelkan liikeradan kallistuskulmien erosta ( $\beta$ ) voitiin kiihtyvyyssignaalin avulla laskea kelkkasysteemin kiihtyvyys liikeradan suuntaisesti kaavan 13 mukaisesti

$$a_{\text{kelkka}} = \frac{a_{\text{anturi}}}{\cos(\beta)}. \quad (13)$$

Kuvassa 8 on esitetty anturin asento suhteessa gravitaatiokenttään ja kelkan liikesuuntaan vektoriesityksenä.



KUVA 8. Anturin mittausakselin ja kelkan kiihtyvyyden suunnat.

Kelkan liikesuunnan mukainen kiihtyvyys  $a_{kelkka}$  integroitiin ajan suhteen kiihtyvyyssignaalin pieni offset huomioiden. Offsetin suuruus määritettiin staattisessa tilanteessa ennen kutakin hyppyä sekunnin ajalta kelkan liikesuuntaiselle kiihtyvyydelle. Integraali oli muotoa

$$v(t) = \int_{t_0}^{t_1} (a_{kelkka} - a_{offset})(t) dt . \quad (14)$$

Kiihtyvyyssignaali tuotiin Matlab 7-ohjelmaan ja sen yhteydessä olevalla Simulink-simulointiohjelmalla suoritettiin varsinainen integrointi. Simulaatioon valittiin jatkuva-aikainen integrointi -lohko, jonka sisääntuloon kunkin hypyn kiihtyvyyssignaali tuotiin Matlabista. Integroinnin aloitushetki ( $t_0$ ) oli juuri ennen esikevennyksen alkamista, kun koehenkilö kannatteli kelkkasysteemiä jalat suorana. Integroinnin loppumishetki ( $t_1$ ) oli valittu kustakin hypystä niin, että koko ponnistus saatiin varmasti talteen. Integroimalla saadusta nopeuskuvaajasta poimittiin maksiminopeus, jota verrattiin ponnistuskorkeuden- ja ajan avulla laskettuun lähtönopeuteen. Vertailunopeus kullekin hypylle laskettiin ponnistuskorkeuden ( $h$ ) kaavan avulla

$$h = \frac{1}{2} at^2 , \quad (15)$$

joka ratkaistiin keskimääräisen kiihtyvyyden  $a$  suhteen. Saadusta kiihtyvyydestä ratkaistiin loppunopeus kaavasta  $v = v_0 + a_{avg}t$  (2) kiihtyvyyden ja sen vaikutusajan ( $t$ ) avulla alunopeuden  $v_0$  ollessa nolla. Kaikissa laskuissa putoamiskiihtyvyydeksi gravitaatiokentässä oletettiin  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

### 8.1.5 Tilastollinen analyysi

Kelkkasysteemin kiihtyvyyssanturilla ja etäisyysmittauksen avulla saadut nopeudet alistettiin parilliselle t-testille (SPSS 12.0.1). Testin tuloksista ilmoitetaan luokkien keskiarvot, keskihajonnat, korrelaatio sekä merkitsevyys.

## 8.2 Mäkihyppy

### 8.2.1 Mittausasetelma ja tutkimuksen kulku

Mäkihyppymittauksissa oli koehenkilönä nuorten yhdistetyn maajoukkueen 15-vuotias hyppääjä. Hän suoritti viisi hyppyä helmikuussa 2006 hiukan utuisessa ja kohtalaisen tyynessä säässä pakkasen ollessa n. 15 astetta. Hyppymäkenä oli Vuokatissa sijaitseva HS 100 (K-90) normaalimäki. Hyppymäken kallistuskulma ja pituus mitattiin. Tämä suoritettiin paikan päällä pitkän vesivaa'an ja mittanauhan avulla, sekä lisäksi varmistettiin tulokset hyppymäken teknisistä piirustuksista määrittämällä. Kallistuskulmaksi ja pituudeksi saatiin  $12^{\circ}$  ja 6,2 m. Kiihtyvyyssanturi kalibroitiin vastaavasti kuin kelkkatestissä ennen anturin kiinnittämistä koehenkilölle ja hyppyjen jälkeen. Kiihtyvyyssanturi teipattiin kaksipuoleisella teipillä kiinni koehenkilön ihoon alaselkään medio-lateraalisesti keskelle selkää anturin yläosan ollessa suunnilleen suoliluun harjun korkeudella. Kiinnitys varmistettiin neljällä kangaskiinnelaastarin palasella. Anturin kiinnityksen jälkeen koehenkilöön kiinnitettiin ohuet tarramaiset heijastavat markkerit olkanivelen ja lonkanivelen kohdalle. Seuraavaksi koehenkilö kuvattiin videokameralla sagittaalitasossa, ensin pystyasennossa kalibroitaisuvan kanssa, ja sitten normaalissa laskuasennossa olka- ja lonkanivelen sijainnin määrittämiseksi. Kiihtyvyyssanturi oli koko ”koehenkilökalibroinnin” ajan näkyvässä kameralla mahdollista anturin sijainnin määrittämistä varten. Samalla tallennettiin kallistusanturilta referenssitaso laskuasennossa, jonka perusteella laskettiin anturin kallistuskulma gravitaatiokentässä. Saatua kallistuskulmaa voitiin verrata kameradatasta laskettavaan vartalosegmentin (lonkkaolkapää) kallistuskulmaan ja käyttää kallistuskulmien eroa vakiosuuruisena anturin asennon selvittämiseksi mäkihyppyn ponnistuksista. Myös kiihtyvyyssanturin signaali kiihtyvyyden referenssitason määrittämistä varten tallennettiin (offsetin huomioimi-

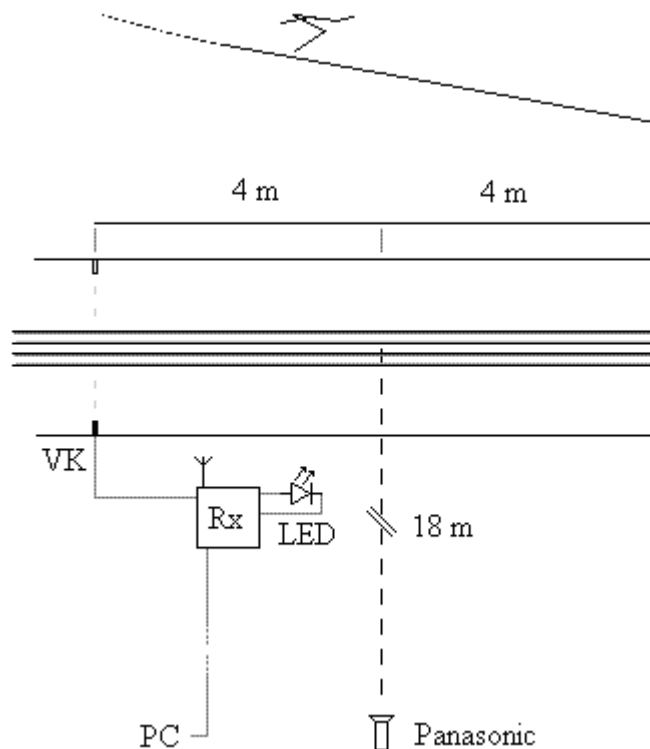


nen). Toinen teoreettinen tapa määrittää anturin kallistuskulma hyppyjen aikana olisi ollut kiihtyvyyssignaalin suodattaminen kiihtyvyy- ja kallistuskomponenttien erottamiseksi (Boonstra ym. 2006), mutta se olisi vaatinut tarkempaa tietoa komponenttien taajuusalueista. Kokemuksia ja varmuutta menetelmän soveltuvuudesta mäkihyppyyn ei ollut.

Kuvaamisen jälkeen anturin kiinnitystä tukevoitettiin 8 cm leveällä joustavalla itseensä tarttuvalla tukisiteellä, joka kieritettiin pari kierrosta anturin yli ja vartalon ympäri, sekä varmistettiin sen pysyvyys teipillä. Anturin kiinnitystiukkuus pyrittiin saamaan samantyyppiseksi kelkka- ja mäkimittauksissa siteen avulla. Lähetinyksikkö kiinnitettiin teipillä selän yläosaan, jossa sen suoritusta haittaava vaikutus oli vähäinen. Vasta tämän jälkeen hyppypuku puettiin koehenkilölle. Kaiken videokuvan analysointiin käytettiin KABasic 6.1–liikeanalyysiohjelmaa. Keho oletettiin symmetriseksi.

Mäkihyppymittauksissa kiihtyvyyssignaalin anturidatalle haettiin referenssi videoanalyysillä, jolla määritettiin pystysuora ponnistusnopeus lonkasta. Kun käytettiin maanvetovoimakenttään nähden pystysuoraa, eikä hyppyrinnokalle kohtisuoraa, nopeutta, saatiin suoraan liikeanalyysiohjelmasta vertailunopeus. Ponnistuksen katsottiin alkavan hyppääjän saapuessa hyppyripöydälle. Vertailupisteinä käytettiin taustalla olevaa valotolppaa, jonka sijainti tunnettiin. Kiihtyvyyssmittalaitteiston yhteydessä oleva valokenno (VK) sijoitettiin hyppyrin nokalta 8 metrin etäisyydelle vauhdinottomäen suuntaan. Kiihtyvyyssdata ja kameradata synkronoitiin valokennon katkaisusignaalin kanssa yhtäaikaista syttyvän valonlähteen (LED) avulla. Vastaanotin, jossa valonlähde oli kiinni, sijaitsi kameran näkökentässä hyppyripöydän vieressä. Vastaanottimelta tulevat signaalit tallennettiin tietokoneelle (PC). Kiinteä kamera sijoitettiin hyppyripöydän kohdalle kohtisuoraan sivulle 18 metrin etäisyydelle ladun keskikohdasta ja 4 m päähän hyppyrinnokasta (kuva 9). Kamera asetettiin säädettävällä kolmijalalla vaakasuoraan asentoon. Kuvakulma oli tarkoitus asettaa siten, että se kuvaisi alueen hyppyrinnokasta valokennolle asti. Valokennoa testattaessa synkronointivalon todettiin näkyvän riittämättömästi kameraan. Täytyi varmistua siitä, että synkronointivalo näkyisi varmasti jokaisen hypyn yhteydessä. Koska synkronointivaloa ei voinut siirtää lähemmäs, täytyi kameraa zoomata hieman enemmän. Sen seurauksena hyppyripöydän kärki jäi kameran kuva-alueen ulkopuolelle. Synkronointivaloa ei oltu testattu kuin laboratorio-olosuh-

teissa. Selkeästi muusta kuvasta erottuva taustalevy LED-valolle olisi voinut parantaa valon näkymistä.



KUVA 9. Mittausasetelma hypyrimäessä. VK on valokenno ja Rx vastaanotin.

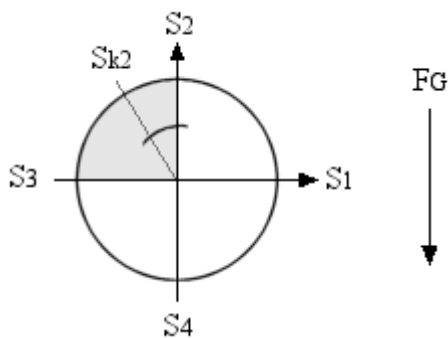
Videokuvan kalibrointiin käytettiin kalibroitisauvaa, johon oli merkitty neljä rastia puolen metrin välein, jolloin kahden toisistaan kauimmaisen rastin väli oli puolitoista metriä. Kalibroitisauvaa kuvattiin vaakasuorassa asennossa latu-uran keskikohdalla. Apuna käytettiin vesivaakaa. Käytössä oli digitaalinen videokamera (Panasonic NV-GS400, Ø 43 mm, Leica Dicomar linssi  $f = 3.3 \mid 39,6 \text{ mm} \mid 1:1,6$ ), jonka kuvaustaajuus oli 50 osakuvaa sekunnissa. Kustakin hypystä digitoitiin kahden pisteen (lonkka ja olkapää) muodostama yhden segmentin symmetrinen 2D-malli. Markkereita ei käytetty apuna itse suorituksissa ja lonkan kohdalla markkeri olisikin peittynyt osittain käden alle.

Mittausten aikana kiihtyvyyssmittalaitteen lähettimen patterin varaus alkoi heikentyä seurauksella että viidennestä hypystä ei saatu riittävää kiihtyvyydataa ja neljännessäkin vaikutukset tarkemman tarkastelun jälkeen alkoivat näkymään alentuneessa signaalitasossa sekä -muodossa. Neljännessä hypystä ei jäänyt puuttumaan datapaketteja, joten

vertailun vuoksi sen signaalitaso nostettiin offsetilla vastaamaan edellisen hypyn signaalitasoa vauhdinottomäen alussa. Lisäksi sille laskettiin kahden peräkkäisen mitta-arvon keskiarvoistus signaalissa olevan sahalaitamuodon poistamiseksi. Muokatun signaalin signaalimuodossa ei todettu olevan suuria eroavaisuuksia muiden hyppyjen raakakiihtyvyyksiin, mutta neljättä hyppeä ei kuitenkaan analysoitu sen tarkemmin.

## 8.2.2 Nopeuden laskeminen kiihtyvyyssignaalista

Ponnistuksen aikaisille kiihtyvyyssignaaleille ei suoritettu minkäänlaisia suodatuksia. Kameradatalle suoritettiin liikeanalyysiohjelmassa polynomisuodatus. Suodatuksen arvoksi valittiin 15 asteikolla 0 - 100, jossa 20 vastaa jo kohtalaisen voimakasta signaalin pehmenystä. Koehenkilökalibroinnin laskuasennosta saatu kallistusanturin signaali keskiarvoistettiin sekunnin ajalta ja sitä ( $s_{k2}$ ) arvoa käytettiin anturin kallistuskulman määrittämiseen (kuva 10). Signaalit  $S_1, \dots, S_4$  esittävät mäkihyppyjen yhteydessä suoritettujen kalibrointien keskiarvoistettuja kallistusanturisignaaleja.



KUVA 10. Anturin kallistuskulman selvittäminen staattisesta laskuasennosta.

Signaalin  $s_{k2}$  ja kalibrointidatan avulla voitiin laskea anturin kallistuskulma  $\varphi_k$  staattisessa laskuasennossa:

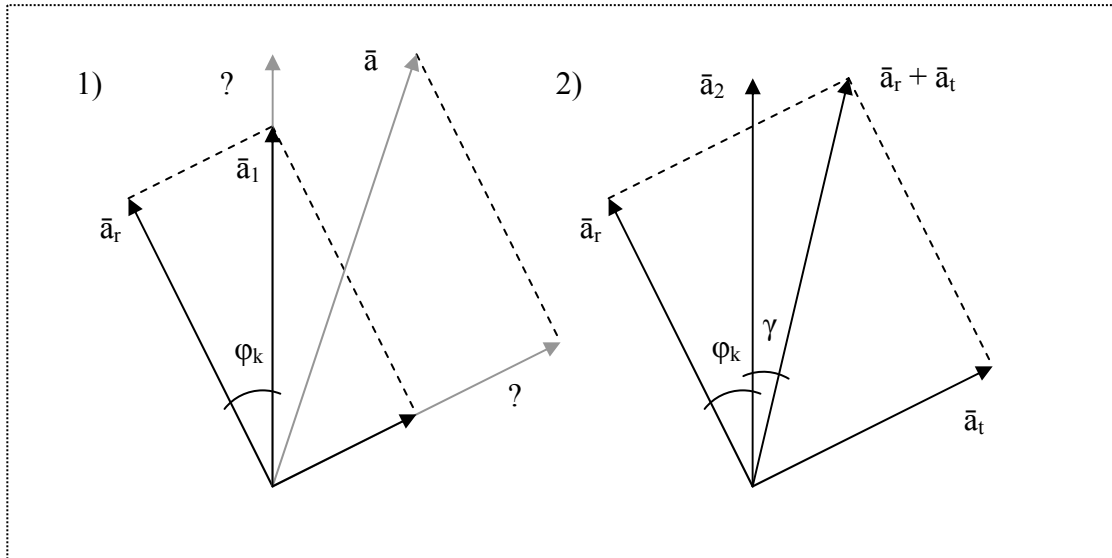
$$\varphi_k = \sin^{-1} \left( \frac{S_2 - S_{k2}}{S_2 - S_3} \right). \quad (16)$$

Koehenkilökalibroinnin yhteydessä kameralla kuvattua vartalon kallistuskulman ja kallistusanturilta saatua kallistuskulman eroa käytettiin anturin asennon laskemiseen ponnistuksen aikaisesta vartalosegmentin asennosta oletuksena, että vartalosegmentissä

ei tapahdu merkittävää taipumista. Kallistusdatan perusteella mäkihyppyjen raakakiihtyvyydestä vähennettiin ensin gravitaatiokomponentin osuus anturin mittausakselin suuntaisen kiihtyvyyden  $a_{\text{anturi}}$  laskemiseksi kaavaa 9 soveltamalla.

Anturin asennon laskemiseksi käytetty data oli taajuudeltaan kameran rajoittama 50 Hz, kun kiihtyvyyden mittalaitteen signaalit olivat 500 Hz. Mäkihypyn ponnistuksesta haluttiin saada tietoa anturin mittaamasta kiihtyvyydestä 500 Hz:n taajuudella tarkemman signaalimuodon selvittämiseksi. Koska videoanalyysistä saatiin asentotieto vain joka kymmenettä kiihtyvyyden arvoa kohden, täytettiin kahden peräkkäisen asentonäytteen välistä puuttuvat arvot taulukkolaskentaohjelman lineaarisella täyttö-toiminnolla ja toistettiin toimenpide koko signaalin matkalle. Menettely oli mahdollinen, koska varjalan kallistus muuttui "pehmeänä" liikkeenä ilman suuria vaihteluita. Täydennetyille signaalille suoritettiin vielä kolmen peräkkäisen arvon liukuva keskiarvoistus näkyvien pykälien pehmentämiseksi. Näin jokaiselle raakakiihtyvyyssignaalin arvolle saatiin vastaava anturin kallistuksen arvo.

Pystykiihtyvyyden laskemiseksi oletettiin ponnistuksen suuntautuvan kohtisuoraan pois päin hyppyripöydästä, sillä käytetyllä anturilla ei voitu mitata ponnistuksen suuntaa. Yksiakselinen kiihtyvyysanturi ei riitä sagittaalitasossa ilmenevän kiihtyvyyden suunnan määrittämiseen dynaamisessa liikkeessä. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 11, jossa vasemman puoleisessa tapauksessa (1) tunnetaan ainoastaan kiihtyvyyksvektori  $\vec{a}_r$ , joka havainnoi epämääräiseen suuntaan olevaa kiihtyvyyttä  $\vec{a}$ , ja yritetään määrittellä  $\vec{a}_r$ :n ja kulman  $\varphi_k$  (kallistus gravitaatiokenttään nähden) avulla pystysuora kiihtyvyys  $\vec{a}_1$ . On huomattava, että tulos pätee vain, jos kappaleen todellinen kiihtyvyys on vektorin  $\vec{a}_1$  suuntainen, muutoin tulokseen tulee virhettä. Oikeanpuoleisessa tapauksessa (2) tunnetaan kiihtyvyydet  $\vec{a}_r$  ja  $\vec{a}_t$ , jotka sijaitsevat kohtisuorassa toisiinsa nähden ja havainnoivat kumpikin kiihtyvyyttä vektorien osoittamiin suuntiin. Näiden kahden kiihtyvyyden avulla voidaan laskea summavektori  $\vec{a}_r + \vec{a}_t$  kappaleen todellisen kiihtyvyyden suuntaan, josta voidaan edelleen laskea pystysuora komponentti  $\vec{a}_2$ , kun kulmat  $\varphi_k$  ja  $\gamma$  tunnetaan.



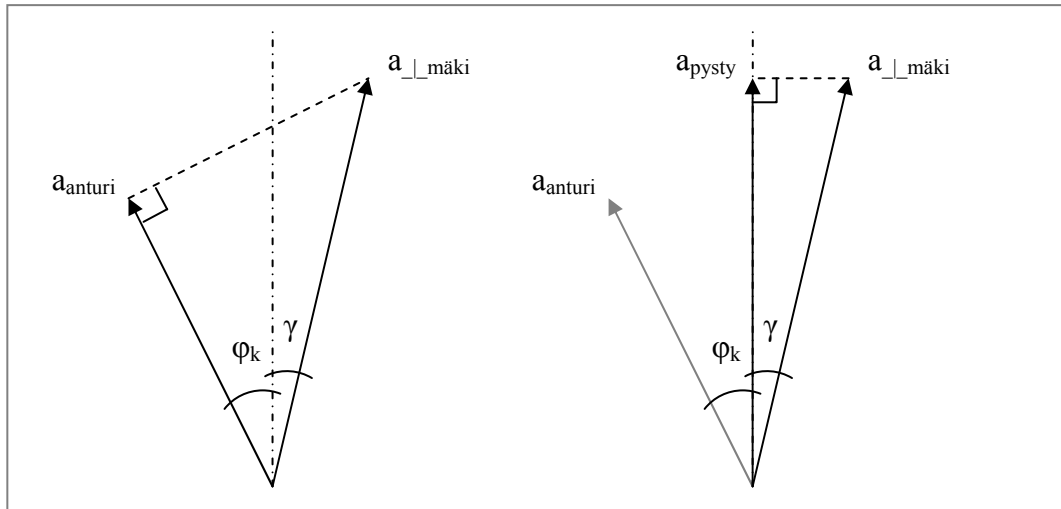
KUVA 11. Yksiakselisen kiihtyvyyssanturin (1) rajoitus kiihtyvyyden suunnan mittaamiseen verrattuna kaksiakseliseen anturiin (2).

Mäkihypyn ponnistuksessa pystysuora kiihtyvyyden komponentti ratkaistiin laskemalla ensin anturin mittausakselin suuntaisesta kiihtyvyydestä hyppyripöydälle kohtisuora kiihtyvyys ( $a_{\perp\text{mäki}}$ ), joka suuntautui oletettuun anturin kiihtyvyyden suuntaan. Hyppyripöydälle kohtisuora kiihtyvyys laskettiin kaavalla

$$a_{\perp\text{mäki}} = \frac{a_{\text{anturi}}}{\cos(\varphi_k + \gamma)}, \quad (17)$$

$\gamma$ :n ollessa hyppyripöydälle kohtisuora kallistuskulma ja  $\varphi_k$ :n vartalosegmentin ponnistuksen aikaisen asennon ja koehenkilökalibroinnista saadun vakiokulman avulla määritetty anturin kallistuskulma. Pystysuuntainen eli gravitaatiokentän suuntainen kiihtyvyys laskettiin seuraavalla kaavalla ja vektoriesityksenä kiihtyvyydet on nähtävissä kuvassa 12.

$$a_{\text{pysty}} = a_{\perp\text{mäki}} \cos(\gamma) = \frac{a_{\text{anturi}} \cos(\gamma)}{\cos(\varphi_k + \gamma)}. \quad (18)$$



Kuva 12. Pystysuoran kiihtyvyyden laskeminen kiihtyvyyssignaalista ( $a_{\text{anturi}}$ ) vektoreina.

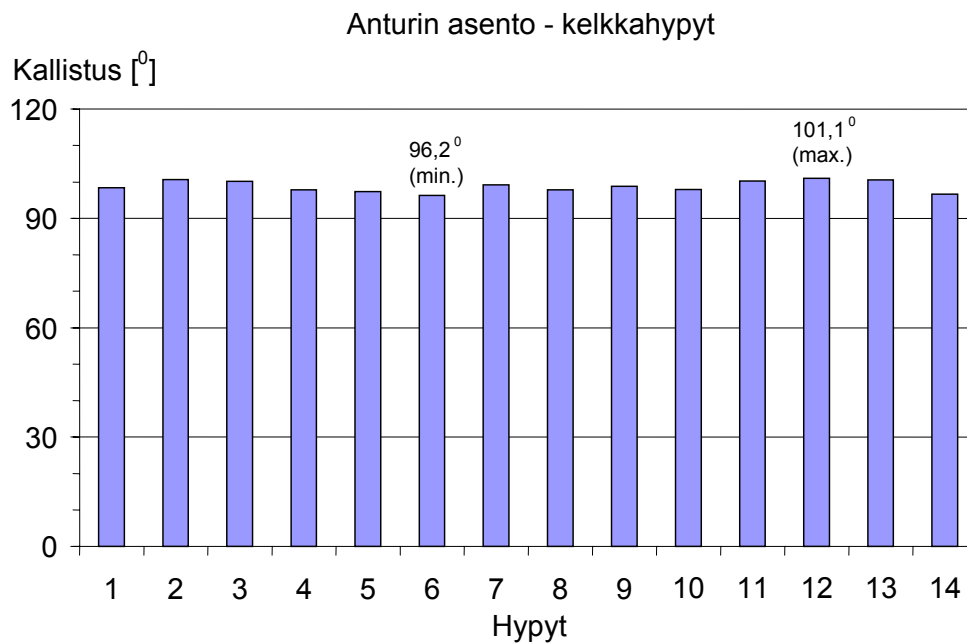
Pystysuora kiihtyvyys  $a_{\text{pysty}}$  integroitiin aloitusajankohtana hyppyripöydän alku, riippumatta siitä milloin hyppääjä on tehnyt ensimmäiset ponnistuksen aloitukseen viittavat liikkeet. Näinä voidaan pitää esimerkiksi käden tai lonkan ensimmäistä havaittavaa liikettä (Komi ym. 1974). Kiihtyvyyssanturilta saatua nopeuden kuvaajaa voitiin verrata liikeanalyysiohjelmalla saatuun lonkan pystynopeuden kuvaajaan. Saadut nopeudet ilmoitetaan suhteellisina hyppyripöytään nähden.

## 9 TULOKSET

### 9.1 Hypyt kelkkaergometrissa

#### 9.1.1 Ponnistusnopeudet

Kuvassa 13 on esitetty kelkkahyppyjen staattisessa tilassa ennen kutakin hyppyä määritetty anturin kallistuskulma maanvetovoimakenttään nähden, joita käytettiin lineaaristen kiihtyvyyksien laskemiseen. Taulukossa 2 on esitetty 14 esikevennetyn hypyn kiihtyvyyssignaaleista integroimalla saadut lähtönopeudet ja niille ponnistuskorkeuksien ja -aikojen avulla lasketut vertailunopeudet kahden desimaalin tarkkuudella. Lisäksi on esitetty ponnistusnopeuksien prosentuaalinen erotus. Tulosten perusteella luotiin pylväsdiagrammi, joka on esitetty kuvassa 14.

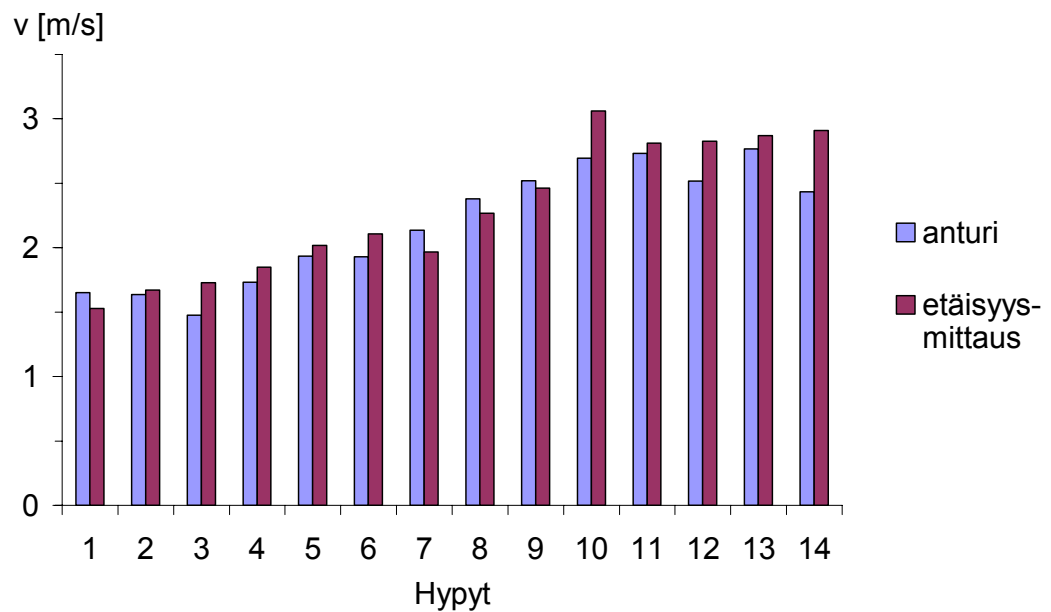


KUVA 13. Kaikkien kelkkahyppyjen staattisesti ennen ponnistusta määritetty anturin kallistuskulma maanvetovoimakenttään nähden.

TAULUKKO 2. Kelkkahyppyjen ponnistusnopeudet etäisyysmittauksesta ja kiihtyvyyssanturista.

Hypyn numero	Anturilta integroimalla laskettu nopeus [m/s]	Etäisyysmittauksella saatu vertailunopeus [m/s]	Anturin nopeus suhteessa vertailunopeuteen [%]
1	1,65	1,53	+8
2	1,64	1,67	-2
3	1,48	1,73	-14
4	1,73	1,85	-6
5	1,94	2,02	-4
6	1,93	2,11	-9
7	2,14	1,97	+9
8	2,38	2,27	+5
9	2,52	2,46	+2
10	2,70	3,06	-12
11	2,73	2,81	-3
12	2,52	2,83	-11
13	2,77	2,87	-4
14	2,43	2,91	-16

Ponnistusnopeudet - kelkkahypyt



KUVA 14. Ponnistusnopeuksien graafinen vertailu kelkkaergometrihyppyistä.



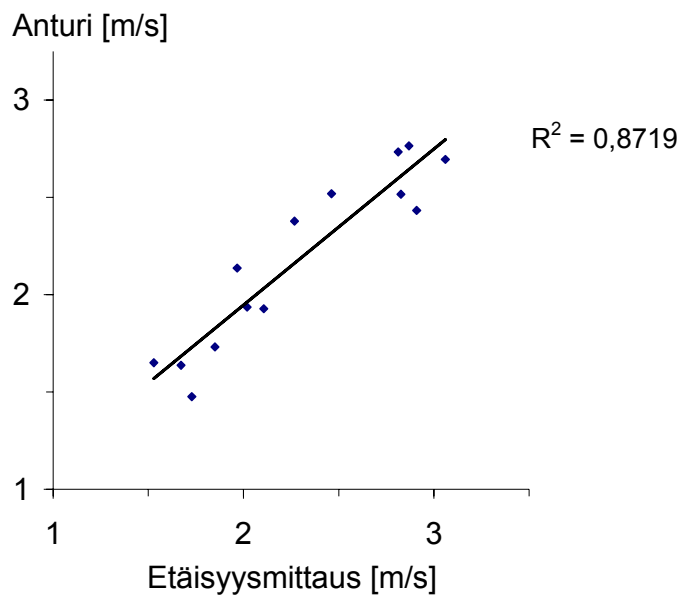
### 9.1.2 Tilastollinen analyysi

Kelkkahyppyjen tuloksille suoritettiin tilastoajat (SPSS 12.0.1) luokkien keskiarvojen ja -hajonnan, sekä luokkien välisen merkitsevyyden (P) ja korrelaation selvittämiseksi (taulukko 3). Luokkien välille ei löydetty tilastollisesti merkitsevää eroa ( $P \geq 0,05$ ). Kuvassa 15 on esitetty graafisesti lineaarinen riippuvuus etäisyysmittauksella saadun (vaaka-akseli) ja anturilla saadun nopeuden (pystyakseli) välillä.

TAULUKKO 3. Tilastolliset tulokset kelkkaergometrihyppyistä.

	Keskiarvo	Keskihajonta	t-testi	Korrelaatio
Ponnistuskorkeus	2,29	0,53	P = 0,051	r = 0,934
Anturi	2,18	0,45		P < 0,01

Lineaarisuus - kelkkahyppyt

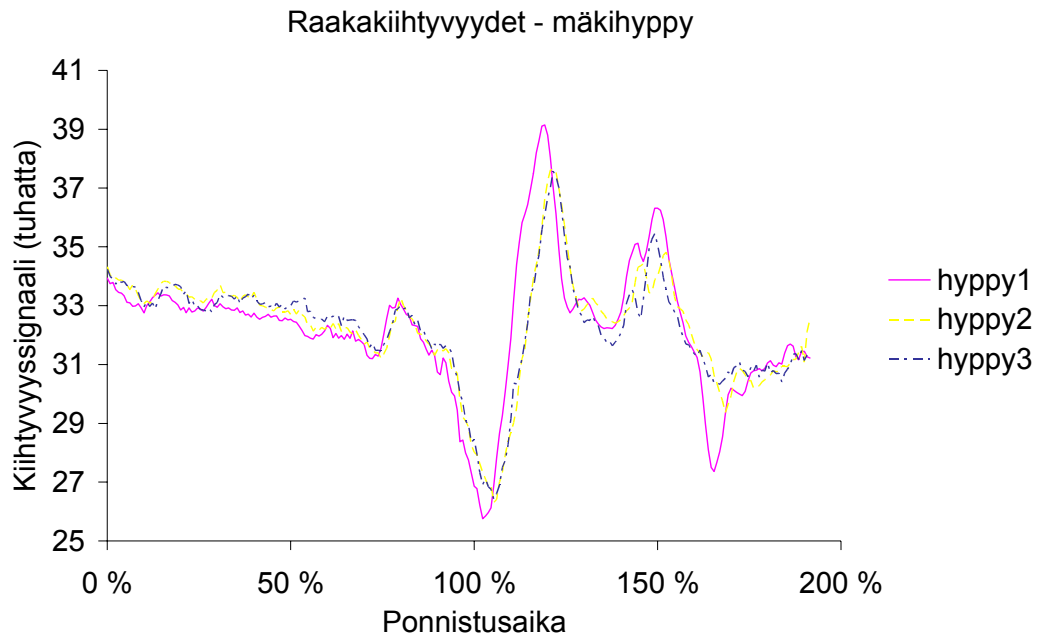


KUVA 15. Lineaarinen riippuvuus eri menetelmillä saatujen nopeuksien välillä.

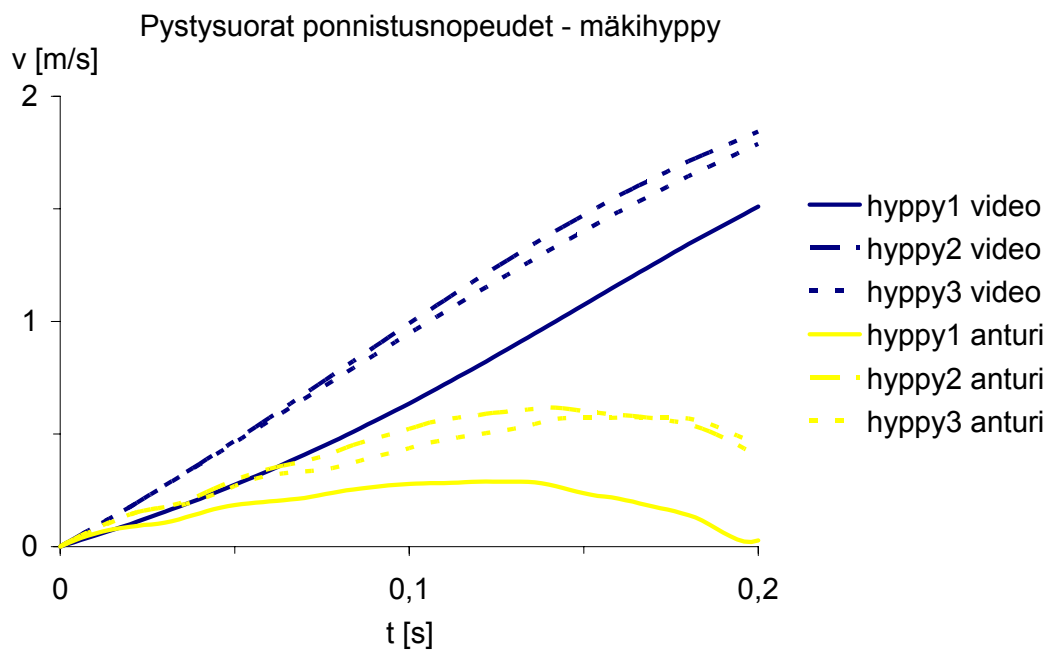
## 9.2 Mäkihyppyt

Kuvassa 16 on esitetty raaka kiihtyvyydata mäkihyppyistä hyppyripöydän alusta ja siitä voidaan havaita hyppyjen raakakiihtyvyyksien välinen yhdenmuotoisuus. Pystynopeuden määrittämiseksi raakasignaalista täytyy signaali skaalata kalibroinnista saatavilla

skaalauskerroimilla kiihtyvyyden yksiköksi, selvittää tieto anturin asennosta ja ponnistuksen suunnasta, sekä suorittaa niiden avulla saatavan pystykiihtyvyyden integrointi. Kuvassa 17 on esitetty pystysuorat ponnistusnopeudet kiihtyvyyssanturista sekä video-analyysistä suhteellisena hyppyripyöydälle.



KUVA 16. Raakakiihtyvyydet hypyistä 1 – 3. Hyppyripyötää vastaa 0 – 100 % ponnistusajasta eli noin 0,26 s.



KUVA 17. Mäkihypyistä 1 - 3 saadut pystysuorat ponnistusnopeudet.

## 10 POHDINTA

### 10.1 Hypyt kelkkaergometrissa

Ponnistusetäisyyden ja –ajan sekä kiihtyvyyssanturin avulla saadut nopeudet osoittivat suuren keskinäisen korrelaation kelkkaergometrihyppyissä, eikä tilastollisesti merkitsevää eroa löytynyt. Pienehkö P-luku ( $P = 0,051$ ) selittyy osaltaan kiihtyvyyssanturilta saatujen nopeuksien alhaisemmalla keskiarvolla. Erityisesti voimakkaammissa ponnistuksissa kiihtyvyyssanturi aliarvioi lähtönopeuksia, kuten tulosten lineaarisuudesta on nähtävissä (kuvassa 15). Korrelaation neliö ( $R^2$ ) oli 0.8719 (noin 87 %) eli kiihtyvyyssanturilla saatu lähtönopeus pystyi selittämään hyvin etäisyysmittaukseen perustuvan lähtönopeuden vaihteluita. Seuraavaksi on käsitelty mahdollisia virhelähteitä ja niiden vaikutusta kiihtyvyyssanturin mittaustuloksiin.

#### 10.1.1 Anturin asennon vaikutus

Kiihtyvyyssanturin asennon muuttuminen suorituksen aikana muodostaa virhelähteen kelkkahypyissä. Kuvassa 13 on kaikkien hyppyjen staattisessa tilanteessa määritelty anturin kallistuskulma sagittaalitasossa maanvetovoimakenttään nähden. Nämä ennen jokaista hypyä määritetyt kallistuskulmat rajoittuivat  $96,2^\circ$  (hyppy 6) ja  $101,1^\circ$  (hyppy 12) väliin. Näin ollen suurin mitattu anturin pystykallistuksen muutos kaikkien suoritusten välillä oli  $4,9^\circ$  huolimatta siitä, että koehenkilö oli kiinnitetty kelkkaergometrinen penkkiin nelipisteturvavöillä. Anturin kiinnityspaikka ei ollut optimaalinen kelkkaergometrihyppijä ajatellen. Turvavyöt sallivat pientä lantion ja alaselän liikkumista, joka mahdollisti anturin asennon muuttumisen. Voidaan myös spekuloida olisiko turvavöillä voinut vielä saada koehenkilöä pysymään paremmin paikoillaan kelkkaergometrinen penkissä. Koska anturin asento muuttui suoritusten välillä, on täysin mahdollista, jopa oletettavaa, että asento muuttui myöskin ponnistusten aikana. Hyppyissä 6 ja 14 oli havaittavissa pientä koehenkilön liikehdintää aikavälillä, jolloin anturin kallistuskulmaa määritettiin. Jos nämä hyppyt jätetään huomioimatta, kallistuskulman muutos muiden jäljellä olevien hyppyjen välillä on silti vajaat neljä astetta. Hyppyjen staatti-

sessä tilassa määritetyn anturin kallistuskulman arvolla ei ollut suoraa havaittavaa yhteyttä siihen kuinka suuri ero ponnistusnopeuksissa oli eri menetelmien välillä.

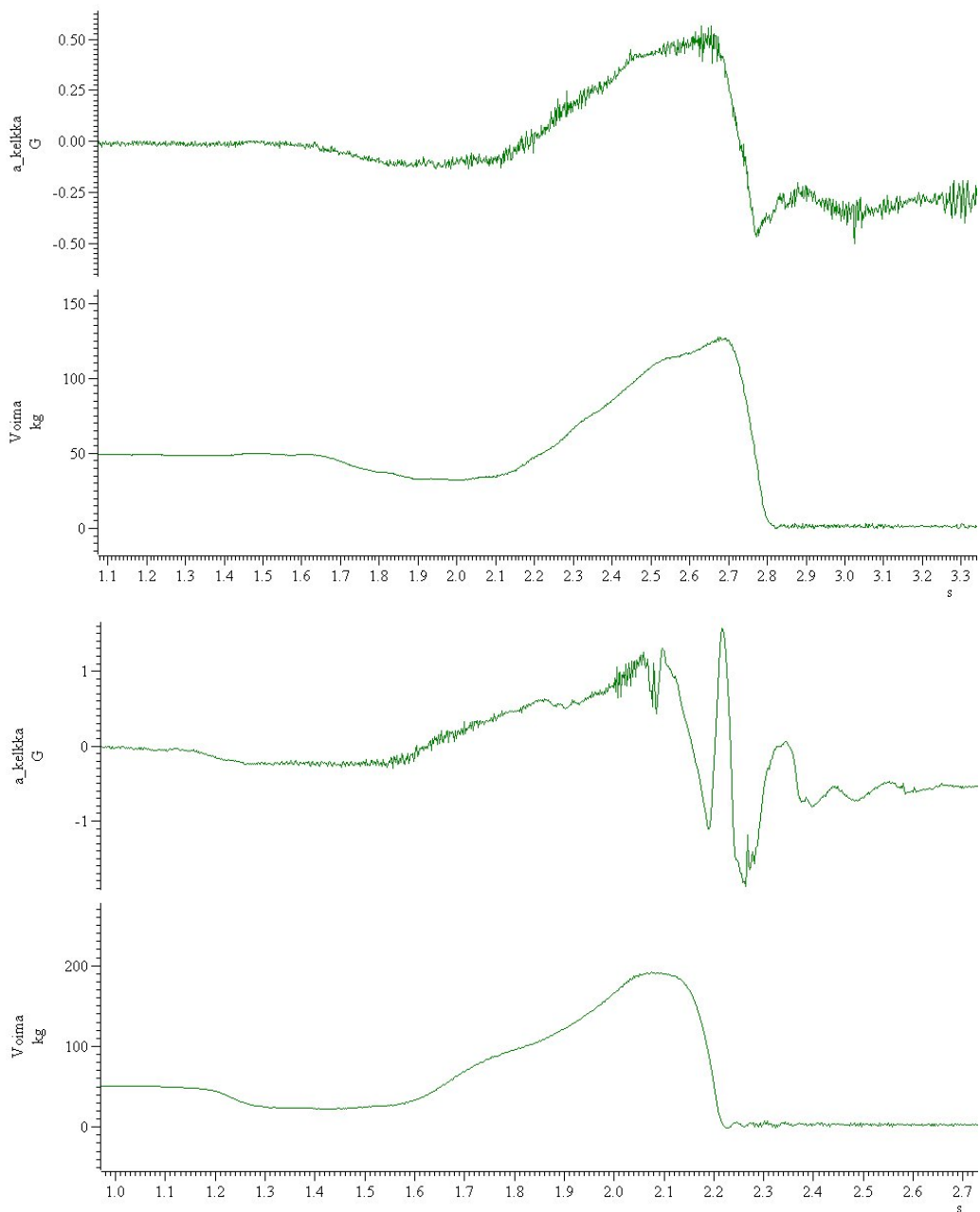
Teoreettisesti pieni virhe kiihtyvyyssanturilla saatavaan nopeuteen saattoi tulla siitä, että anturin mittausakseli ei mahdollisesti ollut aivan liikesuunnan mukainen sivuttaissuunnassa (pystyrotaatioakseli). Vaikutus olisi lineaarista kiihtyvyyttä alentava, mutta suuruusluokaltaan hyvin pieni. Anturin kiinnitys ei olisi mahdollistanut suuria asennon muutoksia.

### 10.1.2 Anturin suhteellisen liikkeen vaikutus

Kiihtyvyyden kohdistuessa kappaleeseen anturi voi liikkua translationaalisesti ja rotationaalisesti suhteessa kappaleeseen johon se on kiinnitetty. Tätä kutsutaan suhteelliseksi liikkeeksi. Kiihtyvyyssignaaliin vaikuttaa kiinnitysalustan ominaisuudet ja anturin kiinnitystiukkuus. (Nigg & Herzog 1999). Kiihtyvyyden ja voiman signaalien pitäisi muistuttaa toisiaan muodoltaan, koska niillä on riippuvuus massan kautta ( $F = ma$ ), joka on vakio.

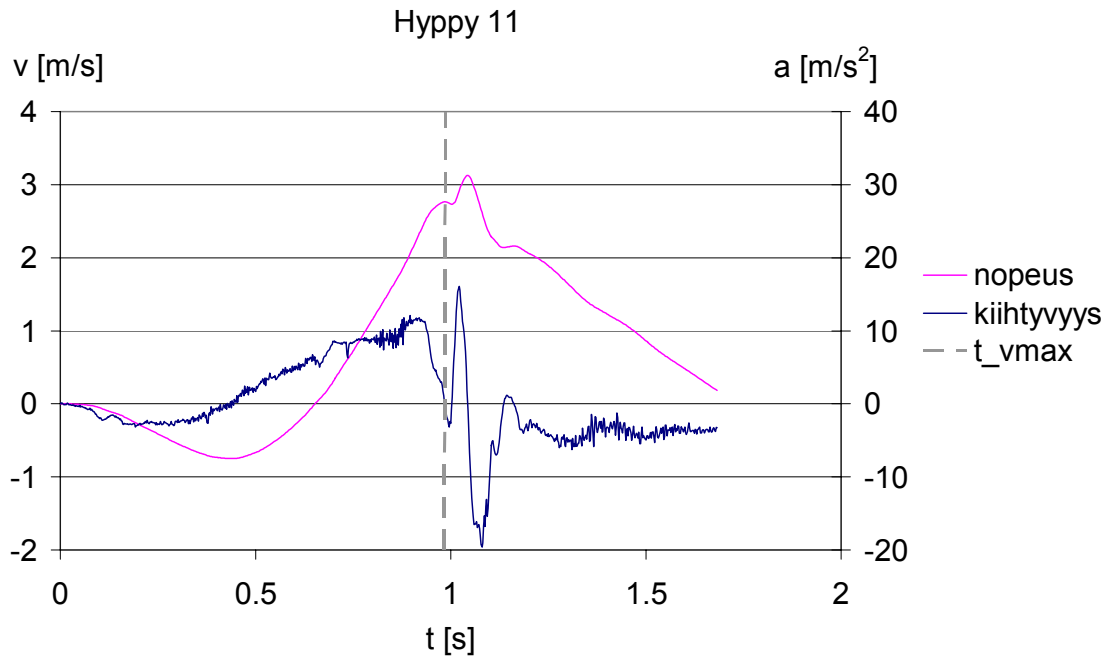
Kelkkaergometrissa saatiin eroja kiihtyvyyden ja voimalevyssignaalin muodossa etenkin voimakkaammassa hyppyssä. Asiaa voidaan havainnollistaa kuvalla 18, jossa on esitetty kahden erikorkuisen ponnistuksen kiihtyvyys liikesuuntaansa kiihtyvyyssanturin signaalista laskettuna sekä voimasignaali voimalevyanturista. Voidaan havaita, että voimakkaammassa ponnistuksessa voimantuoton loppuvaiheessa kiihtyvyyssignaalin esiintyy lyhytkestoinen suuriamplitudinen nopeasti vaimeneva värähtely. Lisäksi huomioimalla kaikki hyppyt amplitudin huomataan kasvavan ponnistusnopeuden kasvaessa. Vastaavanlaista kiihtyvyyssignaalin käyttäytymistä ei havaittu silloin, kun anturi oli kiinni kelkan rungossa. Myös osassa voimakkaammista ponnistuksista oli nähtävissä kiihtyvyyden tason vaihtelua maksimikiihtyvyyden paikkeilla, mikä saattoi vaikuttaa alentavasti kiihtyvyyssanturilta saataviin ponnistusnopeuksiin. Vähemmän voimakkaissa ponnistuksissa kiihtyvyyden ja voimantuoton signaalimuodot vastasivat paremmin toisiaan. Suhteellista liikkumista voidaan epäillä, kun kiihtyvyyden signaalimuodossa on suuri ennakkoon odottamaton poikkeama, jonka taajuus ja amplitudi ovat sellaiset, että kappale ei tunnetuissa olosuhteissa voi liikkua kiihtyvyyssignaalin osoittamalla tavalla.

Epäilyä vahvistaa se, että anturin runkokiinnityksessä aivan vastaavanlaista kiihtyvyyssignaalin käyttäytymistä ei havaittu. Anturin kiinnittäminen kelkan runkoon ehkäisee anturin kallistuskulman muuttumista ponnistuksen aikana sekä suoraviivaista anturin liikkumista kiinnityskohtaansa nähden. Metallipalkkiin voidaan soveltaa suurempaa kiinnitystiukkuutta ja sen käyttäytyminen on enemmän jäykän kappaleen mukaista kuin ihmiskehon. Toisaalta testattaessa anturin runkokiinnitystä kiihtyvyyden signaalimuoto kärsi suuritaajuisista suuriamplitudisista värähtelyistä.



KUVA 18. Kiihtyvyyssignaali tapahtuvia muutoksia ponnistusnopeuden kasvaessa. Ylhäällä heikompi ponnistus ja alhaalla voimakkaampi. Signaalit ovat järjestyksessä kiihtyvyys ylempänä ja voima alempana.

Kuvassa 19 on esitetty anturin kiihtyvyys ajan funktiona ja siitä integroimalla saatu liikenopeuden kuvaaja voimakkaassa ponnistuksessa. Kuvasta voidaan havainnoida nopeuden käyttäytymistä ponnistuksen aikana. Katkoviivalla on kuvattu ajan hetki  $t_{vmax}$ , jolloin nopeussignaali saa maksimiarvonsa, joka on määritelty ponnistusnopeudeksi. Positiivinen kiihtyvyyssiikki alkaa kuvassa vasta ponnistuksen loppumisen jälkeen, jolloin se ei pääse vaikuttamaan ponnistusnopeuteen.



KUVA 19. Nopeuden kuvaajan käyttäytyminen ja ponnistusnopeuden määrittäminen.

Yksi erilaisuus kiihtyvyyss- ja voimasignaalien välillä oli havaittavissa. Riippumatta kiihtyvyyssiikin suuruudesta tai ponnistuksen voimakkuudesta poikkeuksetta kaikissa hyppyissä kiihtyvyyssiini signaali laskee aavistuksen aikaisemmin noltaan kuin voimasignaali lähtöarvoonsa, vaikka signaalit oli synkronoitu juuri ennen ponnistusta. Selitystä tälle ei keksitty.

## 10.2 Mäkihypyty

Mäkihypyistä kiihtyvyyssanturilla saadut tulokset eivät olleet yhteneviä videoanalyysin kanssa. Hyppyripöydällä kiihtyvyyssanturin raakasignaaleissa oli selkeä laskeva trendi. Sama trendi pysyi lasketuissa pystykiihtyvyyksissä, jonka seurauksena myös pysty-

nopeuden kuvaajat lähtivät laskuun ennen ponnistuksen loppumista. Käytetyllä menetelmällä ei voitu mitata ponnistusnopeutta riittävän tarkasti suurten epätarkkuustekijöiden johdosta. Huomattavaa on raakasignaalien väliset samankaltaisuudet sekä signaalin muodossa, että suuruudessa mukaan lukien luultavasti alustan epätasaisuudesta johtuvat tärahdykset. Se viittaa siihen, että signaaleissa esiintyneet ilmiöt toistuivat samankaltaisina kaikissa hyppyissä. Ensimmäisessä hyppässä ponnistusnopeus tosin jäi alhaisemmaksi verrattuna muihin hyppyihin sekä kiihtyvyyssanturin signaalin että videoanalyysin perusteella. Täytyy kuitenkin muistaa, että koehenkilöitä oli vain yksi ja dataa oli hyvin rajallisesta määrästä hyppyjä, joten on aikaista tehdä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä siitä kuinka hyvin mitatuista kiihtyvyyssanturisignaaleista voidaan erottaa ponnistusnopeuksien eroja eri hyppyistä.

Videoanalyysillä lasketut lonkan pystynopeudet eivät ole suoraan verrattavissa kirjallisuudessa esitettyihin nopeuksiin, koska koko hyppäripöydän alueelta ei ollut käytettävissä videodataa, ja toisekseen tulokset yleensä ilmoitetaan kehon massakeskipisteen suhteen. Ponnistusnopeuden kuvaajissa esiintyy myös vaihtelua mäen, hyppääjän ja olosuhteiden vaikutuksesta vaikeuttaen vertailua. Voidaan kuitenkin todeta, että videoanalyysillä saadut pystysuorat ponnistusnopeudet näyttävät suunnilleen odotetunlaisilta ja niitä voidaan käyttää tulosten vertailuun. Seuraavaksi pohditaan niitä tekijöitä, jotka saattaisivat selittää miksi kiihtyvyyssanturilta saadut tulokset eroavat niin huomattavasti videoanalyysiin tuloksista.

### 10.2.1 Kiihtyvyyden suunnan vaikutus

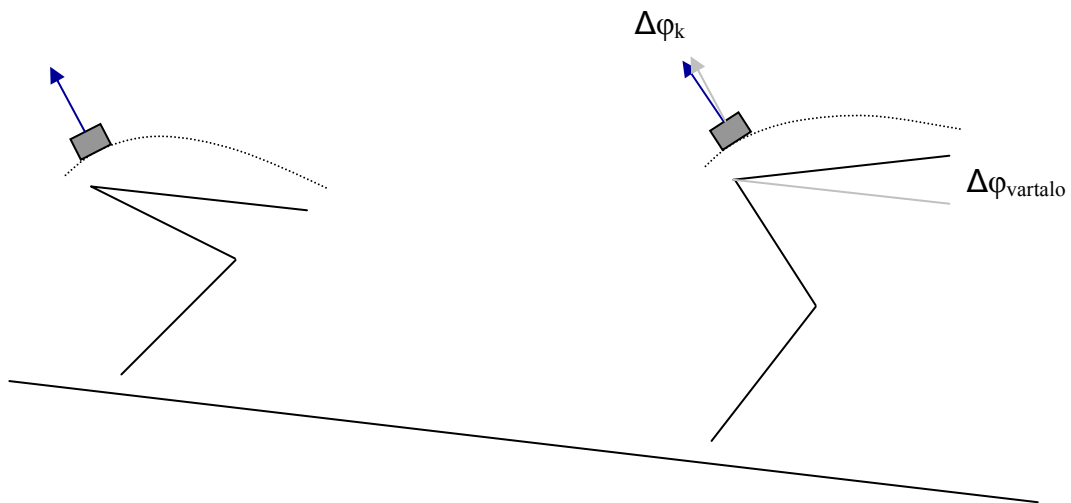
Yksi virhelähde tulee kiihtyvyyden suunnan approksimoinnista. Yksiakselisella kiihtyvyyssanturilla ei pystytty määrittämään anturin kiihtyvyyden suuntaa sagittaalitasossa, joka periaatteessa kahdella kohtisuoraan toisiinsa nähden sijoitetulla mittausakselilla onnistuisi, kunhan vain anturin kallistuskulma gravitaatiokenttään nähden tunnetaan. Myöskään videoanalyysillä tarkka anturin liikesuunnan määrittäminen ponnistuksessa ei onnistunut. Tarvittava tieto tukipisteen (=vertailupisteen) sijainnista puuttui, koska vauhdinottomakeä reunustava muoviaita oli läpinäkymätön siihen tiukasti kerääntyneen jään ja huurteen johdosta estäen näkymän polvien korkeudelle ja siitä alaspäin koko hyppäripöydän matkalla. Virheen suuruus kiihtyvyyssanturin tuloksissa riippuu siitä

kuinka paljon anturin liikesuunta ponnistuksessa todellisuudessa erosi hyppyrpöydälle kohtisuorasta suunnasta. On mahdollista, että määritetty pystynopeus on alhaisempi kuin todellinen juuri siitä syystä, että lantion liikkeen suuntautuessa ponnistuksessa eteenpäin myös anturi liikkuu eteenpäin. Virnavirta (1993) esittää kahden eri hyppäjän vartalon vaakanopeuden suhteessa jalkateriin, joka on positiivinen, eli eteenpäin suuntautunut, koko ponnistuksen ajan. Kun kasvatetaan  $\gamma$ :aa, eli anturin oletettua kiihtyvyyden eteenpäin kallistuvaa suuntaa gravitaatiokentän suunnasta, saadaan silloin suurempi laskennallinen pystysuuntainen kiihtyvyys (vrt. kaava 18). Virhe  $\gamma$ :n suuruudessa voisi olla yksi selittävä tekijä siihen miksi hypyistä saatiin niin pieni pystysuuntainen nopeus kiihtyvyyssanturilta.

### 10.2.2 Anturin asennon vaikutus

On huomioitavaa, että käytetty mittausanturi ei mahdollistanut anturin tai segmentin asennon tunnistamista kiihtyvyyssignaaleista suorituksen aikana. Anturin asennon määrittämiseksi käytettiin lonkka-olkapää -pisteiden määräämää segmentin asentoa. Staattisessa tilanteessa ennen hyppyä määritettiin ero anturin kallistuksen ja vartalon kallistuksen välillä koehenkilön laskuasennosta. Tätä kulmaa käytettiin vakiosuuruisena hyppyjen aikana määrittämään anturin kallistusta vartalosegmentin kallistuksen perusteella. Perusoletuksena oli, että lonkka-olkapää -kulma vastaa suunnilleen jäykän kappaleen käyttäytymistä. Tosiasiassa vartalo sekä kallistuu että taipuu ponnistuksessa, mikä aiheuttaa virhettä määritelyyn anturin asentoon. Vaikutus korostuu ponnistuksen loppuvaiheessa, kun selkää ojennetaan suoremaksi jolloin myös selän kaari oikenee. Sen seurauksena on todennäköisempää, että yliarvioidaan anturin asennon muutos ja lasketaan virheellinen anturin asento. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 20, jossa on mallinnettu kulmamuutosta anturissa ja vartalosegmentissä hyppyrpöydällä ponnistuksen aikana. Anturin asennon muutoksen mahdollinen yliarviointi johtaa siihen, että anturin kallistuskulma gravitaatiokentästä oletetaan suuremmaksi seurauksella, että laskennallinen maanvetovoiman kiihtyvyys aliarvioidaan. Silloin lineaarisen kiihtyvyyden osuus signaalissa kasvaa ja samalla pystynopeus. Mainitun suuntainen virhe ei pysty selittämään miksi pystysuuntainen ponnistusnopeus jää alhaiseksi. Myöskään mahdollinen vakiosuuruinen virhe anturin oletetussa asennossa ei yksin pystyisi selittämään kiihtyvyyssignaalin käyttäytymistä ponnistuksen aikana.





KUVA 20. Anturin kulman muutos todennäköisesti yliarvioidaan vartalon taipumisen seurauksena ( $\Delta\varphi_k < \Delta\varphi_{\text{vartalo}}$ ).

Sagittaalitasoon kulmakiihtyvyyden, ja sitä kautta kallistuksen, laskeminen olisi vaatinut yhden erillisen kiihtyvyysanturin lisää tai gyroskoopin. Hyödyntämällä kaavaa 11 kahdesta samaan suuntaan mittaavasta vakioetäisyyden päässä toisistaan olevasta anturista olisi saatu tarvittavat signaalit kallistuksen selvittämiseen. Anturien välisen etäisyyden kasvattaminen kasvattaa lineaaristen kiihtyvyyksien eron suuruutta parantaen signaali/kohina-suhdetta, mutta anturin massan siirtäminen kauemmas mitattavan kappaleen massakeskipisteestä lisää kappaleen hitausmomenttia (Yogonandan ym 2002). Hitausmomentin kasvulla ei ole tässä yhteydessä suurta merkitystä, jos antureja kiinnittävä varsi ei ole massiivinen, sillä itse anturit ovat keveitä. Kahden anturin käyttö kuitenkin hankaloittaa kiinnitystä koehenkilöön, sillä anturien asento ja etäisyys suhteessa toisiinsa ei saa muuttua. Käytännössä tämä tarkoittaa anturien kiinnittämistä jäykkään kappaleeseen, joka puolestaan kiinnitetään esimerkiksi hyppääjälle puettaviin valjaisiin. Valitettavasti ongelmia tulee kiinnitysmenetelmän toteutuksessa ja sen mahdollisesti lajinomaiseen suoritukseen aiheuttamien haittojen muodossa. Edellisen perusteella gyroskooppi voisi olla parempi vaihtoehto. Yksi gyroskooppi riittää sagittaalitasossa asennon tunnistamiseen ja lisäksi siitä saatava vaste (kulmanopeus) on epäherkempi tärinälle.

Kahdella kiihtyvyysanturilla saatu kulmakiihtyvyys joudutaan integroimaan kulmanopeuden selvittämiseksi ja vielä toiseen kertaan *kulmamuuutoksen* selvittämiksi. Vastaa-

vasti gyroskoopin signaalille yksi integrointi riittää. Kulmamuuutos ei vielä kerro anturin asentoa ajan funktiona, vaan sen selvittämiseen tarvitaan referenssikulma jollain ajan hetkellä, jonka perusteella asento lasketaan. Helpoimmin se on saatavissa staattisessa tilanteessa kiihtyvyyssanturilta hetkeä ennen suorituksen aloitusta (esim. kaavan 10 mukaisesti). Integrointi korostaa virhettä signaalin matalissa taajuuksissa aiheuttaen anturin asennon ryömimistä, joka ilmenee virheellisenä asentotietona. Ongelma korostuu mittausajan kasvaessa.

Käytetyssä menetelmässä ei voitu määrittää anturin sivuttaiskallistusta liikesuuntaan nähden suorituksen aikana, vaikka sillä saattoi olla pieni vaikutus kiihtyvyyssignaaliin. Anturin sivuttaiskallistuksen mahdollista vaikutusta ei voitu juurikaan kontrolloida. Anturi pyrittiin kuitenkin kiinnittämään mahdollisimman tukevasti ja oikeaan asentoon.

### 10.2.3 Rotaatiokomponenttien vaikutus

Tuloksissa tyydyttiin vertaamaan lonkkapisteen ja anturin pystynopeutta. Koska anturin asennon tunnistamiseksi käytetty menetelmä oli vartalon taipumisen seurauksena epätarkka, virhe kulman muutoksissa olisi korostuneena näkynyt kulmanopeudessa ja -kiihtyvyydessä, joita kumpaakin olisi tarvittu mittauspisteen siirtämiseksi esimerkiksi vartalon massakeskipisteeseen (kaava 19). Wun (1997) mukaan segmentin massakeskipisteen ja anturin mittauspisteen kiihtyvyyksien välillä on riippuvuus

$$a_{cm} = a_p - \omega' \times r - \omega \times (\omega \times r), \quad (19)$$

jossa  $a_{cm}$  on segmentin massakeskipisteen kiihtyvyys,

$a_p$  on anturin sijaintipisteestä mitattu kiihtyvyys,

$\omega'$  on kulmakiihtyvyys,

$\omega$  on kulmanopeus ja

$r$  on segmentin massakeskipisteen ja anturin välinen etäisyys.

Etäisyyden  $r$  määrittäminen vartalon massakeskipisteeseen olisi onnistunut anturin kiinnittämisen yhteydessä kuvatusta kiihtyvyyssanturin koehenkilökalibroinnista. Anturin sijaintipaikka oli lähellä lonkkapistettä, joten ilman rotaatiokomponenttien laske-

mistakin anturilta pitäisi saada kohtalaisen hyvä vertailtavuus videoanalyysillä selvitetyn lonkkapisteen pystynopeuteen.

#### 10.2.4 Muut tekijät

Kiihtyvyyssanturi rekisteröi myös muita kuin mittausakselin suuntaisia kiihtyvyyksiä. Kiihtyvyyssanturin valmistajan tietojen mukaan mittaussuunnalle kohtisuoraan olevasta kiihtyvyydestä kiihtyvyyssanturi rekisteröi viiden prosentin luokkaa olevaa vastetta (=anturin poikittaisherkyys), joka summautuu signaaliin. Se voi lisätä pystykiihtyvyyden vaihtelua mittausakselin suunnalle poikittaisen tärinän vaikutuksesta.

Suorituksena kelkkaergometrihypyt erosivat mäkihypyistä suuresti. Kelkkaergometrihypyissä oli vähemmän muuttujia, jotka olisivat voineet vaikuttaa mittauksiin. Kiihtyvyyden suunta ja anturin asentokin oli tietyllä tarkkuudella tiedossa. Lisäksi suorituksen aloitus tapahtui staattisesta tilanteesta ja kelkan ylimääräinen massa saattoi rajoittaa kiihtyvyyden muutoksia ponnistuksen aikana. Luonnollisesti myös analysoitavan suorituksen kesto oli huomattavasti pidempi kelkkaergometrihypyissä, jossa kiihdytysvaihe kesti vähintään luokkaa 0,6 sekuntia, kun mäkihypyissä ponnistuksen kestoksi määritettiin noin 0,26 sekuntia. Mäkihypyissä pystykiihtyvyyden laskemiseksi tarvittavat muuttujat eivät olleet hallittavissa käytetyllä menetelmällä ja siksi tuloksiin tuli virhettä kiihtyvyyden suunnan ja anturin asennon osalta. Siinä lienee suuri syy miksi tulokset erosivat niin paljon videoanalyysin tuloksista. Edellä mainitut tekijät eivät kuitenkaan selitä kokonaan kiihtyvyyden signaalimuotoa, joka laski nollakiihtyvyyteen jo ennen ponnistuksen loppumista.

Toinen mahdollinen syy on anturin suhteellinen liikkuminen, jonka merkitystä ei pidä väheksyä. Jo kelkkaergometrihypyissä joissakin voimakkaammissa ponnistuksissa oli nähtävissä ponnistusvaiheen aikaista kiihtyvyyssignaalin vääristymistä, joka todennäköisesti johtui anturin suhteellisesta liikkumisesta. Anturissa kiinni ollut tukilevy saattoi itsessään olla osa ongelmaa. Alumiininen tukilevy, vaikkakin rei'itetty, vastasi suurelta osin mittausanturin massasta. Suurempi massa vaatii suuremman anturia kiinnittävän voiman pitääkseen sen paikallaan kiihtyvyyden kohdistuessa kappaleeseen eli koehenkilöön. Toisaalta tukilevy antoi enemmän kiinnityspinta-alaa ja saattoi jossain mää-

rin ehkäistä paremmin anturin asennon muutoksia. Muiden epätarkkuustekijöiden ohella suhteellinen liikkuminen voisi vastata huomattavalta osin syntyneistä eroista tuloksissa videoanalyysiin verrattuna. On selvää, että kun halutaan määrittää ponnistusnopeus tarkasti, täytyy pyrkiä eliminoimaan kaikki epätarkkuustekijät. Anturien suhteelliseen liikkumiseen voidaan vaikuttaa parantamalla anturien kiinnitystä ja keventämällä niitä jos mahdollista.

Pohdittaessa mittauslaitteen soveltuvuutta mittauksiin, Aumala (1989) kirjoittaa seuraavasti: ”Mittauslaitteen on oltava spesifinen. Sen tulee antaa tieto juuri siitä suureesta, jota halutaan mitata, ja toisaalta sen on oltava tunteeton käyttöolosuhteille ja muille kuin kohdesuureelle. Edelleen mittauslaitteen on oltava riittävän tarkka.” Käytetty kiihtyvyyden mittalaite antoi vasteen, josta haluttu kiihtyvyys piti ratkaista toisen mitatajärjestelmän jokseenkin epätarkan kallistustiedon ja oletetun ponnistussuunnan perusteella. Tämä oli menetelmällinen ongelma, johon sopivalla anturien valinnalla voidaan vaikuttaa. Mittaukset olivat riippuvaisia anturin kiinnitystiukkuudesta sekä pehmytkudoksen ja anturin reagoinnista kiihtyvyyksiin. Mittalaitetta ei kalibroitu dynaamisesti, jolloin sen ominaisuuksia ei päästy tarkastelemaan lähemmin. Mäkihypyn tuloksiin tuli virhettä useasta lähteestä. Osaan ongelmista olisi pitänyt pystyä varautumaan ennalta käsin. Tutkimuksessa saatiin arvokasta kokemusta kiihtyvyydsanturien käyttäytymisestä ja erityisesti esiin nostettiin asioita, joita on huomioitava tulevaisuudessa.

## **11 YHTEENVETO JA JATKOKEHITYSTARPEET**

### **11.1 Yhteenveto tuloksista**

Kelkkaergometrihypyissä kiihtyvyyssanturilla nopeuden mittaaminen osoitti kohtalaisen hyvän vastaavuuden etäisyysmittauksella saatuun nopeuteen verrattuna. Mahdollinen anturin asennon muuttuminen hypyn aikana saattoi vaikuttaa kiihtyvyyssanturilta saatuihin nopeuksiin ja selittää syntyneitä eroja eri mittausmenetelmien välillä. Hypyissä, joissa oli suurempi ponnistusnopeus kiihtyvyyssignaaliin tuli sellaisia vääristymiä, jotka voisivat osaltaan selittää alhaisempia ponnistusnopeuksia. Kuitenkin tulosten välinen korrelaatio oli hyvä eikä tilastollisesti merkittäviä eroja löydetty. Mäkihypyissä saatiin huono vastaavuus kiihtyvyyssanturin ja videoanalyysin tulosten välillä. Mahdollisia selittäviä syitä on useita. Mittausanturin rajoitukset mitata pystykiihtyvyyden määrittämiseksi vaadittavia muuttujia aiheutti virhettä tuloksiin. Myöskään videoanalyysistä ei saatu ratkaistua kyseisiä muuttujia riittävällä tarkkuudella. Anturin suhteellisesta liikkeestä saattoi aiheutua huomattavaa epätarkkuutta, joka täytyy pystyä eliminoimaan riittävän tukevalla kiinnityksellä. Vaikka tässä tutkimuksessa ei pystytty mittamaan luotettavasti mäkihypyn ponnistusnopeutta, esiin nostettiin sellaisia tekijöitä ja ongelmia, joita on otettava huomioon jatkotutkimuksissa. Mäkihypyn ponnistus on hyvin vaativa suoritus mitata tarkasti ja luotettavasti kiihtyvyyssantureilla lajin dynaamisen luonteen ja sen anturin kiinnitysmenetelmälle aiheuttamien vaatimusten johdosta. Kiihtyvyyssantureissa on potentiaalia mitata myös mäkihypyn ponnistusta, kunhan esille tulleet rajoitukset ja ongelmat huomioidaan mittauksiin valmistauduttaessa.

### **11.2 Menetelmälliset rajoitukset**

Kiihtyvyyssmittalaitteiston rajoitukset voidaan kiteyttää kolmeen kohtaan: mittausanturin kiihtyvyyden suunnan määrittäminen, asennon tunnistaminen ja kiinnittäminen. Kaikkiin kolmeen kohtaan voidaan tehdä parannuksia. Näiden lisäksi kehon massakeskipisteen liikkeiden mittaaminen kiihtyvyyssantureilla on rajoittunutta.

*Kiihtyvyyden suunnan määrittämiseen* yksi yksiakselinen kiihtyvyyssanturi ei riitä. Tarvittaisiin vähintään kaksi toisiinsa nähden kohtisuoraa mittausakselia kaksiulotteisen kiihtyvyyden suunnan määrittämiseen. Kiihtyvyyden suunnan määrittäminen kiihtyvyyssanturilla on riippuvainen anturin asennon tunnistamisesta maailmankoordinaatistossa.

*Anturin asennon tunnistaminen* dynaamisessa liikkeessä ei onnistunut käytetyllä anturilla. Boonstran ym. (2006) mukaan anturin kallistuskulma ja lineaarinen kiihtyvyys pitäisi pystyä erottamaan yhdestä pisteestä mitatusta signaalista sopivalla alipäästösuodatuksella. Menetelmän käyttöä edellyttää komponenttien taajuusalueiden ja sopivan suodattimen rajataajuuden tunteminen. Liikuntasuorituksen luonteen täytyy olla lisäksi sellainen että komponentit esiintyvät eri taajuusalueilla. Tässä tutkimuksessa ei lähdetty selvittämään menetelmän soveltuvuutta mäkihyppyolosuhteisiin. Kiinnostavana yksityiskohtana menetelmässä ei tarvitse integroida kiihtyvyyssignaalia anturin asennon selvittämiseksi. Siitä voisi olla etua, kun integroinnin seurauksena tapahtuvaa asennon ryömimistä ei esiintyisi. Mäkihyppyissä käytetty videoanalyysi tarjosi vartalon taipumisen takia vain approksimaation anturin pystykallistuksesta. Anturin asento pitää pystyä mittaamaan tarkasti ja luotettavasti, koska lineaarisen kiihtyvyyden suuruus on suoraan riippuvainen siitä. Anturin kallistuskulman selvittämiseksi sagittaalitasossa olisi teoriassa tarvittu yksi erillinen kiihtyvyyssanturi lisää tai vaihtoehtoisesti gyroskooppi. Kahden kiihtyvyyssanturin käyttöön vaaditaan sama mittaussuunta ja tunnettu etäisyys anturien välille. Se on aika suuri vaatimus kiinnitysmenetelmälle ja edellyttää käytännössä anturien kiinnittämistä jäykkään kappaleeseen. Gyroskoopin etuna kulmamuuutosten mittaajana kiihtyvyyssantureihin nähden on epäherkkyys tähtelyille, koska se ei anna vastetta lineaariselle kiihtyvyydelle vaan ainoastaan kulman muutokselle. Gyroskoopin käyttö olisi siten perustellumpaa.

*Anturien kiinnittäminen* siten, että ne eivät liiku kehon segmenttiin tai toisiinsa nähden on haaste. Esimerkiksi kahden kiihtyvyyssanturin kiinnittäminen suoraan vartalon ihoon vakioetäisyydelle ja -asentoon toisiinsa nähden olisi vaikea toteuttaa käytännössä. Anturien kiinnitystä ihoon voitaisiin parantaa vaikka mukautuvalla suurikitkaisella ja tärinää vaimentavalla materiaalilla, jonka välityksellä anturit kiinnitettäisiin. Anturit voidaan kiinnittää ihon lisäksi esimerkiksi koehenkilölle puettaviin valjaisiin, jolloin antu-

rien kiinnittäminen voidaan toteuttaa helpommin niin, että ne pysyvät hyvin paikoillaan toisiinsa ja kehon segmenttiin nähden.

*Kiihtyvyyssanturien mittaus massakeskipisteen suhteen* on rajoitettua. Kiihtyvyyssantureilla voidaan mitata sen segmentin kinematiikka, johon ne on kiinnitetty. Jos haluttaisiin mitata kehon massakeskipisteen suhteen, tarvittaisiin teoreettisesti mittaustuloksia useista segmenteistä, että saataisiin riittävän tarkka mallinnus. Käytännön toteutuksena se olisi hankala. Onkin pohdittava mistä segmenteistä tai segmenttien pisteistä mitattu kiihtyvyys on oleellisinta suorituksen kannalta. Alaselässä kiinni oleva anturi on kuitenkin aika lähellä koko kehon massakeskipistettä. Esimerkiksi kypäaraan anturi olisi ollut helpompi kiinnittää tukevasti. Eri asia on riittävätkö yksistään pään liikkeet kertomaan luotettavasti ponnistusnopeudesta, sillä pää on kehon distaalinen segmentti ja kaukana kehon massakeskipisteestä. Lisäksi pää voi liikkua jonkin verran riippumatta muun kehon liikkeistä.

Vaikka haluttaisiinkin, antureita ei pystytä kiinnittämään suoraan segmentin massakeskipisteeseen. Jos kiihtyvyys lasketaan segmentin massakeskipisteen suhteen, se edellyttää massakeskipisteen ja anturin sijainnin määrittämistä (videoanalyysillä) niiden välisen etäisyyden ratkaisemiseksi. Jos taas kiihtyvyyssanturin sijaintikohdasta mitatun kiihtyvyyden todetaan riittävän, täytyy kuitenkin muistaa hyppääjien erilaiset kehon mittasuhteet. Suurta varovaisuutta on noudatettava tuloksia analysoitaessa, jos halutaan ilmoittaa nopeus pelkästään anturin mittauspisteestä ja verrata hyppääjiä keskenään.

### **11.3 Huomioita kiihtyvyyden mittalaitteistosta**

*Lähettimen kantama* riittää mittaamaan koko vauhdinottomäen alueelta. Lähetin oli kiinnitetty koehenkilön yläselkään. Sijainti valittiin, koska vaikutus hyppääjän suoriin oli vähäinen ja kiinnittäminen helppoa. Hyppääjän keho oli väistämättä välillä lähettimen ja vastaanottimen välissä ja tiedonsiirto saattoi katketa, kun hyppääjä oli tornissa odottamassa lähtölupaa. Kantamaa ei yritetty maksimoida lähetintä siirtämällä, kun mielenkiinnon kohde oli hyvin lyhyellä matkalla vastaanottimen välittömässä läheisyydessä. Sijoittamalla lähetin sopivasti kantaman riittävyudessa ei pitäisi olla

ongelmia koko vauhdinottomäen matkalla. Myös erilaisia antenneja on mahdollista käyttää.

*Mittalaitteiston toimintavarmuudessa* ei ollut suurempia ongelmia. Ainoa ongelma liittyi lähettimen patteriin varauksen tarkistamiseen, johon ei ollut mitään helppoa ja nopeaa keinoa. Tässä tutkimuksessa lähetin oli hyppypuvun alla, joten kylmyys ei päässyt vaikuttamaan siihen. Jos lähetintä käytetään vaatetuksen ulkopuolella talvisissa olosuhteissa, on syytä varautua kylmyyden aiheuttamiin vaikutuksiin patterin toiminnassa. Anturia ja lähetintä yhdistävä johto oli kierrettyä parikaapelia, joka oli käyttötarkoitukseen nähden hieman liian jäykkää. Sopiva johtoon kohdistuva voima olisi voinut pyrkiä siirtämään anturia.

*Yhteensopivuutta* muihin järjestelmiin voisi kehittää. Mittausanturin signaalit tai signaalien tiedonkeräysjärjestelmä ei ollut suoraan yhteensopiva muiden mittausten, esimerkiksi voimalevyn tuottaman signaalin, kanssa. Jos tulevaisuudessa halutaan yhdistää erilaisia mittauksia kiihtyvyydsmittauksen kanssa, olisi hyvä saada kaikki data kerättyä samaan tiedonkeräysjärjestelmään.



## 12 LÄHTEET

- Allard, P., Stokes, I. & Blanci, J-P. (toim.) 1995. Three-dimensional analysis of human movement. Human kinetics, Champaign, IL.
- Aumala, O. 1989. Mittaustekniikan perusteet. Kahdeksas korjattu painos. Otatieto Oy, Helsinki.
- Blumenbach, T. 2005. GPS-Anwendungen in der Sportwissenschaft – Entwicklung eines Messvehrens für das Skispringen. Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs.
- Bogert van den, A.J., Read, L. & Nigg, B.M. 1996. A method for inverse dynamic analysis using accelerometry. *Journal of Biomechanics* 29, 949-954.
- Boonstra, M., Rienk, M., van der Slikke, R., Keijsers, N., Lummel, R., de Waal Malefijt, M. & Verdonshot, N. 2006. The accuracy of measuring the kinematics of rising from a chair with accelerometers and gyroscopes. *Journal of Biomechanics* 39, 354-358.
- Boyer, K.A. & Nigg, B. M. 2006. Soft tissue vibrations within one soft tissue compartment. *Journal of Biomechanics* 39, 645-651.
- Chen, K. & Ming, S. 1997. Improving energy expenditure estimation by using a triaxial accelerometer. *Journal of Applied Physiology* 83, 2112-2122.
- Eston, R.G., Rowlands, A.V. & Ingledew, D.K. 1998. Validity of heart rate, pedometry, and accelerometry for predicting the energy cost of children's activities. *Journal of Applied Physiology* 84, 362-371.
- Forthomme, B., Croisier, J-L., Ciccarone, G., Crielaard, J-M. & Cloes, M. 2005. Factors correlated with volleyball spike velocity. *American Journal of Sports Medicine* 33, 1513-1519.
- Gardner, J. 1994. *Microsensors: principles and applications*. John Wiley & sons Ltd., Chichester, West Sussex.
- Hore J. & Watts, S. 2005. Timing finger opening in overarm throwing based on spatial representation of hand path. *Journal of Neurophysiology* 93, 3189-3199.

- Johnson, C. 2006. Accelerometer Principles. Saatavilla [www-muodossa: <URL: http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/ED9B9E0657CED8008625684300753508>](http://www.muodossa.com/zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/ED9B9E0657CED8008625684300753508) (National Instruments). (Luettu 20.8.2006)
- Komi, P.V., Nelson, R. & Pulli, M. 1974. Biomechanics of skijumping. Studies in sport, physical education and health 5. University of Jyväskylä.
- Kuivalainen, P. 1992. Mikroanturit. Otatieto Oy, Helsinki.
- Mayagoitia, R., Nene, A. & Veltink, P. 2002. Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems. *Journal of Biomechanics* 35, 537-542.
- Moe-Nilssen, R. 1998. A new method for evaluating motor control in gait under real-life environmental conditions. Part 1: The instrument. *Clinical Biomechanics* 13, 320-327.
- Morris, J. R. W. 1973. Accelerometry –A technique for the measurement of human body movements. *Journal of Biomechanics* 6, 729-736.
- Müller, E. & Schwameder, H. 2003. Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *Journal of Sport Sciences* 21, 679-692.
- Newman, J., Beusenbergh, M., Shewchenko, N., Withnall, C. & Fournier, E. 2005. Verification of biomechanical methods employed in a comprehensive study of mild traumatic brain injury and the effectiveness of American football helmets. *Journal of Biomechanics* 38, 1469-1481.
- Nigg, B. & Herzog, W. (toim.) 1999. Biomechanics of the musculo-skeletal system (second edition). John Wiley & sons Ltd., Chichester, West Sussex, England.
- Pelkonen, J. 2000. Sideanturien käyttö mäkihypyn ponnistusvoimien mittaamisessa. Jyväskylän yliopisto, liikuntabiologian laitos. Pro gradu -tutkielma.
- Phillips, C. & Parr, J. 1999. Signals, systems, and transforms. Second edition. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Schmölzer, B. & Müller, W. 2002. The importance being light: aerodynamic forces and weight. *Journal of Biomechanics* 35, 1059-1069.
- Schmölzer, B. & Müller, W. 2005. Individual flight styles in ski jumping: results obtained during Olympic Games competitions. *Journal of Biomechanics* 38, 1055-1065.
- Schwameder, H., Müller, E., Lindenhofer, E., De Monte, G., Potthast, W., Brüggemann, G., Virravirta, M., Isolehto, J. & Komi, P. 2005. Kinematic

- characteristics of the early flight phase in ski-jumping. Teoksessa Müller E ym. (toim.) *Science and Skiing III*. Meyer & Meyer Sport, Oxford, 381-391.
- Sägesser, A. Neukomm, P. A., Nigg, B. M., Rüegg, P. & Troxler, G. 1981. Force measuring system for the take-off in ski jumping. Teoksessa Morecki A ym. (toim.) *Biomechanics VII-B*. University Park Press, Baltimore, Maryland, 478-482.
- Thompson, C. & Bembien, M. 1999. Reliability and comparability of the accelerometer as a measure of muscular power. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 31, 897-902.
- Tveit, P. & Pedersen, P.O. 1981. Forces in the take-off in ski jumping. Teoksessa Morecki A ym. (toim.) *Biomechanics VII-B*. University Park Press, Baltimore, Maryland, 472-477
- Vihriälä, E. 2002. Koehenkilöön kiinnitettävä kiihtyvyyksmittalaite liikuntasuoritusten aiheuttamien kiihtyvyyksien mittamista varten. Oulun yliopisto, sähkötekniikan osasto. Diplomityö.
- Virmavirta, M. 1993. The take-off forces in ski jumping. Jyväskylän yliopisto, Liikuntabiologian laitos. Lisensiaatintyö.
- Virmavirta, M & Komi, P. 1989. Takeoff forces in skijumping. *International Journal of Sport Biomechanics* 5: 248-257.
- Virmavirta, M. & Komi, P. V. 2000. Plantar pressures during ski jumping take-off. *Journal of Applied Biomechanics* 16, 320-326.
- Virmavirta, M. 2000. Limiting factors in ski jumping take-off. *Studies in sport, physical education and health* 73. University of Jyväskylä. Väitöskirja.
- Virmavirta, M., Perttunen, J. & Komi, P. V. 2001. EMG activities and plantar pressures during ski jumping take-off on three different sized hills. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 11, 141-147.
- Virmavirta, M., Kivekäs, J & Komi, P. V. 2001. Take-off aerodynamics in ski jumping. *Journal of Biomechanics* 34, 465-470.
- Virmavirta, M. & Komi, P. V. 2001. Ski jumping boots limit effective take-off in ski jumping. *Journal of Sport Sciences* 19, 961-968.
- Virmavirta, M., Isolehto, J., Komi, P., Brüggeman, G., Müller, E. & Schwameder, H. 2005. Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition. *Journal of Biomechanics* 38, 2157-2163.

- Webber, S. & Kriellaars, D. 2004. The effect of stabilization instruction on lumbar acceleration. *Clinical Biomechanics* 19, 777-783.
- Wu, G. 1997. On the accuracy of center of mass acceleration estimation during high-impact movement. *Human Movement Science* 16, 323-336.
- Yogonandan, N., Zhang, J., Pintar, F. & Liu, K. 2006. Lightweight low-profile nine-accelerometer package to obtain head angular accelerations in short-duration impacts. *Journal of Biomechanics* 39, 1347-1354.
- Ziljstra, W. & Bisseling, R. 2004. Estimation of hip abduction moment based on body fixed sensors. *Clinical Biomechanics* 19, 819-827.