

Opinnäytetyö (AMK)

Esittävä taide

Sirkus

2015

Lauri Vanhatalo

# KÄSINSEISONNAN PAINOPISTEANALYYSI

– käytännölliset menetelmät



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Lauri Vanhatalo

## KÄSINSEISONNAN PAINOPISTEANALYYSI

Huippu-urheilussa urheilijoiden ja tiedemiesten yhteistyö on nykypäivää. Lääketieteen, fysiologian ja ravitsemustieteen tuntemuksesta saatavien hyötyjen lisäksi urheilijan tuloksia pyritään parantamaan analysoimalla itse liikuntasuorituksia. Matematiikan ja fysiikan työkaluin on mahdollista seurata ja optimoida urheilijan teknistä suoritusta. Sirkuksen käsinseisontaharjoittelussa suoritustekniikan kehittäminen perustuu pääasiallisesti harjoittelijan tuntemuksiin, omiin ja ulkopuolisten ehdottamiin mielikuviin sekä opettajan visuaalisten havaintojen pohjalta antamiin neuvoihin. Suoritusten mekaniikan ja statiikan yksityiskohtainen käsittely sivuutetaan täysin.

Tässä työssä esitellään käytännöllinen menetelmäkokonaisuus käsinseisontasuoritusten analysoimiseksi: Käsinseisonnassa statiikkaa tutkitaan *painopisteanalyysin* avulla. Koeolosuhteissa videokuvatuista käsinseisontasuorituksista eristetään tietokoneavusteisesti kaksiulotteinen painopistemalli. Mallin visuaalisen esityksen avulla pyritään sekä ymmärtämään että havainnollistamaan suorituksen vaiheita ja osa-alueita sekä käsinseisontan tasapainoon vaikuttavia tekijöitä. Työn teoriaosuudessa luodaan myös lyhyt katsaus käsinseisonnasta tehtyyn akateemiseen tutkimukseen sekä kehonosien inertiaparametrien tutkimusmenetelmiin.

Lopuksi esitetään menetelmän avulla luotuja videoita ja pohditaan työn mahdollista kontribuutiota opetustyössä: Onko menetelmällä mahdollista tutkia harjoitustilanteiden suorituksia – jopa reaaliaikaisesti? Voidaanko käsinseisonnassa tekniikkavirheitä tunnistaa kerätystä liikeaineistosta objektiivisesti ja edes osin automaattisesti? Auttavatko analyysin tulokset käsinseisontaliikkeiden havainnollistamisessa ja harjoitukselle hyödyllisten, fysiikkaan perustuvien mielikuvien ja ajattelumallien luomisessa?

### ASIASANAT:

Tasapaino, käsinseisonta, painopiste, massakeskipiste, konenäkö, kehonosaparametrit

Lauri Vanhatalo

## HAND BALANCING: CENTRE OF GRAVITY ANALYSIS

The co-operation between athletes and scientists is part of competitive sports today. In addition to utilizing knowledge of medicine, physiology and nutrition there is a tendency to optimize the performance of an athlete by analyzing their maneuvers. Mathematics and physics enable one to observe and optimize the technical aspects of the performance of an athlete. Within circus the training aimed at improving one's hand balancing technique is based primarily on the gut feeling of the acrobats, on mental images coined by the acrobats themselves or by others, and on instructions given by the teacher based on their visual observations. The maneuvers are not addressed from the point of view of mechanics and statics.

This thesis introduces a set of practical methods for analyzing hand balancing maneuvers. The statics of hand balancing is studied by means of *centre of gravity analysis*. A computer program is used to extract a two-dimensional model of centre of gravity from videos shot in a test setting. A visualization of the model is used in building a foundation for better understanding the maneuver and its statics as well as to illustrate its components. The literature review gives a brief overview of the academic research on hand balancing as well as on the methodology of measuring body segment inertial parameters.

Finally, a set of videos produced using the described method is presented and their educational potential discussed. Is the method feasible for analyzing maneuvers during hand balancing training – even in real time? Is it possible to detect errors in technique objectively and at least partly automatically? Can the results of the analysis be used in illustrating the hand balancing poses and in discovering beneficial mental images that are based on knowledge of physics.

### KEYWORDS:

Balance, hand balancing, centre of gravity, centre of mass, machine vision, body segment parameters

# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Käsinsenonnan teoria ja aikaisempi tutkimus</b>	<b>7</b>
2.1 Fysiologinen perusta	8
2.2 Mekaniikka, statiikka ja tasapainoehdo	11
2.3 Tasapainostrategiat ja muu käsinsenontatutkimus	15
<b>3 Kehonosien massakeskipisteet ja suhteelliset massat</b>	<b>19</b>
3.1 Ihmiskehon nivelmalli ja kineettinen analyysi	19
3.2 Ruumiiden dissektointiin perustuvat menetelmät	20
3.3 Tilavuuden määrittäminen ja geometrinen mallintaminen	21
3.4 Lääketieteellinen kuvantaminen	22
3.5 Ennustusmenetelmät	22
3.6 Optimointimenetelmät	23
3.7 Osituksen sitominen kehon pisteisiin	23
<b>4 Koeasetelma ja menetelmät</b>	<b>25</b>
4.1 Kuvausolosuhteet ja värimerkkien valinta	25
4.2 Kineesioteippimerkkien asettaminen	31
4.3 Pisteiden seuraaminen	47
4.4 Massakeskipisteen laskeminen	52
<b>5 Tulokset</b>	<b>56</b>
5.1 Menetelmän käyttökelpoisuus	56
5.2 Massakeskipiste ja sen pystysuora projektio	61
5.3 Yhden käden harjoitteet	64
5.4 Hyppy, hidastusvideo ja liikeinterpolaatio	68
5.5 Päälläseisonnasta käsinsenontaan	70
<b>6 Johtopäätökset</b>	<b>73</b>
<b>Lähteet</b>	<b>75</b>
<b>A Videoiden katselu ja lokaali lukupaketti</b>	<b>81</b>
<b>B Piilossa olevien pisteiden seuraaminen</b>	<b>82</b>

## Kuvat

1	Käsinseisojan vapaakappalekuva	13
2	Massakeskipiste osamassojen summana	15
3	Kuvausasetelma: kameran ja valonheittimien sijainnit	26
4	Värimerkkin ja kuvausolosuhteiden asteittainen kehitys 1	29
5	Värimerkkin ja kuvausolosuhteiden asteittainen kehitys 2	30
6	Pistemäisten merkkien ongelmat	32
7	Oikean käden rannemerkin sijainnin määrittäminen	34
8	Oikean käden ranne- ja käsimerkin tekeminen	35
9	Käden massakeskipisteen määrittäminen	36
10	Kyynärpäämerkin tekeminen	37
11	Olkalisäkkeen sijainnin määrittäminen	38
12	Olkalisäkkeen ja olkanivelen merkitseminen	39
13	Olkannivelen sijainnin ja olkavarren massakeskipisteen määrittäminen	40
14	Yläraajan teippimerkit	41
15	Yläruumiin referenssipisteiden sijaintien määrittäminen	42
16	Lantiomerkkien sijainnit	43
17	Polvimerkin sijainnin määrittäminen ja merkitseminen	44
18	Nilkka- ja jalkaterämerkin tekeminen	45
19	Kehon etupuolen merkit	46
20	HSV-väriavaruuden komponentit	48
21	Videokuvan prosessointi: kynnystys ja morfologinen sulkeminen	49
22	Virhetilanteiden tunnistaminen pisteiden seurannassa	51
23	Kehonosien suhteelliset massat ja massakeskipisteiden sijainnit	53
24	Polvi- ja olkapäämerkin yhteen sulautuminen	59
25	Käsimerkin näkyvyys käden irroituksessa alustasta	60
26	Päälläseisonnasta käsinseisontaan, kuvaaja	71
27	Piilossa olevien merkkien seuraaminen	82
28	Pisteen $P_3$ sijainti pisteiden $P_1$ ja $P_2$ suhteen	83

## Videot

1	Normaalin ja yksinkertaistetun mallin massakeskipisteet 1	55
2	Normaalin ja yksinkertaistetun mallin massakeskipisteet 2	55
3	Videoilla käytettyjen merkintöjen selitykset	62
4	Taittopressi ja mexican-käsinseisonta	63
5	Painonsiirrot split-asennossa	64
6	Painonsiirrot sormille split-asennossa	65
7	Painonsiirrot sormille pienessä split-asennossa	65
8	Painonsiirrot sormille klassisessa asennossa	66
9	Yhden käden käsinseisonta käsinseisontatapeilla	66
10	Yhden käden käsinseisonta kylkitaitossa käsinseisontatapeilla	67
11	Yhden käden käsinseisonta käsinseisontatapeilla, normaali ja kylkitaitto	67
12	Taaksepäin hyppy, yksinkertainen hidastus	69
13	Taaksepäin hyppy, liikeinterpolaatiohidastus	69
14	Päälläseisonnasta käsinseisontaan (hidastettuna 0.2x-nopeuteen)	72
15	Esimerkkivideo, ohjeistus	81
16	Piilossa olevien pisteiden seuraaminen, matematiikan havainnollistus	88
17	Piilossa olevien pisteiden seuraaminen, soveltaminen käytäntöön	89

# 1 Johdanto

Käsinseisonta on osa monen voimisteluun pohjautuvan urheilulajin harjoitus- ja kilpailurutiineja[1, s. 27][2, 3]. Voimistelulajien lisäksi käsinseisontaan pohjautuvia liikkeitä voi nähdä esimerkiksi cheerleadingissä, joogassa ja tanssin joissain alalajeissa kuten breakdancessa. Sirkuksessa käsinseisonta on oma itsenäinen lajimuotonsa, jolla on selkeitä yhteneväisyyksiä muiden lajien kuten akrobatian ja tasapainolajien kanssa – mutta joka ei kuitenkaan ole muille lajeille alisteinen[4, 5]. Erilaisten yhden tai kahden käden varassa suoritettujen tasapainoliikkeiden kirjo ja variaatioiden määrä on muihin käsillään seisomista sisältäviin lajeihin verrattuna huomattavasti suurempi.

Käsinseisontaa on kuitenkin tieteellisesti tutkittu huomattavasti vähemmän kuin voimistelua.<sup>1</sup> Käsinseisonnasta tehty tutkimus ottaa usein lähtökohdaksi voimistelun tai erityisesti telinevoimistelun. Tutkimusten koehenkilöt ovat monesti voimistelijoina, ja tutkimuksissa tarkastellut käsinseisonta-asennot ja -liikkeet kuuluvat perinteisiin telinevoimistelun rutiineihin. Lisäksi käsinseisontaa on käytetty hyödyksi tasapainotutkimuksissa, joiden koeasetelma vaatii tasapainoilua ihmiselle epäluonnollisessa asennossa. Asennoksi on usein valittu ns. *klassinen käsinseisonta-asento*, jossa seistään jalat yhdessä vartalo pystysuorassa linjassa.

Erityisesti käsinseisontaan keskittyneissä tutkimuksissa on selvitetty muun muassa tasapainostrategioita. Videokuvan ja voimalevyanturista saatavan datan avulla on tutkittu, mitä niveliä ja lihasryhmiä kontrolloimalla koehenkilöt pyrkivät säilyttämään tasapainon käsinseisonnassa? Tasapainostrategiatutkimuksen lisäksi on selvitetty tasapainon ylläpitämiseen osallistuvien fysiologisten järjestelmien suhteellista merkitystä: Kuinka paljon tasapainoon vaikuttaa vestibulaarinen järjestelmä, proprioseptiikka ja näköaisti? Lisäksi on tutkittu voimaharjoittelun tulosten osuutta tasapainon ylläpitämisessä: Edesauttaako suurempi lihasvoima tasapainon säilyttämisessä vai ei – vai onko syy-seuraussuhde päinvastainen?

---

<sup>1</sup> Osviittaa antaa Google Scholarin suurpiirteiset hakutulospäämäärät eri hakusanoille: “handstand” → 8040 vs. “gymnastics” → 115000; “handstand biomechanics” → 724 vs. “gymnastics biomechanics” → 7950.

Käsinseisontatutkimus on keskittynyt käytännössä täysin klassisen käsinseisonta-asennon havainnointiin. Osaltaan tämä johtuneet tutkimusten päämääristä, joita varten ei ole tarvittu muita, monimutkaisempia asentoja. Lisäksi klassisessa asennossa tutkimus- ja mittausasetelmaa voidaan oleellisesti yksinkertaistaa: Kehon symmetrian vuoksi liikettä voidaan tarkastella kahdessa ulottuvuudessa sagittaalitasossa. Kehonosien liikkeen seuraaminen ja täten kehon dynaamisen mallin konstruointi on huomattavasti helpompaa kuin kolmiulotteisessa koeasetelmassa. Tällöin tutkimuksen tulokset jäävät kuitenkin liian suppeiksi sirkuskäsinseisonnalle, jossa klassisen käsinseisonta-asennon hallitseminen on vaativuudestaan huolimatta vain lähtökohta lukuisten muiden asentojen ja liikkeiden harjoittelulle. Lisäksi tutkimusten tuloksia käsinseisannon statiikasta ja strategioista ei ole kytketty takaisin opetukseen. Teoreettista tietämystä ei muunneta ohjeiksi ja mielikuviksi käsinseisojille.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin käsinseisannon statiikkaa pelkistetyn *massakeskipisteanalyysin*<sup>2</sup> avulla. Työ esittelee akateemisissa tutkimuksissa yleisesti käytettyihin metodeihin verrattuna yksinkertaistetun ja sovelletun menetelmän: Koehenkilön kehonosien kaksiulotteiset sijainnit tallennettiin seuraamalla vartaloon kiinnitettyjä merkkejä videokuvasta. Videokuvasta poimittujen sijaintien ja kehonosien arvioitujen massakeskipisteiden pohjalta laskettiin estimaatti koko kehon massakeskipisteelle.

Lopulta massakeskipiste ja muita oleellisia tietoja kehon konfiguraatiosta liitettiin graafisesti yhteen alkuperäisen videokuvan kanssa.<sup>3</sup> Koeasetelman käyttökelpoisuutta ja rajoitteita testattiin erilaisten käsinseisontaliikkeiden tutkimisessa. Tarkan mekaanisen mallin konstruoinnin sijasta keskityttiin arvioimaan painopisteanalyysin käyttökelpoisuutta suoritusten lajinomaisessa arvioinnissa, havainnollistamisessa sekä käsinseisojan kehitykselle hyödyllisten mielikuvien luomisessa.

---

<sup>2</sup> *Massakeskipistettä* ja *painopistettä* käytetään tekstissä synonyymeinä.

<sup>3</sup> Ohjeet työssä kuvattujen videoiden katseluun on liitteessä A

Analyysissä hyödynnettiin aiempien tutkimusten tuloksia kehonosien massakeskipisteiden ja suhteellisten massojen määrittämisessä. Näitä ns. *kehonosaparametreja* on tutkittu laajasti erilaisin menetelmin. Työn kirjallisuusosiossa katsastetaan menetelmien kirjoja ja kehitystä, sekä kehonosaparametreista kerätyn tiedon käyttökohteita.

Työn ensisijaisena tavoitteena oli käsinseisannon analysointiin soveltuvan, käytännöllisen ja edullisen *menetelmän kehittäminen*. Akateemisissa tutkimuksissa voidaan mittausdatan analysointiin käyttää runsaasti aikaa ja manuaalista työtä, mikä ei opetustilanteessa ole mahdollista. Menetelmäosuus pyrkii kuvaamaan yksinkertaisen ja suoraviivaisen tavan käsinseisontasuoritusten tallentamiseen, puoliautomaattiseen analysointiin ja sitä kautta hyödyntämiseen suorituksen arvioimisessa.

Toissijaisesti *pohditaan* menetelmän ja sen tuottaman aineiston laatua, sekä hyödyllisyyttä ja käyttökelpoisuutta käsinseisannon tutkimuksen ja opetuksen apuna. Hyödyllisyyden ja käyttökelpoisuuden käsitteet on tarkoituksellisesti eriytetty. Menetelmän käyttökelpoisuuden arvioinnissa on huomioitava tuotto-panossuhde: onko saatava hyöty tarpeeksi suuri analyysin työmäärä huomioiden? Hyödyllisyyttä tarkasteltaessa on luonteva vertailukohta pelkän videonauhoituksen käyttäminen.

## 2 Käsinseisannon teoria ja aikaisempi tutkimus

Käsinseisonta on ihmiselle epäluonnollinen asento, jonka ominaispiirteitä ovat kuitenkin selvittäneet useat tutkijat. Jaloilla seisomiseen verrattuna asento on huomattavan epästabiiili, mikä on seurausta suhteellisen korkeasta painopisteestä ja tukipinnan pienuudesta: erityisesti sagittaalitasossa kämmenien rajaama alue on pienempi kuin jalkaterien rajaama. Näin ollen pienikin horjahdus siirtää painopisteen pois tukipinnan päältä. Tasapainon ylläpitoon osallistuva vestibulaarijärjestelmä on ylösalaisin ja lähempänä maata, missä kehon heilahdukset ovat pienempiä kuin jaloilla seistessä.[3] Asento on erittäin vaativa yläraajoille, joiden täytyy kannatella koko kehon paino[6]. Lisäksi asennon säilyttämiseen tähtäävät korjausliikkeet tapahtuvat jaloilla seisomisen kolmen nivelen sijaan neljän nivelen alueella: ranteet, kyynärnivelet, olkanivelet, lantio[7].



## 2.1 Fysiologinen perusta

Hedbávný et al. tiivistää käsinseisannon fysiologisena prosessina kolmeen vaiheeseen: tasapainotilanteen ja -muutosten havaitsemiseen, aistisignaalien käsittelemiseen keskushermostossa, ja lihasaktivaation tuottamiseen korjausliikkeiden aikaansaamiseksi. Staattinenkin tasapaino on pohjimmiltaan näiden kolmen vaiheen *yhtäaikainen jatkuva prosessi*, jossa korjausliikkeet seuraavat toisiaan.[3]

Ensimmäisessä vaiheessa ihmisen aistijärjestelmät tuottavat hermoimpulssien muodossa tietoa kulloisestakin tasapainotilanteesta. Tasapainon säilyttämisen kannalta olennaista tietoa ihmisessä tuottavat vestibulaarijärjestelmä, propioseptiikan mahdollistavat proprio-reseptorit sekä näköaisti. Lisäksi apua voi olla tuntoaistin kautta saaduista ärsykkeistä[8, 9].

Sisäkorvan vestibulaarijärjestelmä edesauttaa tasapainon ylläpitämisessä tuottamalla tietoa pään asennosta ja liikkeistä. Käsinseisonnassa epäluonnollisen pään asennon on kuitenkin oletettu heikentävän vestibulaarijärjestelmän toimintaa[10].

Proprioseptiikka perustuu ihon, lihasten ja sidekudoksen proprioreseptoreihin, jotka reagoivat paineen, asennon ja venytyksen muutoksiin[11, s. 1920]. Proprioseptiikka kykenee tuottamaan tietoa kehonosien asennoista suhteessa toisiinsa ja täten osaltaan mahdollistaa lihasten hienomotorisia toimintoja. Hienomotoristen liikkeiden harjoittelun on todettu lisäävän proprioseptiikan tarkkuutta[12, 13].

Näköaistin avulla ihminen pystyy arvioimaan omaa sijaintiaan ja liikettään suhteessa ympäristöön, joka normaalisti pysyy paikoillaan. Toisin kuin vestibulaarijärjestelmän ja propioseptisen järjestelmän kontribuutiota, näköaistin merkitystä tasapainolle on mahdollista tutkia suhteellisen suoraviivaisilla koeasetelmilla: näköaistiin pystytään vaikuttamaan silmiä sulkemalla, valaistusta säätämällä tai peittämällä osa näkökentästä. Vestibulaarijärjestelmän ja propioseptisten ärsykkeiden manipulointiin on käytettävä ulkoisesti luotuja sähköisiä ja mekaanisia häiriöitä[14, 15, 16]. Näköaistin merkitystä tasapainolle onkin selvitetty useissa tutkimuksissa. On selvää, että näköärsykkeiden poistaminen vaikeuttaa tasapainon ylläpitämistä, jolloin korjausliikkeet ja huojunta suurenevät[8, 10, 17, 18, 19].

Clément ja Rezette huomasivat, että tutkimuksen koehenkilöinä toimineet viisi akrobaattia kiinnittivät käsinseisonnassa katseensa pisteeseen, joka oli noin 5 cm ranteiden etupuolella käsien välissä[8]. Myöhemmässä tutkimuksessa Clément et al. tutki kiintopisteen valinnan merkitystä tasapainolle muuttamalla pisteen sijaintia kahdella eri tavalla: pyytämällä koehenkilöitä kohdentamaan katseensa eri kohtaan sekä siirtämällä kiintopistettä koehenkilöiden käyttämällä kiilaprismoilla (engl. *wedge prism*). Kiintopisteen merkityksen vahvistamisen lisäksi Clément et al. päätteli, että käsinseisijat assosioivat katseensa kiintopisteen massakeskipisteensä pystysuoran projektion kanssa.[20]

Gautier et al. pyrki selvittämään, mikä on keskeis- ja ääreisnäön suhteellinen merkitys tasapainon ylläpitämisessä. Kokeessa tutkittiin käsinseisontaa silmät auki, silmät kiinni, keskeisnäkö eliminoituna ja ääreisnäkö eliminoituna. Keskeisnäkö eliminoituna näköärsykkeet muodostuivat pelkästään näkökentän laidoilta tulevista vihjeistä, toisin sanoen käsivarsien liikkeistä suhteessa ympäristöön. Katseen suuntaaminen kiintopisteeseen ei ollut mahdollista. Ääreisnäkö eliminoituna vain kiintopisteeseen katsominen oli mahdollista; näkökentän laidat olivat pimennossa. Tulosten mukaan käsinseisonta silmät auki oli stabiileinta ja silmät kiinni epästabiileinta. Keskeis- tai ääreisnäön eliminointi lisäsi tasapainon huojuntaa, mutta ei yhtä paljon kuin silmien sulkeminen kokonaan. Lisäksi tulokset osoittivat, että keskeis- ja ääreisnäön tuottamalla tasapainon ylläpitoa edistävillä ärsykkeillä oli päällekkäisyyttä. Tämä oli odotettua, koska keskeis- ja ääreisnäkö eivät ole kaksi erillistä järjestelmää.[21]

Asseman ja Gahéry tutkivat näköaistin ja pään asennon merkitystä käsinseisonnassa vakaudelle[10]. Koeasetelmassa tutkittavat henkilöt seisoivat käsillään silmät auki ja ja silmät kiinni neljässä eri asennossa: pää normaalissa asennossa (lievä dorsifleksio), pää maksimaalisessa dorsifleksiossa, pää suorassa linjassa ylävartalon kanssa sekä pää maksimaalisessa ventroflexiossa. Hieman yllättäen silmien sulkeminen ei tehnyt käsinseisonnasta merkittävästi huojuvampaa, mutta vaikeutti silti tehtävää: käsinseisontasuoritukset olivat silmät kiinni huomattavasti lyhyempiä kuin silmät auki. Haastavinta oli tasapainoilla pää maksimaalisessa ventroflexiossa; seuraavaksi haastavinta pää linjassa ylävartalon kanssa, pää maksimaalisessa dorsifleksiossa ja helpointa pää normaalissa asennossa. Vertailtaessa eri asentoja silmät auki ja silmät kiinni tutkijat päättelivät, että pään asennon merkitys tasa-

painolle ei johdu pelkästään näköaistikonfiguraation muutoksista. Muussa tapauksessa silmät kiinni seistessä pään asennolla ei olisi merkitystä tasapainokyvylle. Myös Clément ja Rézette huomasivat, että käsinseisonta oli stabiileinta, kun pää oli dorsifleksiossa[8].

Tasapainoon vaikuttavien aistien tärkeysjärjestyksestä ei ole tutkijoiden keskuudessa yksimielisyyttä. Ylipäätään kysymyksen määrittely on erittäin monisyinen ongelma. Tutkittavia konfiguraatioita, asentoja ja olosuhteita, on teoriassa rajattomasti.

Toisessa vaiheessa aistijärjestelmien tuottama informaatio käsitellään keskushermostossa. Keskushermoston lähettämät hermosignaalit aktivoivat lihasryhmiä, joiden tuottama voima liikuttaa tai stabiloi kehonosia.

Yeadon and Trewartha ovat koonneet tietoa viiveistä, joilla lihakset reagoivat tasapainossa tapahtuviin muutoksiin[22]. Lihasten omasta kimmoisuudesta johtuvat mekanismit ovat lähes välittömiä. Tämän jälkeen aktivoituvat lihaksen venymisestä johtuva venymisrefleksi (engl. *myotatic reflex*), tooninen (tahdosta riippumaton) refleksi (engl. *tonic reflex*) ja pitkän viiveen refleksi (engl. *long latency reflex*). Vasta näiden jälkeen aktivoituvat visuaalisiin ja vestibulaariärsykkeisiin pohjautuvat hermosignaalit lihaksille. Keskushermoston viiveiden lisäksi aikaa kuluu ennen kuin lihasvoima saavuttaa tavoitetasonsa.

Lihassoiman yhteyttä tasapainokykyyn on tutkittu laajasti. Siitä huolimatta on epäselvää, onko lihasvoiman ja tasapainokyvyn välillä yhteyttä, ja jos on, mikä on syy-seuraussuhde. Useat tutkimukset päätyvät tulokseen, jonka mukaan voimaharjoittelu parantaa tasapainoa. Toisten tutkimusten mukaan kausaaliteetti on päinvastainen: tasapainoharjoittelu lisää lihasvoimaa. Osassa tutkimuksia ei löydetty yhteyttä kumpaankaan suuntaan.[3] Käsinseisontakyvyn ja lihasvoiman yhteyden tutkiminen lieneekin ongelmallista, koska käsinseisontan harjoittelu kehittää sekä tasapainoa että lihasvoimaa. Täten jos tutkimuksen koehenkilöryhmässä on eri tasoisia käsinseisojia, lienee korrelaatio odotettua, mutta varsinainen selittävä muuttuja on käsinseisontan harjoittelun määrä.

## 2.2 Mekaniikka, statiikka ja tasapainoehto

Käsinseisannon fysikaalisten periaatteiden ymmärrys pohjautuu fysiikan kahteen haaraan, *mekaniikkaan* ja *statiikkaan*. Mekaniikka on fysiikan haara, joka tutkii kappaleiden liiketilaa niihin vaikuttavien voimien alaisena. Kappaleella voidaan sen sisäisen rakenteen perusteella tarkoittaa *jäykkää kappaletta*, *pehmeää kappaletta* tai *fluidia*<sup>4</sup>. Jäykällä kappaleella tarkoitetaan objektia, jonka rakenneosat eivät liiku suhteessa toisiinsa edes rasituksessa: kappale säilyttää muotonsa, vaikka siihen kohdistuisi ulkoisia voimia. Jos muodon muutokset ovat pieniä, voidaan analyysissä usein käyttää *jäykän kappaleen mekaniikan* lainalaisuuksia. Jäykän kappaleen mekaniikka voidaan edelleen jakaa *statiikkaan* ja *dynamiikkaan*. Statiikka käsittelee levossa tai tasaisessa liikkeessä olevia kappaleita; dynamiikassa tarkasteltavien kohteiden liiketila voi muuttua.[24, s. 3–5]

Ihmiskehoa ei voida pitää jäykkänä kappaleena: nivelten välityksellä toisiinsa kiinnittyvät raajat muodostavat rakenteen, jonka osat selvästi liikkuvat suhteessa toisiinsa. Käsillään seisovaa henkilöä ei myöskään voida pitää tarkkaan ottaen levossa (paikallaan) pysyvänä: tasapainon hakeminen on jatkuva prosessi, jossa tahattomat horjahdukset ja tietoiset korjausliikkeet seuraavat toisiaan. Käsinseisontaa voidaan kuitenkin tiettyjen yksinkertaistusten valossa tarkastella jäykän kappaleen statiikan keinoin. Lyhyen hetken (lähes) paikallaan olevaa käsinseisojaa pidetään staattisessa tilassa olevana, jolloin tilannetta voidaan mallintaa statiikan *tasapainoehdon* mukaisesti.[3]

Yhtälöiden 1 ja 2 kuvaaman *tasapainoehdon mukaan* kappale on tasapainossa, jos sekä siihen vaikuttavien ulkoisten *voimien summa* että *momenttien summa* on nolla:

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\sum \mathbf{M} = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \dots + \mathbf{M}_n = \mathbf{0} \quad (2)$$

<sup>4</sup> Aine, jonka rakenneosat liikkuvat vapaasti suhteessa toisiinsa: esimerkiksi nesteet ja kaasut[23, s. 1].

Yhtälö 1 on seuraus Newtonin 2. laista

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{a} = \frac{\sum \mathbf{F}}{m} \quad (3)$$

jonka mukaan kappaleen kiihtyvyys  $\mathbf{a}$  on suoraan verrannollinen siihen vaikuttavaan kokonaisvoimaan  $\sum \mathbf{F}$  ja kääntäen verrannollinen sen massaan  $m$ . Kokonaisvoiman ollessa nolla myös kiihtyvyys on nolla eikä kappaleen liiketila muutu. Samoin kappaleen, jonka hitausmomentti on  $J$ , kulmakiihtyvyys  $\alpha$  on nolla, jos kappaleeseen vaikuttava kokonaismomentti  $\sum \mathbf{M}$  on nolla[25, s. 179]:

$$\sum \mathbf{M} = J\alpha \quad \Leftrightarrow \quad \alpha = \frac{\sum \mathbf{M}}{J} \quad (4)$$

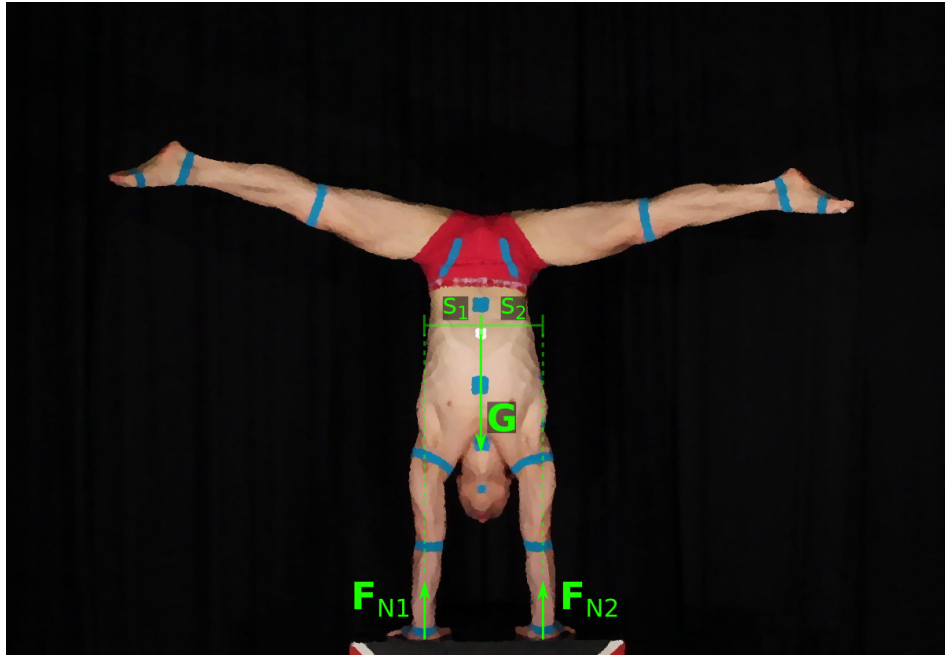
Tarkasteltaessa tasapainoehtojen toteutumista on tutkittavasta kappaleesta tehtävä *vapaakappalekuva*, johon piirretään kappale ja siihen vaikuttavat voimat. Käsinsensojan tapauksessa vapaakappalekuva on yksinkertainen: käsinsensojaan vaikuttaa vain *painovoima* sekä alustan käsiin kohdistamat *tukivoimat* (kuva 1).

Kuvien staattisissa tasapainotiloissa yllä esitetty tasapainoehto on voimassa. Tukivoimien summa on yhtä suuri kuin painovoima, mutta vastakkaisuuntainen:

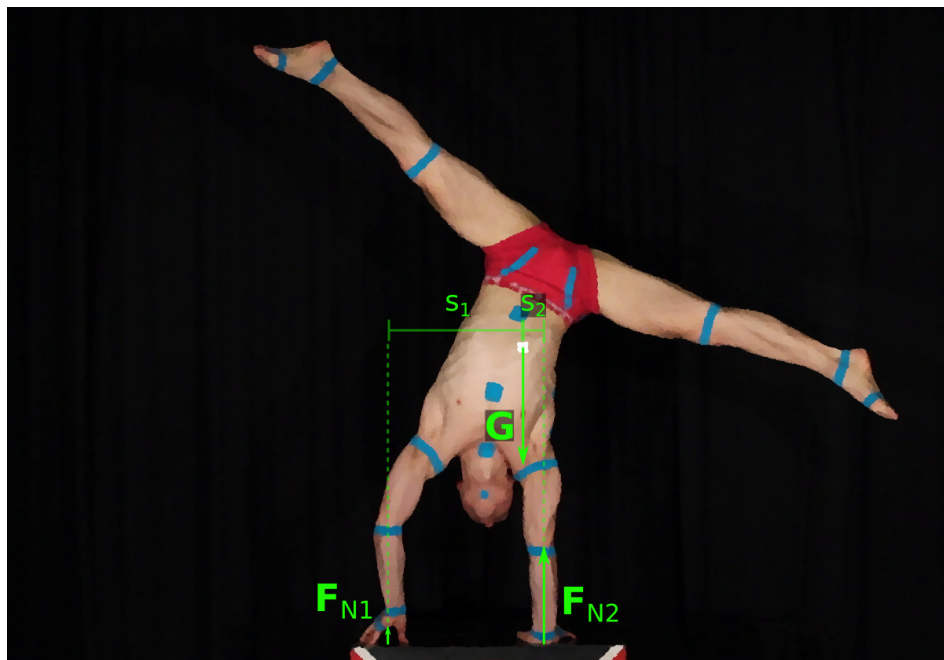
$$\sum F = \mathbf{G} + \mathbf{F}_{N1} + \mathbf{G}_{N2} = \mathbf{0}$$

Voiman momentti  $\mathbf{M}$  lasketaan tulona, jonka tekijät ovat vaikuttava voima  $\mathbf{F}$  ja vaikuttavan voiman kohtisuora etäisyys valitusta pyörimisakselista  $s$ :

$$\mathbf{M} = s \times \mathbf{F}$$



1.1. Käsineisoja symmetrisessä *split*-asennossa. Tukivoimat ovat likimain yhtä suuret.



1.2. Käsineisojan paino kallistettuna oikealle. Tukivoima  $\mathbf{F}_{N2}$  on suurempi kuin tukivoima  $\mathbf{F}_{N1}$ , mutta niiden aiheuttamat momentit ovat yhtä suuret, koska etäisyys  $s_1$  on vastaavasti suurempi kuin  $s_2$ .

Kuva 1: Käsineisojan vapaakappalekuva. Käsineisojaan vaikuttaa painovoima  $\mathbf{G}$  sekä alustan käsineisojaan kohdistamat tukivoimat  $\mathbf{F}_{N1}$  ja  $\mathbf{F}_{N2}$ . Painovoima kohdistuu laskennallisesti pyörimisakseliksi valittuun käsineisojan massakeskipisteeseen; tukivoimien kohdistuorat etäisyydet pyörimisakselista ovat  $s_1$  ja  $s_2$ . Painovoiman vaikutuspisteen etäisyyttä pyörimisakseliin  $s_G$  ei ole merkitty, koska se on nolla.

Pyörimisakseliksi on luonnollista valita kappaleen massakeskipiste, jolloin painovoiman momentti on nolla. Tällöin kokonaismomentti saadaan seuraavasti:

$$\begin{aligned}\sum \mathbf{M} &= s_G \times \mathbf{G} + s_1 \times \mathbf{F}_{N1} + s_2 \times \mathbf{F}_{N2} \\ &= 0 \times \mathbf{G} + s_1 \times \mathbf{F}_{N1} + s_2 \times \mathbf{F}_{N2} \\ &= s_1 \times \mathbf{F}_{N1} + s_2 \times \mathbf{F}_{N2}\end{aligned}$$

Valitsemalla positiiviseksi pyörimissuunnaksi myötäpäivä saadaan skalaarimuodossa

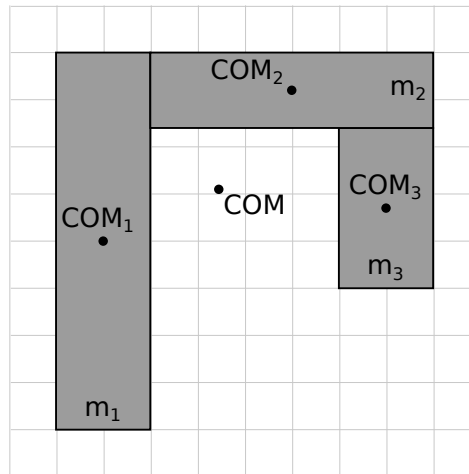
$$\begin{aligned}0 &= s_1 \times F_{N1} - s_2 \times F_{N2} \\ s_1 \times F_{N1} &= s_2 \times F_{N2} \\ \frac{s_1}{s_2} &= \frac{F_{N2}}{F_{N1}}\end{aligned}$$

Voimien vaikutuspisteiden etäisyydet pyörimisakselista ovat kääntäen verrannolliset voimien suuruuteen. Kuvassa 1.1 tukivoimat ovat yhtä suuret, mutta kuvassa 1.2 oikean käden tukivoiman  $\mathbf{F}_{N2}$  on oltava vasemman käden tukivoimaa  $\mathbf{F}_{N1}$  suurempi.

Kehoon kohdistuva painovoima voidaan ajatella summana voimista, jotka kohdistuvat jokaiseen kehon hiukkaseen. Tämän summavoiman voidaan ajatella kohdistuvan jäykän kappaleen *painopisteeseen*, joka on Maan tasaisessa painovoimakentässä sama kuin kappaleen *massakeskipiste*.

Ei ole kuitenkaan mahdollista – tai ainakaan käytännöllistä – laskea yhteen kehon jokaisen hiukkasen painoa. Kappaleen massakeskipiste (ja täten painopiste) on määritettävissä käyttäen samankaltaista periaatetta, jonka mukaan massakeskipiste on laskettavissa kappaleen osien massakeskipisteiden painotettuna vektorisummana [24, s. 470][26, s. 88]. Periaatetta on havainnollistettu kuvassa 2.

Osamassojen selvittämiseksi on määriteltävä *kehon ositus*: mistä alkaa ja mihin päättyy esimerkiksi kämmen, kyynärvarsi tai olkavarsi? Lisäksi on tunnettava kehon osien fysikaaliset parametrit, niin sanotut *kehonosaparametrit*: massakeskipisteet, suhteelliset massat ja hitausmomentit eri akselien suhteen. Kuinka paljon kyynärvarsi painaa suhteessa henkilön koko painoon? Missä pisteessä ranne- ja kyynärnivelen välillä on kyynärvarren painopiste? Mikä on kyynärvarren hitausmomentti eri akselien suhteen? Kehonosaparametrien selvittämiseksi tehtyä tutkimusta on käsitelty kappaleessa 3 sivulla 19.



Kuva 2: Kolmesta osasta koostuvan kappaleen massakeskipiste  $COM$  voidaan laskea sen massaltaan  $m_i$  painoisten osien massakeskipisteiden  $COM_i$  painotettuna summana:

$$COM = \frac{\sum m_i COM_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 COM_1 + m_2 COM_2 + m_3 COM_3}{m_1 + m_2 + m_3}$$

### 2.3 Tasapainostrategiat ja muu käsinseisontatutkimus

Statiikan näkökulmasta käsinseisannon luonteenomaiset piirteet perustuvat aikaisemmin kuvattuun tasapainoehtoon: kappale on tasapainossa, jos sekä siihen vaikuttavien ulkoisten *voimien summa* että *momenttien summa* on nolla. Täyttääkseen tasapainoehdon käsinseisojan on pystyttävä vastustamaan painovoiman vaikutusta ja pitämään massakeskipisteensä kämmenien rajaaman tukipinnan yläpuolella. Klassisessa käsinseisonta-asennossa oleellista on kehon horisontaalisten liikkeiden kontrolloiminen; vertikaalisesti vaikuttavan painovoiman



vastustamiseen riittää kyky kannatella omaa painoaan käsien varassa. Lisäksi huomionarvoisempaa on kontrolli sagittaali- kuin frontaalitasossa: horjahdukset tapahtuvat normaalisti selän tai vatsan puolelle; virheliikkeet kylkien suuntaan ovat pienemmät[10, 21, 27].

Käsinseisannon statiikkaa ja biomekaniikkaa on tutkittu analogisesti jaloilla seisomisen kanssa. Nashnerin, McCollumin ja Horakin tutkimukset ihmiskehon liikkeistä tasapainon säilyttämiseksi jaloilla seisten loivat *nilkka-* ja *lantiostrategioiden* käsitteet[7, 28]. Strategiat kuvasivat tyypilliset toimintamallit eri nivelille ja niveliin vaikuttaville lihaksille, kun koehenkilöt korjasivat tasapainoaan ulkoisen häiriön seurauksena. Jaloilla seistessä varpaiden suuntaan kaatumista estetään nilkkastrategialla. Suuremman horjahduksen korjaamiseen käytetään lantiostrategiaa. Lukuisat myöhemmät kehon asentoa ja tasapainoa kartoittaneet tutkimukset ovat hyödyntäneet tasapainostrategioiden käsitteitä ja taustalla olevia periaatteita[29, 30, 31].

Samankaltaiset käsitteet ja periaatteet on omaksuttu käsinseisannon tutkimuksessa[3, 21, 22]. Kummassakin tapauksessa mittaukset on mahdollista toteuttaa samoilla menetelmillä: koehenkilön tukipintaan (lattiaan) kohdistamia voimia mitataan voimalevyanturilla, ja koehenkilön liikkeitä havainnoidaan käyttäen kehoon kiinnitettyjä merkkejä sekä yhtä tai useampaa videokameraa. Joissain tutkimuksissa on lisäksi käytetty lihasaktivaatiota mittaavia EMG-menetelmiä[8].

Klassista käsinseisonta-asentoa verrataan usein pystysuoraan seisoma-asentoon. Käsinseisonnassa aktiivisia ranne-, kyynär- ja olkaniveleitä vastaa seisoma-asennossa nilkka-, polvi- ja lantionivelet. Useat tutkijat ovat selvittäneet, voidaanko tasapainoilu käsinseisonnassa pelkistää samalla tavalla tasapainostrategioiksi kuin jaloillaan seisomisen tapauksessa.

Slobounov ja Newell tutkivat voimistelijoiden ja uimahyppääjien käsinseisontasuorituksia[6]. He havaitsivat, että suurimmat tasapainon korjausliikkeet ilmenivät jalkojen etutakasuuntaisena oskillaationa; pään ja ylävartalon liikkeet olivat pienemmät. Havaintojen pohjalta pääteltiin, että tasapainon ylläpitämiseksi koehenkilöt liikuttivat alaraajojaan nilkkanivelestä pitääkseen kehon painopisteen tukipinnan yläpuolelle. Lisäksi kyynärnivelen liikkeet nähtiin oleellisena tasapainon säilyttämisen kannalta.

Kerwin ja Trewartha asettivat tavoitteekseen tutkia, mikä on ranne-, olka- ja lantionivelen suhteellinen vaikutus käsinseisannon tasapainon ylläpitämiselle[32]. Artikkelissaan he kyseenalaistavat Slobounovin ja Newellin johtopäätöksen jalkojen liikkeiden merkityksestä: Havaitut jalkojen oskillaatiot ovat alun perin lähtöisin alemmaa. Käsien ja torson pienet korjausliikkeet propagoituvat ylemmäksi kohti jalkoja samalla kun liikkeiden laajuus kasvaa. Teoriaa tukee myös jalkaterien hyvin pieni suhteellinen osuus koko kehon massasta.

Kerwin ja Trewartha konstruoivat mallin, jossa keho oli jaettu neljään osaan, jotka nivELYvät toisiinsa ranne-, olkapää- ja lantionivelen välityksellä. Käsinseisontasuorituksen aikana nivelten sijainteja seurattiin kahdella videokameralla, minkä lisäksi voimalevyanturi mittasi koehenkilön alustaan kohdistamaa voimaa. Koehenkilön inertiaparametrit laskettiin antropometrisistä<sup>5</sup> suureista hyväksikäyttäen Yeadonin kehittämää mallia[34]. Käänteisen dynamiikan analyysillä selvitettiin tutkittujen nivelten yli vaikuttavat vääntömomentit. Suurin vääntömomentti syntyi rannenivelessä, jonka merkitys tasapainolle oli suurin; pienin vääntömomentti oli lantionivelessä.

Kaksi vuotta myöhemmin Yeadon ja Trewartha käyttivät samanlaista koeasetelmaa käsinseisannon tasapainostrategioiden tarkastelemiseksi[22]. Tulokset vahvistivat aikaisemman hypoteesin: koehenkilöt käyttivät rannestrategiaa, jossa painopisteen kontrolloimiseen käytettiin pääasiallisesti ranteen vääntömomenttia, jonka kanssa synergisesti vaikuttivat olkapäiden ja lantion vääntömomentit. Tutkimus otti myös kantaa Slobounovin ja Newellin esittämään teoriaan kyynärnivelen roolista. Yeadon ja Trewartha päättelivät, että kyynärnivelen koukistuksella pyrittiin korjaamaan tasapaino tapauksessa, jossa rannestrategia oli jo osoittautunut riittämättömäksi. Samaan tulokseen tuli Gautier et al. päätellessään kyynärpäiden koukistuksen olevan keino, jolla kehon painopistettä voidaan nopeasti alentaa äärimmäisestä horjahduksesta selviämiseksi[21].

Voimistelun biomekaniikkaa käsittelevässä kirjassaan George esittää kaksi voimistelijoiden käyttämää käsinseisannon tasapainotekniikkaa[35]. Vastapainotekniikassa (engl. *counterbalancing*) käytetään laajasti ranne-, olka- ja lantioniveliä suurten epätasapainotilanteiden korjaamiseen. Tekniikka hylkää suoran vartalolinjan tavoittelun tilanteissa, joissa tukipinnan

<sup>5</sup> Antropometria: tieteenala joka tutkii ihmisen mittasuhteita ja mittaamista[26, s. 82][33].

pinta-ala on erityisen pieni kuten rekkatangolla ja renkailla. Suoran vartalolinjan säilyttävästä tekniikasta George käytti nimitystä (suoralla) viivalla tasapainoilu (engl. *on-line balancing*). Tekniikka vastaa akateemisten tutkimusten rannestrategiaa, jossa olka- ja lantionivelen rooli tasapainotilan korjaamisessa on erilainen kuin ranteen.

Käsinseisannon harjoittelua tukevaa akateemista kirjallisuutta on niukasti. Uzunovin mukaan tietämys oikeoppisesta käsinseisontatekniikasta ja sen harjoittelusta kulkee työpajoissa suullisena tietona valmentajalta valmentajalle; informaatio ei ole kirjallisessa muodossa suuren yleisön saatavilla[2]. Uzunov on käsitellyt yllä mainittujen tutkimusten löydöksiä ja tiivistänyt niiden tuloksia oikeaoppisen käsinseisontatekniikan esittämiseksi. Hän esittää neljävaiheisen harjoittelumallin rungon, joka etenee puhtaan vartalolinjan iskostamisesta aina vaativimpiin telinevoimistelun dynaamisiin käsinseisontarutiineihin. Harjoittelun näkökulma on vahvasti telinevoimisteluun sidottu.

Sirkukselle ominaisten käsinseisontatekniikoiden ja -liikkeiden tutkimusta on yhtäältä hyvin vähän. Kong et al. käsitteli tutkimuksessaan pressinousua käsinseisontaan (engl. *press-to-handstand*)[36]. Käsinseisannon vakautta mitattiin nousun aikana kahdessa käsien asennossa: sormet suoraan eteenpäin ja sormet ulospäin (auki) käännettynä. Sormet ulospäin käännettynä käsinseisannon huojunta oli pienempää, mutta sormet eteenpäin osoittaessa kehon linja oli pystyasennossa suurempi.

Ainoa kirjoittajan löytämä yksityiskohtainen käsinseisontaliikkeen analyysi oli Prassasin artikkeli, jossa luotiin perusteellinen biomekaaninen malli kulmanojapressinousulle[37]. Prassas käytti kolmeosaista nivelmallia selvittääkseen nivelkulmien ja lihaksistolta vaadittavan voimantuoton yhteyttä. Erityisesti tutkittiin olkaniveeliin kohdistuvaa voiman momenttia nousun eri vaiheissa. Lisäksi tarkkailtiin koehenkilön massakeskipisteen liikerataa suorituksen aikana.

### 3 Kehonosien massakeskipisteet ja suhteelliset massat

Drillisin mukaan kehon mittasuhteista ovat olleet kiinnostuneita niin egyptiläiset ja kreikkalaiset kuin renessanssin Leonardo da Vincikin. Aiheen varsinaisen tieteellisen tutkimuksen voidaan kuitenkin nähdä alkaneen vasta italialaisen Borellin työstä ihmiskehon massakeskipisteen selvittämiseksi 1679[38, 39, 40]. Drillis listaa tutkimustulosten käyttökohteiksi muun muassa erilaisten (fyysisten) töiden suunnittelun, urheilijoiden suoritusten kehittämisen, lääketieteen diagnostiikan ja erityisesti *ihmiskehon kineettisen analyysin*. [41]

#### 3.1 Ihmiskehon nivelmalli ja kineettinen analyysi

Väitöskirjatyössään kehon massakeskipisteen liikeradan estimoinnista ja kehonosaparametrien määrittämisestä Jaffrey ottaa lähtökohdakseen ihmiskehon liikkeen kineettisen analyysin ja mallinnuksen. Ihmiskehon liikkeitä tarkasteltaessa tutkijat käyttävät usein yksinkertaistettua mallia, jossa keho koostuu jäykistä toisiinsa niveltyvistä osista. Mallia voidaan pelkistää edelleen käsittelemällä nivelen yli kulkevien lihasten tuottamia voimia yhtenä kokonaisvoimana, jos yksittäisten lihasten kontribuutiota ei tarvitse tuntea. [42, s. 1]

Käänteisen dynamiikan menetelmässä (engl. *IDA, inverse dynamics approach*) mitattavan systeemin osien liikeradat (paikka ja nopeus) tallennetaan yhdellä tai useammalla videokameralla. Liikeradoista voidaan tietyin oletuksin estimoida systeemiin vaikuttavat ulkoiset ja sisäiset voimat ja momentit, jotka aiheuttivat havaitut liikkeet. [43, s. 283] Suoran dynamiikan menetelmässä (engl. *FDA, forward dynamics approach*) puolestaan tunnetaan systeemiin vaikuttavat voimat, joiden aiheuttamat liiketilän muutokset voidaan laskea [44]. Molempien menetelmien tapauksessa on tunnettava systeemin fysikaaliset ominaisuudet – ihmiskehon tapauksessa kehonosaparametrit. Yhdessä tasossa tapahtuvia liikkeitä on mahdollista tarkastella kahdessa ulottuvuudessa kolmen sijaan.

Jaffrey esittelee aiheesta tehdyn tutkimuksen lähtien Harlessin vuonna 1860 suorittamista mittauksista aina 2000-luvun alkupuolelle asti. Hän jakaa alalla tehdyn tutkimuksen metodologian perusteella löyhästi viiteen ryhmään ja arvioi menetelmien etuja ja ongelmia:

- ruumiiden dissektointiin perustuvat menetelmät
- tilavuuden määrittämiseen ja geometriseen mallintamiseen perustuvat menetelmät
- lääketieteellisen kuvantamisen menetelmät
- ennustusmenetelmät (regressiomenetelmät)
- dynamiikka- ja optimointimenetelmät

### **3.2 Ruumiiden dissektointiin perustuvat menetelmät**

Kehonosparametrien kuten massan suora mittaaminen on luontaisesti vaikeaa, koska kehonosat ovat kiinni toisissaan. Suoraviivaisin lähestymistapa ongelman kiertämiseksi on käyttää vainajia, jotka voidaan dissektoida halutulla tavalla. Menetelmän kiistaton etu on mahdollisuus irti leikattujen kehonosien suoraan mittaamiseen. Muissa menetelmissä esimerkiksi massan määrittäminen perustuu aina yksinkertaistuksiin ja epäsuoraan mittaamiseen. Menetelmän ongelma on luonnollisesti sen invasiivinen luonne, joka ei sovellu eläville henkilöille.

Myös tulosten tarkkuuteen liittyy ongelmia. Harlessin tutkimuksessa käytettiin mestattuja vankeja, jolloin tuntematon määrä kehon nesteitä oli poistunut koehenkilöiden elimistöstä ennen mittauksia[45]. Clauserin mittauksissa kaikki ja Dempsterin mittauksissa osa ruumiista oli säilöttyjä[39, 46]. Dissektiot suoritettiin jäädytetyille ruumiille, jolloin nesteiden poistumisen ongelmaa ei ollut. Jäätymisen seurauksena kehonosien tiheys tosin pienenee.

Dempsterin mittauksia on kritisoitu koehenkilöiden otoksen edustavuuden takia: tutkimuksen kahdeksan ruumista olivat suhteellisen laihoja ja vanhoja (52–83 vuotta) kaukaasialaisia miehiä. Tulosten yleistettävyyks on kyseenalainen. Clauserin työssä käytetyt ruumiit pystyttiin valikoimaan tarkemmin paremman otoksen saavuttamiseksi. Hänen ansiokseen lukeutuu myös antropometriset mittaukset, joiden pohjalta elävien koehenkilöiden kehonosaparametreja saattoi estimoida ruumiilla tehdyn työn tulosten pohjalta.[42, s. 41]

### 3.3 Tilavuuden määrittäminen ja geometrinen mallintaminen

Tilavuuden määrittämiseen ja geometriseen mallintamiseen perustuvissa menetelmissä mitataan kehonosien tilavuuksia upottamalla niitä nesteeseen, erilaisilla 3D-skannauslaitteilla, tai approksimoimalla kehonosan tilavuutta yksinkertaisemmilla geometrisilla 3D-kappaleilla. Kehonosien massa voidaan tämän jälkeen arvioida kertomalla tilavuus kudoksen tiheydellä. Menetelmän etuna on sen noninvasiivinen luonne ja yksilöitävyys: parametrit pystytään määrittämään yksilöllisesti riippumatta mitattavan henkilön vartalo- eli *somatotyypistä*.

Suurimmat epätarkkuustekijät kumpuavat oletuksista kudosten tiheyksistä ja kehonosien massajakaumista. Osassa tutkimuksia tulokset on saavutettu approksimoimalla kehon tiheys kauttaaltaan yhtenäiseksi. Approksimaation on kuitenkin osoitettu aiheuttavan huomattavia virheitä lopullisiin kehonosaparametrien arvoihin[47]. Virhettä on mahdollista pienentää ottamalla paremmin huomioon eri kudosten erilainen tiheys ja sijainti tarkasteltavassa kehonosassa[48].

Tulosten epätarkkuuden lisäksi metodi on monesti hidas ja vaivalloinen. Esimerkiksi Hatzen[49] ja Yeadonin[34] kehittämässä geometriseen mallintamiseen perustuvissa menetelmissä oli jokaiselle koehenkilölle tehtävä suuri määrä aikaa vieviä mittauksia: Hatzen menetelmän vaatimiin 242 mittaukseen kului lähes 80 minuuttia; Yeadonin 95 mittaukseen 20–30 minuuttia.

### 3.4 Lääketieteellinen kuvantaminen

Lääketieteellisen kuvantamisen menetelmissä kehon koostumusta mitataan erilaisilla gamma-, röntgen- tai magneettikuvantamismenetelmillä. Tutkimuksissa voidaan käyttää varausin eläviä koehenkilöitä: gamma- ja röntgenkuvantamisesta aiheutuu koehenkilöille pienehkö säteilyannos. Menetelmillä kyetään tuottamaan tarkkoja kolmiulotteisia malleja koko kehosta. Vaikka kehonosaparametrit joudutaan arvioimaan 3D-mallista, tulokset ovat olleet tarkkoja, kun niitä on verrattu esimerkiksi ihmisruumiilla tai eläinten raajoilla tehtyihin suoriin mittauksiin.[42, s. 53–62]

Merkittävän laajoa tutkimuksia on tehnyt Zatsiorsky, joka käytti gammakuvantamista määrittäessään kehonosaparametrit 100 kaukaasialaiselle miehelle[50] ja myöhemmin 15 kaukaasialaiselle naiselle[51]. Menetelmän huonot puolet ovat magneettikuvantamista lukuun ottamatta koehenkilön saama säteilyannos ja erityisesti kuvantamislaitteiden korkea hinta sekä kuvantamisen hitaus ja monimutkaisuus.[42, s. 55]

### 3.5 Ennustusmenetelmät

Edellä esitellyillä menetelmillä saatuihin tuloksiin on sovellettu regressioanalyysin<sup>6</sup> keinoja. Regressioanalyysin tuloksena saatuja ennustusyhtälöitä voidaan käyttää uuden koehenkilön kehonosaparametrien arviointiin: syöttämällä ennustusyhtälöihin (aikaisemman tutkimuksen regressioanalyysissä valitut) selittävät muuttujat, kuten koehenkilön paino, pituus ja kehonosien mitat, voidaan laskea estimaatit koehenkilön kehonosaparametreille.

Muihin menetelmiin verrattuna parametrien laskeminen on yksinkertaista, nopeaa ja edullista. Menetelmän tarkkuus on kuitenkin kyseenalainen. Erityistä huomiota tulisi kiinnittää selittävien muuttujien määrään.

---

<sup>6</sup> Tilastollinen menetelmä selittävien muuttujien ja selitettävän muuttujan riippuvuussuhteen tutkimiseksi[52, s. 1084].

Ennen Clauseria ennustusyhtälöissä oli käytetty vain yhtä selittävää muuttujaa. Clauser kehitti menetelmää oleellisesti kerätessään koehenkilöiltä 73 mittausta, joiden joukosta valitsi kolme parasta (paras selitysaste) erikseen jokaiselle kehonosalle [39]. Toinen lähestymistavan ongelma on tutkimuksissa käytettyjen otosten pienuus ja täten niiden edustavuus ja yleistettävyys: useimpien tutkimusten otoskoko on ollut pienempi kuin 20; poikkeuksena Zatsiorskyn tutkimukset.[42, s. 62–65]

### 3.6 Optimointimenetelmät

Optimointimenetelmien lähestymistapa on päinvastainen muihin menetelmiin verrattuna. Muissa menetelmissä kehonosaparametrien avulla ennustetaan systeemin liiketietoa ja systeemiin vaikuttavia voimia; optimointimenetelmissä kehonosaparametrit pyritään selvittämään tutkimalla liiketietoa ja voimia.

*Nopean irroituksen menetelmässä* (eng. *quick release method*) koehenkilö pitää isometrisellä lihasjännityksellä raajaansa paikallaan ulkoista voimaa vastaan. Ulkoinen voima poistetaan yhtäkkiä, jolloin raaja heilahtaa ja sen kiihtyvyys mitataan. Ulkoisen voiman — joka on yhtä suuri kuin koehenkilön lihastyön synnyttämä voima — ja kiihtyvyyden avulla voidaan matemaattisen optimoinnin keinoin laskea raajan hitausmomentti heilahdusakselin suhteen.[42, s. 65–86]

### 3.7 Osituksen sitominen kehon pisteisiin

Leva on käsitellyt kehonosaparametrien mittaamisessa tehdyn työn hyödyntämistä jatkotutkimuksissa[53]. Ihmiskehon liikeanalyysissä koehenkilön kehonosaparametrit on yleensä arvioitava aikaisempien tutkimusten pohjalta. Clauserin vanhoilta miesvainajilta keräämiä mittaustuloksia on käytetty laajasti jopa naiskoehenkilöille. Tulosten yleistämisen eri somatotyypin omaaville koehenkilöille on kuitenkin näytetty tuottavan suuria virheitä kehon massakeskipisteen määrittämisessä.[54]



Laadukkaampi tutkimusaineisto oli Levan mukaan Zatsiorskyn, jonka otoskoko oli huomattavan suuri. Lisäksi Zatsiorskyn koehenkilöt olivat nuoria (miesten keski-ikä 24 vuotta; naisten keski-ikä 19 vuotta), joista suuri osa liikunnan korkeakouluopiskelijoita. Kehonosaparametrien yleistettävyyden samanikäisiin urheilijoihin oli parempi.

Voimistelu- ja käsinseisontatutkimuksissa koehenkilöt ovat usein nuoria urheilijoita. Levan mukaan kehonosaparametrien estimoinnissa käytetään silti usein Clauserin tuloksia, vaikka Zatsiorskyn mittausdata on ollut saatavilla jo pitkään[53]. Leva pääättelee, että syynä tähän on Zatsiorskyn lähestymistapa käyttää kehonosien pituuksien ja massakeskipisteiden sitomiseen vartalon luisia referenssipisteitä. Joidenkin nivelten kohdalla luisten referenssipisteiden ongelma on niiden etäisyys nivelen keskikohdasta. Nivelteä koukistaessa ja ojentaessa referenssipisteiden etäisyys kehonosan massakeskipisteeseen ei pysy samana. Ongelman minimoimiseksi referenssipisteinä tulisi käyttää nivelten keskikohtia.

Vuonna 1996 Leva käytti hyväkseen sekä Chandlerin että Zatsiorskyn aineistoja konstruoidessaan suoraviivaisemmin käytettävät referenssipisteet kehonosaparametrien määrittämiseksi. Ensimmäisessä artikkelissaan Leva hyödynsi Chandlerin työtä nivelten keskipisteiden määrittämisessä ja esitti nivelten sijainnit suhteessa kehon helposti paikallistettaviin luisiin referenssipisteisiin.[55]

Toisessa artikkelissaan hän esittää koko vartalon kattavan aineiston kehonosien massakeskipisteiden määrittämiseksi pohjanaan Zatsiorskyn gammakuvantamisaineisto. Leva antaa kehonosille "helppokäyttöiset päätepisteet" ja lisäksi vaihtoehtoisia päätepisteitä, joiden suhteen massakeskipisteet on määritetty. Lisäksi hän taulukoi kehonosien suhteelliset massat ja tarjoaa täten aineiston koko kehon massakeskipisteen laskemiseksi.[53]

## 4 Koeasetelma ja menetelmät

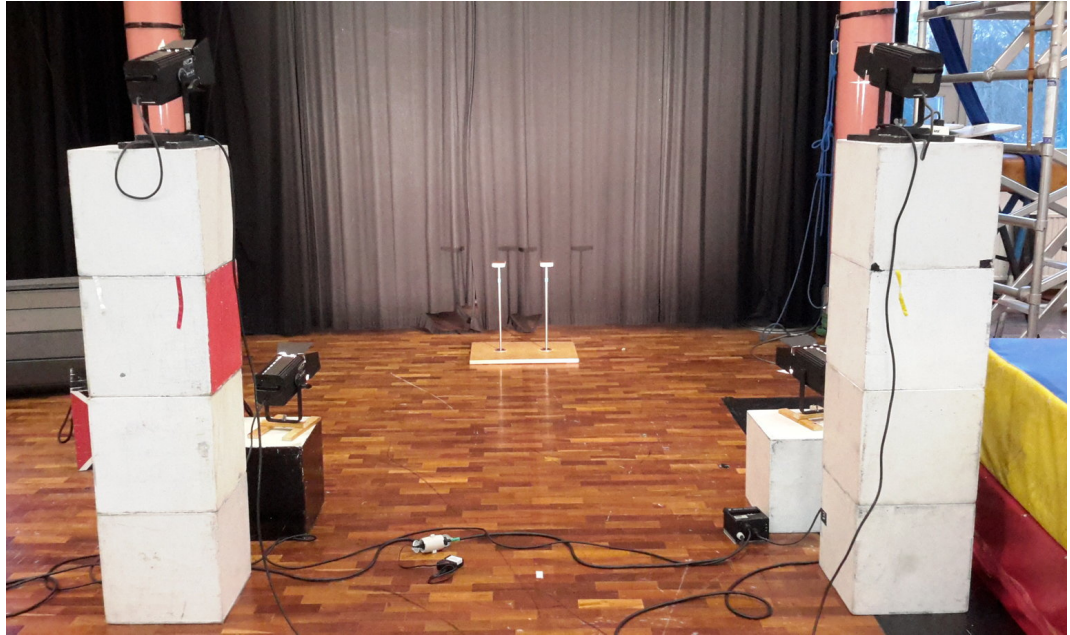
Tutkimuksen kokeellisen osuuden tavoitteena oli tallentaa joukko käsinseisontasuorituksia tavalla, joka mahdollisti koehenkilön liikkeen analysoinnin yhdessä tasossa. Painopisteanalyysiä varten koehenkilön ruumiinosien (ranne, kyynärpää, nilkka yms.) sijaintia tuli pystyä seuraamaan automaattisesti tietokoneohjelmalla. Toisin sanoen, videotallenteesta tuli kyetä eristämään käsinseisijan ruumiinosien 2D-projektoiden koordinaatit. Tavoitetta varten improvisoitiin koulun liikuntasaliin valokuvausstudio, missä videokuvauksen taustaa ja valaistusolosuhteita oli mahdollista manipuloida.

### 4.1 Kuvausolosuhteet ja värimerkkien valinta

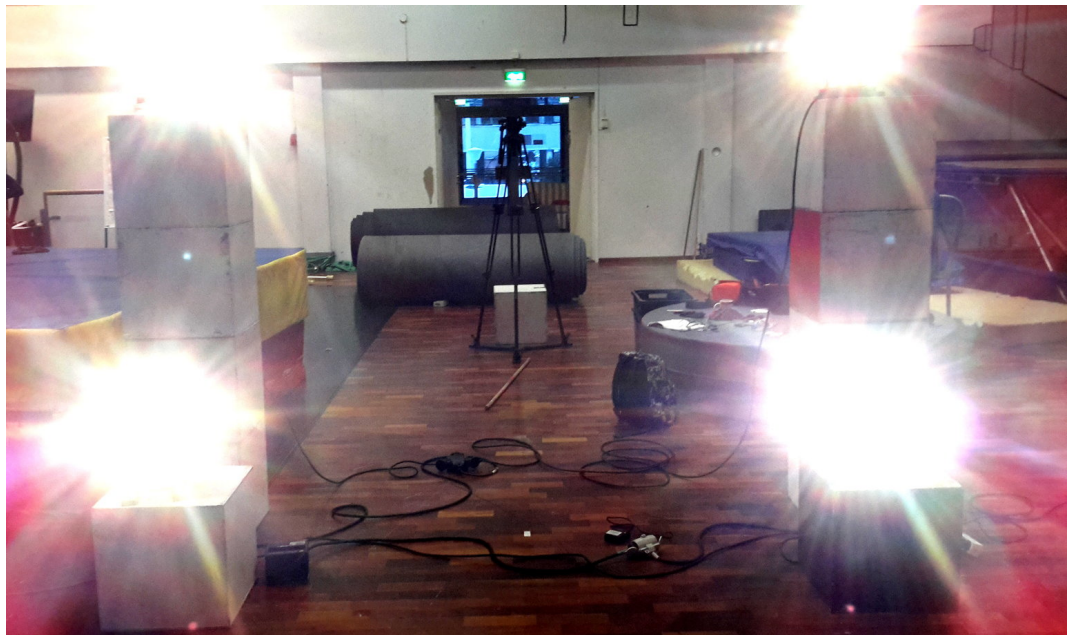
Optimaalisten valaistusolosuhteiden luomiseksi käytettiin mustaa taustakangasta ja neljää näyttämövalonheitintä. Kuvauksessa käytettiin Canon EOS D60 -järjestelmäkameraa, joka mahdollisti valotuksen tarkat manuaaliset asetukset. Objektiivin aukon koon, suljinajan ja valoherkkyyden säädöillä kuvattava kohde pystyttiin tuomaan tarkasti esiin ja taustakangas häivyttämään. Voimakasta keinovaloa käyttämällä kameran suljinaika voitiin asettaa pieneksi (1/200), jolloin pysäytyskuvissa usein havaittava, nopeista liikkeistä johtuva kuvan pehmeneminen pystyttiin estämään. Muut valotukseen vaikuttavat asetukset olivat aukko (5.6) ja valoherkkyys (ISO800).

Kamera asetettiin mahdollisimman kauas (n. 7 metrin päähän) kuvauskohteesta, minkä jälkeen kuva zoomattiin koehenkilöön kuvakulman optimoimiseksi ja resoluution maksimoimiseksi. Kamera asetettiin korkeudelle, joka vastasi käsinseisijan kehon vertikaalista keskipistettä käsinseisonta-asennossa. Kuvausasetelmaa on havainnollistettu kuvassa 3.

Videosta automaattisesti tietokoneohjelmalla seurattavien pisteiden toteuttamiseksi kehitettiin useita lähestymistapoja. Yksinkertaisimmillaan kuvassa seurattavan kohteen tulee muodostua yhtenäisestä alueesta, joka eroaa jollain tavalla ympäristöstään. Aluksi pyrittiin käyttämään hyväksi valoisuuseroja. Musta koko vartalon peittävään aluspukuun liimattiin



3.1. Neljä näyttämövalonheitintä asetettiin kuvauskohteen molemmin puolin ala- ja ylätasoon.



3.2. Kuvausasetelma koehenkilön näkökulmasta.

Kuva 3: Kuvausasetelma: kameran ja valonheittimien sijainnit.

valkoisia teippejä (kuva 4.1). Tällöin kuitenkin teipin väriin sekoittumaton musta tausta häivytti myös koehenkilön hahmon. Lisäksi ongelmallista oli teippien irtoilu ja liikkuminen aluspuvun mukana suhteessa ihoon. Myös mustien teippien käyttäminen vaalealla iholla olisi ollut mahdollista, mutta tällöin olisi jouduttu käyttämään vaaleaa taustaa, mikä olisi jälleen heikentänyt taustan ja koehenkilön kontrastia.

Parannusaskel oli korvata teipit vahameikeillä, jotka eivät irtoile iholta eivätkä vaatteiden tavoin liiku suhteessa ihoon (kuva 4.3). Samalla siirryttiin käyttämään valoisuuserojen sijaan värisävyeroja. Oli löydettävä värisävy, joka erottuu selkeästi sekä ihosta että taustasta. Kokeilluista väreistä (keltainen, vihreä, punainen, sininen) sininen soveltui tarkoitukseen parhaiten, mutta kuvauspaikan normaalissa valaistuksessa sekin näkyi kameralle pikemminkin harmaana eikä täten erottunut tarpeeksi selvästi automaattista seuraamista varten. Tässä vaiheessa siirryttiin lisävalojen käyttöön.

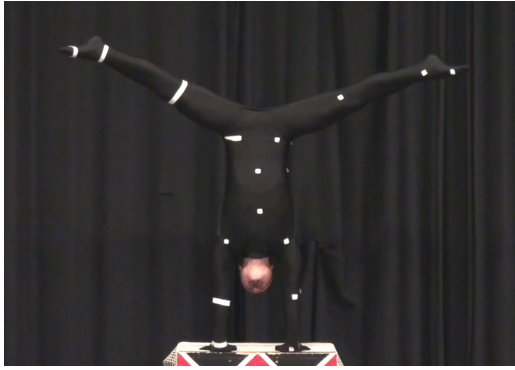
Lisävalojen kanssa meikkivärejä kokeiltiin sekä mustaa että valkoista taustaa vasten (kuvat 4.5 ja 5.1). Meikit erottuivat selvemmin, mutta valotus muodostui ongelmaksi: Mustaa taustaa vasten vaalea iho paloi kuvissa puhki; valkoista taustaa vasten iho ja meikit jäivät liian tummiksi. Testien alussa kuvaamiseen käytettiin digitaalista videokameraa, jonka valotusta ei pystynyt korjaamaan kattavasti. Siirtyminen järjestelmäkameraan ja videon valottaminen pelkästään koehenkilön — ei mustan taustan mukaan — ratkaisivat värien näkyvyysongelman (kuva 5.3).

Valaistuksen lisääminen ja järjestelmäkameraan siirtyminen mahdollistivat myös suljinnopeuden säätämisen. Koska valotusta oli valonheittämiä käytettäessä joka tapauksessa pienennettävä, voitiin suljinnopeutta kasvattaa (lyhyempi suljinaika). Kameran aukko pystyttiin pitämään suurena, koska kuvaan tarvittiin vain kapea syväterävyysalue.

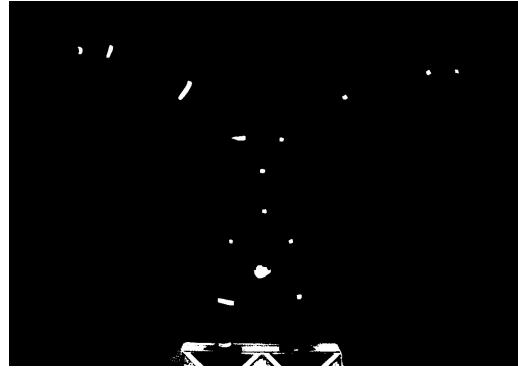
Meikkivärien kokeilemisen yhteydessä testattiin myös UV-aktiivisia meikkejä. Mielikuva pimeässä yökerhossa UV-valojen alla voimakkaasti loistavasta meikistä ei kuitenkaan realisoitunut päivänvalossa. Vaikka kahden UV-loisteputken valossa ranteeseen tehty UV-meikkimerkki saatiinkin hieman hehkumaan, ei se koeolosuhteiden voimakkaassa valaistuksessa erottunut normaalilla meikillä tehdystä merkistä.

Meikkien käyttämisessä oli kaksi perustavanlaatuaista ongelmaa: meikkaamisen työläys sekä meikkien sotkeutuminen. Videokuvan käsittelyä varten tarpeeksi leveiden merkkien tekeminen iholle vaati huomattavan paljon tarkkuutta ja aikaa vievää käsityötä. Lisäksi meikit sotkeutuivat helposti osuessaan toisiin kehonosiin, eikä meikkien päälle voinut pukea vaatteita koehenkilön lämmön ylläpitämistä varten.

Kineesioteippi oli helpompaa, vaikeikaan ongelmattonta, asetella kohteeseen. Se ei sotkeutunut kosketuksesta, ja sen päälle pystyi pukemaan vaatteita. Lisäksi teippien poistaminen kuvauksen jälkeen oli nopeampaa ja yksinkertaisempaa kuin vahameikkien.



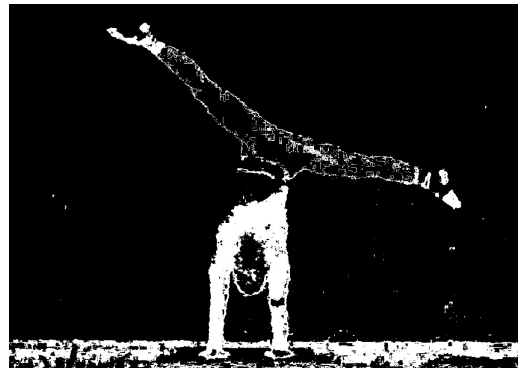
4.1. Alkuperäisen kuvan kontrasti oli huono: koehenkilön hahmo sulautui taustaverhoon. Ongelmia aiheuttivat myös käytännön seikat: teipit irtoilivat ja liikkuiivat aluspuvun mukana suhteessa ihoon.



4.2. Valkoiset teippimerkit erottuivat hyvin mustasta aluspuvusta ja taustaverhosta. Toisaalta käsinseisojan leuka on vaaleana alueena virheellisesti kynnystetty: lähestymistapa olisi vaatinut koehenkilön koko pään peittämisen mustalla hupulla.



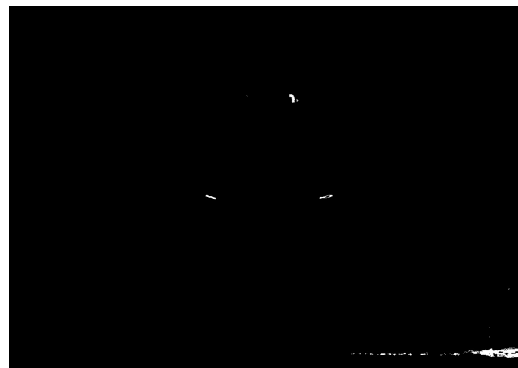
4.3. Meikit (esim. vatsa ja nilkat) eivät liikkuneet iholla, mutta olivat työläitä levittää ja sotkeutuivat helposti osuessaan vaatteisiin tai muihin ihoalueisiin.



4.4. Sininen sävy erottui binäärikuvassa, mutta himmeässä valaistuksessa meikkimerkin saturaatio oli hyvin alhainen, jolloin riittävän laajoilla raja-arvoilla binäärikuvaan valikoitui myös laajoja alueita muualta kuvasta.



4.5. Näyttämövalonheittimiä käyttäen parannettu valaistus kasvatti meikkimerkkien saturaatiota; kamera ei enää tallentanut niitä liian harmaana. Mustan taustan ja vaatetuksen mukaan automaattisesti säätyvä valotus aiheutti kuitenkin kuvassa ihoalueiden palamisen puhki.

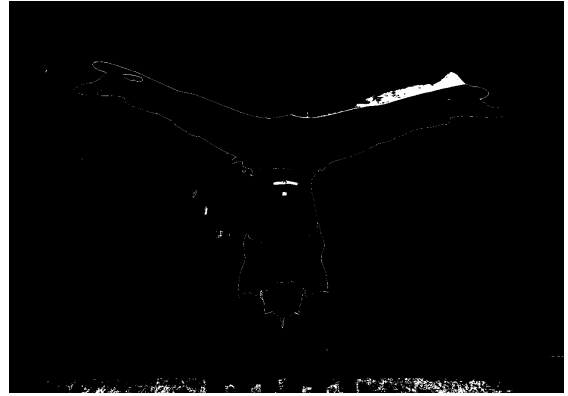


4.6. Parempi saturaatio ja kontrasti mustaan taustakankaaseen sai molempien käsien rannemerkit erottumaan selvästi.

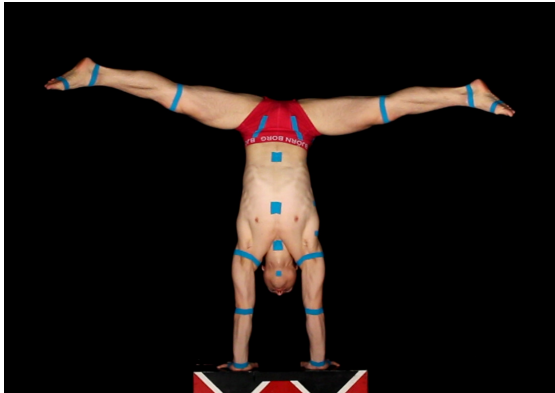
Kuva 4: Värimerkkin ja kuvaolosuhteiden asteittainen kehitys: Valoisuuserojen seuraamisesta meikkiväreihin ja valonheittimien hyödyntämiseen.



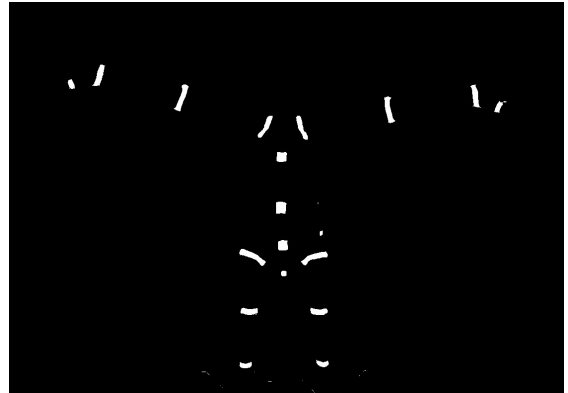
5.1. Valaistuksen parantamisen lisäksi videokameran valotusta säädettiin manuaalisesti. Taustan mukaan toimivan automaattivalotuksen virheitä pystyttiin jonkin verran korjaamaan...



5.2. ... mikä ei kuitenkaan auttanut riittävästi. Meikkimerkki erottui kynnyksen jälkeen, mutta myös virheellisiä alueita esiintyi.



5.3. Lopullisessa kuvausasetelmassa meikit korvattiin kineesioteipeillä. Koehenkilö nostettiin kuvassa esiin valitsemalla taustaksi musta kangas ja vaihtamalla aikaisemmin käytetty videokamera järjestelmäkameraan, jonka huomattavasti kattavammilla asetuksilla valotus oli mahdollista säätää optimaalisesti.



5.4. Teipit erottuivat selvästi taustakankaasta valoisuusarvonsa perusteella, ja ihosta sekä koehenkilön alushousuista värisävyarvonsa perusteella. Virhepikseleitä ei ollut käytännössä lainkaan.

Kuva 5: Värimerkkin ja kuvausolosuhteiden asteittainen kehitys: valotuksen säätäminen ja lopullinen koeasetelma.

## 4.2 Kineesioteippimerkkien asettaminen

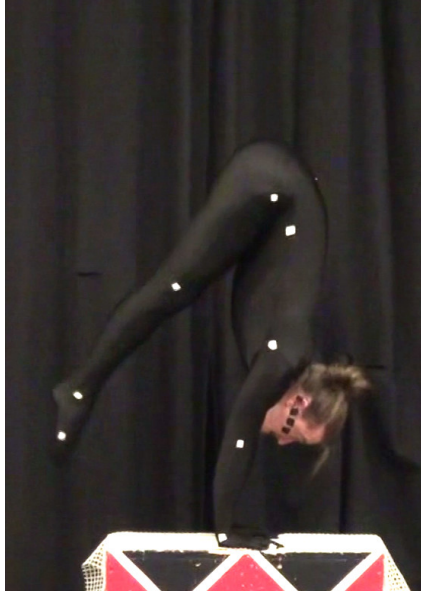
Kineesioteippimerkit asetettiin Levan määrittelemiin pisteisiin[53, 55]. Osa teipeistä oli koehenkilön itsensä kiinnitettävissä, mutta näissäkin tapauksissa avustajan käyttäminen nopeutti ja yksinkertaisti toimenpidettä. Esimerkiksi nilkan ympärille koehenkilön oli mahdollista kiinnittää teippi ilman ulkopuolista apua, mutta teippauksen tekeminen tarkasti oli haastavaa. Toisten teippien asettaminen kehoon omatoimisesti oli käytännössä mahdotonta: esimerkkinä olkapään ympäri asetettava teippi. Tässä kappaleessa kuvataan teipattavat kehon pisteet, teippien kiinnittämisen järjestys sekä työn aikana opittuja käytäntöjä ja tekniikoita, jotka koettiin hyödyllisiksi työn tarkkuuden ja suorittamisnopeuden kannalta.

Työssä tehtiin kameranäkymän osalta kahdenlaisia kuvauksia: sagittaalitasossa (kylki kameraan päin, kuva 6.1) ja frontaali- eli koronaaritasossa (rintakehä kameraan päin, kuva 6.2). Teippien tarkoitus oli mahdollistaa kehonosan, esimerkiksi nilkan, keskipisteen seuraaminen kuvassa.

Yksinkertaisessa koeasetelmassa teippimerkki olisi voinut olla pistemäinen. Pistemäisen merkin ongelmat ilmenivät kuitenkin tilanteessa, jossa koehenkilön raajat kiertyivät suorituksen aikana: kierretyn raajan teippimerkin projektio kuvassa ei enää vastannut kyseisen kehon pisteen keskipistettä. Raajojen kiertoa tapahtui käytännössä kaikissa frontaalitason videoissa. Ongelma oli mahdollista ratkaista käyttämällä koko raajan kiertävää teippiä, joka jakoi raajan pitkittäisessä suunnassa proksimaaliseen ja distaaliseen osaan. Kameralle näkyvän teipin osan keskipiste säilyi likimain kyseisen kehonosan keskipisteen kohdalla huolimatta raajan kiertymisestä. Ongelmaa ja sen ratkaisua on havainnollistettu kuvassa 6.

Teippaamisessa käytettiin normaalia urheiluvälinekaupasta tai tavaratalosta saatavaa, sinistä 5 cm leveää kineesioteippiä. Raajoja kiertäviä merkkejä varten teippi halkaistiin keskeltä kahtia 2,5 cm levyisiksi liuskoiksi. Pistemäisissä merkeissä käytettiin neliön muotoisia teipin paloja: tilanteesta riippuen sivun pituudeltaan joko 5 cm tai 2,5 cm. Liikkeissä, joissa tapahtui isoja taivutuksia ja kehon kiertoa, osa neliön muotoisista merkeistä rypistyi ihon mukana kasaan. Tarpeeksi leveät merkit varmistivat, että osa teipistä näkyi jatkuvasti kameralle.

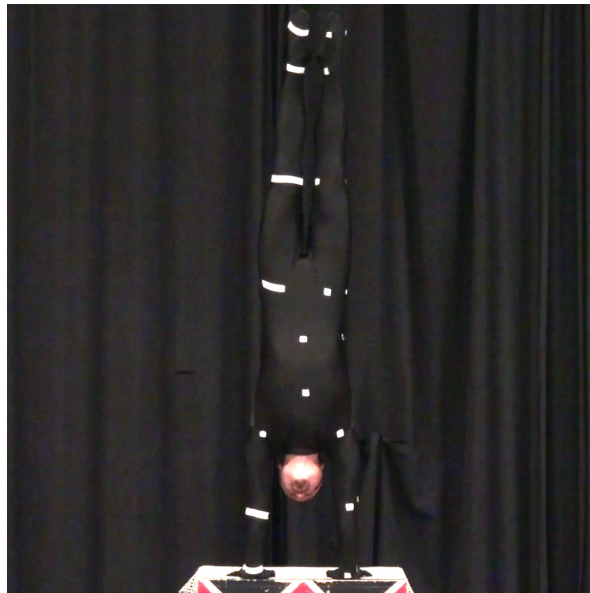




6.1. Pistemäiset merkit toimivat yksinkertaisissa sagittaalitasoon liikkeissä, joissa raajat eivät kiertyneet ja joissa teippimerkkien suunta pysyi täten suoraan kohti kameraa.



6.2. Frontaalitasossa, ns. jalkojen split-asennossa oikean polven teippimerkki näkyi kameralle likimain alaraajan transversaalitasoon keskipisteessä. Raaja on lateraalirotaatioissa (ns. aukikierto).



6.3. Klassisessa käsinseisonta-asennossa alaraaja ei ole kiertynyt, jolloin polven teippimerkki jäi alaraajan mediaalisella pinnalla osittain piiloon kameralta: merkin keskikohta ei enää vastannut polvinivelen keskikohtaa. Koko raajan kiertävissä teipeissä (esim. vasen polvi) ongelmia ei ollut.

Kuva 6: Pistemäisten merkkien ongelmat ilmenivät liikkeissä, joissa raajat kiertyivät pituusakselinsa ympäri.

Yleisessä tapauksessa teippimerkkien asettaminen koostui kolmesta vaiheesta:

1. kehonpisteen osoittavan luisen maamerkin paikantaminen ja merkitseminen tussilla
2. kehonpisteen mahdollinen siirto tasossa ja koko teipattavan kohteen merkitseminen tussilla
3. kehonpisteen teippaaminen tussilla tehtyjen merkkien mukaan

Merkkien kiinnittämisjärjestys suunniteltiin liikkeiden kuvausjärjestyksen mukaisesti. Ensin kiinnitettiin merkit oikeaan kylkeen ja oikeisiin raajoihin sagittaalitasoon liikkeiden kuvaamista varten:

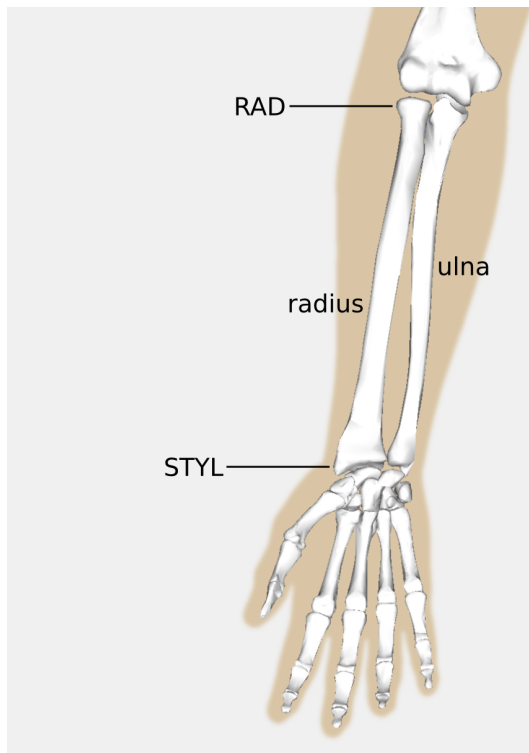
1. Oikean käden ranne- ja käsimerkki (kuvat 7, 8 ja 9).
2. Oikean käden kyynärpäamerkki (kuva 10).
3. Oikean käden olkapäämerkki (kuvat 11, 12, 13 ja 14).
4. Pään oikealle sivulle painopistemerkki ja hiuspantaan kiinnitetyt apumerkit (kuva 14).
5. Ylävartaloon, oikeaan kylkeen kiinnitetyt merkit: samassa tasossa kuin rintalastan ylä- ja alareuna sekä napa (kuva 15).
6. Oikean jalan lantiomerkki (lonkkamerkki, kuva 16).
7. Oikean jalan polvimerkki (kuva 17).
8. Oikean jalan nilkka- ja jalkaterämerkki (kuva 18).

Sagittaalitasoon liikkeiden kuvaamisen jälkeen kiinnitettiin loput merkit frontaalitasoon liikkeiden kuvaamista varten:

9. Vasemman yläraajan merkit samoin kuin edellä.
10. Lonkkamerkit nivustaipeisiin (kuva 16.3).

11. Vasemman polven ja nilkan merkit samoin kuin edellä.
12. Ylävartaloon kiinnitettävät teipit aikaisemmassa vaiheessa tehtyjen tussimerkkien pohjalta: rintalastan ylä- ja alareuna, ja napa.
13. Pään painopistemerkki leuan alle. Merkin vertikaalinen sijainti määritettiin silmämääräisesti käsinseisonta-asennossa, pään sivuun (korvannipukkaan) tehdyn merkin mukaisesti (kuva 19).

Kehon etupuolen merkit on esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 19. Alla olevat anatomiset kaaviokuvat luotiin käyttäen BodyParts3D-verkkotyökalua[56].



7.1. Kyynärvarren ja käden kaaviokuva: varttinäluu (radius) ja kyynärluu (ulna). RAD: proksimaalinen piste varttinäluun lateraalisella sivulla. STYL: varttinäluun puikkolisäkkeen (lat. *processus styloideus radii*) distaalinen kärki.



7.2. Varttinäluun puikkolisäkkeen sijainnin määrittäminen palpoimalla.

Kuva 7: Oikean käden rannemerkin sijainnin määrittäminen.



8.1. Puikkolisäkkeen merkitseminen tussilla. Merkitsemisessä oli huomioitava, ettei luukyhmyyn päällinen iho ole venytettynä mihinkään suuntaan. Hyväksi havaittu tapa oli painaa sormen kynnellä pieni jälki haluttuun paikkaan ennen tussilla merkitsemistä. Tällöin sormen tuntoaistia pystyi hyödyntämään (kynnellä painettavaa) merkkiä tehdessä.



8.2. Ranteen palmaripuolen merkitseminen. Ranteen ympärille pingotettu kuminauha aseteltiin kohtisuoraan raajan pitkästäsuuntaista akselia vastaan. Kuminauhaa apuna käyttäen merkittiin ranne molemmilta puolilta väärtinäluun puikkolisäkkeen kohdalta.

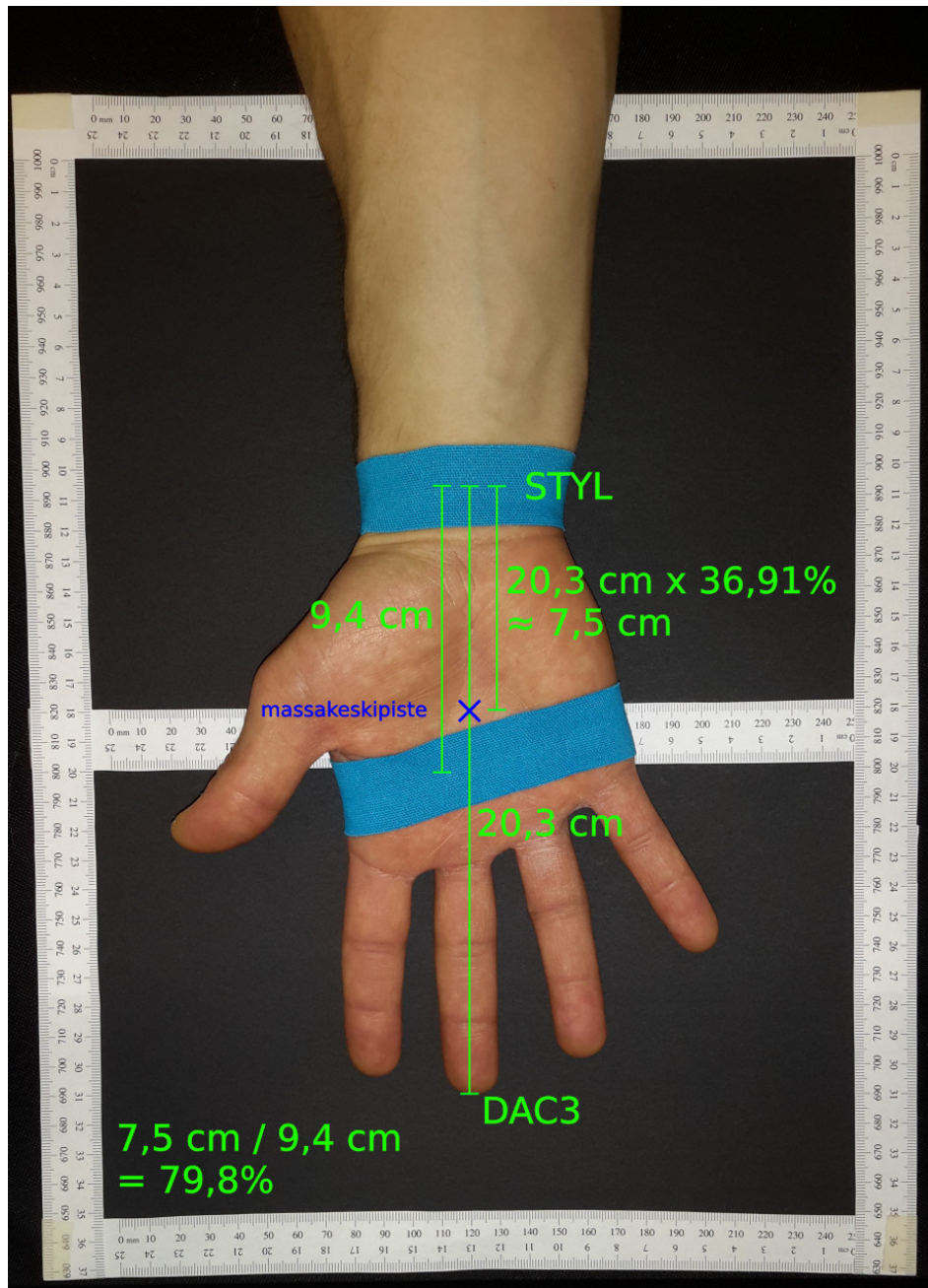


8.3. Teipin asettaminen tussilla tehtyjen merkkien mukaan. Teipin keskikohta asetettiin tussimerkkien mukaisesti.

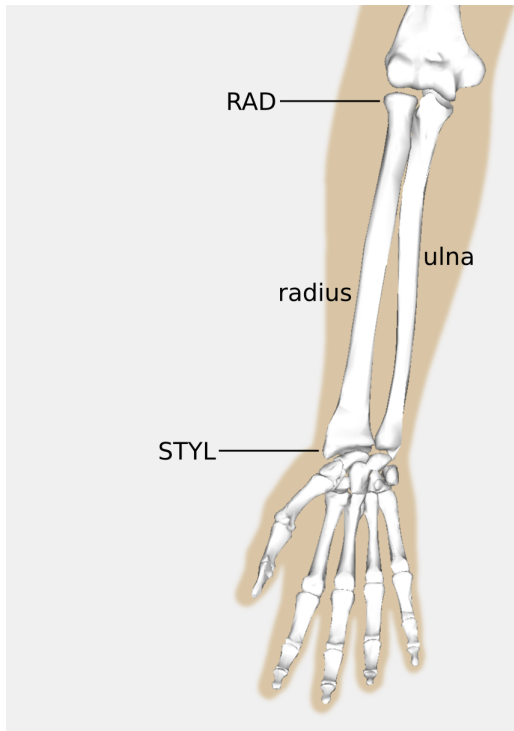


8.4. Käsimerkki teipattiin pikkusormen tyvestä kohti peukalonhankaa mahdollisimman kauas ranteesta. Tällä pyrittiin minimoimaan merkin sekoittuminen videokuvassa rannemerkin kanssa.

Kuva 8: Oikean käden ranne- ja käsimerkin tekeminen.



Kuva 9: Käden massakeskipisteen määrittäminen. Käden massakeskipisteen määrittämiseen käytettiin Levan aineistoa[53]. Massakeskipiste määrittiin rannemerkin (*STYL*) ja keski-sormen pään mukaan (*DAC3*, engl. *dactylion*): 36,91% välimatkasta. Tämän jälkeen piste sidottiin teippimerkkeihin: 79,8% teippien etäisyydestä proksimaalisesta pisteestä lukien.



10.1. Kynärvarren ja käden kaaviokuva: varttinäluu (radius) ja kynnärluu (ulna). RAD: proksimaalinen piste varttinäluun lateraalisella sivulla. STYL: varttinäluun puikkolisäkkeen (lat. *processus styloideus radii*) distaalinen kärki.

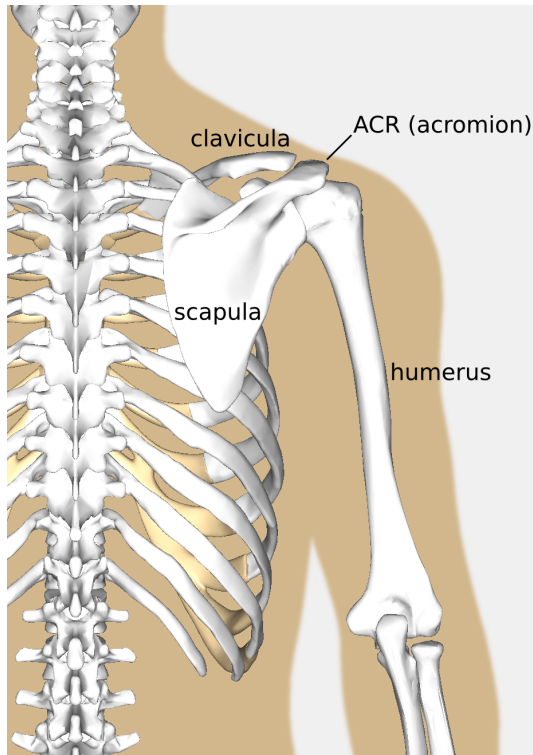


10.2. Varttinäluun proksimaalisimman pisteen määrittäminen palpoimalla.



10.3. Kynärpään merkitseminen tussilla joka puolelta.

Kuva 10: Kynärpäämerkin tekeminen.



11.1. Selän ja olkavarren kaaviokuva: solisluu (clavicula), lapaluu (scapula), olkaluu (humerus). ACR: olkalisäkkeen (acromion) lateraalisin piste.

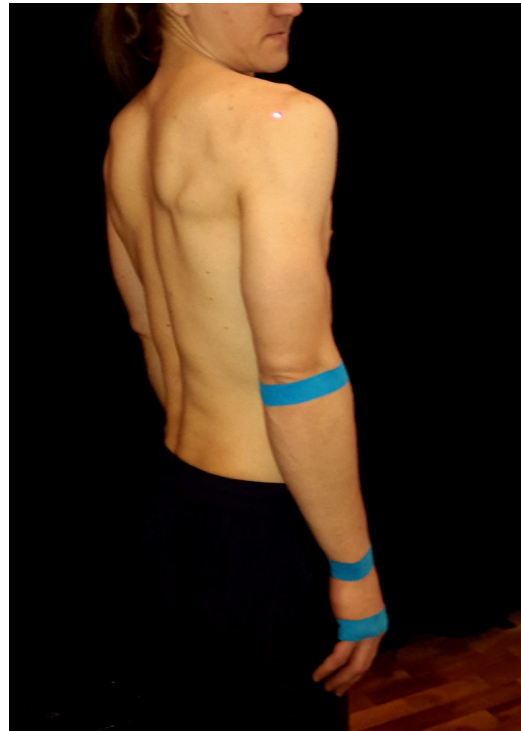


11.2. Olkalisäkkeen sijainnin määrittäminen palpimalla.

Kuva 11: Olkalisäkkeen sijainnin määrittäminen.



12.1. Olkalisäkkeen merkitseminen tussilla.



12.2. Olkalisäkemerkin siirtäminen horisontaalisesti. Muutaman metrin päähän vaakatasoon sijoitetun laserosoitin valonsäde pysyy samalla korkeudella koehenkilön kääntyessä...



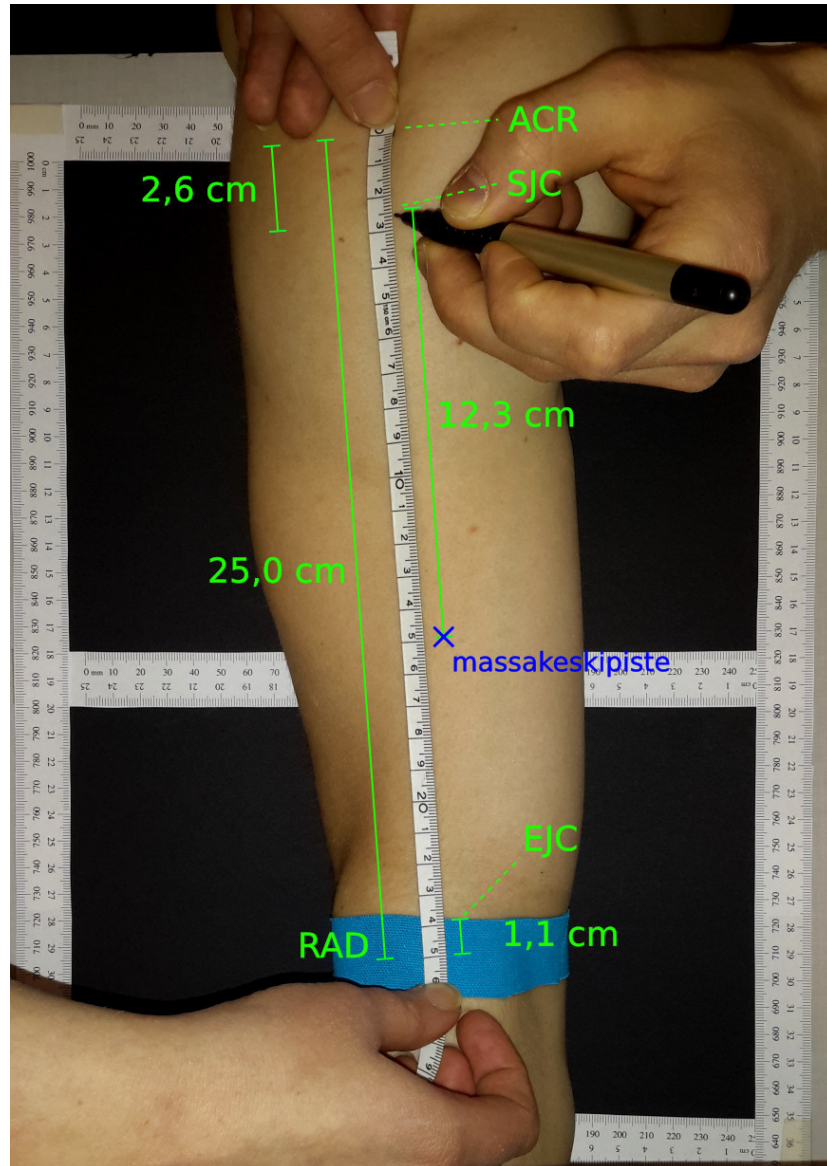
12.3. ... mikä mahdollisti olkalisäkemerkin horisontaalisen projektion merkitsemisen tussilla.



12.4. Olkanivelen merkitseminen tussilla. Olkanivelen sijainnin määrittäminen olkalisäkkeen ja kyynärpäätteipin avulla esitetty kuvassa 13

Kuva 12: Olkalisäkkeen ja olkanivelen merkitseminen.





Kuva 13: Olkanivelen sijainnin ja olkavarren massakeskipisteen määrittäminen. Olkanivelen ja kyynärnivelen keskikohtat (*SJC* ja *EJC*) määritettiin olkalisäkkeen (*ACR*) ja värttinäluun proksimaalisen ulokkeen mukaan käyttäen Levan aineistoa[55]:

$$25 \text{ cm} \times 10,4 \% = 2,6 \text{ cm}$$

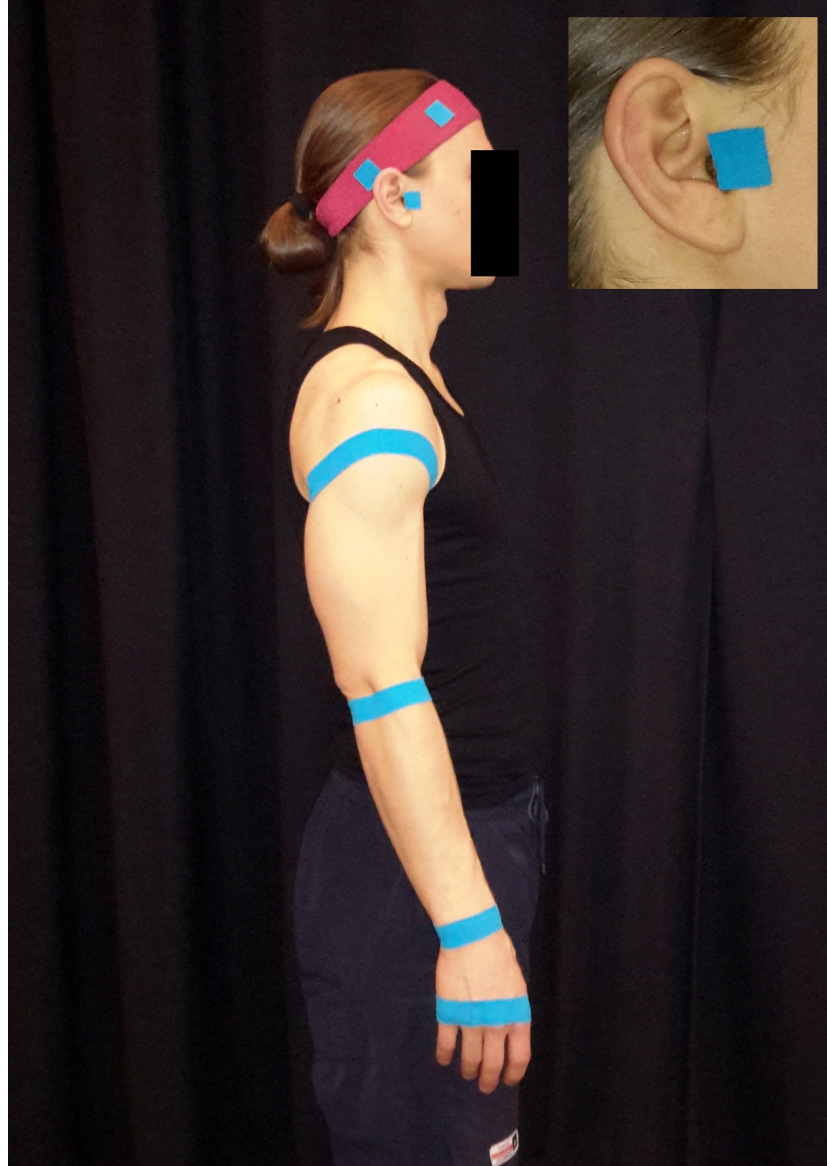
$$25 \text{ cm} \times 4,3 \% \approx 1,1 \text{ cm}$$

Olkavarren massakeskipiste voidaan tämän jälkeen laskea nivelten keskikohtiin sitoen:

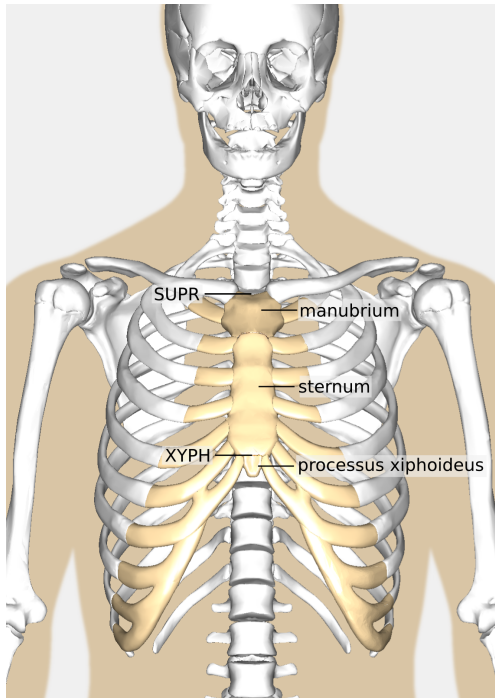
$$(25 \text{ cm} - 2,6 \text{ cm} - 1,1 \text{ cm}) \times 57,72 \% \approx 12,3 \text{ cm}$$

Pisteen suhteellinen etäisyys olkapääteipistä saadaan tämän jälkeen:

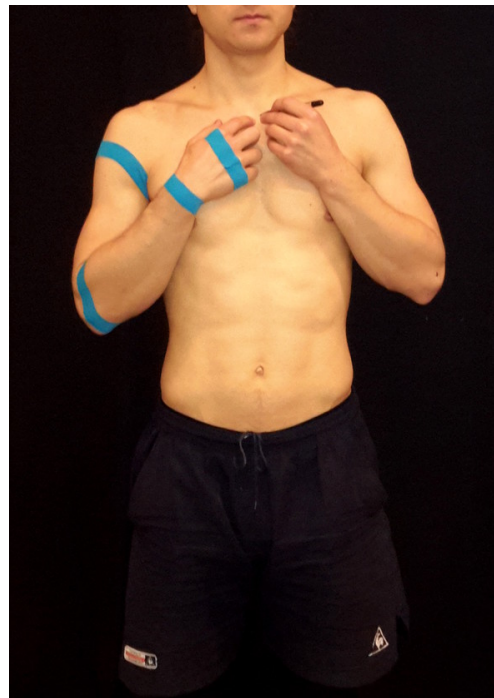
$$12,3 \text{ cm} / (25 \text{ cm} - 2,6 \text{ cm}) \approx 54,9 \%$$



Kuva 14: Yläraajan teippimerkit. Pään massakeskipistemerkki kiinnitettiin keskelle korvannipukkaa (lat. *tragus*). Punaiseen hiuspantaan kiinnitettiin ylimääräiset teippimerkit, joita oli mahdollista käyttää apuna tilanteissa, joissa korvannipukkamerkki ei ollut videokuvassa näkyvissä.



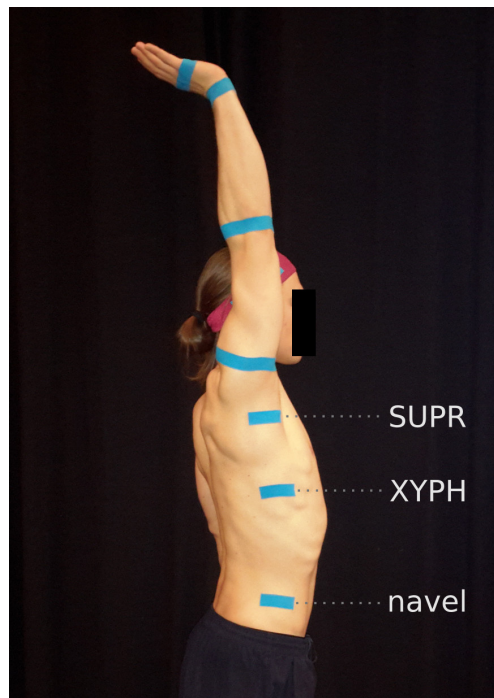
15.1. Rintalastan (lat. *sternum*) kaaviokuva. Referenssipiste (SUPR) sijaitsee kaulakuopan (lat. *incisura jugularis sternalis*) alimmassa (kaudaalisimmassa) pisteessä rintalastan kahvan (lat. *manubrium*) yläpinnalla. XYPH-piste sijaitsee rintalastan ja miekkalisäkkeen (lat. *processus xiphoideus*) välisen uurteen keskipisteessä.



15.2. Kaulakuopan palpoinnointi ja merkitseminen. Piste tuntuu noin sormenpään kokoiselta painaumalta solisluiden ja rintalastan välissä.

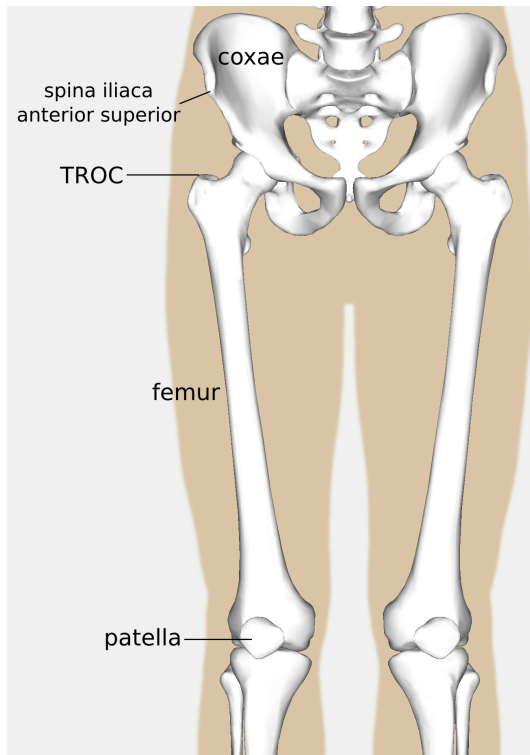


15.3. Miekkalisäkkeen palpoinnointi ja merkitseminen. Piste löytyy rintalastan alareunasta palpoinnolla alaspäin pitkin rintalastaa.

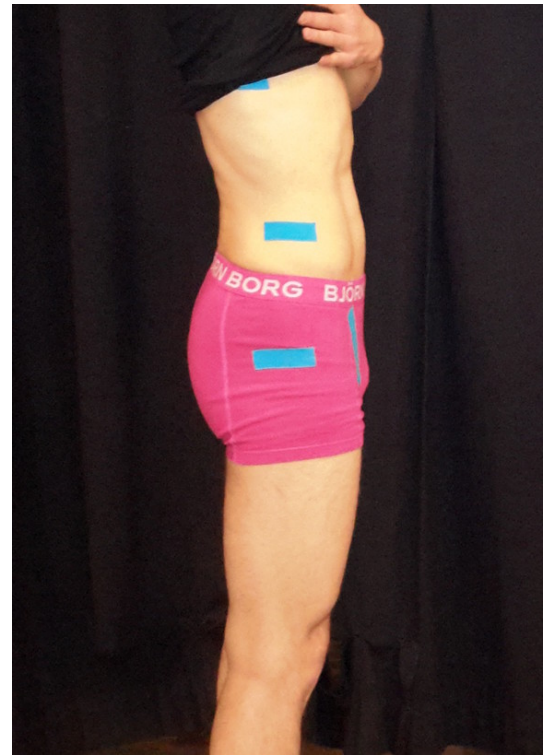


15.4. Valmiit yläruumiin lateraalimerkit. Vertaa samojen pisteiden merkkeihin kehon etupuolella kuvassa 19.

Kuva 15: Yläruumiin referenssipisteiden sijaintien määrittäminen ja merkitseminen.



16.1. Reiden ja lantion kaaviokuva. Suoliluun etu-yläkärki (lat. *spina iliaca anterior superior*), polvilumpio (lat. *patella*), reisiluu (lat. *femur*), lantioluu (lat. *coxae*). Referenssipiste (TROC) sijaitsee ison sarvennoisen ylimmässä lateraalisessa kärjessä.



16.2. Lateraalinen lantiomerkki asetettiin ison sarvennoisen yläkärjen kohdalle, silmämääräisesti lantion keskikohtaan etu-takasuunnassa.



16.3. Kehon etupuolen lantiomerkit asetettiin lateraalisen merkin kanssa samalle korkeudelle suoliluun etuyläkärjestä kohti jalkoväliä.

Kuva 16: Lantiomerkkien sijainnit.



17.1. Polvilumpion reunojen palpointi.

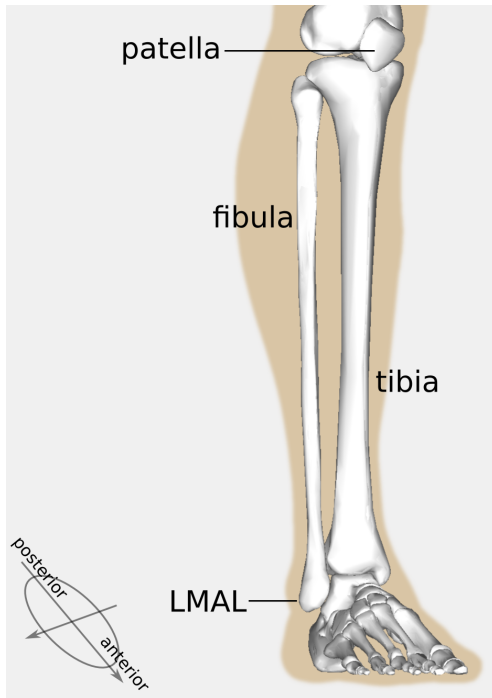


17.2. Polvilumpion reunojen merkitseminen.



17.3. Polvinivelen keskikohdan merkitseminen:  
kaksi kolmannesta polvilumpion korkeudesta.

Kuva 17: Polvimerkin sijainnin määrittäminen ja merkitseminen.



18.1. Kaaviokuva oikeasta jalasta, henkilö kääntynyt 45° vastapäivään. Pohjeluu (lat. *fibula*), sääriluu (lat. *tibia*), polvilumpio (lat. *patella*). Referenssipiste (LMAL) sijaitsee ulkokehräsen (lat. *malleolus lateralis*) lateralisimmassa pisteessä.



18.2. Ulkokehräsen palpinti.

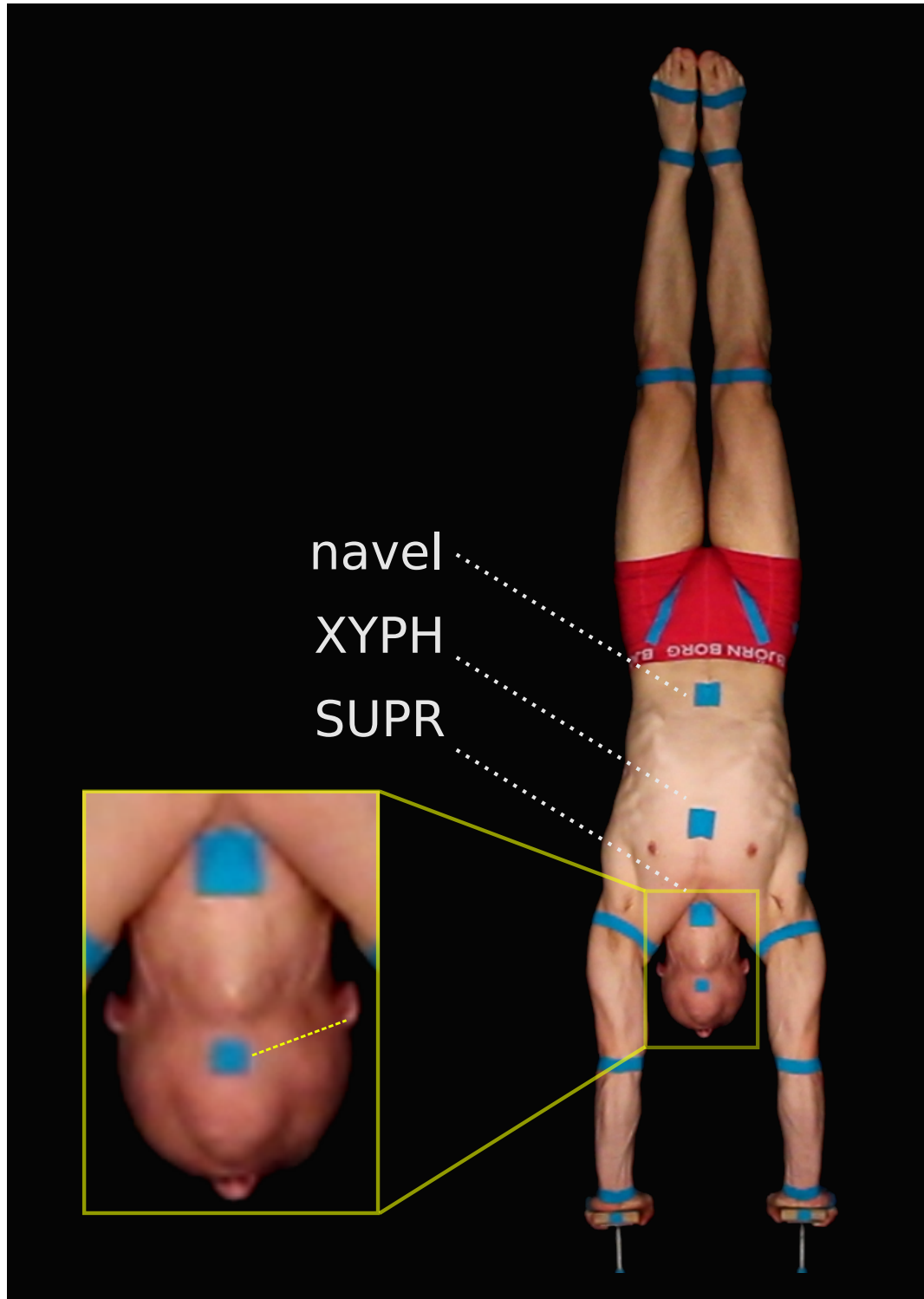


18.3. Ulkokehräsen merkitseminen tussilla.



18.4. Valmiit nilkka- ja jalkaterämerkit. Jalkaterämerkki teipattiin pikkurvarpaan tyven kohdalle kohtisuoraan jalkaterän pitkittäistä akselia vastaan.

Kuva 18: Nilkka- ja jalkaterämerkin tekeminen



Kuva 19: Kehon etupuolen merkit. Pään painopistemerkki siirrettiin frontaalitasoon leuan alle silmämääräisesti korvannipukkamerkin mukaisesti. Vertaa navan (engl. *navel*) ja rintalastan (XYPH ja SUPR) merkkejä kuvan 15.4 lateraalimerkkeihin.

### 4.3 Pisteiden seuraaminen

Työtä varten kirjoitettiin C++ -ohjelmointikielellä tietokoneohjelma, jonka tarkoitus oli seurata puoliautomaattisesti videolla näkyviä kineesioteippimerkkejä. Ohjelmassa käytettiin hyväksi OpenCV-ohjelmakirjastoa videon käsittelyyn, kuvien manipulointiin ja pelkistetyn visuaalisen käyttöliittymän toteuttamiseen[57]. Ohjelman avulla oli mahdollista analysoida suuri määrä videoita ilman liiallista manuaalista työtä. Lisäksi videoihin oli mahdollista lisätä objekteja kuten tekstiä ja piirroksia, jotka helpottivat videolla näkyvän käsinseisontasuorituksen silmämääräistä arviointia.

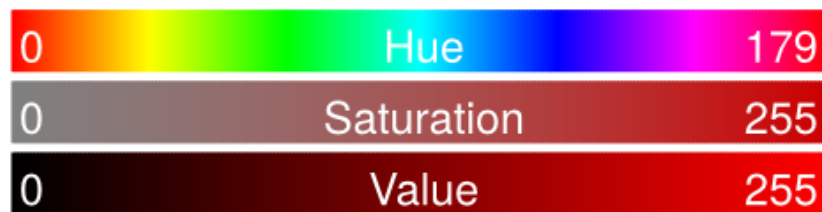
Ohjelma käsittelee kerrallaan yksittäistä kuvaruutua (engl. *frame*) videosta ja etsii siitä yhtenäisiä, kineesioteipin värisiä alueita. Alueisiin mahdollisesti jäävät pienet, muutaman pikselin kokoiset aukot korjataan alueeseen kuuluviksi. Sopivan kokoiset erilliset alueet listataan ja niille lasketaan geometriset painopisteet (engl. *centroid*), jotka vastaavat visuaalisesti alueiden keskipisteitä. Listaa painopisteistä verrataan kineesioteippien sijainteihin edellisissä kuvaruuduissa ja pisteiden etäisyyksien perusteella päätellään, mikä painopiste vastaa mitään kineesioteippiä. Kun jokaisen kineesioteipin sijainti on onnistuneesti selvitetty, siirrytään seuraavaan kuvaruutuun. Videon ensimmäisessä kuvaruudussa teippien sijainnit asetetaan manuaalisesti.

Kuvaruudun pikselien värejä käsiteltiin HSV-väriavaruudessa<sup>7</sup>. Numeerinen arvo *värisävylle* ilmaisee kansantajuisesti pikselin värin: esim. sininen, vihreä, violetti. *Värikylläisyys* määrittelee, onko pikselin väri lähempänä harmaata vai puhdas ja voimakas. *Arvo* kertoo pikselin kirkkauden asteikolla, jonka toisessa päässä on väri itse, toisessa päässä musta.[58, s. 79–80] Väriavaruuden komponentteja on havainnollistettu kuvassa 20.

Käsittelyn ensimmäisessä vaiheessa alkuperäisestä kuvaruudusta valittiin kineesioteippejä edustavat pikselit, joiden HSV-arvot olivat tietyllä välillä. Taulukossa 1 on esitetty kineesioteippipikselien keskimääräiset väriarvot sekä valinnassa käytetyt väriarvot. Kuvausolosuhteiden optimoinnilla pikselien valinnassa käytetyt arvovälit pystyttiin asettamaan

<sup>7</sup> Sama kuin HSB-väriavaruus: **Hue** (suom. värisävy), **Saturation** (värikylläisyys), **Value/Brightness** (arvo/kirkkaus)





Kuva 20: HSV-väriavaruuden komponentit. *Hue* ilmaisee värisävyn (arvo välillä 0–179), *Saturation* värikylläisyyden (arvo välillä 0–255, harmaasta puhtaaseen väriin) ja *Value* kirkkauden (arvo välillä 0–255, mustasta kirkkaaseen).

	H	S	V
OpenCV:n koko asteikko	0 – 179	0 – 255	0 – 255
Kineesioteipit keskimäärin	95 – 100	165 – 230	100 – 240
Pikselien valinnan raja-arvot	90 – 170	40 – 255	60 – 255

Taulukko 1: Kineesioteippien valinnassa käytetyt HSV-arvot.

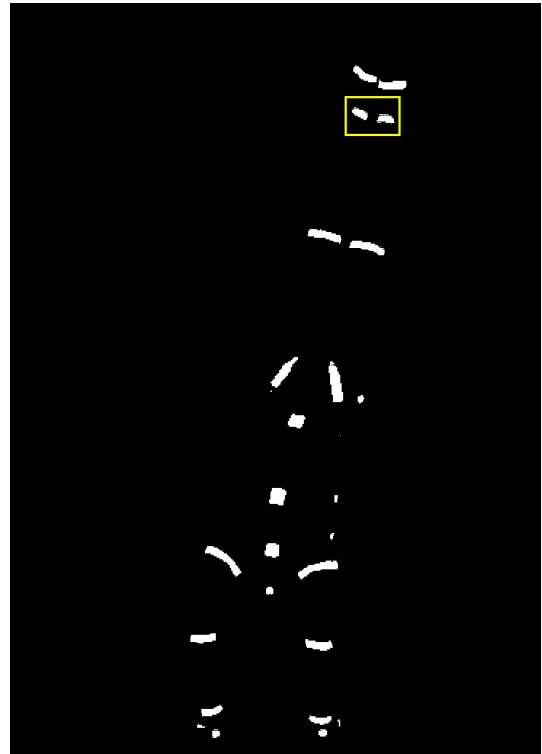
hyvin laajoiksi: Musta taustaverho ja alustan mustat osat pystyttiin sulkemaan pois pienten kirkkausarvojensa perusteella. Koehenkilön iho ja alushousut sekä alustan punaiset ja valkoiset osat erottuivat puolestaan värisävyarvonsa puolesta kineesioteipeistä. Ainoastaan alushousujen vyötärönauhan teksti aiheutti valinnassa muutamia virhepikseleitä, jotka oli kuitenkin helppo jättää huomiotta käsittelyn myöhemmässä vaiheessa.

Seuraavassa vaiheessa alustavaan pikselien valintaan tehtiin tarvittaessa pieniä korjauksia. Silloin tällöin kineesioteippejä edustaviin pikselialueisiin jäi pieniä “reikiä”. Tietyissä tapauksissa puuttuvat pikselit olisivat jättäneet yhteen kuuluvat pikselialueet kahdeksi erilliseksi alueeksi, mikä olisi hankaloittanut jatkokäsittelyä. Puuttuvien pikseleiden lisäämiseksi käytettiin *matemaattisen morfologian* keinoja. *Morfologinen sulkeminen* on kuvankäsittelyoperaatio, joka täyttää kuvassa mahdollisesti esiintyvät kapeat alueet [59, s. 20–22]. Kuvassa 21 on havainnollistettu alustavaa pikselien valintaa, ns. *kynnystystä* (engl. *thresholding*), sekä morfologista sulkemista.

Puuttuvat pikselit olivat usein seurausta huonoista kuvaolosuhteista: valon määrästä, taustan väristä ja kameran asetuksista. Tällöin alkuperäisessä pikselien valinnassa käytettyjä raja-arvoja ei pystytty asettamaan kattamaan kaikkia haluttuja pikseleitä. Toisin sanoen, vä-



21.1. Alkuperäinen kuvaruutu, jossa siniset kineoteippimerkit ovat selvästi erotettavissa.



21.2. Kynnystetty kuva, jossa valittujen raja-arvojen sisältämät pikselit on merkitty valkoisella; muut mustalla. Keltaisella on merkitty suurennosalue, joka on esitetty kuvassa 21.3.



21.3. Suurennos kynnystetystä kuvaruudusta. Nilkan merkeissä on kynnestyksen jäljiltä yhden pikselin levyisiä "aukkoja".



21.4. Morfologinen sulkeminen on korjannut virheelliset pikselit täyttämällä kynnestyksen jättämät kapeat mustat alueet.

Kuva 21: Videokuvan prosessointi. Kynnystys väriarvon mukaan ja morfologinen sulkeminen.

riarvovälien kasvattaminen olisi lisännyt liian voimakkaasti virheellisesti valittujen pikselien määrää. Myöhemmässä vaiheessa kuvausolosuhteet pystyttiin aikaisempien kokemusten perusteella optimoimaan paremmin, jolloin puuttuvia pikseleitä ei juurikaan esiintynyt ja morfologisesta sulkemisesta oli mahdollista luopua.

Edellisten vaiheiden lopputuloksena oli binäärikuva, jossa valitut alueet olivat valkoisia ja tausta musta. Binäärikuvan pohjalta muodostettiin lista, jossa jokaista aluetta vastasi tietorakenne, joka sisälsi alueen pikselien koordinaatit. Alueille laskettiin pinta-alat ja alueiden sisältämien pikseleiden määrä. Tietojen perusteella osa alueista voitiin sulkea pois jatkokäsittelystä: esimerkiksi vain muutaman pikselin kokoiset alueet voitiin hylätä, koska ne eivät todennäköisesti kuuluneet kineesioteippeihin. Jokaiselle sopivan kokoiselle alueelle laskettiin geometrinen painopiste (engl. *centroid*), joka edusti kineesioteipin keskipisteen sijaintia.

Jokaisen seuratun kineesioteipin seuraava *odotusarvoinen* sijainti laskettiin edellisistä sijainneista. Tapauksia oli kaksi: joko sijainti oli tiedossa vain edellisessä kuvaruudussa tai se oli tiedossa ainakin kahdessa edellisessä ruudussa. Esimerkiksi koko videon toisessa kuvaruudussa vain pisteen edellinen sijainti tiedettiin. Tällöin seuraavan sijainnin paras arvaus oli edellinen sijainti itse. Jos edellisen sijainnin lisäksi tiedettiin sitä edellinen sijainti, käytettiin odotusarvon laskemisessa tasaisen nopeuden mallia: pisteen oletettiin siirtyvän yhtä paljon samaan suuntaan, kuin se siirtyi kahden edellisen kuvaruudun välillä. Lopuksi kineesioteipin sijaintiin nykyisessä kuvaruudussa yhdistettiin lähin odotusarvoinen sijainti.

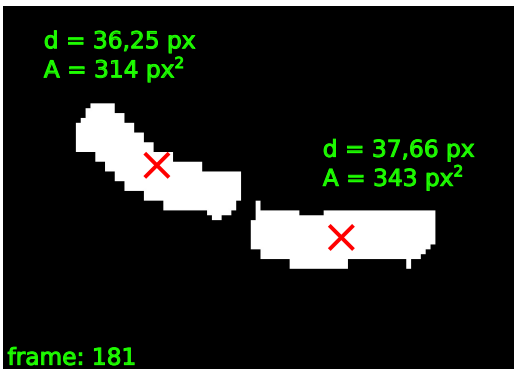
Algoritmin yleisin kompastuskivi oli tilanne, jossa kaksi toisiaan lähellä olevaa kineesioteippiä tuli virheellisesti yhdistetyksi yhdeksi alueeksi. Näin saattoi käydä esimerkiksi oikean ja vasemman jalan jalkaterien teipeille, kun koehenkilö toi jalat yhteen; morfologinen sulkeminen lisäsi virhetilanteita entisestään. Tällöin ohjelman käyttäjän oli asetettava seurattavat pisteet manuaalisesti hiiren avulla. Virhetilanteet tunnistettiin seuraamalla kunkin pisteen edustaman kineesioteippialueen kokoa: pinta-alaa ja läpimittaa. Jos pinta-alan tai läpimitan suhteellinen tai absoluuttinen muutos kahden kuvan välillä oli liian suuri, ohjelma antoi käyttäjälle mahdollisuuden manuaalisesti korjata automaattisesti lasketun pisteen sijainti (kuva 22).



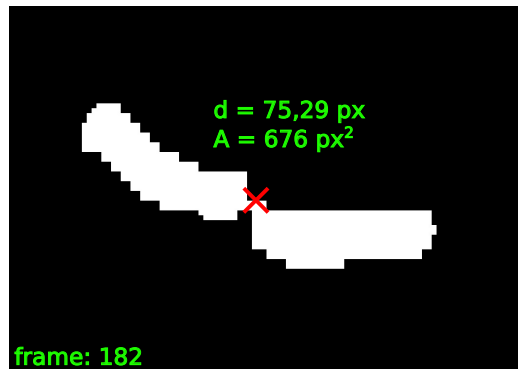
22.1. Alkuperäinen kuvaruutu, jossa jalkaterän teippimerkit ovat lähes kiinni toisissaan.



22.2. Kynnystetty kuva. Keltaisella merkitty kuvien 22.3 ja 22.4 esittämä suurennosalue.



22.3. Alkuperäisestä kuvaruudusta kynnystetyssä kuvassa merkkien edustamat valkoiset pikselialueet ovat juuri ja juuri erilliset. Kuvaan on merkitty alueiden läpimitat ( $d$ ) ja pinta-alat ( $A$ ) sekä punaisella rastilla keskipisteet (geometriset painopisteet).



22.4. Seuraavassa kuvaruudussa merkit ovat siirtyneet lähemmäksi toisiaan, jolloin kynnystetyssä kuvassa pikselialueet ovat sulautuneet yhteen. Tällöin myös seurattavat pisteet (vasen ja oikea jalkaterä) sulautuvat virheellisesti yhteen. Muun muassa kuvatun kaltaiset virhetilanteet pystyttiin kuitenkin tunnistamaan pikselialueen äkillisestä läpimitan ( $d$ ) ja pinta-alan ( $A$ ) muutoksesta. Esimerkiksi vasemman jalkateräteipin muutokset:

$$d: 36,25 \text{ px} \rightarrow 75,29 \text{ px} \quad (+108\%)$$

$$A: 314 \text{ px}^2 \rightarrow 676 \text{ px}^2 \quad (+115\%)$$

Kuva 22: Virhetilanteiden tunnistaminen pisteiden seurannassa.

#### 4.4 Massakeskipisteen laskeminen

Kehon referenssipisteiden perusteella voitiin laskea kehonosien massakeskipisteet, ja niiden pohjalta edelleen koko kehon massakeskipiste. Massakeskipisteiden laskemisessa käytettiin Levan referenssipisteitä ja arvoja[53, 55]. Kehonosien massakeskipisteiden sijainnit suhteessa referenssipisteisiin on esitetty kuvassa 23. Käden massakeskipisteen määrittäminen on esitetty kuvassa 9. Koko kehon massakeskipiste  $\vec{s}$  laskettiin painotettuna vektorisummana:

$$\vec{s} = \frac{\sum m_i \vec{t}_i}{\sum m_i} = \sum \frac{m_i}{M} \vec{t}_i = \sum \hat{m}_i \vec{t}_i$$

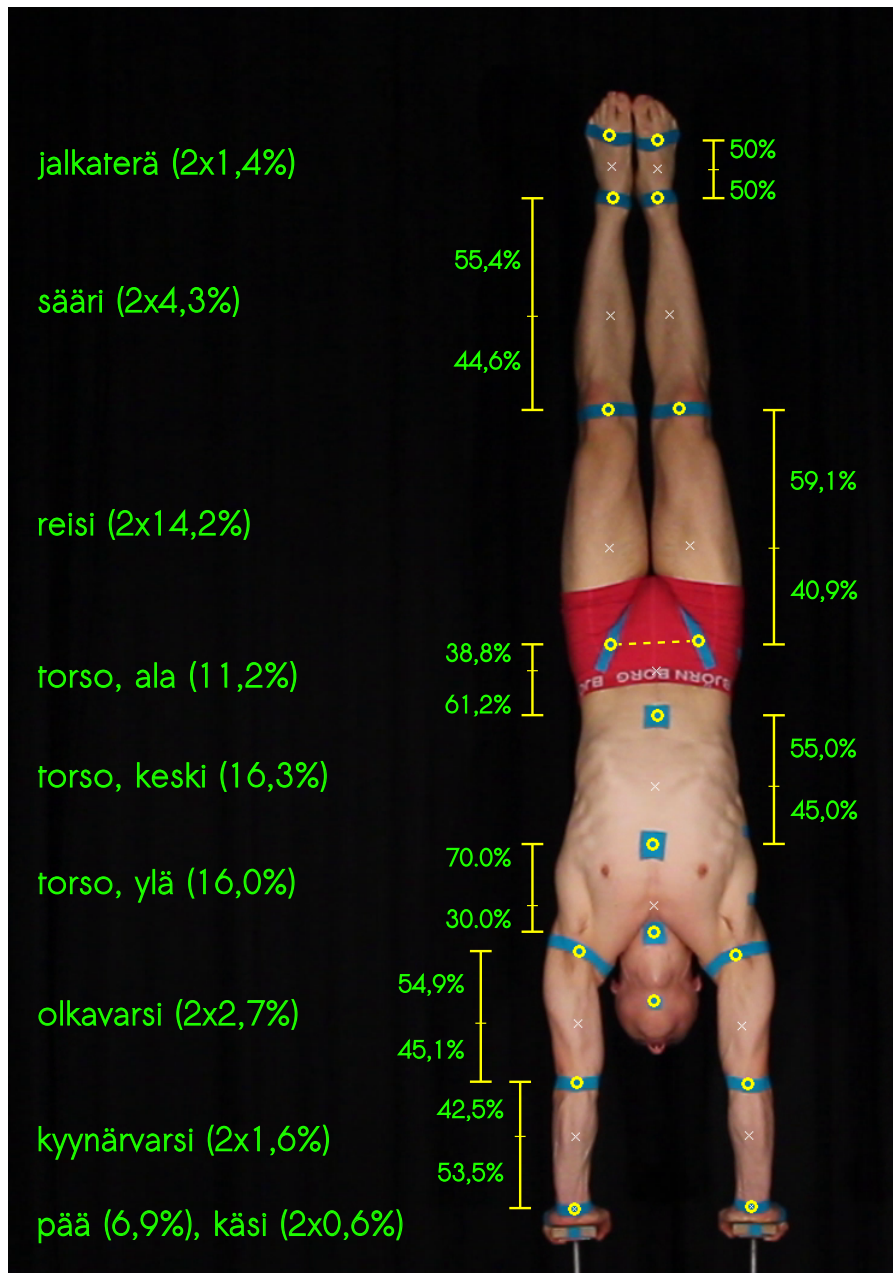
missä  $m_i$  on kehonosan  $i$  massa;  $\vec{t}_i$  on kehonosan  $i$  massakeskipisteen sijainti paikkavektorina;  $M = \sum m_i$  on koko kehon massa ja täten  $\hat{m}_i$  kehonosan  $i$  suhteellinen massa. Komponentteihin jaettuna saadaan:

$$s_x = \sum \hat{m}_i t_{ix}$$

$$s_y = \sum \hat{m}_i t_{iy}$$

missä  $s_x$  ja  $s_y$  ovat koko kehon massakeskipisteen x- ja y-koordinaatit, ja  $t_{ix}$  ja  $t_{iy}$  kehonosan  $i$  massakeskipisteen x- ja y-koordinaatit.

Käsien hyvin pienestä massasta ( $2 \times 0,6\%$  koko kehon massasta) johtuen osassa painopisteanalyysejä käytettiin yksinkertaistettua mallia: koko käden massa kiinnitettiin laskutoimituksissa rannemerkin kohdalle. Myös jalkaterien suhteellinen massa on hyvin pieni:  $2 \times 1,4\%$  koko kehon massasta. Jalkaterän massakeskipisteen määrittämisessä käytettiin Levan aineiston tukena silmämääräistä arviointia. Tähän päädyttiin osaltaan, koska Leva käytti referenssipisteinä kantapäätä ja pisimmän varpaan (1. tai 2. varvas) kärkeä, joiden suhteellinen sijainti muuttuu nilkan ojennuksessa (plantaarifleksiossa) käsinseisonta-asennossa. Analyysivaiheessa kokeiltiin myös jalkaterien osalta yksinkertaistettua mallia, jossa koko jalkaterän massa kiinnitettiin laskutoimituksissa nilkkamerkin kohdalle.



Kuva 23: Kehonosien suhteelliset massat ja massakeskipisteiden sijainnit. Vasemmalla kehonosien suhteelliset osuudet koko kehon massasta. Oikealla kehonosien massakeskipisteiden sijainnit suhteellisina etäisyyksinä referenssipisteistä.[53, 55].

Vaikka käsien massa kiinnitettiin ranteiden kohdalle ja jalkaterien massa nilkkojen kohdalle, ei tällä ollut merkitystä koko kehon massakeskipisteen arvioidulle sijainnille. Yksinkertaistetulla mallilla lasketun massakeskipisteen sijainti erosi videokuvassa alkuperäisestä pisteestä korkeintaan yhden pikselin pysty- ja vaakasuunnassa. Suurin virhe vastasi täten alle 3 millimetriä; keskimäärin virhe oli alle 2 millimetriä. Yksinkertaistetun ja normaalin mallin avulla laskettujen massakeskipisteiden hyvin tarkkaa yhtenevyyttä on havainnollistettu videoissa 1 ja 2.

Kehonosien ja koko kehon massakeskipisteen laskemisessa oli useita tuntemattomia virhelähteitä, jotka jätettiin työssä huomiotta. Kehonosien referenssipisteiden määrittäminen palpoimalla tehtiin ilman ammattilaisen apua. Kehonosien massakeskipisteiden ja suhteellisten massojen kirjallisuusarvojen soveltuvuutta koehenkilölle ei työn puitteissa ollut mahdollisuutta varmistaa. Lisäksi kameran tallentama kuva ei erilaisista vääristymistä johtuen koskaan vastaa täydellisesti reaalia maailmaa[60, s. 27–57].

On kuitenkin oletettavaa, että mahdolliset virheet varsinkin kehonosien inertia-parametreissa olivat luonteeltaan systemaattisia, mikä tämän työn tavoite huomioon ottaen oli hyväksyttävää. Suoritusten fysiikan havainnollistamisen kannalta esimerkiksi täydellisen tarkka kehon massakeskipisteen sijainti ei ole oleellista. Tärkeämpää on kehonosien sijaintien, nopeuksien ja kulmien muutokset, erot ja vaihtelut.

<https://www.youtube.com/watch?v=vMHd1HDYZDk>



Video 1: Normaalin ja yksinkertaistetun mallin massakeskipisteet: taittopressi ja -lasku.

**Frame 200:** Ero normaalilla ja yksinkertaistetulla mallilla laskettujen massakeskipisteiden välillä on korkeintaan yksi pikseli vaaka- ja pystysuunnassa; suurimman osan ajasta vähemmän. Normaalin mallin massakeskipistettä on merkitty valkoisella paksulla rastilla; yksinkertaistetun mallin massakeskipistettä sinisellä ohuella rastilla. Lisäksi videossa on eritelty massakeskipisteen vaaka- ja pystykomponentti. Oikeassa alakulmassa on esitetty massakeskipisteiden etäisyys ja etäisyyden x- ja y-komponentit pikseleinä. Yksi pikseli videossa vastaa noin 2 millimetriä luonnossa.

<https://www.youtube.com/watch?v=8zDbwpEGJ6M>



Video 2: Normaalin ja yksinkertaistetun mallin massakeskipisteet: painonsiirrot sormille.

Merkinnät kuten videossa 1.



## 5 Tulokset

Työn ensisijaisena tavoitteena oli käsinseisannon analysointiin soveltuvan, käytännöllisen ja edullisen *menetelmän tutkiminen*. Toissijaisesti tarkasteltiin menetelmällä tuotetun aineiston laatua, sekä hyödyllisyyttä käsinseisannon tutkimuksen ja opetuksen apuna. Täten työn tulososio on kaksijakoinen: Ensimmäisessä osassa arvioidaan sekä menetelmän käytännöllisyyttä ja käyttökelpoisuutta että haasteita ja ongelmia. Toisessa osassa esitellään työn aikana luotuja videoita ja pohditaan niistä saatua tietoa suoritusten arvioimisessa käsinseisontatekniikan kannalta.

### 5.1 Menetelmän käyttökelpoisuus

Työn tavoitteena oli kehittää analyysimenetelmä, joka on edullinen ja käytännöllinen. Kuvauksissa käytetyn laitteiston kalleimmat osat olivat järjestelmäkamera ja valonheittimet, joiden yhteishinta on vähintään satoja euroja. Toisaalta tehtävään soveltuvia järjestelmäkameroita on monesti mahdollista lainata; toisin kuin esimerkiksi voimalevyantureita ja EMG-mittauslaitteita. Valaisimina voi ammattimaisten näyttämöheittimien sijaan käyttää esimerkiksi remonttivaloja tai mahdollisuuksien mukaan luonnonvaloa. Tässä työssä kuvaukset suoritettiin tilassa, jossa luonnonvalon käyttäminen ei ollut mahdollista.

Koehenkilön valmistelussa kuvaukseen ei tarvita kalliita välineitä. Rulla (5 cm × 5 m) ki-neesioteippiä maksaa alle kymmenen euroa ja riitti koehenkilön teippaamiseen kahtena kuvauspäivänä. Tussimerkkien horisontaalisessa siirtämisessä käytetty laserosoitin (kuva 12.2) maksaa parikymmentä euroa eikä ole välttämätön; tehtävään soveltuu myös pelkkä metrimitta. Työssä kirjoitettua tietokoneohjelmaa pystyy ajamaan lähes millä tahansa nykyaikaisella tietokoneella.

Tavoite menetelmän edullisuudesta saavutettiin odotetulla tavalla. Vaikka osa vaaditusta välineistöstä maksaa satoja euroja, on laitteita yleisesti ottaen hyvin saatavilla ilman uusia hankintoja.

Menetelmän käytännöllisyyttä tarkasteltaessa on huomioitava sekä videokuvausten toteuttaminen että jälkikäteen tehty videoiden prosessointi ja analysointi. Videoiden kuvaamisessa työläintä oli kuvauspaikan valmistelu ja teippimerkkien kiinnittäminen koehenkilöön. Koulun harjoittelusalista raivattiin ensin ylimääräinen välineistö, patjat ja matot, pois kuvauspaikan tieltä. Tämän jälkeen aseteltiin paikoilleen taustaverho, valaisimet ja kamera. Lisäksi ennen kuvauksia säädettiin kameran asetukset valaistusolosuhteiden mukaan. Kokonaisuudessaan kuvauspaikan valmisteluun kului aikaa noin puolitoista tuntia.

Koehenkilön teippimerkkien paikkojen määrittäminen ja teippien kiinnittäminen tehtiin erityisen huolellisesti. Kahdessa osassa tehtyjen teippausten (kts. luku 4.2) suorittamiseen käytettiin aikaa yhteensä noin puolitoista tuntia. Osa ajasta kului työvaiheiden raportoinnissa hyödynnettyjen valokuvien ottamiseen. Kokemuksen myötä tätä työvaihetta olisi varmasti mahdollista nopeuttaa. Lisäksi esimerkiksi jalkaterä- ja käsimerkkien sijainnin erityisen huolellinen määrittäminen oli turhaa: tarkka sijainti koko massakeskipisteen laskemisen kannalta on merkityksetön (kts. luku 4.4).

Työssä käytetyn PC:n komponentit ja käyttöjärjestelmä olivat AMD Athlon™ 7750 Dual-Core Processor 3000+ (2700MHz), 8GB muistia, Xubuntu Linux (64-bit). Kirjoitushetkellä tietokoneen prosessori oli jo yli kuusi vuotta vanha ja täten suorituskyyvyltään hyvin vaatimaton verrattuna uudempiin prosessoreihin. Käytetyllä laitteistolla pystyttiin analysoimaan teräväpiirtotarkkuuksista (1920x1080) videokuvaa noin 8 ruutua/s. Täten esimerkiksi minuutin pituisen videon (25 fps) automaattiseen analysointiin kului parhaassa tapauksessa vain noin 3 minuuttia:

$$60s \times 25 \frac{\text{ruutu}}{s} \div 8 \frac{\text{ruutu}}{s} \approx 190s$$

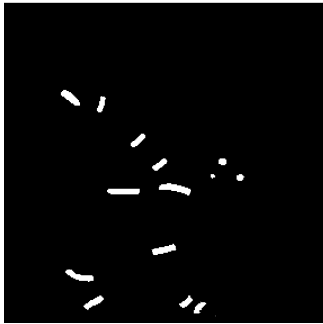
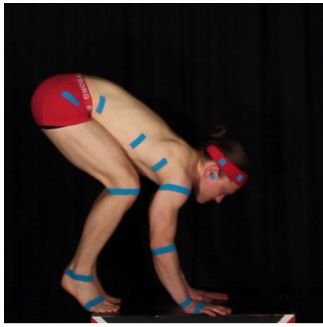
Varovaisen arvion mukaan nopeus olisi ohjelmakoodin optimoinnilla mahdollista nostaa yli 10 ruutuun sekunnissa. Reaaliaikainen analyysi – yli 25 ruudun prosessointinopeus sekunnissa – olisi vaatinut ohjelman perusteellisempaa uudelleen suunnittelua tai tehokkaamman tietokoneen.

Automaattisen teippimerkkien seurannan lisäksi videoiden prosessointi vaati manuaalista työtä. Tapauksia oli kolmenlaisia: Ennen automaattista seuranta teippimerkkien sijainnit oli alustettava manuaalisesti videon pysäytyskuvasta hiirellä klikkaamalla. Sijaintien alustukseen kului yhden videon osalta keskimäärin 10–20 sekuntia.

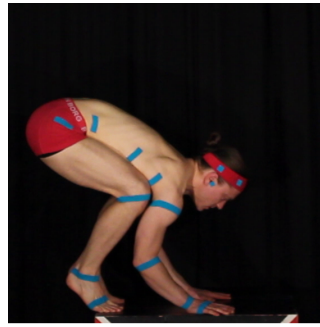
Silloin tällöin automaattinen seuranta kadotti seurattavan teippimerkin tai sekoitti kaksi merkkiä keskenään. Toisissa videoissa tällaisia tilanteita ei ollut ainuttakaan; toisissa kaksi teippimerkkiä saattoi olla pitkiäkin aikoja kiinni toisissaan, jolloin molempien merkkien sijainnit täytyi syöttää videolle käsin, mikä saattoi kestää useita minuutteja (kuva 24).

Työläimpiä osia videoiden prosessoinnissa olivat tilanteet, joissa jokin teippimerkeistä oli näkyvillä vain osan ajasta: Frontaalitason videoissa koehenkilön käsiteippimerkki ei kahdella kädellä seistessä ollut näkyvissä; yhdelle kädelle siirryttäessä merkki ilmestyi kuvaan lähellä rannemerkkiä. Automaattisen prosessoinnin yksinkertaisuuden vuoksi kuvatus kaltaiset tilanteet oli käsiteltävä manuaalisesti ruutu kerrallaan (kuva 25). Tällöin videon prosessointiin saattoi kulua 10–20 minuuttia ylimääräistä aikaa. Yksittäisen videon kokonaisprosessointiaika saattoi venyä yli puoleen tuntiin.

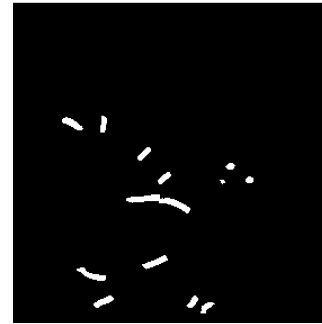
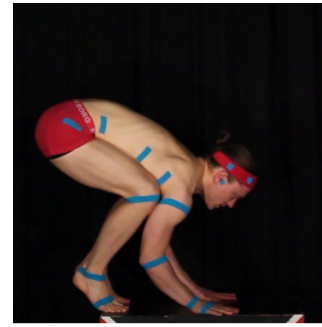
Käsinseisonta-asennossa, jossa pää käännetään dorsifleksioista kehon linjan mukaisesti käsien väliin, korvannipukkaan kiinnitetty teippimerkki jää käsivarren taakse piiloon kameralta. Tilanne on harvinainen, mutta ongelman — ja samankaltaisten ongelmien — ratkaisemiseksi liitteessä B pohditaan piiloon jäävän pisteen seuraamista kahden näkyvissä olevan pisteen avulla.



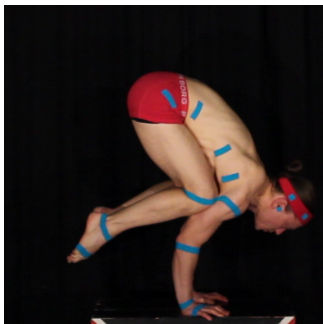
Ruutu 070: Koehenkilö on asettumassa niin sanottuun *norsukäsinseisonta-asentoon*.



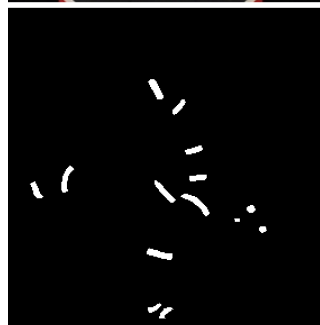
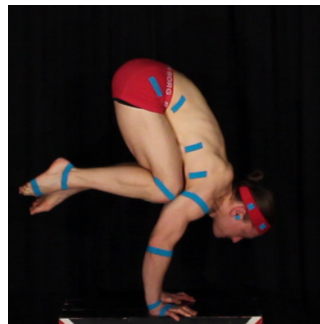
Ruutu 080: Polvi- ja olkapäämerkit lähestyvät toisiaan.



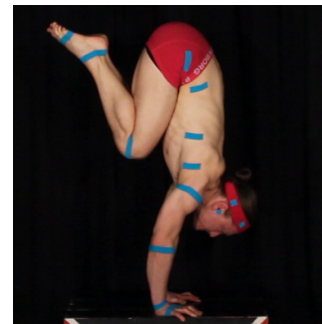
Ruutu 094: Polvi- ja olkapäämerkit sulautuvat yhteen, jolloin automaattinen pisteen seuranta ei enää erota polvea ja olkapäätä.



Ruutu 143: Teippimerkit ovat kiinni toisissaan koko *norsukäsinseisonn*an ajan.

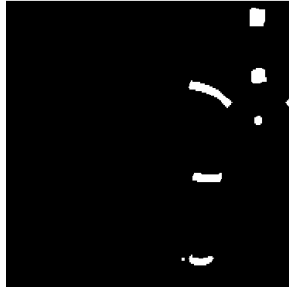
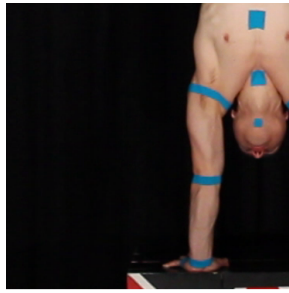


Ruutu 212: Koehenkilön punnertaessa ylös *käsinseisontaan* merkit alkavat erottua toisistaan.

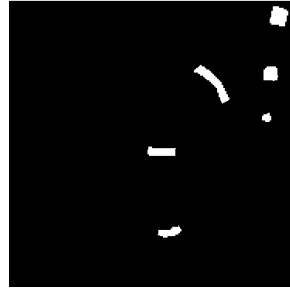
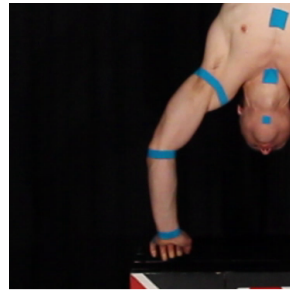


Ruutu 228: Koehenkilö on *keräkäsinseisonn*assa. Teippimerkit ovat erillä toisistaan ja automaattisen analyysin seurattavissa.

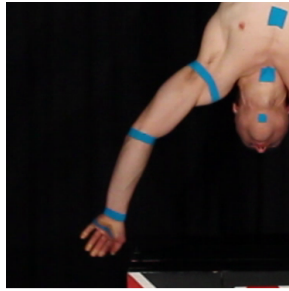
Kuva 24: Polvi- ja olkapäämerkin yhteen sulautuminen. Asennossa, jossa polvet lepäävät olkavarsien päällä, polven ja olkapään teippimerkit olivat kiinni toisissaan, jolloin merkien automaattinen erottaminen ja seuraaminen ei ollut mahdollista.



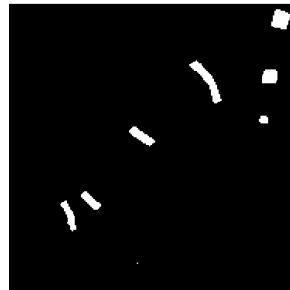
Ruutu 225: Käsi normaalissa asennossa. Käsiteipistä on näkyvissä ranteen vasemmalla puolella vain pieni osa, joka ei kuitenkaan edusta koko käsiteipin keskikohtaa.



Ruutu 289: Käsi irtoamassa alustasta. Käsiteippi ei ole näkyvissä ollenkaan.



Ruutu 293: Käsi irronnut alustasta, muttei kokonaan auennut: käsiteipistä on näkyvissä vain pieni osa.



Ruutu 299: Käsi auennut kokonaan, jolloin merkin automaattinen seuraaminen on mahdollista muutaman ruudun ajan.

Kuva 25: Käsimerkin näkyvyys käden irroituksessa alustasta. Videon ruutukaappauksista ilmenee, kuinka käsimerkin sijaintia pystyttiin seuraamaan automaattisesti ainoastaan, kun käsivarsi oli ojennettu alaviistoon ja kämmen oli avattu. Muutoin käden teippimerkki ei joko näkynyt kameralle tai sen näkyvä osa ei vastannut käden keskikohtaa, jolloin käden sijainti oli arvioitava ja syötettävä manuaalisesti.

Kun jokaisen teippimerkin sijainti koko videolla oli tallennettu, voitiin pisteistä laskea käsinseisontasuorituksen analysoimiseksi muita suureita: kehonosien massakeskipisteet, koko kehon massakeskipiste, kehonosien nopeusvektorit (suunta ja vauhti) ja kehonosien väliset kulmat. Laskenta tehtiin eräajoina erillään videon prosessoinnista, ja siihen käytettiin GNU Octave -laskentaohjelmistoa[61]. Videon päälle piirretyt merkinnät kuvattiin tekstitiedostossa, jonka luominen ja työstäminen vei usein huomattavasti enemmän aikaa kuin videon esiprosessointi teippimerkkien sijaintien määrittämiseksi.

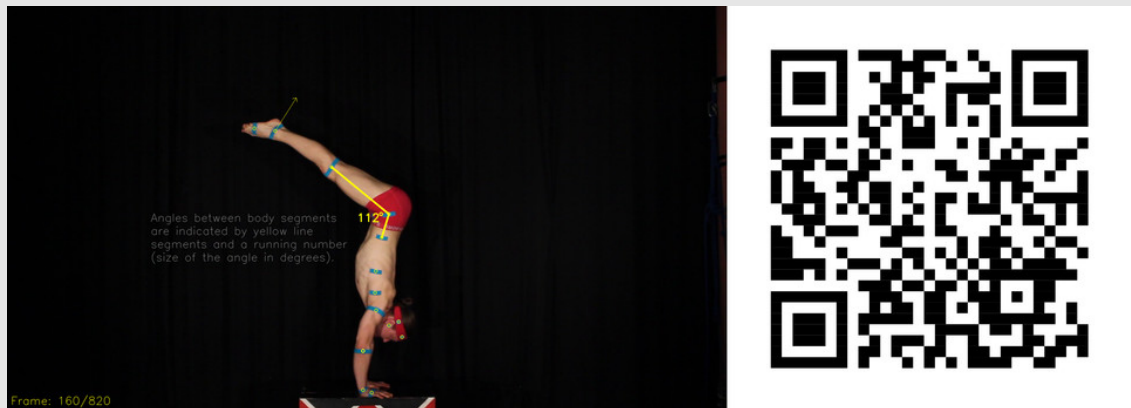
## 5.2 Massakeskipiste ja sen pystysuora projektio

Kehon massakeskipisteen lisäksi videoissa seurattujen referenssipisteiden pohjalta pystytettiin havainnollistamaan muun muassa nivelkulmia ja kehonosien suhteellisia nopeuksia. Videossa 3 on havainnollistettu työssä käytettyjä merkintätapoja.

Pystyssä pysäkkeen käsinseisojan tulee pystyä pitämään massakeskipisteensä käsiensä rajaaman tukipinnan yläpuolella. Työn nimenomainen lähtökohta oli kehonosien ja koko kehon massakeskipisteen sijainnin määrittäminen ja havainnollistaminen videoituissa käsinseisontasuorituksissa. Massakeskipisteen lisäksi videoihin merkittiin sen pystysuora projektio tukipinnan eli käsien tasolla.

Kahden käden käsinseisonnassa tasapainon hallinnan vaikeus ilmenee useimmiten etutakasuuntaisena huojuntana. Sivuttaisissa painonsiirroissa ja sivutaitoissa massakeskipisteen kontrollointi vaikeutuu myös sivusuunnassa. Videolla 4 on havainnollistettu massakeskipisteen sijaintia taittopressin (engl. *pike press*) ja ns. *mexican*-käsinseisonnassa aikana. Koko kehon massakeskipisteen lisäksi on havainnoitu alaraajojen massakeskipisteen liikerataa ja vaikutusta tasapainoon.

<https://www.youtube.com/watch?v=WyXgErTYey8>



Video 3: Videoilla käytettyjen merkintöjen selitykset.

**Frame 50:** Automaattisesti seurattuja teippimerkkejä on korostettu keltaisilla ympyröillä.

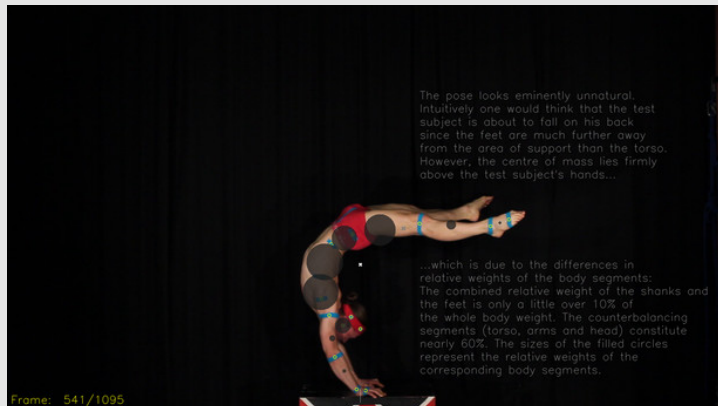
**Frame 123:** Nopeusvektorit on merkitty keltaisilla nuolilla, joiden pituus on verrannollinen nopeuden suuruuden kanssa.

**Frame 160:** Kehonosien väliset kulmat on merkitty murtoviivalla ja kulman suuruuden (asteina) kertovalla tekstillä.

**Frame 230:** Kehonosien massakeskipisteet on merkitty valkoisilla rasteilla.

**Frame 330:** Koko kehon massakeskipiste on merkitty isommalla valkoisella rastilla. Sen vertikaalinen projektio on merkitty viivalla, joka havainnollistaa, pysyykö massakeskipiste tukipinnan yläpuolella.

<https://www.youtube.com/watch?v=4bpU88F71vM>



Video 4: Taittopressi ja mexican-käsinseisonta.

**Frame 90:** Lantiokulma pidetään mahdollisimman pienenä, jotta jalkojen paino olisi mahdollisimman edessä. Kyynärpäiden ojennuksessa yläruumiin paino viedään (videossa) oikealle nojaamalla eteenpäin ja nostamalla yläruumista olkapäiden päälle.

**Frame 141:** Alaraajojen painopistettä on merkitty harmaalla rastilla. Taittopressin ensimmäisen puoliskon aikana painopiste liikkuu vain pystysuoralla linjalla. (Videossa) vasemmalle liikkuvia sääriä ja jalkateriä tasapainottaa alaselän ojentaminen, joka siirtää lantiota oikealle. Jalkojen irrotessa alustasta lantiokulma pysyy noin 65 asteessa siihen asti, että alaselkä on ojennettu. Käsivarret ovat kallistuneet eteenpäin (noin 95 asteen kulmassa). Kallistus tasapainottaa jalkojen painoa pitämällä yläruumiin edessä.

**Frame 170:** Selän ojennuksen jälkeen alkaa lantion ja käsivarsien kulman ojennus. Seuraavaksi alaraajojen massakeskipiste liikkuu hieman vasemmalle... ja koska koehenkilö ojentaa samaan aikaan käsivarsiensa kulmaa, koko kehon paino siirtyy hieman vasemmalle kämmensyrjiä kohti.

**Frame 184:** Alaraajojen massakeskipiste on äärimmillään vasemmalla taittopressin aikana, kun jalat ovat kuta kuinkin vaakatasossa. Massakeskipisteen poikkeama pystysuoralta linjalta on kuitenkin minimaalinen ja johtuu pikemminkin ranteiden kuin lantion ojentamisesta.

**Frame 382:** Mexican-käsinseisonta aloitetaan taivuttamalla selkä kaarelle, laskemalla jalkoja alaspäin ja työntämällä rintakehää vastakkaiseen suuntaan tasapainon ylläpitämiseksi.

**Frame 540–541:** Asento näyttää ilmeisen luonnottomalta. Koehenkilö näyttäisi olevan kaatumassa selälleen, koska jalat ovat huomattavasti kauempana (käsien muodostamasta) tukipinnasta kuin yläruumis. Massakeskipiste on silti käsien yläpuolella, ja asento on stabiili... mikä on selitettävissä kehonosien suhteellisten massojen eroilla: Säärien ja jalkaterien yhteen laskettu suhteellinen massa on vain hieman yli 10%. Vastapainona toimivien yläruumiin, käsien ja pään suhteellinen massa on lähes 60% koko kehon massasta. Videoon piirrettyjen ympyröiden koot vastaavat kehonosien suhteellisten massojen suuruuksia.

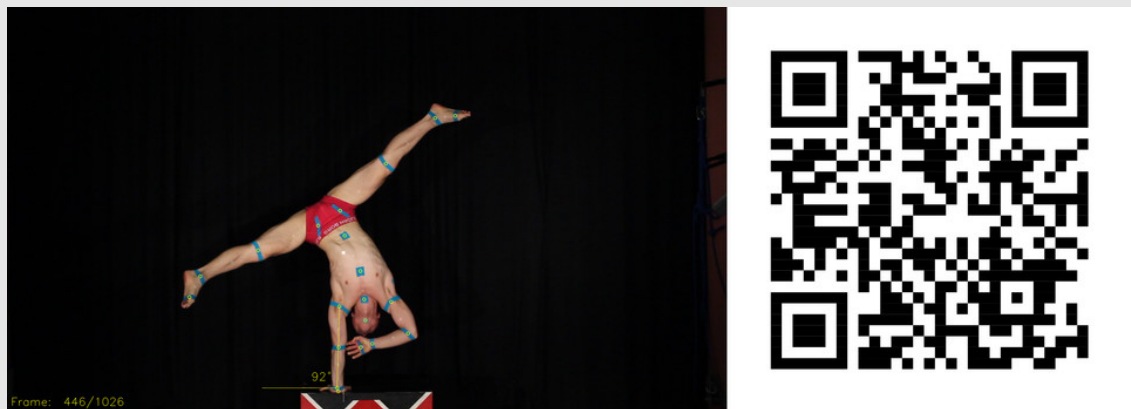


### 5.3 Yhden käden harjoitteet

Kirjoittajan päälajiopinnoissa yhden käden käsinseisannon harjoittelulla on ollut korostunut rooli. Toisesta lukuvuodesta lähtien huomattava osa harjoittelusta on valmistanut yhdellä kädellä seisomiseen. Harjoitteet ovat sisältäneet muun muassa erilaisia painonsiirtoja ja lyhyitä käden irrotuksia alustasta.

Videoissa 5, 6, 7, 8, 9, 10 ja 11 esitellään tavanomaisia liikkeitä ja asentoja yhden käden käsinseisannon harjoittelussa. Huomiota kiinnitetään erityisesti oikean ja vasemman käden suoritusten eroihin. Koehenkilön oikea käsi oli vasenta vahvempi, mikä näkyi silmämääräisesti suoritustekniikan ja liikepuhtauden eroina sekä yleisemmin eroina asentojen vakaudessa. Videoilta pystyttiin tunnistamaan myös kvantitatiivinen ero: Vakaammassa, oikean käden suorituksissa käsivarsi pysyi hieman sisäänpäin kallistuneena tai vähintään pystysuorassa. Vasen käsi oli altis kallistumaan ulospäin painonsiirron suuntaan.

<https://www.youtube.com/watch?v=mF3uUKCuHww>



Video 5: Painonsiirrot split-asennossa.

**Frame 160:** Painonsiirrossa oleellista on käsivarren hienoinen kallistus sisäänpäin, mikä vastaa kuvassa esitetyn käsivarren kulman pysymistä vähintään 90 asteessa.

**Frame 246:** Vasemmalla puolella koehenkilö epäonnistuu pitämään käsivarren sisäänpäin kallistuneena, mikä johtaa tasapainon järkkymiseen heti, kun oikea käsi irttaa hetkeksi alustasta.

**Frame 337:** Loput painonsiirrot sujuvat vakaasti.

<https://www.youtube.com/watch?v=SA8cYxlqSOw>

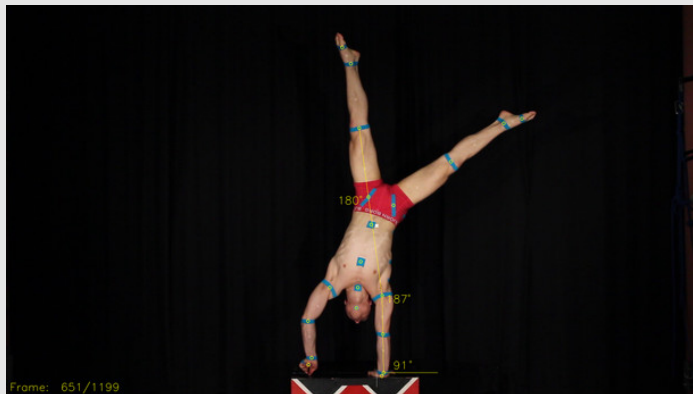


Video 6: Painonsiirrot sormille split-asennossa.

**Frame 300:** Käsivarren kulma pysyy yli 90 asteen koko painonsiirron ajan: asento on vakaa.

**Frame 540:** Vasemman puolen painonsiirrosta käsivarren kulma on hieman oikean puolen painonsiirtoa pienempi: asento on hieman alttiimpi horjahduksille.

<https://www.youtube.com/watch?v=HsDg-anyxc>



Video 7: Painonsiirrot sormille pienessä split-asennossa.

**Frame 500:** Videolla esitetty lantio-, olkapää- ja käsivarsikulma. Käsivarsikulman tulisi pysyä vähintään 90 asteessa. Olkapään hieman yli 180 asteen kulma näyttää tuottavan vakaan asennon. Lantio on likimain suorassa kulmassa (180 astetta).

**Frame 800:** Vasemmalle (heikommalle) kädelle siirryttäessä suurin ero on huomattavasti pienempi lantioikulma (alle 180 astetta). Käsivarsikulman putoaminen alle 90 asteen johtaa kehon painon nojautumiseen vasemmalle, mitä lantion virheellinen taittuminen kompensoi. Olkapääkulmassa ei ole eroa oikeaan puoleen.

<https://www.youtube.com/watch?v=PcunqRU2RkK>



Video 8: Painonsiirrot sormille klassisessa asennossa.

**Frame 314:** Oikea käsi pidetään noin 90 asteen kulmassa vaakatasoon nähden. Lisäksi kehon linjan tulee olla suora ylävartalosta jalkoihin: videolla suoraa linjaa on havainnollistettu murtoviivalla, joka kulkee rintalastan alaosan (lat. *processus xiphoideus*), lonkkaniveltä puolivälin ja nilkkamerkkien puolivälin kautta.

**Frame 584:** Vasemmalla puolella käsivarsi on kallistunut hieman ulospäin, mitä joudutaan kompensoimaan lantiota taittamalla. Vartalon linja ei ole suora, mikä huonontaa tasapainoa ja asennon näytävyyttä.

<https://www.youtube.com/watch?v=sTOsf0quPcc>



Video 9: Yhden käden käsinseisonta käsinseisontatapeilla.

**Frame 170:** Yhden käden käsinseisonnin vakaus riippuu käsivarren kulmasta. Yli 90 asteen kulma tekee asennosta vakaamman.

**Frame 171:** Olkapään ja lantion kulmat vaihtelevat enemmän jalkojen asennon mukaan.

<https://www.youtube.com/watch?v=PfeeY6JCS5c>



Video 10: Yhden käden käsinseisonta kylkitaitossa käsinseisontatapeilla.

**Frame 350:** Yhden käden kylkitaittoasennossa molempien alaraajojen paino viedään tukipinnan toiselle puolelle. Tämän tasapainottamiseksi yläruumista on painettava vastakkaiseen suuntaan. Tasapainotus ilmenee selvästi käsivarren kulmana (videolla 98 astetta), joka on huomattavasti suurempi kuin muissa yhden käden asennoissa, joissa jalat ovat jokseenkin symmetrisesti molemmin puolin tukipintaa.

<https://www.youtube.com/watch?v=i0J1-0bbHSc>



Video 11: Yhden käden käsinseisonta käsinseisontatapeilla, normaali ja kylkitaitto.

**Frame 100:** Video havainnollistaa eron käsivarren kulmassa oikean ja vasemman puolen välillä. Kulma on suurempi oikean käden varassa seistessä, ja täten asento vakaampi.

## 5.4 Hyppy, hidastusvideo ja liikeinterpolaatio

Luonteeltaan dynaamisemmista harjoitteista videoitiin hyppy taaksepäin käsinseisonnassa. Liikkeen haastavuus johtuu suurelta osin massakeskipisteen nopeasta liikkeestä etu-takasuunnassa. Kahden käden staattisissa asennoissa massakeskipisteen sijainnin vaihtelu etu-takasuunnassa on harvoin 5 cm:ä suurempi. Videoiden 12 ja 13 liikkeessä massakeskipiste siirtyy vaakatasossa yhtäkkisesti yli toistakymmentä senttimetriä.

Videoiden luomisessa kokeiltiin yksinkertaisen hidastusefektin lisäksi *liikeinterpolaatiota* (engl. *motion interpolation*). Menetelmässä videon kahden peräkkäisen kuvaruudun väliin lasketaan interpolaation keinoin lisää kuvaruutuja, jolloin videon kuvanopeutta (kuvaruutua/sekunti) voidaan kasvattaa. Tällöin on mahdollista luoda alkuperäisestä videosta voimakkaasti hidastettuja versioita, joissa hidastusta ei ole toteutettu naiivilla tavalla näyttämällä jo olemassa olevia kuvaruutuja pidemmän aikaa. Liikeinterpolaatioon käytettiin *slowmoVideo*-ohjelmistoa[62].

Yksinkertaista hidastusta käytettiin videossa 12, joka oli tallennettu kuvanopeudella 25 ruutua/s (resoluutio 1920x1080). Liikeinterpolaation tapauksessa laadultaan tyydyttävien hidastusvideoiden lähdemateriaaliksi kuvanopeus ei kuitenkaan riittänyt. Liikeinterpolaatiolla tuotettua hidastusta havainnollistava video 13 tallennettiin alun perin nopeudella 50 ruutua/s (resoluutio 1280x720).

[https://www.youtube.com/watch?v=2JxgcJeez\\_E](https://www.youtube.com/watch?v=2JxgcJeez_E)



Video 12: Taaksepäin hyppy, yksinkertainen hidastus.

**Frame 177:** Keräasennossa ylävartalo on hieman eteenpäin kallistuneena (käsivarren kulma 85 astetta) asennon tasapainottamiseksi. Jalkojen ojentuessa käsivarren kulma kasvaa noin 90 asteeseen.

**Frame 340:** Ponnistuksessa jalat tuodaan keräasentoon, mutta ylävartaloa ei enää juuri kallisteta eteenpäin. Alaraajojen massakeskipiste liikkuu taaksepäin, mistä seuraa koko kehon massakeskipisteen siirtyminen taaksepäin. Jalat ojennetaan ponnistuksessa ylöspäin suuntautuvan nopeuden tuottamiseksi, jolloin käsivarren kulma kasvaa entisestään.

<https://www.youtube.com/watch?v=Hwzko5QB6EM>



Video 13: Taaksepäin hyppy, liikeinterpolaatiohidastus.

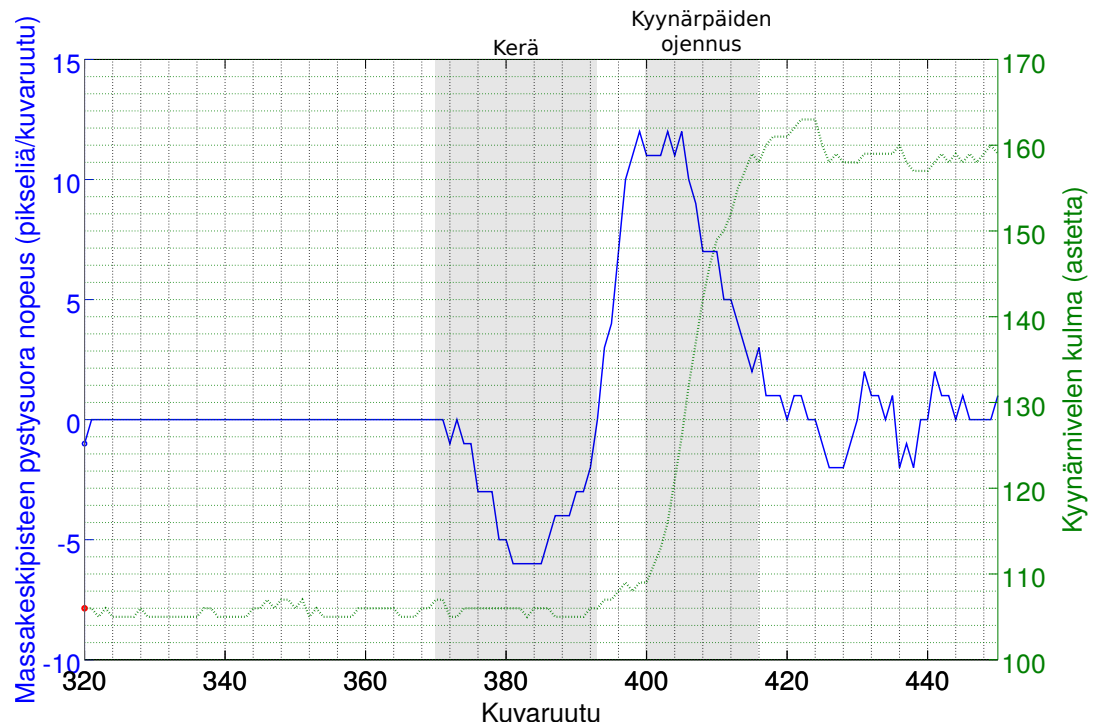
Lähdemateriaali kuvattiin kuvanopeudella 50 ruutua/s ja resoluutiolla 1280x720. Liikeinterpolaatiolla tuotettu hidastus on yksinkertaista hidastusta huomattavasti sulavampi. Haittapuolena on videossa esiintyvät visuaaliset virheet, joista ilmeisin näkyy hypyn aikana koehenkilön käsien kohdalla.

## 5.5 Päälläseisonnasta käsinseisontaan

Videoiden lisäksi kerätystä aineistosta oli mahdollista luoda käsinseisontasuoritusten kulkua havainnollistavia kuvaajia esimerkiksi nivelkulmien tai kehonosien sijaintien ja nopeuksien muutoksista. Kuvassa 26 ja videossa 14 on käsitelty liikettä, jossa koehenkilö ponnistaa päälläseisonnasta kerän kautta käsinseisontaan.

Oleellista on erityisesti kyynärpäiden ojentamisen ajoitus. Staattisessa asennossa (massakeskipisteen kiihtyvyys on nolla) käsiin kohdistuva voima on käsinseisojan painon suuruinen. Jos käsinseisoja nousisi päälläseisonnasta käsinseisontaan ilman jaloilla tehtyä ponnistusta, pitäisi käsien tuottaa käsinseisojan painoa suurempi voima, jotta massakeskipisteelle saataisiin ylöspäin suuntautuva kiihtyvyys ja nousu onnistuisi. Kuvaajan esittämässä tilanteessa jaloilla tehdyn ponnistuksen ansiosta käsien tarvitsee nousun aikana tuottaa käsinseisojan painoa *pienempi* voima, koska massakeskipisteen vertikaalinen kiihtyvyys on alaspäin (massakeskipisteen vauhti ylöspäin hidastuu).

Ponnistuksen merkitykseen liittyy myös fysiologinen näkökulma: Kädet pystyvät kanttelemaan suuremman painon suorina kuin kyynärpäät koukussa. Tämän vuoksi nousun aikana käsiltä vaadittavaa voimaa on edullista pienentää jalkojen avulla ponnistamalla.



Kuva 26: Kuvaajasta on selvästi erotettavissa liikkeen vaiheet:

**Kuvaruudut 370–393:** Jalkojen tuominen kerään. Aluksi massakeskipisteen nopeus pienenee (alaspäin suuntautuva vauhti kiihtyy), minkä jälkeen nopeus suurenee (alaspäin suuntautuva vauhti hidastuu), kunnes keräasento on saavutettu (massakeskipisteen nopeus on nolla).

**Kuvaruudut 394–399:** Jalkojen voimakkain ojennus. Massakeskipisteen kiihtyvyys on suurimmillaan.

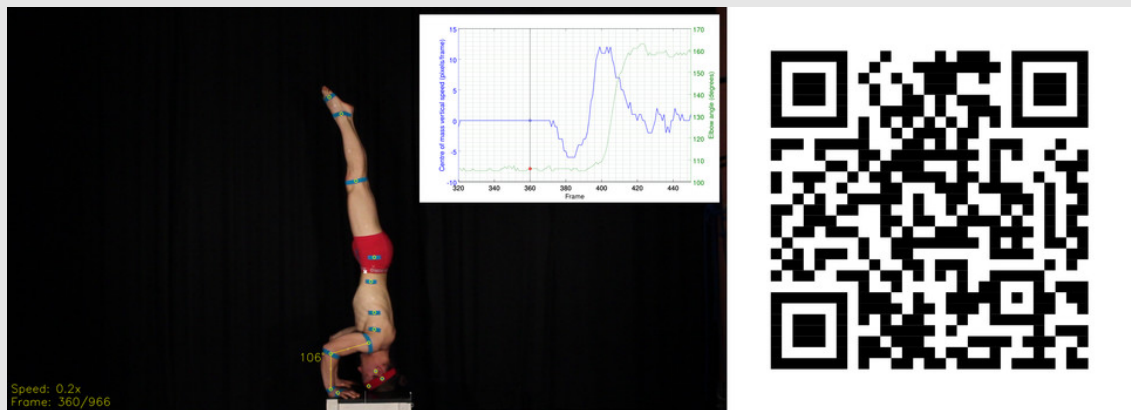
**Kuvaruutu 400:** Kyynärpäiden kunnollinen ojennus alkaa vasta, kun massakeskipisteen maksimikiihtyvyys on ohitettu ja ylöspäin suuntautuva vauhti on suurimmillaan.

**Kuvaruudut 400–416:** Kyynärpäiden tasainen ojennus tapahtuu samaan aikaan, kun massakeskipisteen nopeus pienee (ylöspäin suuntautuva vauhti hidastuu). Tällöin käsien tuottaman voiman ei tarvitse olla yhtä suuri kuin käsinseisojan paino: massakeskipisteen kiihtyvyys suuntautuu tässä vaiheessa jo alaspäin — nopeudelle vastakkaiseen suuntaan.

**Kuvaruudut 416–:** Kyynärpäät ovat saavuttaneet ojennetun kulman. Massakeskipisteen vauhti on (pieniä korjausliikkeitä lukuun ottamatta) pysähtynyt.



<https://www.youtube.com/watch?v=JiXstywGTow>



Video 14: Päälläseisonnasta käsinseisontaan (hidastettuna 0.2x-nopeuteen).

**Frame 320:** Kuvaaja esittää jalkojen ja kyynärpäiden ojentamisen keskinäisen ajoituksen. Yhtenäinen sininen viiva kuvaa massakeskipisteen pystysuoraa nopeutta (vasen y-akseli), punainen pisteiviiva kyynärpään kulmaa (oikea y-akseli). Kuvaruudun indeksinumero on x-akselilla.

## 6 Johtopäätökset

Työssä esiteltiin käytännöllinen menetelmäkokonaisuus käsinseisontasuoritusten analysoimiseksi. Työtä varten kirjoitetulla tietokoneohjelmalla oli mahdollista luoda videoita, joiden päälle piirretyt apukuviot antoivat lisäarvoa liikkeiden mekaniikan havainnollistamiselle. Menetelmä on edullinen mutta analyysin vaatima työmäärä melko suuri.

Manuaalisen työn määrän vuoksi järjestelmän käyttäminen reaaliaikaisesti harjoitusten osana on käytännössä mahdotonta. Reaaliaikaisen, täysin automaattisen järjestelmän luominen vaatii jatkokehitystä. Aineiston pohjalta luotuja videoita ja graafeja olisi kuitenkin mahdollista käyttää esimerkiksi osana oppimateriaaleja, jolloin analyysin tekemiseen on enemmän aikaa.

Urheilun parissa on saatu hyviä tuloksia videoiden käyttämisestä opetuksen apuna[63, 64]. Täten on mahdollista, että myös käsinseisontan harjoittelua voitaisiin kehittää käyttämällä videoituja suorituksia osana palautetta. Automatisoidun mekaniikka-analyysin mahdollinen hyöty verrattuna pelkkien raakavideoiden katseluun kaippaa kuitenkin selvittämistä. Hämärän peitossa on, voivatko mekaniikan ja statiikan lakeihin perustuvat mallit toimia hyödyllisten mielikuvien pohjana fysiikkaan syvemmin perehtymättömille käsinseisojille.

Työn pääpaino oli menetelmän kehittämisessä ja sen mahdollisuuksien esittelemisessä. Videoituja käsinseisontasuorituksia ei työn laajuuden puitteissa pystytty käsittelemään kuin pintapuolisesti. Jo yksittäiset videoanalyysit antoivat kuitenkin kirjoittajalle uutta tietoa käsinseisontan fysiikasta ja herättivät lukemattomia jatkokehitysideoita.

Menetelmän käyttökelpoisuuden parantamiseksi jatkotyön olisi keskityttävä kahteen osa-alueeseen: Koehenkilön videokuvauksiin valmisteluun kuluva aika olisi pystyttävä lyhentämään. Lisäksi tietokoneohjelmaa tulisi kehittää kohti korkeampaa automaation astetta. Kineesioteippimerkkien sijaintien alustus olisi mahdollista automatisoida käyttäen yksinkertaista heuristiikkaa merkkien sijaintien suhteista toisiinsa tunnetussa asennossa.

Teippimerkkien sekoittuminen toisiinsa voitaisiin mahdollisesti estää käyttämällä kahta tai useampaa eri väristä teippiä, jolloin lähellä toisiaan oleviin merkkeihin voitaisiin käyttää eri värejä. Myös morfologisten operaatioiden tehokkaampi ja hienostuneempi hyödyntäminen vaatii lisäselvitystä. HSV-kynnestyksen raja-arvojen adaptiivisuutta tulisi kokeilla. Suorituskyvyn kannalta ilmeisin optimointikeino olisi välttää kuvamanipulaatio-operaatioiden tekemistä koko kuvaruudun alueelle; kun merkkien sijainnit ovat selvillä, voitaisiin HSV-kynnystys ja muut operaatiot rajata seuraavissa kuvaruuduissa vain merkkien lähialueille, jolloin käsiteltävien pikselien määrä putoaisi murto-osaan.

Kineesioteippimerkkien leikkaamisesta ja kiinnittämisestä voitaisiin luopua käyttämällä koko vartalon peittävää aluspukua, johon olisi ommeltu valmiiksi merkit kehon referenssipisteiden kohdalle. Puvun monikäyttöisyyttä voisi lisätä käyttämällä ommeltujen merkkien sijaan tarrakiinnitystä: kun merkkien sijaintia olisi mahdollista säätää käyttäjäkohtaisesti, koehenkilöiden pienet kokoerot eivät välttämättä vaatisi useampia pukuja.

Työ oli kokonaisuutena onnistunut: Kehitetty analyysimenetelmä oli sellaisenaan käyttökelpoinen ja antoi uutta tietoa aihealueesta. Lisäksi työn jatkokehitysmahdollisuudet ovat erittäin lupaavat ja mielenkiintoiset.

## Lähteet

- [1] William Sands, Dennis Caine, and Jan Borms. *Scientific Aspects of Women's Gymnastics*. Medicine and sport science. Karger, 2003.
- [2] Valentin Uzunov. The handstand: A four stage training model. *Gym Coach*, 2:52–59, 2008.
- [3] Petr Hedbávný, Jana Sklenaříková, Dušan Hupka, and Miriam Kalichová. Balancing in handstand on the floor. *Science of Gymnastics Journal*, 5(3):69–79, 2013.
- [4] Cirque du Soleil - Casting - Disciplines, verkkodokumentti. Viitattu 8.3.2015. <http://www.cirquedusoleil.com>.
- [5] Various authors. *FEDEC Basic Circus Arts Instruction Manual*, chapter Manual for Acrobatics: Handstand, hand to hand, banquine, pages 1–12. The European Federation of Professional Circus Schools (FEDEC), 2007.
- [6] Semyon M. Slobounov and Karl M. Newell. Postural dynamics in upright and inverted stances. *Journal of Applied Biomechanics*, 12:185–196, 1996.
- [7] Lewis M. Nashner and Gin McCollum. The organization of human postural movements: a formal basis and experimental synthesis. *Behavioral and brain sciences*, 8(01):135–150, 1985.
- [8] G. Clément and D. Rezzette. Motor behavior underlying the control of an upside-down vertical posture. *Experimental brain research*, 59(3):478–484, 1985.
- [9] G. Croix, L. Lejeune, D. I. Anderson, and R. Thouvarecq. Light fingertip contact on thigh facilitates handstand balance in gymnasts. *Psychology of Sport and Exercise*, 11(4):330–333, July 2010.
- [10] F. Asseman and Y. Gahéry. Effect of head position and visual condition on balance control in inverted stance. *Neuroscience Letters*, 375(2):134 – 137, 2005.

- [11] Donald Venes. *Taber's Cyclopedic Medical Dictionary*. F. A. Davis Company, 22th edition, 2013.
- [12] S. M. Lephart, J. L. Giraldo, P. A. Borsa, and F. H. Fu. Knee joint proprioception: a comparison between female intercollegiate gymnasts and controls. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 4(2):121–124, 1996.
- [13] Jill R. E. Ramsay and M. Jane Riddoch. Position-matching in the upper limb: professional ballet dancers perform with outstanding accuracy. *Clinical Rehabilitation*, 15(3):324–330, 2001.
- [14] F. Hlavačka, M. Křížková, and F. B. Horak. Modification of human postural response to leg muscle vibration by electrical vestibular stimulation. *Neuroscience letters*, 189(1):9–12, 1995.
- [15] F. Hlavačka, T. Mergner, and M. Křížková. Control of the body vertical by vestibular and proprioceptive inputs. *Brain research bulletin*, 40(5):431–434, 1996.
- [16] F. Hlavačka. Human postural responses to sensory stimulations. measurements and model. *Measurement Science Review*, 3, 2003.
- [17] N. Vuillerme, F. Danion, L. Marin, A. Boyadjian, J. M. Prieur, I. Weise, and V. Nougier. The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neuroscience Letters*, 303(2):83–86, 2001.
- [18] N. Vuillerme, N. Teasdale, and V. Nougier. The effect of expertise in gymnastics on proprioceptive sensory integration in human subjects. *Neuroscience letters*, 311(2):73–76, 2001.
- [19] Nicolas Vuillerme, Nicolas Pinsault, and Jacques Vaillant. Postural control during quiet standing following cervical muscular fatigue: effects of changes in sensory inputs. *Neuroscience Letters*, 378(3):135–139, 2005.
- [20] G. Clément, T. Pozzo, and A. Berthoz. Contribution of eye positioning to control of the upside-down standing posture. *Experimental Brain Research*, 73(3):569–576, 1988.

- [21] G. Gautier, R. Thouwarecq, and D. Chollet. Visual and postural control of an arbitrary posture: The handstand. *Journal of sports sciences*, 25(11):1271–1278, 2007.
- [22] M. R. Yeadon and G. Trewartha. Control strategy for a hand balance. *Motor Control*, 7(4):411–430, 2003.
- [23] Bernard Stanford Massey and John Ward-Smith. *Mechanics of Fluids*. Taylor & Francis, 8th edition, 2006.
- [24] R. C. Hibbeler. *Engineering Mechanics: Statics*. Prentice Hall, 12th edition, 2008.
- [25] Duane Knudson. *Fundamentals of biomechanics*. Springer, 2007.
- [26] D. A. Winter. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley & Sons, 4th edition, 2009.
- [27] M. Sobera, B. Siedlecka, P. Piestrak, K. Sojka-Krawiec, and B. Graczykowska. Maintaining body balance in extreme positions. *Biology of Sport*, 28(24):81–88, 2007.
- [28] Fay B. Horak and Lewis M. Nashner. Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55(6):1369–1381, 1986.
- [29] Arthur D. Kuo. An optimal control model for analyzing human postural balance. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 42(1):87–101, 1995.
- [30] C. F. Runge, C. L. Shupert, F. B. Horak, and F. E. Zajac. Ankle and hip postural strategies defined by joint torques. *Gait & posture*, 10(2):161–170, 1999.
- [31] Dragomir N. Nenchev and Akinori Nishio. Ankle and hip strategies for balance recovery of a biped subjected to an impact. *Robotica*, 26(05):643–653, 2008.
- [32] D. G. Kerwin and G. Trewartha. Strategies for maintaining a handstand in the anterior-posterior direction. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(7):1182–1188, 2001.
- [33] Kevin Norton and Tim Olds. *Anthropometrica: A Textbook of Body Measurement for Sports and Health Courses*. UNSW press, 1996.

- [34] Maurice R. Yeadon. The simulation of aerial movement — II. A mathematical inertia model of the human body. *Journal of Biomechanics*, 23(1):67–74, 1990.
- [35] G. S. George. *Biomechanics of women's gymnastics*. Prentice-Hall, 1980.
- [36] Pui Wah Kong, Sin Yung Leung, and Yoon Soo Han. Effect of hand placement position on press-to-handstand techniques and stability. In *29 International Conference on Biomechanics in Sports*, 2011.
- [37] Spiros G. Prassas. Biomechanical model of the press handstand in gymnastics. *International Journal of Sport Biomechanics*, 4(4), 1988.
- [38] The American Society of Biomechanics - The Borelli Award, verkkodokumentti. Viitattu 8.3.2015. <http://www.asbweb.org>.
- [39] Charles E. Clauser, John T. McConville, and John W. Young. Weight, volume, and center of mass of segments of the human body. Technical report, DTIC Document, 1969.
- [40] R. F. Chandler, C. E. Clauser, J. T. McConville, H. M. Reynolds, and J. W. Young. Investigation of inertial properties of the human body. Technical report, DTIC Document, 1975.
- [41] Rudolfs Drillis, Renato Contini, and Maurice Bluestein. Body segment parameters - a survey of measurement techniques. *Artificial limbs*, 8(1):44–66, 1964.
- [42] Mark Andrew Jaffrey. *Estimating Centre of Mass Trajectory and Subject-Specific Body Segment Parameters Using Optimisation Approaches*. PhD thesis, Victoria University, 2008.
- [43] Aydin Tözeren. *Human body dynamics: classical mechanics and human movement*. Springer, 2000.
- [44] Bart Koopman. Dynamics of human movement. *Technology and Health Care*, 18(4):371–385, 2010.
- [45] E. Harless. The static moments of human limbs. *Treatises of the Math.-Phys. Class of the Royal Academy of Science of Bavaria*, 8:69–96, 1860.

- [46] W. T. Dempster. *Space Requirements of the Seated Operator: Geometrical, Kinematic, and Mechanical Aspects of the Body with Special Reference to the Limbs*. Technical report. Wright Air Development Center, Air Research and Development Command, U.S. Air Force, 1955.
- [47] Chen Wei and Robert K. Jensen. The application of segment axial density profiles to a human body inertia model. *Journal of biomechanics*, 28(1):103–108, 1995.
- [48] Jonathan Norton, Nicholas Donaldson, and Laura Dekker. 3D whole body scanning to determine mass properties of legs. *Journal of biomechanics*, 35(1):81–86, 2002.
- [49] Herbert Hatze. A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments. *Journal of Biomechanics*, 13(10):833–843, 1980.
- [50] V. M. Zatsiorsky and V. N. Seluyanov. The mass and inertia characteristics of the main segments of the human body. *Biomechanics viii-b*, 56(2):1152–1159, 1983.
- [51] V. M. Zatsiorsky, V. N. Seluyanov, and L. G. Chugunova. Methods of determining mass-inertial characteristics of human body segments. *Contemporary problems of biomechanics*, 272:291, 1990.
- [52] Erwin Kreyszig. *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley & Sons, 9th edition, 2006.
- [53] Paolo de Leva. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov’s segment inertia parameters. *Journal of biomechanics*, 29(9):1223–1230, 1996.
- [54] Paolo de Leva. Validity and accuracy of four methods for locating the center of mass of young male and female athletes. *Journal of Biomechanics*, 27(6):763, 1994.
- [55] Paolo de Leva. Joint center longitudinal positions computed from a selected subset of Chandler’s data. *Journal of biomechanics*, 29(9):1231–1233, 1996.
- [56] Nobutaka Mitsuhashi, Kaori Fujieda, Takuro Tamura, Shoko Kawamoto, Toshihisa Takagi, and Kousaku Okubo. BodyParts3D: 3D structure database for anatomical concepts. *Nucleic acids research*, 37(suppl 1):D782–D785, 2009.



- [57] OpenCV 2.4.10 (open source computer vision library), ohjelmakirjasto.  
<http://opencv.org>.
- [58] Stephen J. Sangwine and Robin E. N. Horne. *The Colour Image Processing Handbook*. Chapman & Hall, 1st edition, 1998.
- [59] Frank Y. Shih. *Image processing and mathematical morphology: fundamentals and applications*. CRC press, 2009.
- [60] Rudolf Kingslake. *Optics in photography*. SPIE Optical Engineering Press Bellingham, Wash., 1992.
- [61] John W. Eaton, David Bateman, and Søren Hauberg. *GNU Octave version 3.0.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2009.
- [62] Simon A. Eugster. slomoVideo: Slow-motion for video with Optical Flow. Bachelor thesis, ETH Zürich, August 2011.
- [63] Eva Boyer, Raymond G. Miltenberger, Catherine Batsche, Victoria Fogel, and Linda LeBlanc. Video modeling by experts with video feedback to enhance gymnastics skills. *Journal of applied behavior analysis*, 42(4):855–860, 2009.
- [64] Zhenkun Zheng. The experimental study on computer video feedback in tennis serve teaching effect. In *2013 International Workshop on Computer Science in Sports*. Atlantis Press, 2013.

## A Videoiden katselu ja lokaali lukupaketti

Työssä kuvatut videot ovat katsottavissa Googlen Youtube-videopalvelussa. Työstä on lisäksi saatavilla lokaali lukupaketti ZIP-tiedostona<sup>8</sup>, joka sisältää PDF-tiedoston sekä kaikki videotiedostot korkealaatuisina alkuperäisversioina. ZIP-tiedoston lataamalla ja purkamalla työn videoita voi katsoa suoraan PDF-tiedostosta videon (lokaaliin versioon osoittavaa) linkkiä klikkaamalla. Yksitellen videot ja PDF-tiedoston voi ladata täältä.<sup>9</sup>

Esimerkkiviite videoon on esitetty alla. Ylimmäisenä on linkki videoon Youtube-palvelussa. Klikkaamalla linkkiä tai linkin alla olevaa esikatselukuvaa video aukeaa web-selaimessa. Oikealla on paperiversion lukijoita varten QR-koodi, joka myös sisältää linkin videon Youtube-versioon. Lukemalla QR-koodin älypuhelimella tai tabletilla, lukija pääsee siirtymään suoraan katselemaan viitteen videota. Videon sisältöä on kuvattu sanallisesti kuvatekstissä, jonka informaatio on sisällytetty myös itse videoon.

<https://www.youtube.com/watch?v=w1XATBFpW0I>



Video 15: Esimerkkivideo.

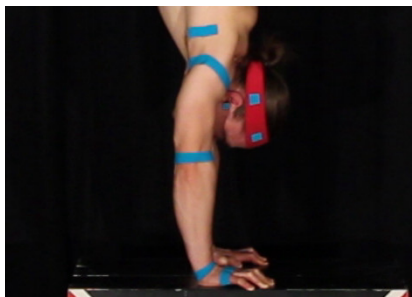
Tämä on esimerkkivideo, jota pääsee katselemaan klikkaamalla yllä olevaa linkkiä tai esikatselukuvaa, tai skannaamalla oheisen QR-koodin älypuhelimella tai tabletilla.

<sup>8</sup> [http://www.googledrive.com/host/0ByjUgm29\\_i2\\_fl9yQklRbWJ6SmRPX3lrcUJJSS0tdGdTRl9xMVFmVGPmMdS1Hc3lyXzFsUEU/kasinseisannon-painopisteanalyysi-lokaali-lukupaketti.zip](http://www.googledrive.com/host/0ByjUgm29_i2_fl9yQklRbWJ6SmRPX3lrcUJJSS0tdGdTRl9xMVFmVGPmMdS1Hc3lyXzFsUEU/kasinseisannon-painopisteanalyysi-lokaali-lukupaketti.zip)

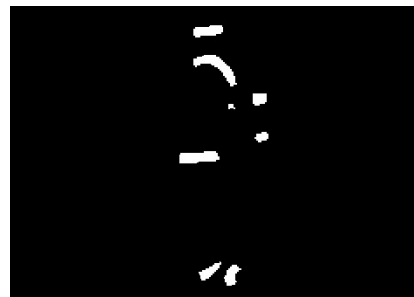
<sup>9</sup> [http://www.googledrive.com/host/0ByjUgm29\\_i2\\_fl9yQklRbWJ6SmRPX3lrcUJJSS0tdGdTRl9xMVFmVGPmMdS1Hc3lyXzFsUEU](http://www.googledrive.com/host/0ByjUgm29_i2_fl9yQklRbWJ6SmRPX3lrcUJJSS0tdGdTRl9xMVFmVGPmMdS1Hc3lyXzFsUEU)

## B Piilossa olevien pisteiden seuraaminen

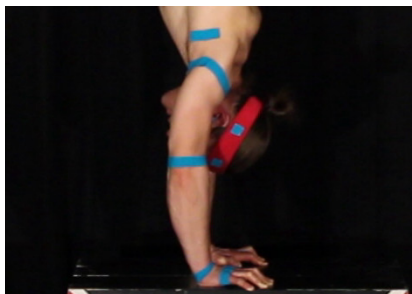
Tietyissä liikkeissä teippimerkki saattaa mennä pois kameran näkökentästä toisen kehonosan taakse. Esimerkiksi korvannipukkamerkki voi jäädä käsivarren taakse piiloon (kuva 27). Jos näkyvissä on kuitenkin kaksi merkkiä, joiden sijainti suhteessa piilossa olevaan merkkiin on muuttumaton, voidaan piilossa olevan merkin sijainti laskea vektorialgebraa hyväksi käyttäen.



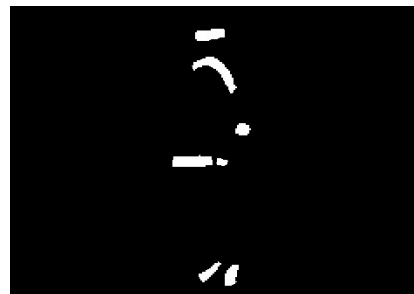
**Ruutu A:** Koehenkilön pää on normaalissa asennossa (lievä dorsifleksio).



**Ruutu A (kynnystetty):** Korvannipukkamerkki sekä molemmat otsapannan merkit ovat näkyvissä.



**Ruutu B:** Koehenkilö on kääntänyt päätään ventraaliseen suuntaan.

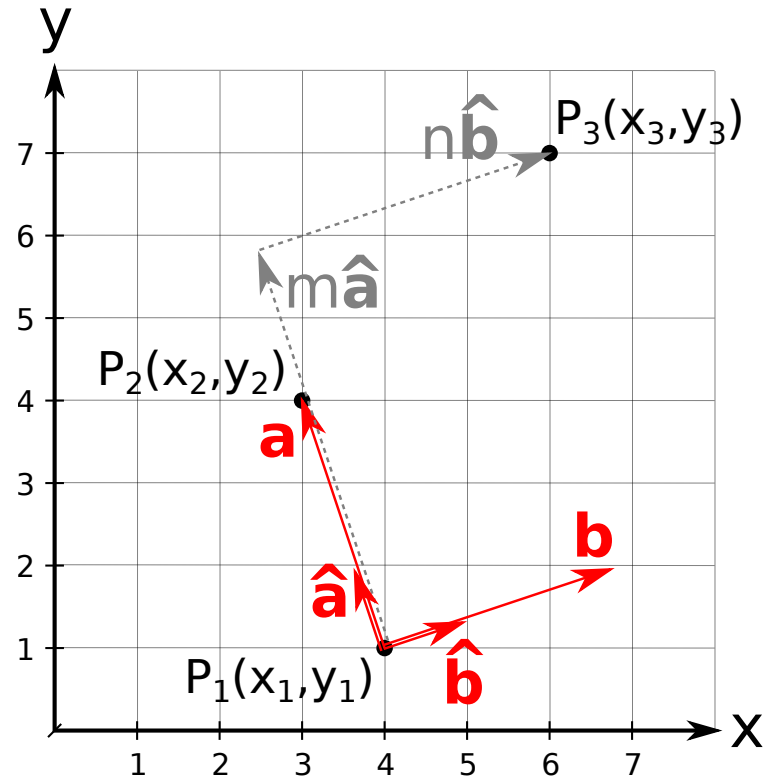


**Ruutu B (kynnystetty):** Korvannipukkamerkki on hävinnyt näkyvistä käsivarsien taakse, mutta otsapannan merkit ovat edelleen näkyvissä.

Kuva 27: Piilossa olevien merkkien seuraaminen. Päässä olevat kolme merkkiä, korvannipukkamerkki ja kaksi otsapantamerkkiä, eivät liiku suhteessa toisiinsa pään kääntyessä. Näin ollen kahden merkin avulla on mahdollista selvittää kolmannen, piilossa olevan merkin sijainti.

Kuvan 28 merkintöjä käyttäen ongelman muotoilu on seuraava: Esitä pisteen  $P_3$  sijainti pisteen  $P_1$  paikkavektorin sekä pisteiden  $P_1$  ja  $P_2$  määrittämien kantavektoreiden avulla.

Ongelma voidaan ratkaista muodostamalla koordinaatistolle uusi *ortonormaali*<sup>10</sup> kanta pisteiden  $P_1$  ja  $P_2$  avulla, ja esittämällä  $P_3$  uudessa kannassa.



Kuva 28: Pisteiden  $P_3$  sijainti pisteiden  $P_1$  ja  $P_2$  suhteen.

Pisteestä  $P_1$  pisteeseen  $P_2$  kulkee vektori  $\mathbf{a}$ , jonka pituus on  $\|\mathbf{a}\|$ . Tällöin uuden kannan toiseksi kantavektoriksi saadaan  $\mathbf{a}$ :n kanssa yhdensuuntainen yksikkövektori  $\hat{\mathbf{a}}$ .

$$\begin{aligned}\mathbf{a} &= a_x \hat{\mathbf{i}} + a_y \hat{\mathbf{j}} \\ &= (x_2 - x_1) \hat{\mathbf{i}} + (y_2 - y_1) \hat{\mathbf{j}} \\ \|\mathbf{a}\| &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\ \hat{\mathbf{a}} &= \frac{\mathbf{a}}{\|\mathbf{a}\|}\end{aligned}$$

missä  $a_x$  ja  $a_y$  ovat vektorin  $\mathbf{a}$  x- ja y-komponentit.

<sup>10</sup> Ortonormaalien kannan kantavektorit ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan (*ortogonaalisuus*) ja niiden pituus on yksi.

Toisen kantavektorin  $\hat{\mathbf{b}}$  ratkaisemiseksi lasketaan vektorin  $\mathbf{a}$  kanssa kohtisuorassa oleva vektori  $\mathbf{b}$ . Käyttämällä pistetulon yleistä määritelmää, johdettua määritelmää karteesisessa koordinaatistossa ja kohtisuoruusehtoa

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \|\mathbf{a}\| \cdot \|\mathbf{b}\| \cdot \cos(\angle(\mathbf{a}, \mathbf{b}))$$

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y$$

$$\angle(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 90^\circ \Rightarrow \cos(\angle(\mathbf{a}, \mathbf{b})) = 0$$

saadaan yhtälö  $\mathbf{b}$ :n ratkaisemiseksi:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = 0$$

$$a_x b_x + a_y b_y = 0$$

$$(x_2 - x_1)b_x + (y_2 - y_1)b_y = 0$$

missä  $a_x$ ,  $b_x$ ,  $a_y$  ja  $b_y$  ovat vektoreiden  $\mathbf{a}$  ja  $\mathbf{b}$  x- ja y-komponentit. Koska etsityn vektorin  $\mathbf{b}$  pituus on mielivaltainen, voidaan valita  $b_x = 1$ , jolloin saadaan

$$(y_2 - y_1)b_y = x_1 - x_2$$

$$b_y = \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea vektorin  $\mathbf{b}$  pituus ja yhdensuuntainen yksikkövektori  $\hat{\mathbf{b}}$ :

$$\begin{aligned} \|\mathbf{b}\| &= \sqrt{b_x^2 + b_y^2} \\ &= \sqrt{1 + \left(\frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1}\right)^2} \\ \hat{\mathbf{b}} &= \frac{\mathbf{b}}{\|\mathbf{b}\|} \end{aligned}$$

Valitsemalla  $b_x = -1$  oltaisiin tulokseksi saatu  $\hat{\mathbf{b}}$ :lle vastakkainen vektori. Yhdenmukaisuuden vuoksi valitaan kantavektori siten, että  $\hat{\mathbf{a}}$ :n ja  $\hat{\mathbf{b}}$ :n välinen kulma avautuu vektoriin  $\hat{\mathbf{a}}$  nähden myötäpäivään.

Nyt pisteen  $P_3$  sijainti voidaan esittää muodossa

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_3 &= \mathbf{P}_1 + m\hat{\mathbf{a}} + n\hat{\mathbf{b}} \\ x_3\hat{\mathbf{i}} + y_3\hat{\mathbf{j}} &= x_1\hat{\mathbf{i}} + y_1\hat{\mathbf{j}} + m(\hat{a}_x\hat{\mathbf{i}} + \hat{a}_y\hat{\mathbf{j}}) + n(\hat{b}_x\hat{\mathbf{i}} + \hat{b}_y\hat{\mathbf{j}})\end{aligned}$$

missä  $\mathbf{P}_1$  ja  $\mathbf{P}_3$  ovat pisteitä  $P_1$  ja  $P_3$  vastaavat *paikkavektorit*;  $\hat{a}_x$ ,  $\hat{a}_y$ ,  $\hat{b}_x$  ja  $\hat{b}_y$  kantavektoreiden  $\hat{\mathbf{a}}$  ja  $\hat{\mathbf{b}}$  x- ja y-komponentit;  $m$  ja  $n$  kantavektoreiden kertoimet. Eriteltynä yhtälö  $\hat{\mathbf{i}}$ - ja  $\hat{\mathbf{j}}$ -komponentteihin saadaan

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\mathbf{i}}: \quad x_3 = x_1 + m\hat{a}_x + n\hat{b}_x \\ \hat{\mathbf{j}}: \quad y_3 = y_1 + m\hat{a}_y + n\hat{b}_y \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5a) \\ (5b) \end{array}$$

Kertomalla yhtälö 5b puolittain tekijällä  $-\frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}$  ja summaamalla yhtälön 5a kanssa voidaan ratkaista  $n$ :

$$\begin{aligned}x_3 &= x_1 + m\hat{a}_x + n\hat{b}_x \\ -\frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}y_3 &= -\frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}y_1 - m\hat{a}_x - \frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}n\hat{b}_y \\ \hline x_3 - \frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}y_3 &= x_1 - \frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}y_1 + n\hat{b}_x - \frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}n\hat{b}_y \\ n\left(\frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}\hat{b}_y - \hat{b}_x\right) &= x_1 - x_3 + \frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}(y_3 - y_1) \\ n &= \frac{x_1 - x_3 + \frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}(y_3 - y_1)}{\frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_y}\hat{b}_y - \hat{b}_x}\end{aligned}$$

Kertomalla yhtälö 5a puolittain tekijällä  $-\frac{\hat{b}_y}{\hat{b}_x}$  saadaan  $m$  ratkaistua samalla tavalla:

$$m = \frac{y_1 - y_3 + \frac{\hat{b}_y}{\hat{b}_x}(x_3 - x_1)}{\frac{\hat{b}_y}{\hat{b}_x}\hat{a}_x - \hat{a}_y}$$

Ratkaisussa oletettiin, että  $\hat{a}_x \neq 0$ ,  $\hat{a}_y \neq 0$ ,  $\hat{b}_x \neq 0$  ja  $\hat{b}_y \neq 0$ . Huomataan, että

$$\hat{a}_x \neq 0 \Leftrightarrow \hat{b}_y \neq 0 \quad (\mathbf{a} \text{ ei ole pystysuora} \Leftrightarrow \mathbf{b} \text{ ei ole vaakasuora})$$

$$\hat{a}_y \neq 0 \Leftrightarrow \hat{b}_x \neq 0 \quad (\mathbf{a} \text{ ei ole vaakasuora} \Leftrightarrow \mathbf{b} \text{ ei ole pystysuora})$$

Tapaukset, joissa  $\mathbf{a}$  (ja täten myös  $\mathbf{b}$ ) on koordinaattiakselin suuntainen, voidaan ratkaista triviaaleina erikoistapauksina. Esimerkiksi kun  $\hat{a}_y = 0$  typistyy yhtälö 5b muotoon

$$y_3 = y_1 + n\hat{b}_y$$

$$n = \frac{y_3 - y_1}{\hat{b}_y}$$

Pisteen  $P_3$  sijainti koordinaatistossa

$$\mathbf{P}_3 = \mathbf{P}_1 + m\hat{\mathbf{a}} + n\hat{\mathbf{b}} \quad (6)$$

voidaan tulkita sanallisesti:

1. Siirry origosta pisteeseen  $P_1$ .
2. Kulje vektorin  $\mathbf{a}$  (tai  $\hat{\mathbf{a}}$ ) suuntaan  $m$  pituusyksikköä.
3. Kulje vektorin  $\mathbf{b}$  (tai  $\hat{\mathbf{b}}$ ) suuntaan  $n$  pituusyksikköä.

Tilanteessa, jossa  $P_3$  ei ole tiedossa, voidaan  $\hat{\mathbf{a}}$  ja  $\hat{\mathbf{b}}$  laskea pisteistä  $P_1$  ja  $P_2$ . Muuttujille  $m$  ja  $n$  on yllä laskettu vakioarvot tapauksessa, jossa kaikki kolme pistettä ovat tiedossa. Täten uudessa tapauksessa tuntematon  $P_3$  on mahdollista laskea tunnettujen pisteiden  $P_1$  ja  $P_2$  sekä aikaisemmassa vaiheessa laskettujen vakioiden  $m$  ja  $n$  avulla käyttäen kaavaa 6.

Käyttämällä yksikkövektorin määritelmää ja vektorin  $\mathbf{a}$  pituuden suhteen esitettyjä kanta-vektoreiden kertoimia  $m_a$  ja  $n_a$

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{a}} &= \frac{\mathbf{a}}{\|\mathbf{a}\|} && \Leftrightarrow && \mathbf{a} = \|\mathbf{a}\|\hat{\mathbf{a}} \\ m_a &= \frac{m}{\|\mathbf{a}\|} \\ n_a &= \frac{n}{\|\mathbf{a}\|}\end{aligned}$$

voidaan yhtälö 6 esittää uudessa muodossa:

$$P_3 = P_1 + m_a\|\mathbf{a}\|\hat{\mathbf{a}} + n_a\|\mathbf{a}\|\hat{\mathbf{b}} \quad (7)$$

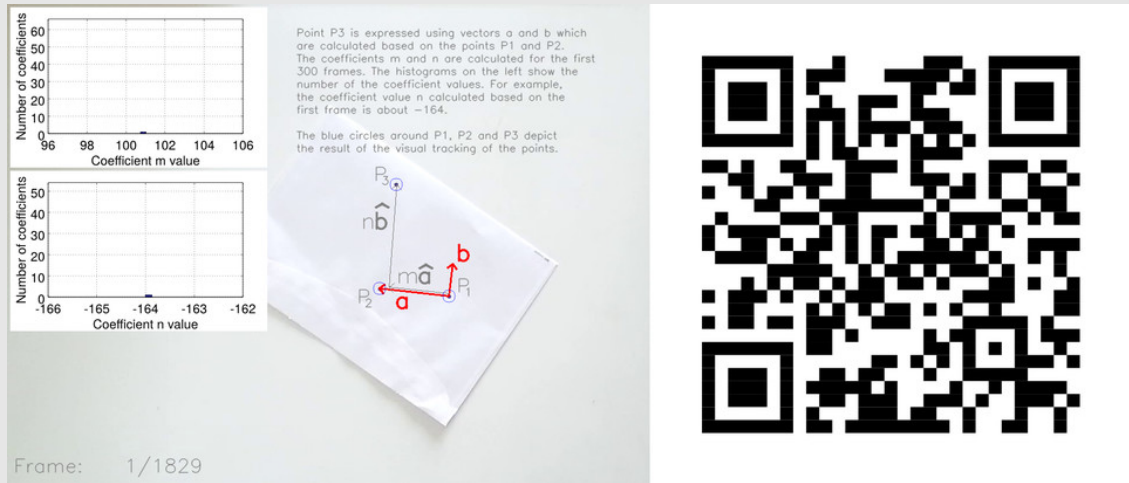
Yhtälössä 7 vektoreiden  $\mathbf{a}$  ja  $\mathbf{b}$  suuntaiset siirtymät on määritetty vektorin  $\mathbf{a}$  pituuden suhteen. Tällöin voidaan ottaa huomioon mahdollinen kuvaruutujen välillä tapahtuva vektorin  $\mathbf{a}$  pituuden muutos, joka voi olla sovelluksen tapauksessa seuraus kameran ja kuvattavan kohteen etäisyyden muuttumisesta: Kun kamera menee lähemmäksi kuvattavaa kohdetta, kuvassa näkyvien pisteiden etäisyydet ja täten vektorin  $\mathbf{a}$  pituus kasvaa kuvaruudun koordinaatistossa. Pisteiden sijainnit suhteessa toisiinsa eivät kuitenkaan muutu.

Laskettaessa tuntemattoman pisteen  $P_3$  sijaintia on huomioitavaa, että  $m_a$  ja  $n_a$  ovat vakioita, jotka on laskettu aikaisemmin tilanteessa, jossa kaikki pisteet  $P_1$ ,  $P_2$  ja  $P_3$  ovat olleet näkyvissä. Myöhemmin tuntemattoman  $P_3$ :n sijaintia laskettaessa käytetään kaavassa 7 vektorin  $\mathbf{a}$  pituutta uudessa tilanteessa. Käytännössä vakioiden  $m_a$  ja  $n_a$  arvot kannattaa laskea useammalle kuin yhdelle kuvaruudulle, jossa kaikki kolme pistettä ovat näkyvissä. Kuvaruuduissa, joissa piste  $P_3$  ei ole näkyvissä, voidaan tämän jälkeen käyttää vakioiden arvona keskiarvoa tai mediaania.

Videolla 16 on havainnollistettu menetelmän matemaattista pohjaa ja toimintaa keinotekoisessa tilanteessa. Videolla 17 menetelmän toimivuutta testataan käsinseisontavideon tapauksessa laskemalla korvannipukkamerkin sijaintia otsapantaan kiinnitettyjen merkkien avulla.



<https://www.youtube.com/watch?v=M4bXTXnZ7nw>



Video 16: Piilossa olevien pisteiden seuraaminen, matematiikan havainnollistus.

**Frame 1:** Piste  $P_3$  on esitetty pisteiden  $P_1$  ja  $P_2$  pohjalta laskettujen vektoreiden  $a$  ja  $b$  avulla. Kertoimille  $m$  ja  $n$  lasketaan arvo 300 ensimmäisen kuvaruudun ajan. Vasemmalla olevat histogrammit näyttävät kertoimien arvojen jakaumat. Esimerkiksi ensimmäisen kuvaruudun pohjalta laskettu kertoimen  $n$  arvo on noin  $-164$ . Siniset ympyrät esittävät pisteiden  $P_1$ ,  $P_2$  ja  $P_3$  visuaalisesti seurattuja sijainteja.

**Frame 299:** Kertoimien  $m$  ja  $n$  arvojen jakaumat on esitetty vasemmalla. Käyttämällä  $m:n$  ja  $n:n$  keskiarvoja  $(100, 82$  ja  $-164, 47)$  voidaan pisteen  $P_3$  sijainti määrittää luotettavammin, kuin jos käytettäisiin yksittäisen kuvaruudun perusteella laskettuja arvoja. Punainen ympyrä esittää pisteen  $P_3$  laskettua sijaintia. Punaisen rastin sijainnin laskemisessa on huomioitu pisteiden  $P_1$  ja  $P_2$  etäisyys toisiinsa. Ympyrän ja rastin sijainnit yhtyvät niin kauan kun  $P_1:n$  ja  $P_2:n$  etäisyys pysyy muuttumattomana.

**Frame 477:** Pisteiden peittäminen estää sen sijainnin jäljittämisen visuaalisesti. Hyödyntämällä aikaisemmin kerättyä tietoa pisteen  $P_3$  sijainnista (suhteessa kahteen muuhun pisteeseen) voidaan sen koordinaatit laskea peittämisen jälkeenkin.

**Frame 1103:** Kun pisteet nostetaan ylös tasolta, pisteiden etäisyys toisiinsa kasvaa (kameran näkökulmasta). Punaisen ympyrän sijainti on selvästi virheellinen, koska sen laskemisessa käytetään oletusta kiinteistä etäisyyksistä pisteiden välillä. Punaisen rastin sijainnin laskemisessa käytetään kuitenkin pisteiden  $P_1$  ja  $P_2$  väliseen etäisyyteen suhteutettuja arvoja.

**Frame 1800:** Menetelmän tarkkuus on hyvä. Oheisesta histogrammista on luettavissa, että virhe laskemalla estimoidun ja visuaalisesti seurattun pisteen välillä on suurimman osan kuvaruuduista vain muutamia pikseleitä.

[https://www.youtube.com/watch?v=vHBgH\\_hYHNU](https://www.youtube.com/watch?v=vHBgH_hYHNU)



Video 17: Piilossa olevien pisteiden seuraaminen, soveltaminen käytäntöön.

**Frame 1:** Tässä videossa korvannipukkamerkkiä ( $P_3$ ) seurataan otsapantamerkkien ( $P_1$  ja  $P_2$ ) avulla. Tällä havainnollistetaan, kuinka ajoittain toisen kehonosan takana piilossa olevia pisteitä on mahdollista seurata. Aluksi kertoimet  $m$  ja  $n$  lasketaan ensimmäisten 150 kuvaruudun osalta. Histogrammit esittävät arvojen jakaumia.

**Frame 149:** Tässä vaiheessa lasketaan kertoimien keskiarvot, joita käytetään loppuvideon aikana korvannipukkamerkin sijainnin laskemiseen (arvioimiseen) otsapantamerkkien pohjalta. Laskettu (arvioitu) piste on merkitty keltaisella rastilla.

**Frame 940:** Menetelmän tarkkuus on tyydyttävä. Virhe on yleisesti ottaen pienempi kuin 3 pikseliä.