

Lasse Pänkäläinen

# Ihmisen luurangon 3D-mallinnus ja animointi



Tradenomi  
Tietojenkäsittely  
Kevät 2020



KAMK • University  
of Applied Sciences

## Tiivistelmä

**Tekijä:** Pänkäläinen Lasse

**Työn nimi:** Ihmisen luurangon 3D-mallinnus ja animointi

**Tutkintonimike:** Tradenomi (AMK), tietojenkäsittely

**Asiasanat:** 3D-mallinnus, anatomia, animointi, peligrafiikka

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutustua tarkemmin ihmisen luurangon anatomiaan, koska kuvataiteilijoille ihmisen kehon tuntemus ja sen jäljentäminen ovat lähes välttämättömiä taitoja. Työn alussa kerrotaan, kuinka ihmisillä on kautta historian ollut kiinnostus luurankoihin ja miten ne ovat esiintyneet eri aikojen taiteissa ja nykyajan videopeleissä. Luurankojen käytön jälkeen tutustutaan ihmisen luiden anatomiaan ja sukupuolten välisiin eroihin.

Työssä käydään läpi myös 3D-mallinnuksen työvaiheita eri mallinnustavoista mallin teksturointiin ja luustamiseen. Teoriaosuuden loppuun kerrotaan animaatiosta, Disney-animaattoreiden kehittämistä animaation periaatteista ja miten niitä on hyödynnetty ja tullaan hyödyntämään luurankojen animoinnissa.

Teoriatietojen pohjalta mallinnettiin Blender-mallinnusohjelman avulla 3D-malli miehen luurangosta luu kerrallaan. Mallintamisen jälkeen luurankomalli luustettiin ja teksturoitiin. Projektiosuuden päätteeksi luurangolle tehtiin muutama animaatioesimerkki hyödyntäen animaation periaatteita.

Luurangon anatomian tutkiminen ja mallintaminen opettivat paljon ihmisen kehosta, ja mihin tulisi jatkossa kiinnittää huomiota ihmistä mallintaessa tai piirtäessä. Animaatioista ei tullut täydellisiä, mutta animaation periaatteiden kertaaminen ja tiedostaminen työskennellessä tekivät animaatioista uskottavampia, kuin edellisistä töistä.

## **Abstract**

**Author:** Pänkäläinen Lasse

**Title of the Publication:** 3D Modeling and Animating a Human Skeleton

**Degree Title:** Bachelor of Business Administration, Business Information Technology

**Keywords:** 3D modeling, anatomy, animation, game graphics

The purpose of this thesis was to familiarize the anatomy of the human skeleton, because for artists knowing and replicating the human body is almost a vital skill. The beginning of the thesis tells how throughout history humans have been fascinated with skeletons and how they have been represented in art and video games. The thesis then describes the anatomy and gender differences of the skeletons.

The thesis also briefly introduces work methods of 3D modeling from different modeling techniques to texturing and rigging the model. The theoretical part ends with animation, the principles of animation and how they have been used in animating skeletons.

Using the 3D computer graphics software Blender, a 3D model of the male human skeleton was modeled based on the gathered facts. The model was then rigged, textured and a few example animations were created for the skeleton model.

Studying and modeling the anatomy of skeletons taught a lot about the human body and what to keep in mind when drawing or modeling humans in the future. The animations didn't turn perfect but brushing up on the principals of animation and being aware of them while working made them more believable than previous works.

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Luurangot ja niiden merkitykset .....	2
2.1	Luurangot videopeleissä.....	5
2.2	Ihmisen luurangon anatomia.....	8
2.3	Sukupuolten väliset erot luissa .....	21
3	3D-mallinnus.....	22
3.1	Polygonimallinnus .....	22
3.2	Teksturointi.....	23
3.3	Luustaminen .....	23
4	Animaatio .....	24
4.1	Animaation 12 periaatetta.....	24
4.2	Luurankojen animointi.....	26
5	Projektiosuus .....	29
5.1	Mallinnus .....	29
5.2	Luustaminen .....	34
5.3	Teksturointi.....	39
5.4	Animointi .....	40
6	Yhteenveto.....	42
	Lähteet .....	43

## Liitteet

## Symboliluettelo

Avainasento	Sulavan liikkeen siirtymisen alku- tai loppuasento.
Avainruutu	Ruutu, johon avainasennon luiden sijainti, kierre ja skaalaus tallennetaan.
Luustaminen	Luurangon luominen 3D-mallille, joka mahdollistaa sen liikkumisen.
Modifikaattori	Väliaikaisesti malliin vaikuttava automaattinen muuttaja.
Pläri	Taskuelokuva, jossa vihon jokaiselle sivulle on piirretty hitaasti muuttuva kuva. Nopeasti selatessa kuvat näyttävät liikkuvan
Reuna	Kahden verteksin välinen jana.
Sivu	Verteksien ja reunojen muodostama pinta.
Verteksi	3D-tilassa sijaitseva piste.

## 1 Johdanto

Kautta historian ihmisillä on ollut kiinnostus luurankoihin, ja niillä on ollut suuri vaikutus taiteisiin ja eri kulttuureihin. Luurangot esiintyvät myös monesti videopeleissä ja niillä on monia eri rooleja tunnelmanluojista tyypillisimpiin vihollisiin.

Koska kuvataiteilijoille ihmisen anatomian tuntemus ja sen jäljentäminen ovat lähes välttämättömiä taitoja, on tämän opinnäytetyön tarkoitus tutustua tarkasti ihmisen luurangon anatomiaan. Tietojen pohjalta luodaan anatomisesti mahdollisimman korrekti 3D-malli ihmisen luurangosta Blender-mallinnusohjelmalla. Opinnäytetyössä tutustutaan myös animaation periaatteisiin ja niiden avulla tehdään muutama animaatioesimerkki luurangolle.

Työn tavoitteena on saada aikaiseksi animoitava 3D-malli luurangosta, jota voidaan hyödyntää tulevilla peli- ja animaatioprojekteissa.

## 2 Luurangot ja niiden merkitykset

Lähes kaikkia kulttuureita yhdistää tieto kuoleman välttämättömyydestä, ja luurangot yhdistetään usein kuolemaan. Monet kulttuurit kuvaavat kuoleman tai sen jumalat joko osittain tai kokonaan luurangon hahmossa. Esimerkiksi useissa kuvissa tuhon ja kuoleman hindujumalatar Kali on pääkalloista koottu kaulanauha, kun taas asteekkien kuoleman jumala ja Manalan hallitsija Mictlantecuhtli on kuvattu verisenä luurankona tai pääkallomiehenä (kuva 1). (Cotterell 1996, 210.) (Miller & Karl 1997, 113.)



Kuva 1. Werner Formanin valokuva 900-luvun Mictlantecuhtli-patsaasta. (Encyclopædia Britannica 2016.)

Keskiajalta lähtien Euroopan kulttuureissa ja taiteissa Kuolema hahmona on kuvattu luurangoksi, joka saapuu noutamaan kuolleiden sieluja. Nykypäivän tunnetuin länsimainen Kuolema lienee Viikatemieheksikin kutsuttu, usein hupulliseen kaapuun pukeutunut ja viikatetta kantava luuranko. Myös suomalainen taidemaalari Hugo Simberg on kuvaillut töissään Kuoleman mustiin vaatteisiin pukeutuneeksi luurangoksi (kuva 2). (Skeleton (undead) 2020)



Kuva 2. Hugo Simberg, Kuolema kuuntelee, 1897. (Kansallisgalleria.)

Meksikolaisen José Guadalupe Posadan 1910-luvulla piirtämä satiirinen La Calavera Catrina piirros (kuva 3) on vaikuttanut suuresti meksikolaisen vainajien muistojuhlan, Kuolleiden päivän calaca-nimisiin luurankofiguureihin. (Levin, n.d.) Nämä luurankokoristeet taas ovat toimineet inspiraationa eri elokuvien ja videopelien luurankojen graafiselle tyyliille. Amerikkalainen animaatiostudio Pixar on esimerkiksi ottanut vaikutteita kyseistä tyylistä 2017 julkaistuun Coco-elokuvaansa (kuva 4).





Kuva 3. José Guadalupe Posada, La Calavera Catrina, 1913. (DailyArt Magazine 2019.)



Kuva 4. Pixar'in Coco-elokuvan (2017) calaca-figuurien inspiroimia luurankoja. (Finnkino 2018.)

## 2.1 Luurangot videopeleissä

Luurangot ovat löytäneet tiensä videopeleihin, ja niillä on pelistä riippuen eri merkityksiä. Toiminta- ja seikkailupeleissä ne taustalla ollessaan voivat muistuttaa taisteluiden julmuuksista tai vihjata lähistöllä olevista vaaroista. Fantasia- ja kauhuteemaisissa peleissä luurangot ovat yleisimpiä epäkuolleita vihollisia. (Skeletons, n.d.)

Pelien luurankojen ulkonäkö vaihtelee graafisesta tyylistä riippuen. Realistisen näköisissä peleissä, kuten pelistudio FromSoftware'n Souls-pelisarjassa (kuva 5), ihmisen luurangot ovat anatomialtaan täysin samanlaisia kuin oikeat. Sarjakuvamaisesti tyylitellyissä peleissä luurangot taas ovat yleensä karikatyyrimäisiä hahmoja, joiden luiden määrä tai muodot voivat olla erilaisia. Peliyritys Rare on hyödyntänyt tätä tyyliä Grabbed by the Ghoulies pelissään (kuva 6).



Kuva 5. Dark Souls 3:n (2016) luurankosotilaita. (Peter Cypers 2016.)



Kuva 6. Grabbed by the Ghoulies pelin (2003) luurankovihollisia. (Giant Bomb 2008.)

Vaikka pelien epäkuolleet luurangot yleensä ovatkin vihollisia, ovat ne joskus päässeet päähahmon tai apurin rooliin. SCE Cambridge Studion ja Other Ocean Interactiven kehittämässä MediEvil-pelisarjassa pelaaja ohjaa kuolleista herännyttä luurankoritaria (kuva 7) ja LucasArtsin Grim Fandango pelin hahmot esiintyvät calaca-figuurien tyylinä luurankoina (kuva 8).



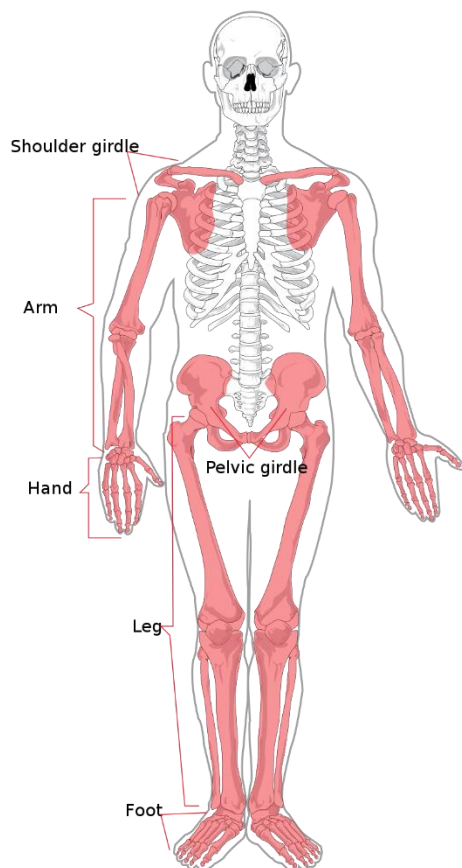
Kuva 7. MediEvil-pelin (2019) sankari Sir Daniel Fortesque. (Push Square 2019.)



Kuva 8. Grim Fandango Remastered pelin (2015) luurankohahmoja. (PC World 2015.)

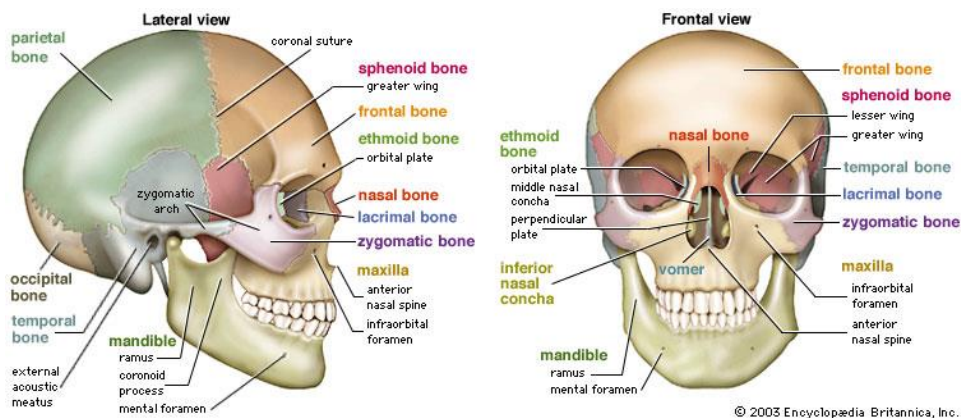
## 2.2 Ihmisen luurangon anatomia

Ihmisen luuranko muodostaa tukirangan, joka suojaa aivoja ja muita arkoja sisäelimiä, kuten sydäntä ja keuhkoja. Täysikasvuisella ihmisellä tunnetaan noin 206 luuta. Ihmisen luuranko jaetaan kahteen pääosaan: aksiaaliseen luurankoon (kallo, selkäranka, kylkiluut ja rintalasta) ja raajojen luurankoon (olkapää, käsivarsi, ranne, käsi, lantio, jalka, nilkka ja jalkaterä) (kuva 9). (Leppäluoto 2008, 74.)



Kuva 9. Punaisella merkitty raajojen luuranko. (Mariana Ruiz Villarreal 2007.)

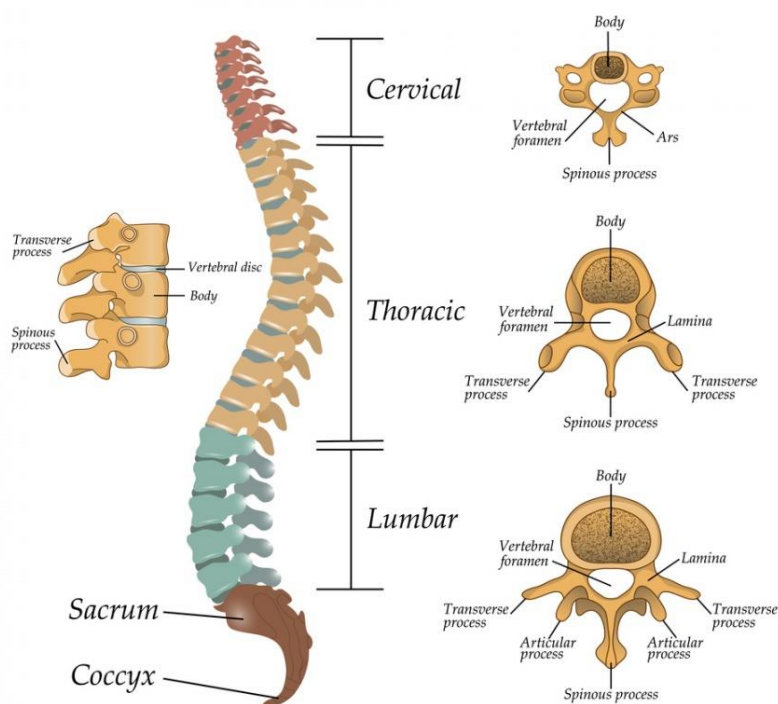
Pääkallo eli kallo koostuu useista yhteen kasvaneista luista, joiden päätarkoituksena on aivojen ja pään muiden elinten suojaaminen. Kallo muodostuu 29 luusta, jotka voidaan jakaa aivokopan ja kasvojen luiden luokkaan. Kallon luut kiinnittyvät toisiinsa sideliitoksilla eli saumoilla. Poikkeuksena toimii alaleualuu, joka kiinnittyy leukanivelellä ohimoluun nivelnastoihin (kuva 10). (Leppäluoto 2008, 78-80.), (Budowick 1994, 78.)



Kuva 10. Kallo ja sen osat. (Encyclopædia Britannica 2018.)

Selkäranka koostuu eri nikamista, jotka jaetaan kaula-, rinta- ja lannenikamiin. Aikuisten selkärangan päätteessä olevat risti- ja häntäluu muodostuvat yhteen kasvaneista samannimisistä nikamista (kuva 11). (Leppäluoto 2008, 81.)

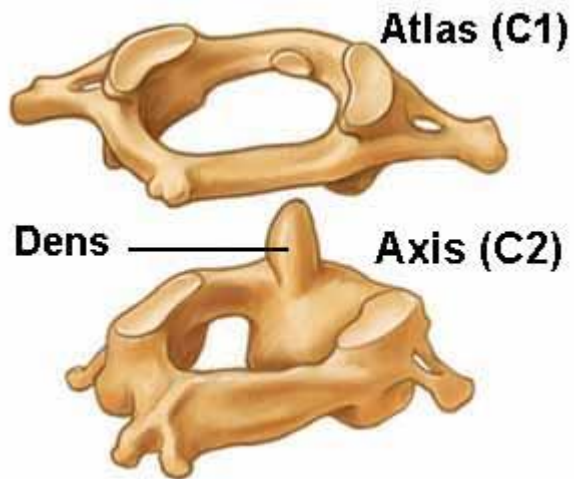
### *The structure of the segments of the spine*



Kuva 11. Selkäranka ja sen nikamat. Oikealla ylhäältä alas ovat kaula-, rinta- ja lannenikamat. (SpineUniverse 2019.)

Selkärangan eri osien nikamat poikkeavat rakenteeltaan jonkin verran toisistaan. Useimmissa nikamissa on kuitenkin nikaman solmu, kaari, reikä, kaksi poikkihaaraketta ja yksi okahaarake. Nikamien reiät suojaavat selkäydintä ja selkäydinkalvoja. Okahaarakkeeseen kiinnittyvät selän syvät lihakset. Eri nikamien poikkihaarakkeet eroavat toisistaan. Kaulanikamien poikkihaarakkeissa on reikä, jonka kautta nikamavaltimo kulkee. Kylkiluut nivELYTYVÄT rintanikamien poikkihaarakkeiden nivelpintoihin. Lannenikamien poikkihaarakkeet ovat surkastuneiden kylkiluiden jäänteitä. (Budowick 1994, 118.)

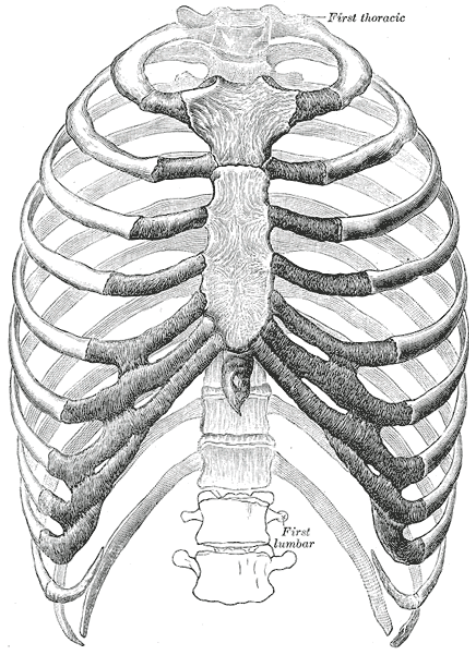
Samannimiset nikamat pysyvät rakenteeltaan lähes samanlaisina. Poikkeuksen tekevät kaksi ylintä kaulanikamaa: kannattajanikama, joka mahdollistaa pään nyökyttämisen ja kiertäjänikama, joka mahdollistaa pään kiertämisen. Kannattajanikamassa on kallonpohjaan vastaavat nivelpinnat ja poikkisideksinen nikamakaaren aukko, johon kiertäjänikaman keskellä oleva hammas sopii (kuva 12). (Leppäluoto 2008, 83.)



Kuva 12. Kannattajanikama (ylhällä) ja kiertäjänikama (alhaalla). (SpineUniverse 2018.)



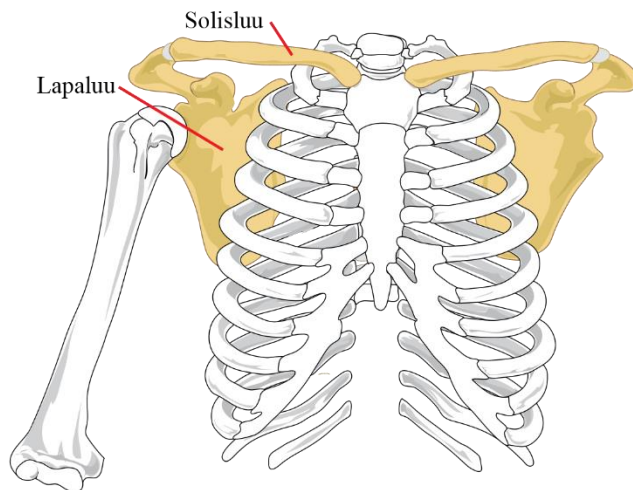
Rintakehä muodostuu rintanikamiin kiinnittyneistä 12 kylkiluuparista ja rintalastasta. Kylkiluut lähtevät kahden rintanikaman välistä ja kiinnittyvät rustoliitoksella rintalastaan. Poikkeuksena ovat kaksi alinta kylkiluuparia, jotka kiinnittyvät vain nikamiin. Rintalasta koostuu kolmesta osasta: kahvasta, rungosta ja miekkalisäkkeestä (kuva 13). (Leppäluoto 2008, 84.)



Kuva 13. Kylkiluut ja rintalasta. (Henry Vandyke Carter 1858.)

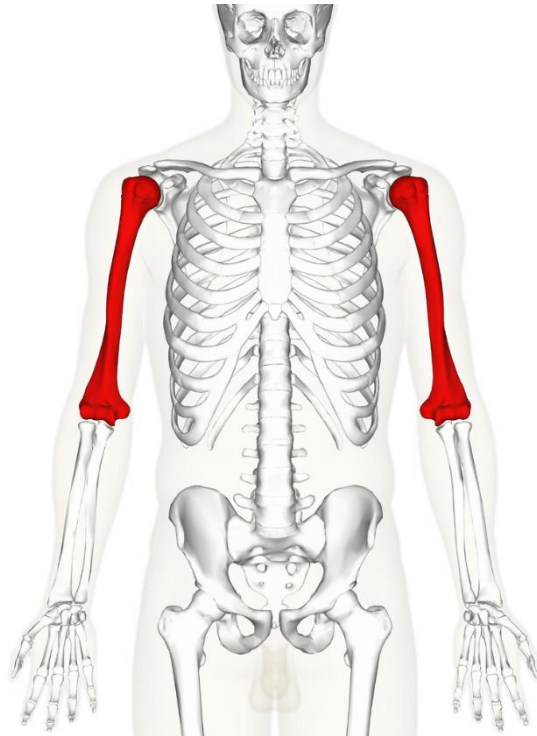
Yläraajan luihin kuuluvat hartian, olkavarren, kyynärvarren ja käden luut.

Hartian luita ovat lievästi S-kirjaimen muotoinen solisluu ja litteä kolmiomainen lapaluu. Lapaluun olkavarteen suuntautuvassa osassa on kaksi lisäkettä, korppilisäke ja olkalisäke, johon solisluu niveltyy rintalastan lisäksi. Lapaluussa on myös nivelkuoppa, johon olkaluu niveltyy. Lapaluun verrattain avoin nivelkuoppa ja se, että lapaluu seuraa olkavarren liikkeitä, takaa olkavarrelle suuren liikelajisuuden (kuva 14). (Leppäluoto 2008, 85.)



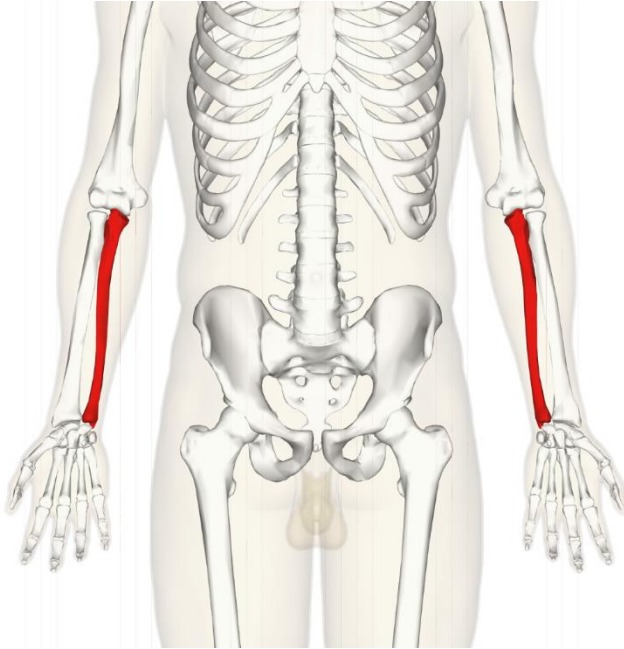
Kuva 14. Solisluu ja lapaluu. (Mariana Ruiz Villarreal 2007.)

Olkavarressa oleva olkaluu niveltyy yläpäästään lapaluun nivelkuoppaan, mitkä muodostavat olkanivelen. Tämä on ihmisen elimistön liikkuvin nivel. Olkaluun alapäässä on kaksi nivelpintaa, olkaluun tela ja värttinänasta, joihin kynnärvarren luut niveltyvät (kuva 15).

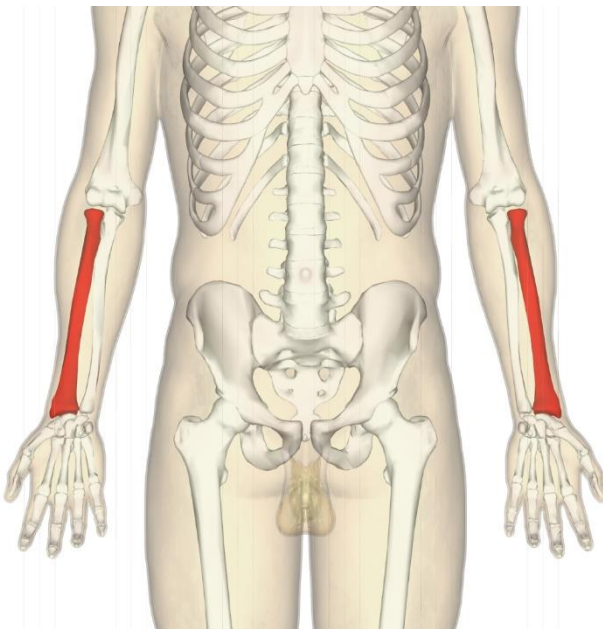


Kuva 15. Olkaluu. (Anatomography 2012.)

Kyynärvarren kaksi luuta ovat kyynärluu, joka kiinnittyy olkaluussa olevaan olkaluun telaan (kuva 16) ja varttinäluu, joka kiinnittyy olkaluun varttinänastaan (kuva 17). Kyynärvarren luut nivELYVÄT ranneluihin.

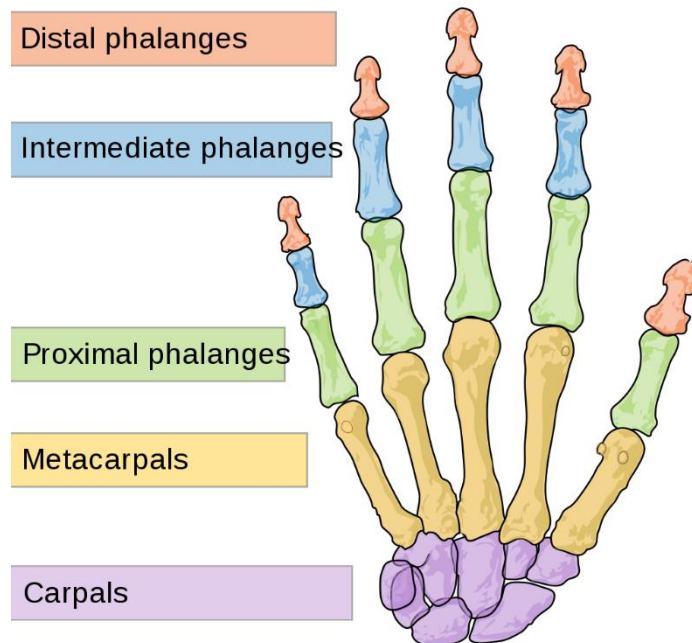


Kuva 16. Kyynärluu. (Anatomography 2013.)



Kuva 17. Varttinäluu. (Anatomography 2013.)

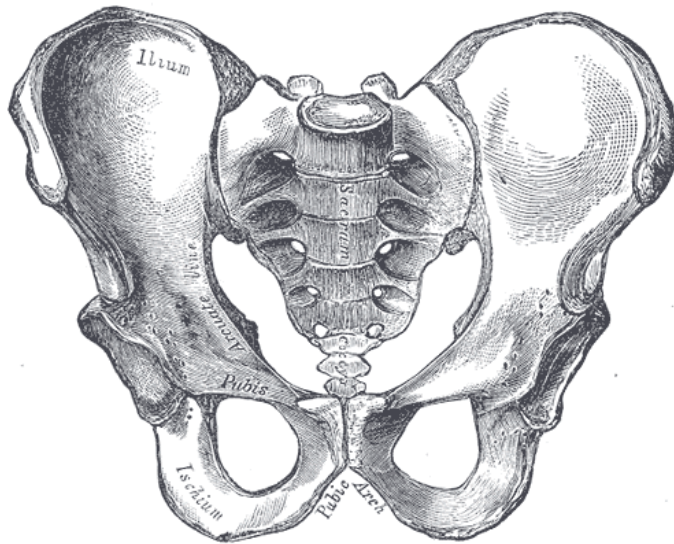
Ranneluut koostuvat kahdeksasta luusta, joista neljä muodostaa ylemmän rannenivelen ja toiset neljä alemman rannenivelen. Ranneluihin nivELYVÄT viisi kämmentuuta, joihin taas nivELYVÄT sormiluitu. Sormiluitu ovät kärkiluu, keskiluu ja tyviluu. Peukalossa sormiluitu on muista sormista poiketen vain kärkiluu ja tyviluu, kun taas muista sormista löytyvät kaikki kolme luuta (kuva 18). (Lepäluoto 2008, 86-88.)



Kuva 18. Käden luut. Violetilla ranneluut, keltaisella kämmentuut, vihreällä kärkiluut, sinisellä keskiluu ja punaisella tyviluu. (Mariana Ruiz Villarreal 2007.)

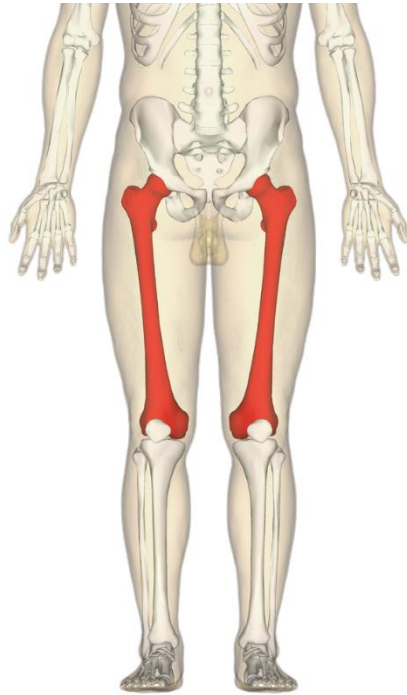
Alaraajan luihin kuuluvat lantion, reiden, polven, säären, nilkan ja jalkaterän luut.

Lantion luut muodostuvat kahdesta lonkkaluusta ja selkärankaan kiinnittyvästä ristiluusta. Lantio tukee selkärankaa, suojaa sukupuolielimiä ja toimii synnytyskanavana (kuva 19). (Leppäluoto 2008, 88), (Budowick 1994, 264.)



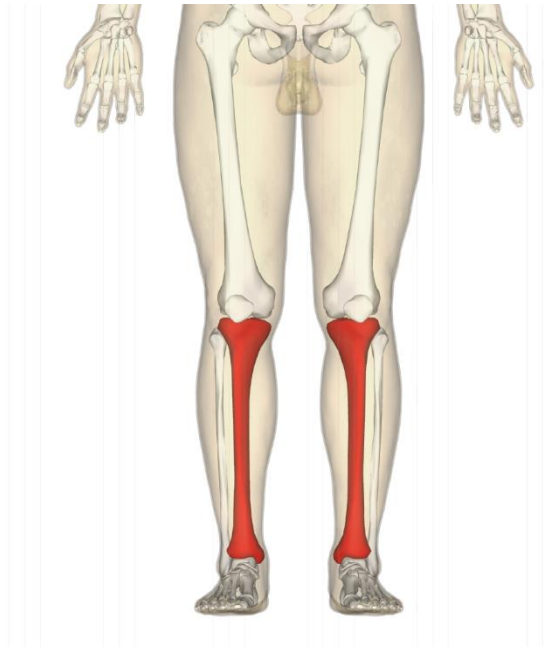
Kuva 19. Miehen lantion luut. (Henry Vandyke Carter 1858.)

Reisiluu niveltyy yläpäästään lonkkaluun lonkkamaljaan ja muodostaa lonkkanivelen. Alapäässään reisiluu niveltyy sääriluuhun muodostaen polvinivelen (kuva 20).

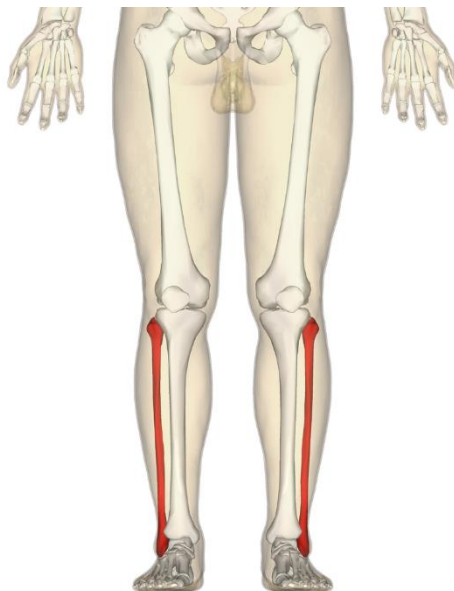


Kuva 20. Reisiluu. (Anatomography 2013.)

Sääressä sijaitsee kaksi luuta. Reisiluuhun niveltävä paksumpi sääriluu (kuva 21) ja ulkosivulla oleva ohuempi, sääriluuhun niveltävä ja polviniveleen kuulumaton pohjeluu (kuva 22). Sääriluun yläpäässä on sääriluun kyhmy, johon nelipäisen reisilihaksen jänne kiinnittyy. Reisiluun ja sääriluun välissä nelipäisen reisilihaksen jänteessä sijaitseva polvilumpio niveltyy reisi- ja sääriluuhun ja suojaa polviniveltä estämällä reisilihaksen ääriliikkeitä.



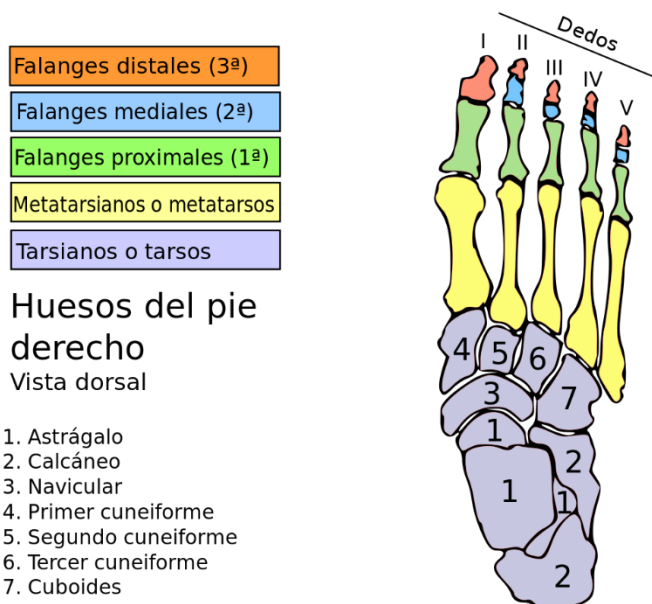
Kuva 21. Sääriluu. (Anatomography 2013.)



Kuva 22. Pohjeluu. (Anatomography 2013.)



Nilkkaan kuuluu seitsemän nilkkaluuta, joiden jatkeena ovat jalkaterän viisi jalkapöytäluuta ja varpaiden luut. Jalkaterän luut vastaavat kämmen- ja sormiluita ja varpaan luut koostuvat sormiluiden tapaan kolmesta osasta: kärki-, keski- ja tyviluusta. Peukalon tapaan, myös isovarvas koostuu poikkeuksellisesti vain kahdesta luusta: kärki- ja tyviluusta (kuva 23). (Leppäluoto 2008, 90-94.)



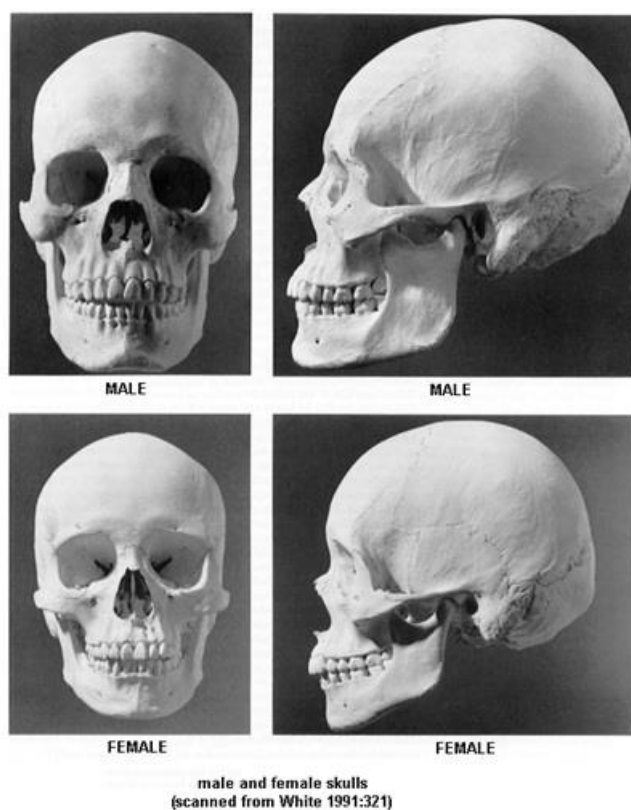
Kuva 23. Nilkan ja jalkaterän luut. Violetilla nilkkaluut, keltaisella jalkapöytäluut, vihreällä kärki- luut, sinisellä keskiluut ja punaisella tyviluut. (Von Tasha & Mario Modesto 2009.)

### 2.3 Sukupuolten väliset erot luissa

Ihmisen luurangon osat ovat samat sekä miehillä että naisilla, mutta niiden rakenteissa on useita eroja. Lasten luurangoista on vaikea määrittellä sukupuolta, mutta aikuisen ihmisen luurangon sukupuoliset erot ovat selkeämpiä.

Isoin eroavaisuus löytyy luiden koosta. Miesten luut ovat yleensä isompia kuin naisten. Poikkeuksena ovat lantion luut. Synnyttämisen takia naisen lantio on suurempi ja leveämpi. (Budowick 1994, 264.)

Kallojen erot myös selkeästi erottuvat. Miehillä takaraivoluun pinta on naisten luuta epätasaisempi ja luussa on terävä ulkonema. Otsa on miehillä luisempi, kun taas naisilla se on pysty ja pyöreämpi. Kulmakaaret ovat miehillä voimakkaat ja naisilla ne ovat sirot tai puuttuvat kokonaan. Miesten silmäkuopat ovat kulmikkaammat ja niiden yläreuna on paksu ja terävä. Naisilla silmäkuopan yläreuna on ohut ja terävä. Naisten leuka on yleensä terävähkö tai pyöreä, kun taas miehillä se on kulmikkaampi (Kuva 24). (Tieteen kuvalehti, 2013.)



Kuva 24. Ylhäällä miehen ja alhaalla naisen kallot. (Missing Tooth Investigators 2012.)

### 3 3D-mallinnus

3D-mallinnuksessa luodaan tietokoneen avulla kolmiulotteinen polygonimalli tai polygoniverkko. Polygonimalli koostuu useista polygoneista, jotka muodostuvat kulmapisteistä eli vertekseistä. Verteksen välistä muodostuvaa janaa kutsutaan reunaksi ja polygonia itseään voidaan kutsua sivuksi. Sivut voivat koostua useista kulmista, mutta renderöinnin helpottamiseksi ne muodostuvat yleensä kolmioista tai nelikulmioista. Yleisimpiä mallinnustapoja ovat polygonimallinnus ja digitaalinen veistäminen. (Slick, 2020.)

Mallinnuksessa voidaan käyttää apuna mallinnusohjelmien modifikaattoreita. Modifikaattorit ovat automaattisia muuttujia, jotka väliaikaisesti näyttävät muokkaavan mallia muuttamatta sen perusgeometriaa. Halutut muutokset tulevat voimaan vasta kun ne hyväksytään. Modifikaattoreiden avulla voidaan helposti ja nopeasti tehdä normaalisti aikaa vieviä muutoksia, kuten mallin käyristämistä. (Blender Documentation Team, 2020.)

#### 3.1 Polygonimallinnus

Polygonimallinnuksen kaksi yleisintä tapaa ovat laatikko- ja reunamallinnus. Laatikkomallinnuksessa yksinkertaisesta muodosta, kuten kuutiosta tai lieriöstä muokataan ja hiotaan haluttu malli. Reunamallinnuksessa malli rakennetaan pala kerrallaan lisäämällä polygonisivuja toisiinsa. Sivut voidaan yhdistää toisiinsa renkaan tapaan, jonka kolo sitten peitetään. Reunamallinnus on hyvä tapa monimutkaisten muotojen, kuten ihmisen kasvojen mallintamiseen. (Slick, 2019.)

Polygonimallinnuksessa sivujen määrä vaikuttaa muotoon. Mitä enemmän mallissa on sivuja, sitä yksityiskohtaisempi se on. Polygonimallinnuksessa sivuja tai reunoja voidaan lisätä pursuttamalla valittuja sivuja ja reunoja tai jakamalla sivut osiin esimerkiksi silmukkaleikkauksella. Mallin reunoja voidaan myös viistota, mikä antaa kulmille enemmän kaarevuutta. (Slick, 2020.)

### 3.2 Tekstuointi

Tekstuurit ovat 3D-mallin pinnalle heijastuvia 2D-kuvioita, jotka vaikuttavat mallin ulkonäköön. Tekstuurien avulla mallin pinnalle voidaan antaa väriä tai tietyn materiaalin ominaisuuksia, kuten kiiltoa tai karheutta. (Trammell & Lampel, n.d.)

Tekstuointi aloitetaan UV-kartoittamisella, mikä määrittää miten tekstuurit muodostuvat 3D-mallin pinnalle. Mallinnusohjelma voi laskea mallin UV-kartan automaattisesti, mutta olisi suotavampaa luoda sellainen itse. Mallin pinnalle voidaan määritellä saumoja eli leikkauskohtia, joiden avulla mallinnusohjelma ikään kuin kuorii mallin auki luoden UV-kartan. UV-kartoittamisen jälkeen tekstuurit voidaan tehdä joko mallinnusohjelmalla tai erillisellä kuvankäsittely- tai tekstuointiohjelmalla, kuten Substance Designerilla tai Painterilla.

### 3.3 Luustaminen

Luustamisessa 3D-mallille luodaan useista toisiinsa yhdistyneistä digitaalisista luista koostuva luuranko. Digitaaliset luut oikean luurangon tapaan liikuttavat vain niitä verteksejä, joihin ne on mallissa sijoitettu. Luurankomainen rakenne mahdollistaa mallin tai sen osien liikuttamisen sätkynuketapaa, joka taas helpottaa ja nopeuttaa mallin animointia.

Jotta mallin raajojen, kuten käsien tai jalkojen liikkuvuus olisi luontevampaa ja animointi helpompaa, voidaan luille lisätä käänteiskinematikkaa. Tämä tapahtuu luomalla halutuille luille omat ohjaimet, rajoitteet ja napakohteet. Käänteiskinematikan avulla kyynärpäät ja polvet osoittavat aina haluttuun suuntaan ja rajoitteet mahdollistavat luiden yksisuuntaisen taipumisen. (Petty, n.d.)

## 4 Animaatio

Animaatio on tekniikka, jossa elottomalle asialle luodaan illuusio liikkumisesta. Animaatio toteutetaan toistamalla nopeasti peräkkäin pieniä muutoksia sisältäviä kuvia. Ihminen on yrittänyt animaatiota jo kivikauden luolamaalauksilla ja antiikin Kreikan ruukkumaalauksilla. 1800-luvun monet lelut, kuten plärit mahdollistivat kuvien liikkumisen illuusion. Animaatio taidemuotona voidaan väittää alkaneen vasta 1910-luvulla. 1900-luvun animaatiot vaihtelivat klassisista 2D-animaatioista stop-motion-animaatioihin. Nykyään lähes kaikki animaatiot tehdään tietokoneella ja 3D-animaatiota voidaan pitää nukketheaterin ja stop-motion-animaatioiden jatkeena. (Williams 2009, 11-20.)

### 4.1 Animaation 12 periaatetta

Kirjassaan *The Illusion of life: Disney animation*, Disney-animaattorit Frank Thomas ja Ollie Johnston listaavat animaation periaatteita. Nämä periaatteet pohjautuvat 1920- ja 1930-luvuilta asti tuotettujen Disney-animaattoreiden töihin. Nykyäänkin lähes kaikki animaatiot pohjautuvat näihin periaatteisiin. Tässä kohtaa periaatteet selitetään lyhyesti ja yksinkertaistetusti.

#### 1. Litistys ja venytys

Litistys ja venytys luo painon ja tilavuuden tunnetta. Tyyllitellyssäkin animaatiossa kappale säilyttää tilavuutensa litistyessä ja venyessä. (Thomas & Johnston 1995, 47-51.)

#### 2. Ennakointi

Ennakoinnin tarkoitus on saada katsoja valmistautumaan pääliikkeeseen. Ennakointi ennen liikettä tekee liikkeestä paljon uskottavamman. (Thomas & Johnston 1995, 51-53.)

#### 3. Lavastus

Lavastuksessa katsojan huomio kiinnitetään kohtauksen tärkeimpiin asioihin. Kohtauksen tulee olla selkeä ja ymmärrettävä ensisilmäyksellä, oli sen päähuomio sitten toiminnassa tai hahmon eleissä. (Thomas & Johnston 1995, 53-56.)

#### 4. Suoraan ja asennosta asentoon animointi

Suoraan animointi ja asennosta asentoon animointi ovat kaksi eri animointitapaa. Suoraan animoinnissa kohde animoidaan alusta loppuun yksi kuva kerrallaan. Asennosta asentoon animoinnissa piirretään aluksi tärkeimmät ns. avainasennot, joiden väliin piirretään loput tarvittavat kuvat. (Thomas & Johnston 1995, 56-58.)

#### 5. Seuraava ja päällekkäinen liike

Seuraavassa liikkeessä liikkuvan hahmon lisäkkeet, kuten pitkät hiukset tai vaatteen helmat jatkavat liikettä hahmon pysähtyessä. Päällekkäisessä liikkeessä hahmon ruumiin osat liikkuvat eri tahtiin. Kädet jatkavat liikettään vielä vaikka keho äkkiä pysähtyisikin. (Thomas & Johnston 1995, 59-62.)

#### 6. Alku- ja loppuhidastus

Alku- ja loppuhidastuksessa liikkeen alkuun ja loppuun lisätään enemmän piirroksia. Tämän avulla liike kiihdyttävän auton tapaan alkaa hitaasti, ja hidastuu loppua kohden jarrutuksen tapaan. (Thomas & Johnston 1995, 62.)

#### 7. Kaaret

Lähes kaikki elävät olennot liikuttavat kehoaan tai raajojaan kaareissa. Suora liike vaikuttaa mekaaniselta ja kaarevat liikkeet tuovat animaatioon eloa. (Thomas & Johnston 1995, 62-63.)

#### 8. Toissijainen liike

Toissijaisen liike tarkoittaa pienempää toimintaa, joka tukee ja elävöittää pääliikettä. Jos katsojan huomio kiinnittyy enemmän toissijaiseen liikkeeseen, animaatio vaikuttaa sekavalta. (Thomas & Johnston 1995, 63-64.)

#### 9. Ajoitus

Ajoituksella tarkoitetaan kuvien määrää liikkeessä. Animaatio voi muuttaa merkitystään mitä enemmän kuvia alku- ja loppukuvien välissä on. Hitaissa liikkeissä välikuvia on enemmän ja nopeissa vähemmän. (Thomas & Johnston 1995, 64-65.)

## 10. Lioittelu

Lioittelussa animoitavan hahmon ilmeitä tai asentoja korostetaan, ettei hahmon tunnetila tai toiminta jää epäselväksi. (Thomas & Johnston 1995, 65-66.)

## 11. Yhtenäinen piirros

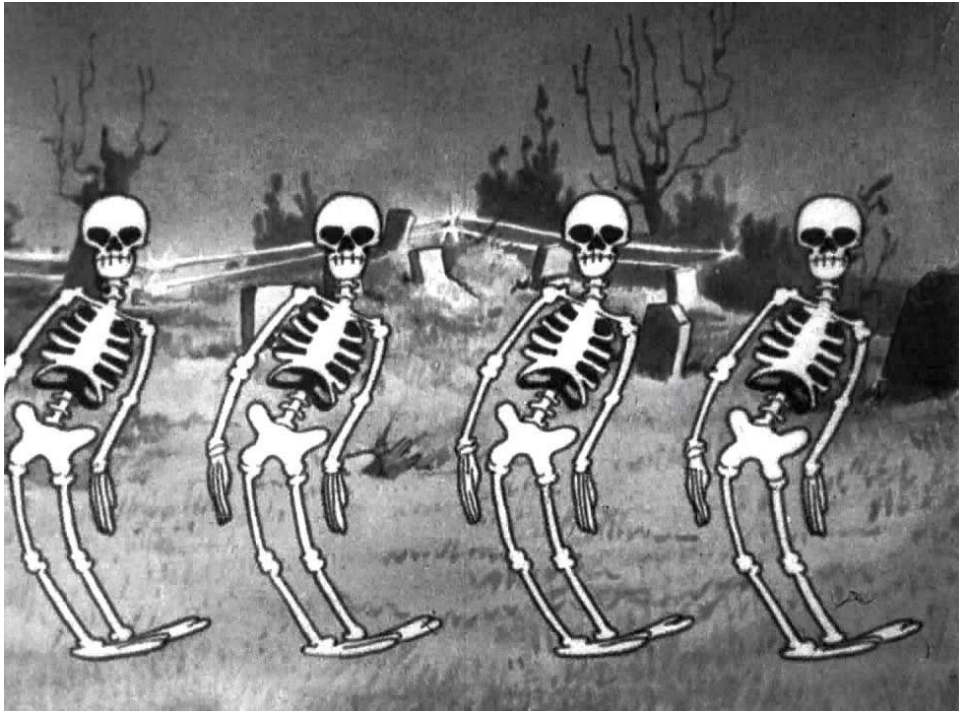
Yhtenäisellä piirroksella tarkoitetaan piirtämisen taitoa. Hyvä animaattori osaa tuoda kuvissa esille painoa, syvyyttä ja tasapainoa. (Thomas & Johnston 1995, 66-68.)

## 12. Viehätytys

Viehätytys tai vetovoima tarkoittaa piirroksen ja toiminnan miellyttävää ja kiinnostavaa ominaisuutta, jota katsoja tykkää katsella. Kuvien viehätystä voidaan verrata näyttelijöiden karismaan. (Thomas & Johnston 1995, 68.)

### 4.2 Luurankojen animointi

Luurankojen animoinnissa periaatteiden käyttö vaihtelee tyylistä ja miten suurella roolilla luurangot ovat. Tyylielitysten luurankojen animoinnissa Disney on hyödyntänyt edellä lueteltuja periaatteita 1929 julkaistussa *The Skeleton Dance* animaatiossaan (kuva 25). Animaatiossa luurangot epärealistisesti, mutta uskottavasti venyttävät luitaan ja muuttavat ilmeitään. Lioitellut eleet ja ilmeet viihdyttävät katsojaa ja selkeästi viestivät luurankojen hauskanpidosta.



Kuva 25. The Skeleton Dance animaation (1929) tanssivat luurangot. (Walt Disney Animation Studios 2015.)

Realistisen luurangon animoinnissa on haasteensa, mutta siihenkin on mahdollista saada elävyyden tunnetta. Litistys ja venytys ovat vähäistä, mutta muilla periaatteilla voidaan saada uskottavaa ja mielenkiintoista liikettä. Stop-motion-animaattori Ray Harryhausen onnistui tässä animoidessaan taistelevat luurankosotilaat vuonna 1963 julkaistuun Jason and the Argonauts elokuvaan. Pällekkäiset- ja toissijaiset liikkeet ja raajojen liikkuminen kaarella luovat realistisen liikkeen tunnetta ja lavastus ja viehätys antavat kuvan vaarallisista ja pelottavista vastustajista (kuva 26).





Kuva 26. Luurankosotilaat hyökkäämässä sankarin kimppuun elokuvassa Jason and the Argonauts (1963). (Chicago Reader 2014.)

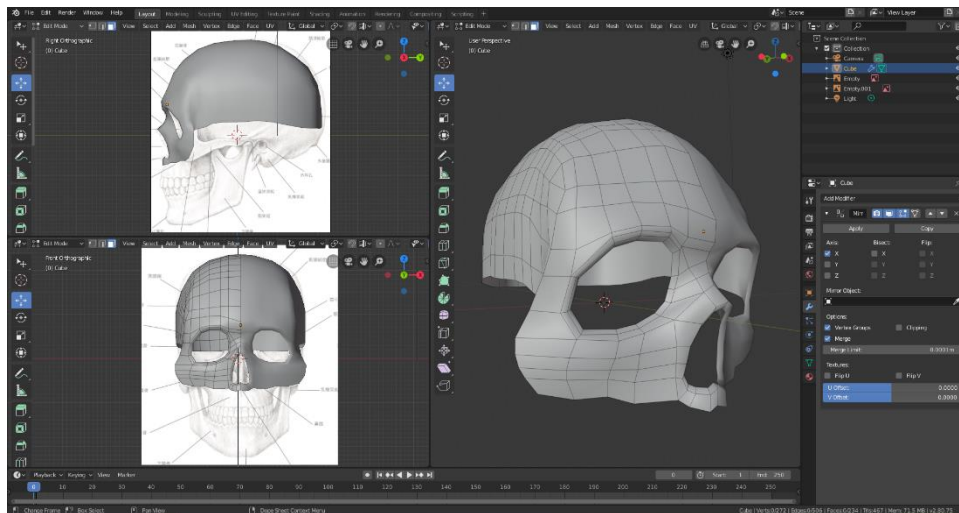
Tässä opinnäytetyössä realistista luurankoa animoitaessa pyritään käyttämään mahdollisimman monia periaatteita. Litistystä ja venytystä ei kuitenkaan tulla käyttämään realistisen luiden liikkeeseen. 3D-animoinnissa suoraan animointia ei juurikaan käytetä, sillä tietokone laskee automaattisesti animaation kulun eri avainasentojen välillä, mikä nopeuttaa animaatioiden hiomista. Realistisen luurangon ilmeitä on lähes mahdoton tulkita, mutta liioittelemalla eleitä ja asentoja voidaan sen tunnetila tuoda esille. 3D-animoinnissa yhtenäinen piirros tulee esille enimmäkseen tasapainoisissa ja selkeissä hahmon asennoissa.

## 5 Projektiosuus

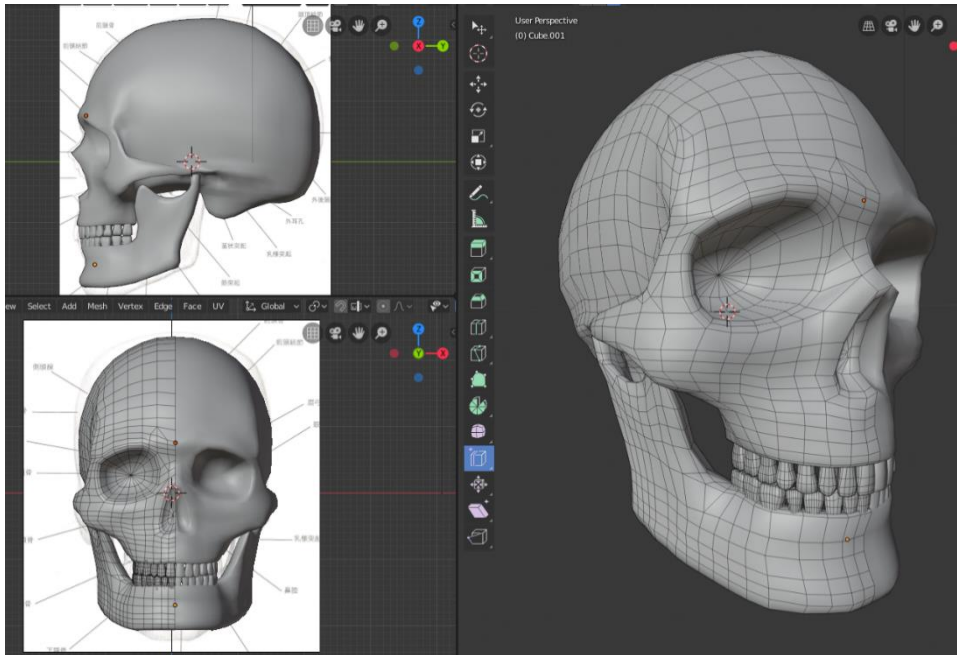
Tässä osuudessa käydään läpi luurangon mallintamisen työvaiheet. Luurangoksi valittiin realistinen miehen luuranko ja työssä käytettiin Blender-mallinnusohjelman 2.8 versiota. Luurangon jokainen osa mallinnettiin käyttäen polygonimallinnustapaa. Kallio mallinnettiin reunamallinnuksella ja muut osat laatikkomallinnuksella.

### 5.1 Mallinnus

Mallinnus aloitettiin kallosta. Reunamallinnuksella muotoiltiin silmät ja nenä, minkä jälkeen edettiin takaraivoon ja yläleukaan. Työssä käytettiin apuna Blenderin peilimodifikaattoria, mikä mahdollistaa symmetrisen mallinnuksen ja näin puolittaa työmäärän (kuva 27). Yläosan jälkeen mallinnettiin alaleukaluu ja lopuksi hampaat (kuva 28).

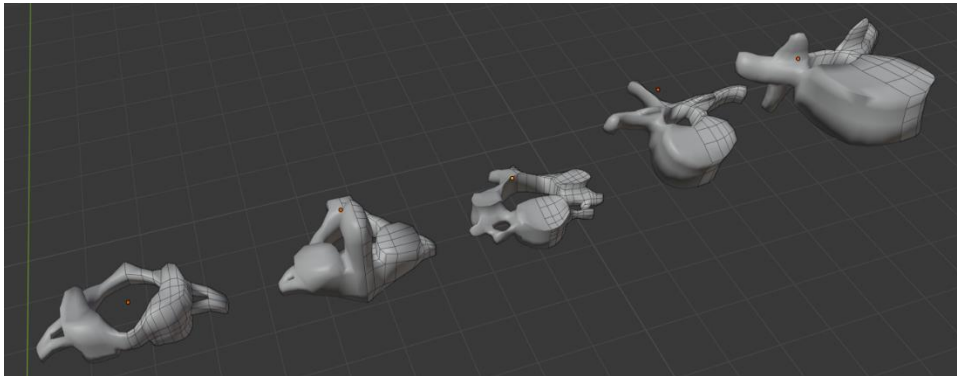


Kuva 27. Kallon yläosan reunamallintamista peilimodifikaattorin avulla.

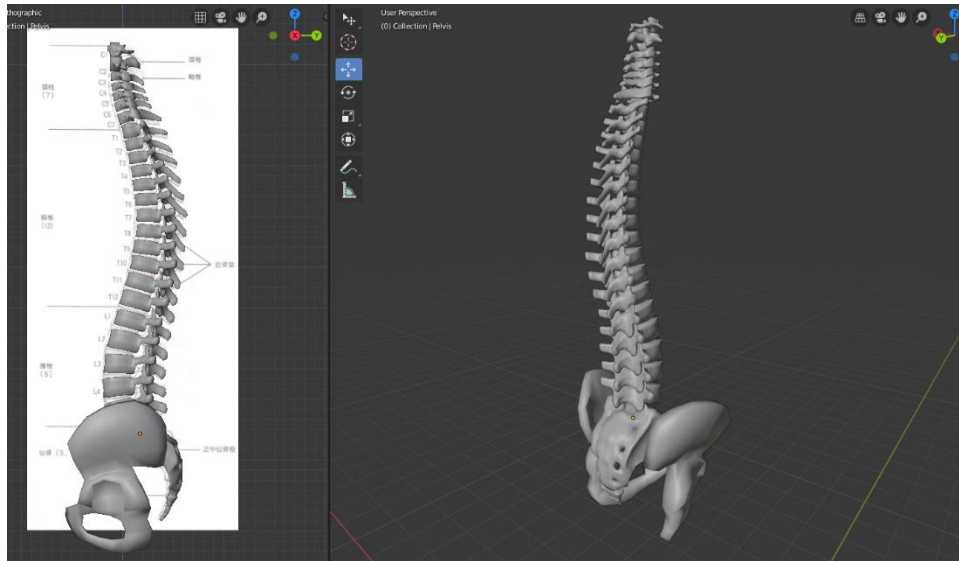


Kuva 28. Valmis kallon malli.

Kallon jälkeen vuorossa olivat selkäranka ja lantio. Aluksi kaulan kolme ylintä nikamaa sekä rinta- ja lannenikama mallinnettiin erikseen (kuva 29). Sen jälkeen kolme alinta nikamaa monistettiin ja pienten muutosten jälkeen sijoiteltiin selkärangan muotoon. Nikamien jälkeen mallinnettiin risti- hantä- ja lonkkaluut (kuva 30).

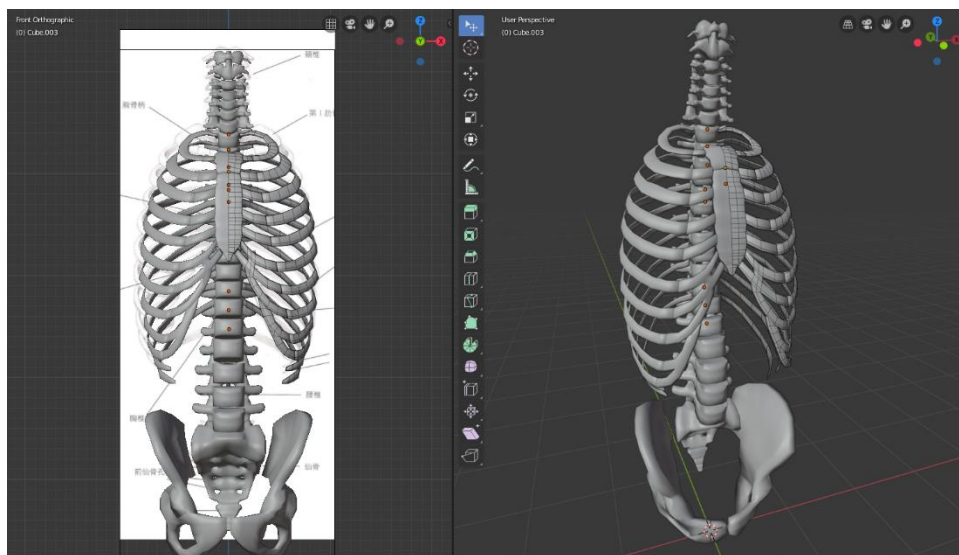


Kuva 29. Vasemmalta oikealle kolme ylintä kaulanikamaa, rinta- ja lannenikama.

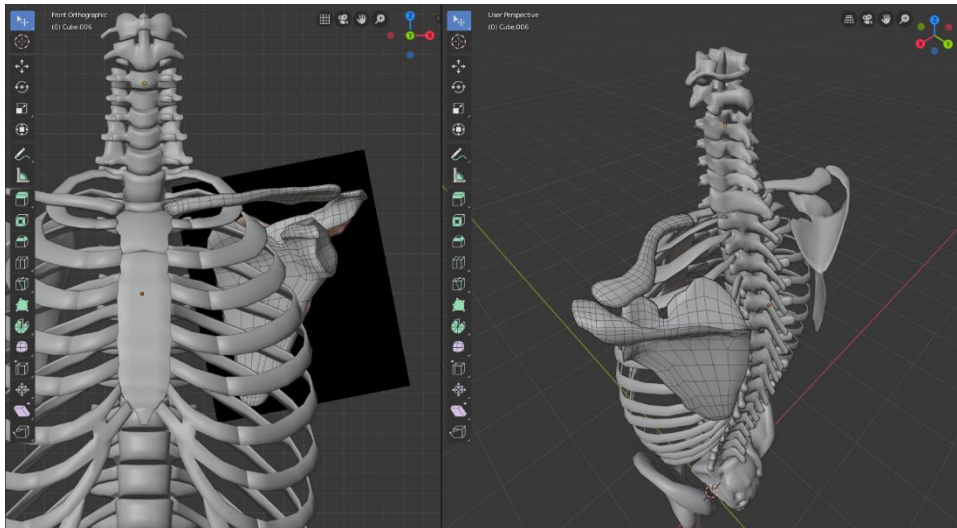


Kuva 30. Valmis selkäranka ja lantion luut.

Kun selkäranka oli valmis, mallinnettiin rintalasta, johon yhdistettiin rintanikamista alkavat kylkiluut (kuva 31). Sen jälkeen mallinnettiin hartian luihin kuuluvat lapa- ja solisluu (kuva 32).

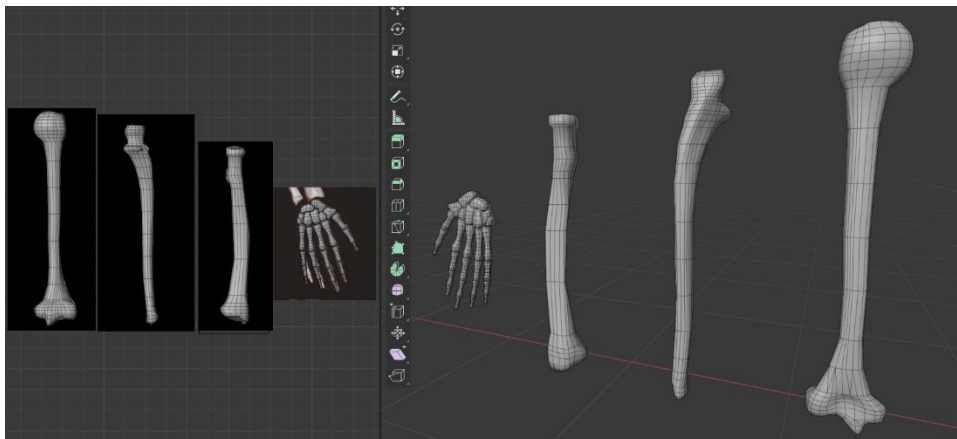


Kuva 31. Rintalasta ja rintanikamista lähtevät kylkiluut.

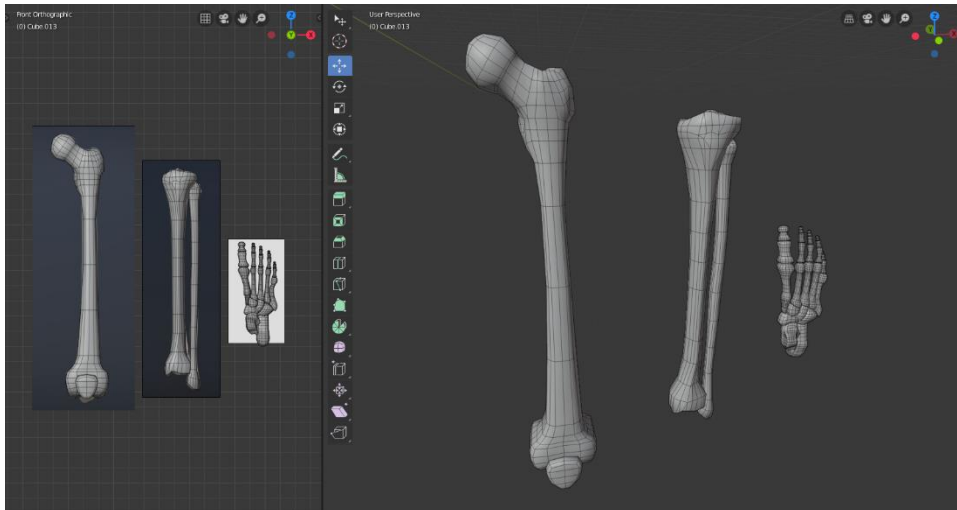


Kuva 32. Lapaluu ja sen ja rintalastan välissä oleva solisluu.

Jäljellä olivat enää loput ylä- ja alaraajan luut. Viimeiset luut mallinnettiin alaspäin edeten järjestyksessä. Ensiksi tehtiin olka-, kyynär-, varttinä- ja käden luut (kuva 33). Lopuksi mallinnettiin reisi-, sääri-, pohje-, jalan luut ja polvilumpio (kuva 34).

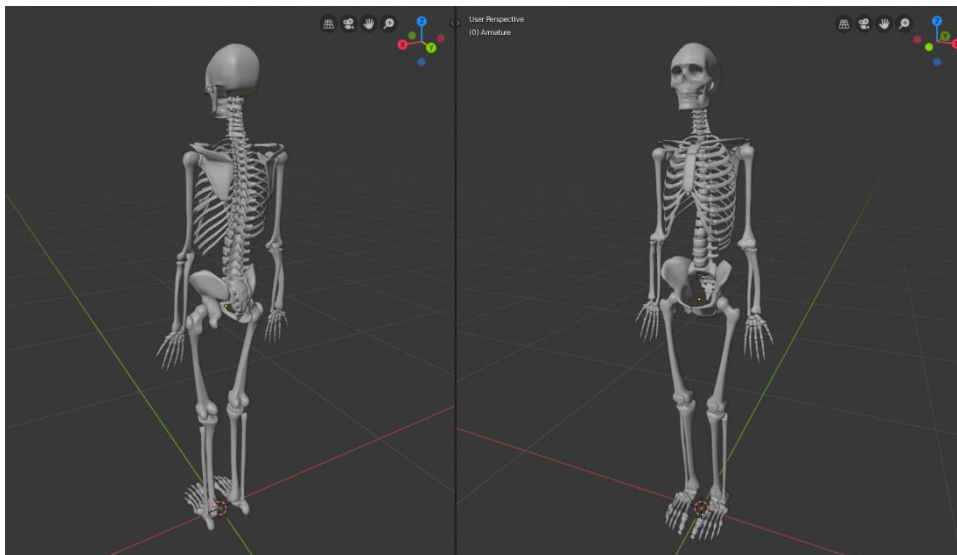


Kuva 33. Olka-, kyynär- ja varttinä- sekä käden luut.



Kuva 34. Reisi-, sääri-, pohje-, jalan luut ja polvilumpio.

Kun kaikki luut oli mallinnettu, aseteltiin ne anatomisesti oikeille paikoilleen. Lopuksi vielä paranneltiin muutamia yksityiskohtia. Kylkiluita levennettiin, jotta ne muistuttaisivat enemmän miehen rintakehää ja lonkkaluuihin lisättiin enemmän yksityiskohtia, etteivät ne olisi liian kulmikkaita. Loppulta luiden mallit yhdistettiin yhdeksi luurankomalliksi (kuva 35). Mallintamisen osalta luuranko oli nyt valmis.

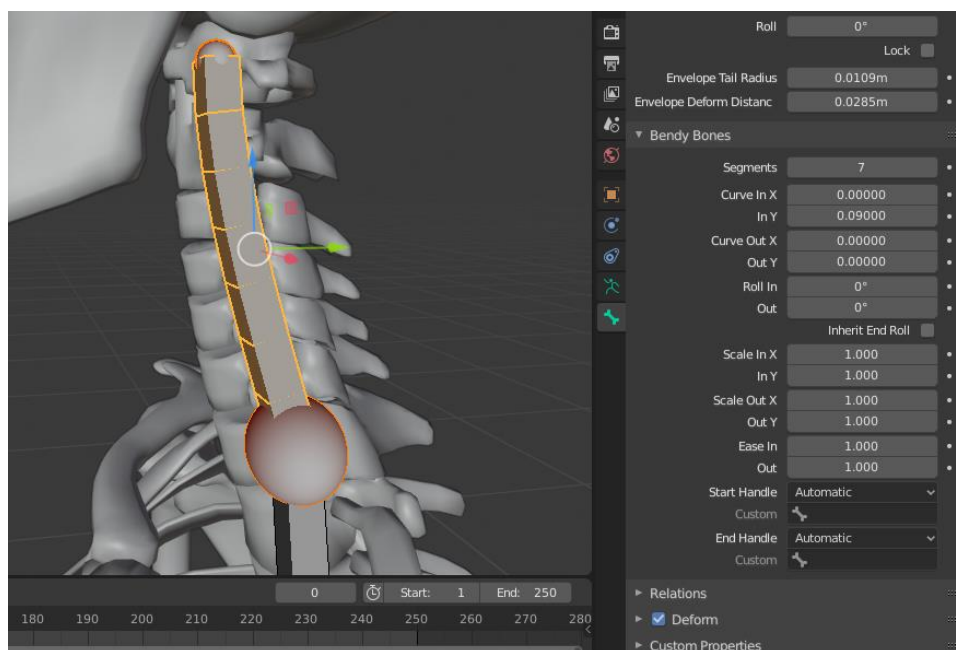


Kuva 35. Valmis ihmisen luuranko.

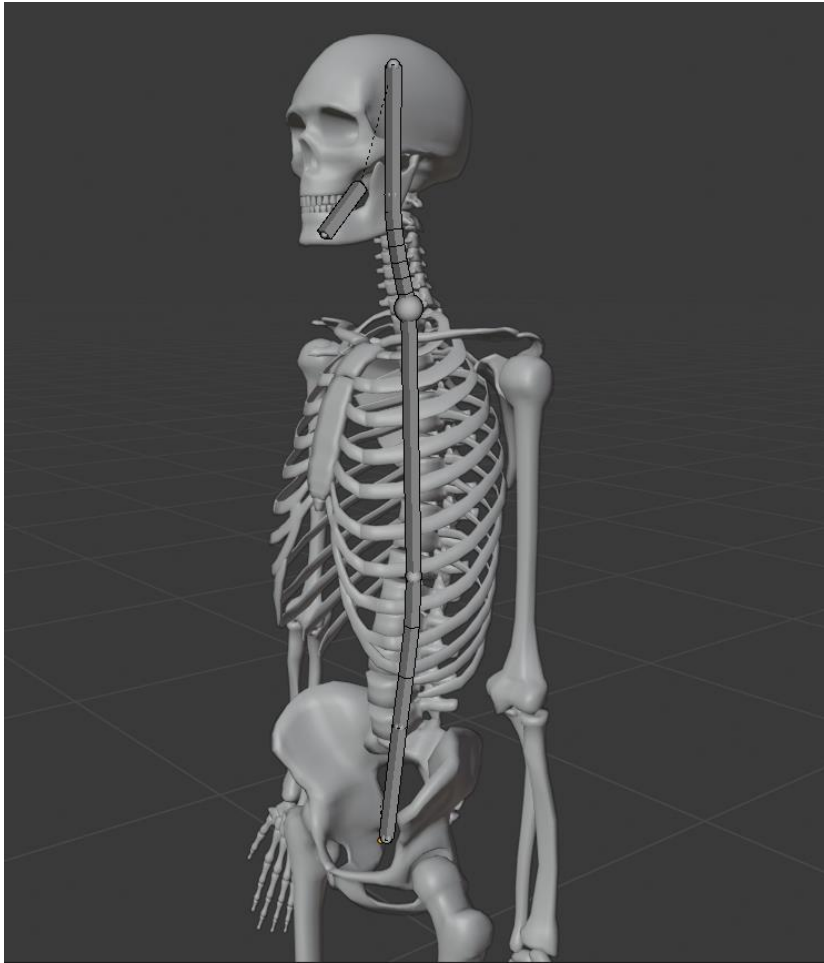
## 5.2 Luustaminen

Mallintamisen jälkeen seuraava työvaihe oli luustaminen. Tässä työvaiheessa puhuttavista luurangosta ja luista ei tule sekoittaa oikeaan luurankoon.

Luustaminen aloitettiin lantiosta, joka tulisi liikuttamaan muita luita sen liikkessa. Lantion luuhun yhdistettiin kolme selkärankaa pitkin kulkevaa luuta lanne-, rinta- ja kaulanikamien kohdalle. Lanne- ja kaulanikamien luista tehtiin ns. joustavia luita, jotta jokaista nikamaa ei tarvitsisi erikseen luustaa. Nämä luut koostuvat useammasta osasta, mikä mahdollistaa niiden helpomman taipumisen, mitä enemmän osia on. Lannenikamien luu koostuu kolmesta osasta, kun taas kaulanikamien luu koostuu seitsemästä osasta (kuva 36). Lannenikamien joustavuus päätettiin pitää vähäisenä, ettei se vääristä mallia liikaa taipuessaan. Kaulanikamien luun jatkoksi lisättiin vielä kaksi luuta kallon yläosalle ja leualle. Leuan luu irrotettiin kallon luusta, mutta sen yhdistyneisyys säilytettiin, jotta se seuraisi kallon liikettä (kuva 37).



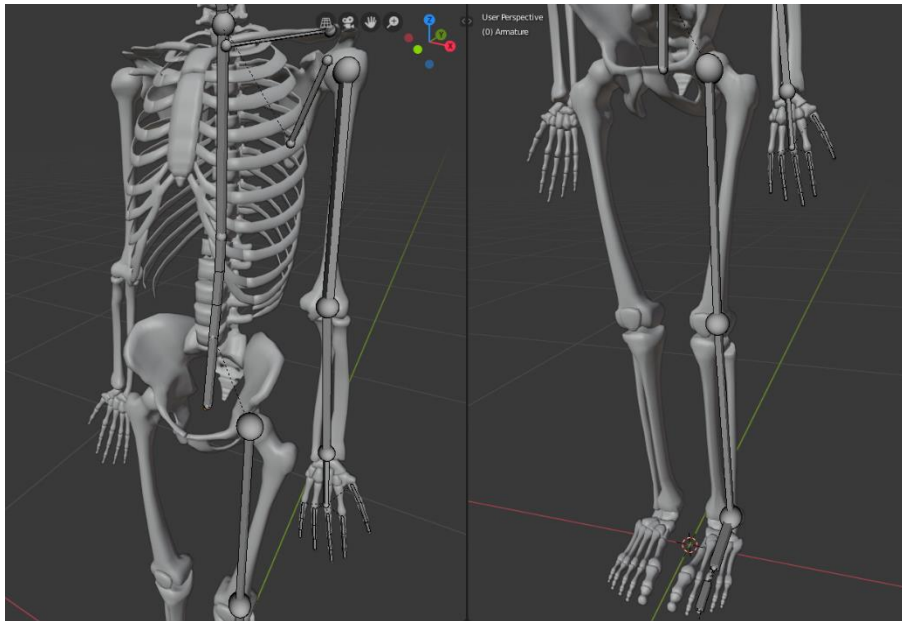
Kuva 36. Kaulan luun joustavat luut.



Kuva 37. Keskivartalon luut lantiosta leukaan.

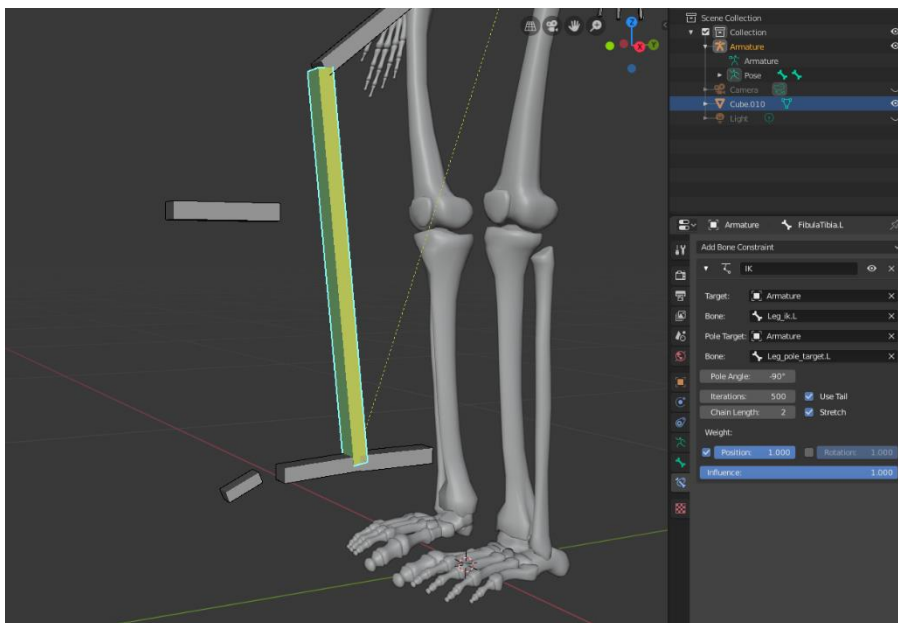
Seuraavan työvaiheen aikana luut nimettiin L-päätteellä. Tämä mahdollistaisi luiden symmetris-  
ten parien luonnin. Keskivartalon luiden jälkeen luotiin rintanikamien luusta erillään olevat, mutta  
siihen yhdistetyt lapa- ja solisluun luut. Olkaluulle luotiin myös oma irrallinen luunsa, joka yhdistyy  
lapaluun luuhun. Nämä luut tulisivat liikkumaan rintanikamien luun mukana. Olkaluun luuhun li-  
sättiin kyynärvarren luu, johon taas lisättiin ranne- ja kämmenluiden luu. Sormen kärkiluille luotiin  
irralliset, mutta kämmenen luuhun yhdistyneet luut. Näitä luita jatkettiin keski- ja tyviluihin asti  
sormesta riippuen. Lantion luuhun yhdistettiin irrallaan oleva reiden luu, jota jatkettiin säären ja  
jalkaterän luilla. Jalkaterän luuhun yhdistettiin irrallaan oleva varpaiden luu, joka tulisi liikutta-  
maan kaikkia varpaita yhtä aikaa (kuva 38).





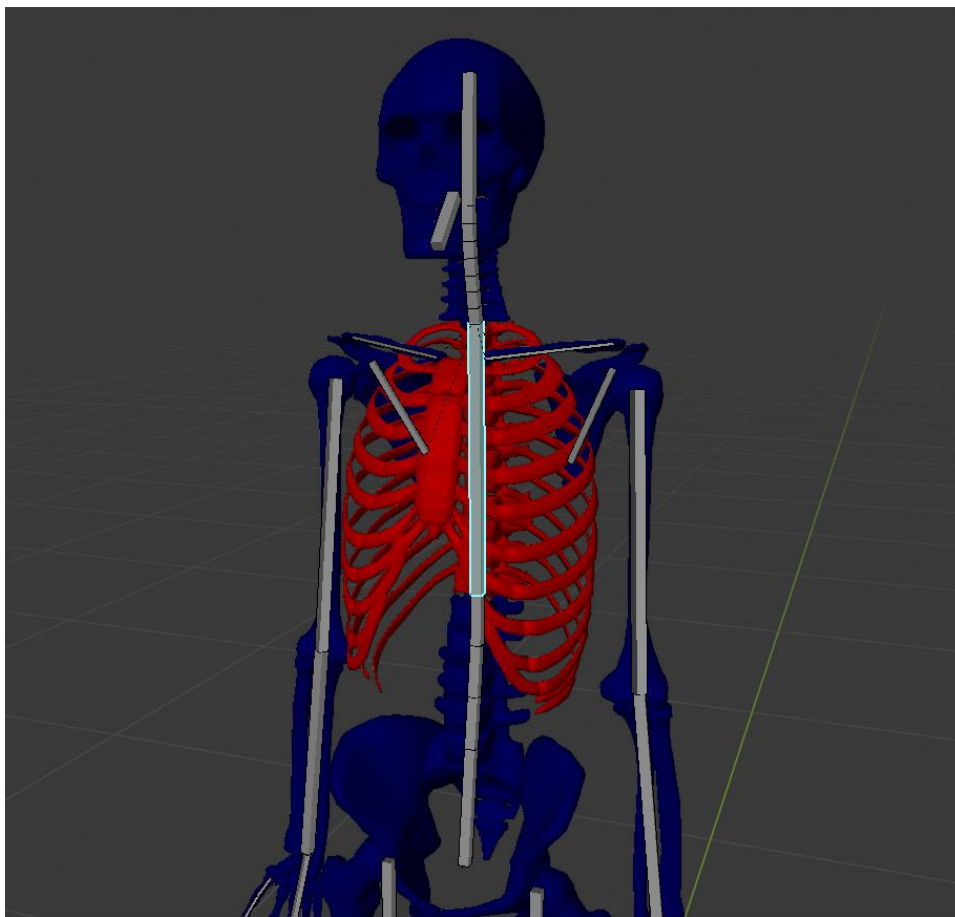
Kuva 38. Käsien ja jalkojen luut.

Jotta mallin jalkojen liikkuvuus olisi luontevampaa ja animointi helpompaa, lisättiin säärelle käänteiskinematikkaa. Säären luulle annettiin käänteiskinemaattinen rajoite, jota ohjaa säären korkeudella oleva irrallinen luurankoon kuulumaton luu ja sen naparajoitteena toimii noin polven korkeudella oleva myöskin erillinen luu (kuva 39).

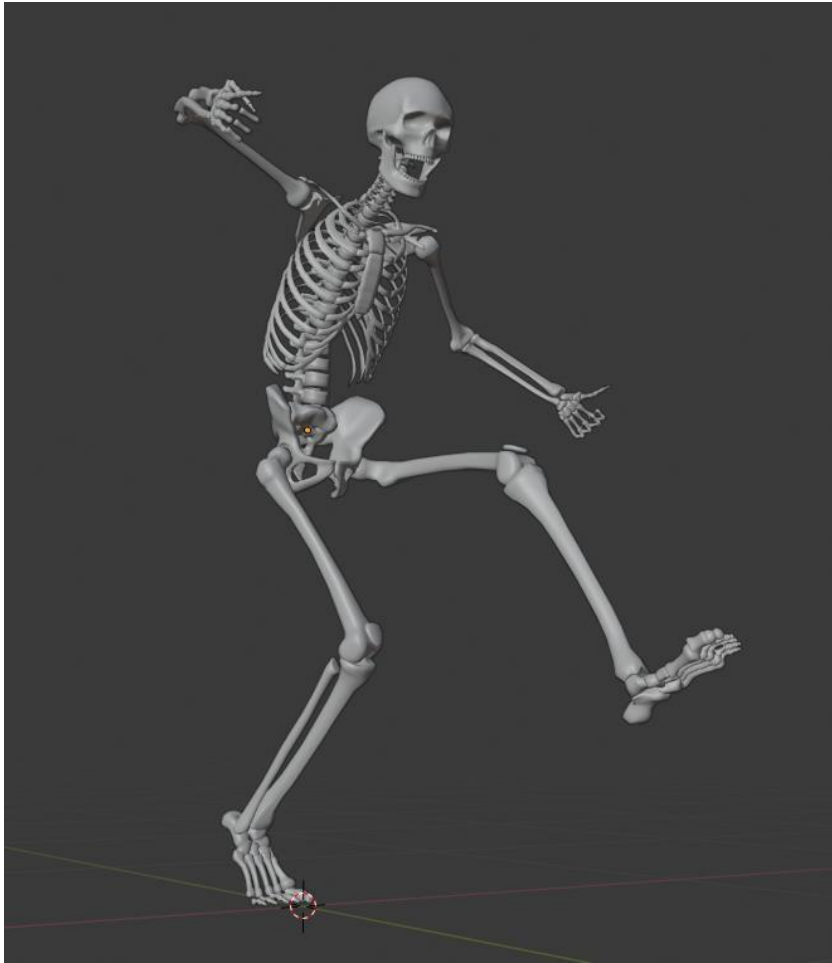


Kuva 39. Säären käänteiskinemaattinen rajoite antaa jalalle luonnollisen taipumisen.

Kun vasemmanpuoleisten luiden paikat ja rajoitteet on määritelty, ne voidaan helposti kopioida peilikuvan tapaan oikealle puolelle symmetrize-komennolla. Kaikki L-päätteiset luut kopioituvat käänteisinä toiselle puolelle R-päätteisinä. Kun luuranko on valmis, 3D-malli liitetään siihen. Kun malli liitetään osaksi luurankoa, laskee Blender automaattisesti luiden painoarvot, eli miten voimakkaasti yksittäiset luut liikuttavat ja muokkaavat mallin osia. Automaattinen laskenta on kuitenkin vain suuntaa antava ja olisi suotavaa korjata niitä jälkikäteen painomaalauksessa. Painomaalauksessa painoarvon voimakkuus määräytyy verteksien liukulukujen mukaan, joiden havainnollistamiseksi käytetään kylmiä ja lämpimiä värejä. Sininen on minimi ja punainen taas maksimi, vihreä on lähempänä sinistä ja keltainen lähempänä punaista. Koska 3D-mallin jokainen liikkuva osa on irrallaan toisistaan, luiden painoarvot maalataan tässä tapauksessa kaikki punaisiksi (kuva 40). Painomaalauksen ja luiden liikkeiden testauksen jälkeen, 3D-malli oli valmiina animoitavaksi (kuva 41).



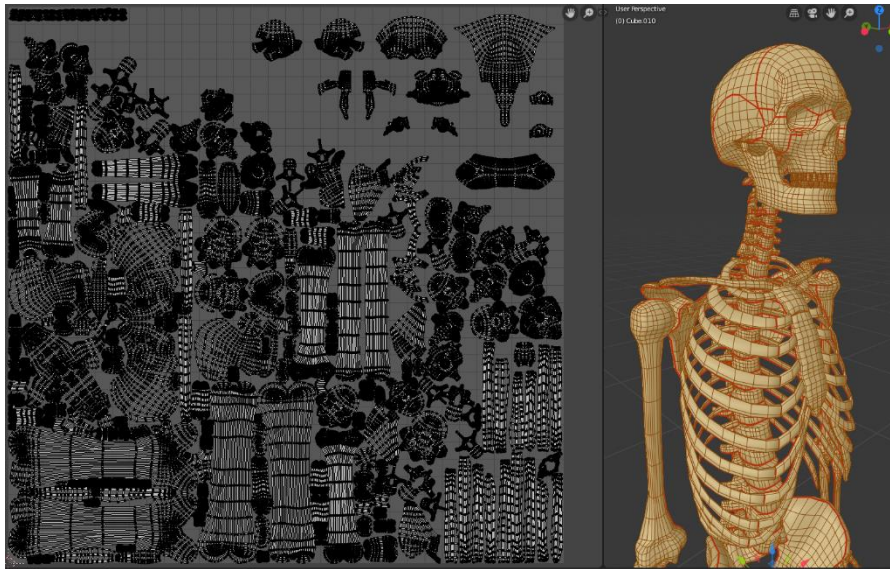
Kuva 40. Punaiseksi maalattu rintanikamien luun painoarvot. Luu tulee liikuttamaan koko punaista aluetta muuttamatta sen muotoa lainkaan.



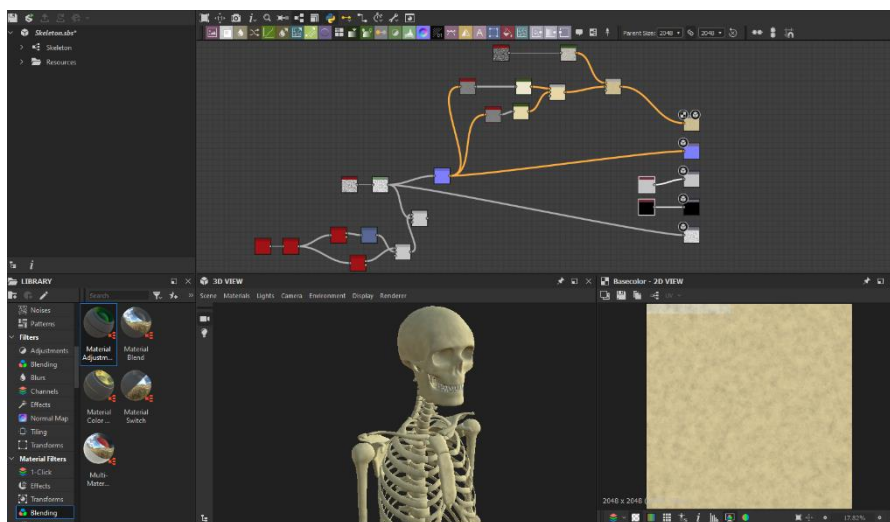
Kuva 41. Luuranko valmiina animoitavaksi.

### 5.3 Tekstuointi

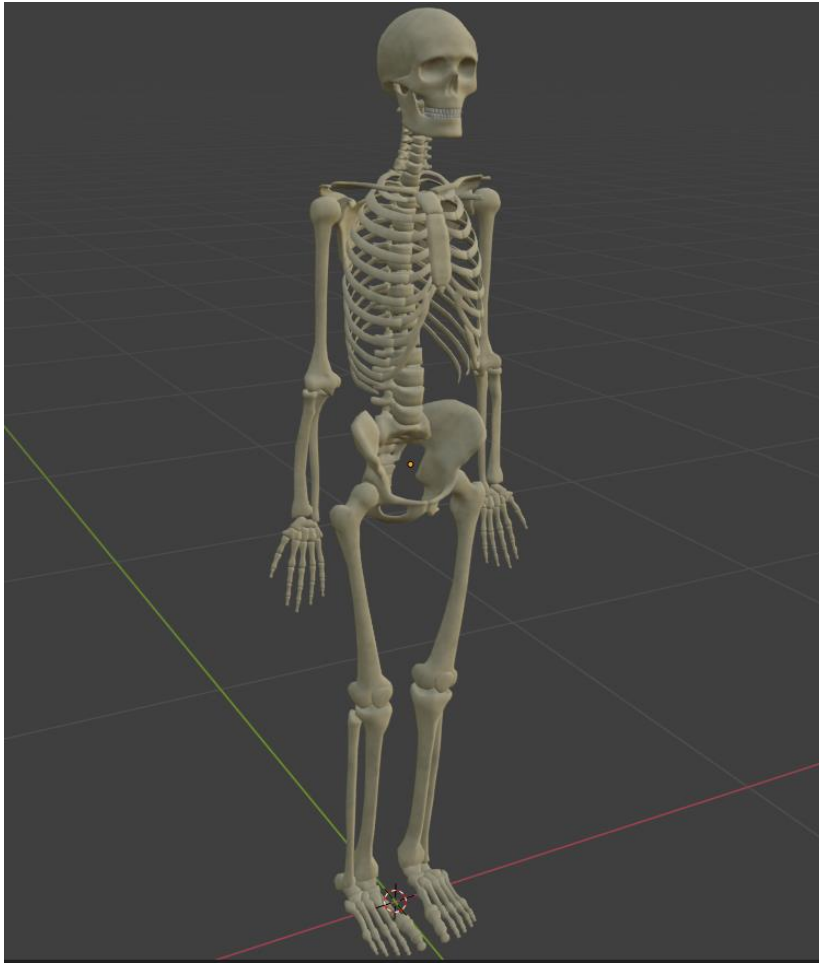
Ennen teksturointia merkattiin luurankoon UV-saumot, jotta unwrap-vaiheessa saatiin luotua UV-kartta, jolle varsinaiset tekstuurit piirtyvät. Hampaat siirrettiin vasempaan ylänurkkaan, jotta niistä saataisiin erivärisiä ja kallon osat siirrettiin oikeaan yläkulmaan, jotta kallon saumat saataisiin merkattua (kuva 42). Tekstuurit luotiin Substance Designer ohjelman avulla (kuva 43) (kuva 44).



Kuva 42. Oikealla punaisilla UV-saumoilla merkattu luurankomalli. Vasemmalla unwrap-toiminnolla saatu UV-kartta.



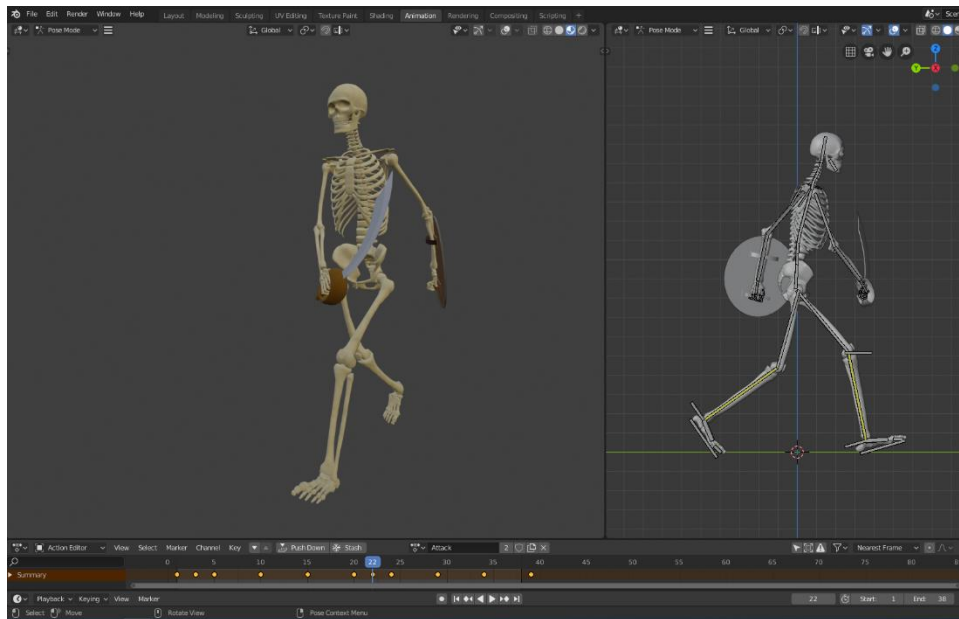
Kuva 43. Tekstuurien luontia Substance Designer ohjelmalla.



Kuva 44. Teksturoitu luuranko.

#### 5.4 Animointi

Mallille annettiin vielä miekka ja kilpi antamaan enemmän persoonallisuutta luurangolle. Aluksi luurangolle luotiin kävelyanimaatio. Luuranko aseteltiin haluttuun avainasentoon ja tallennettiin avainruuduksi. Asennosta asentoon periaatteella luurangolle luotiin kymmenen eri avainasentoa, joidenka välien liikkumiset Blender laskee automaattisesti. Avainasentoja hiomalla kallolle annettiin päällekkäistä liikettä ja kädet ja jalat laitettiin kulkemaan kaarella (kuva 45).



Kuva 45. Luurangon kävelyn animointia. Alhaalla keltaisilla ympyröillä merkatut avainruudut.

Kävelyn jälkeen luurangolle tehtiin animaatioita, mitä luurankovihollisella voi olla videopeleissä. Ensimmäisenä tehtiin hyökkäys- ja torjunta-animaatiot ja lopuksi huutoanimaatio. Näissä animaatioissa raajojen, miekan ja kilven päällekkäiset liikkeet ja kaaressa kulkeminen olivat tärkeitä periaatteita. Myös alku- ja loppuhidastukset ja ennakointi olivat tärkeitä (kuva 46).



Kuva 46. Hyökkäysanimaation ennakointia.

## 6 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoitus oli tutustua tarkemmin ihmisen luurangon anatomiaan ja animaation periaatteisiin. Luurangon anatomia opetti paljon ihmisen kehosta ja varsinkin kallon rakenteen tutkimisesta ja mallintamisesta aloin ymmärtää enemmän ihmisen kasvojen muotoja. Tästä oli valtavasti hyötyä, ja nyt tiedän, mihin kiinnittää jatkossa huomiota ihmistä piirtäessä tai mallintamassa.

Animaation periaatteet olivat jo osittain tuttuja. Tämä opinnäytetyö oli hyvä syy kerrata vanhaa ja tutustua tarkemmin unohdettuihin periaatteisiin. Vaikka animaatiosta oli jo jonkun verran kokemusta, pääsin vasta nyt hyödyntämään animaation periaatteita ihmismäisen hahmon animointiin. Vaikka animaatioihin olisi vielä voinut lisätä yksityiskohtia, olivat ne animaation periaatteiden ansiosta aikaisempia töitä uskottavampia. Tämä oli opettavainen kokemus animoinnista.

Tulevaisuuden jatkosuunnitelmia ovat nykyisten animaatioiden parantaminen, uusien luominen ja luurangon Unity- tai Unreal-pelimoottoriin vieni. Pienellä hiomisella mallintamani luuranko voi hyvinkin päätyä johonkin tulevaisuuden peliprojektiin.

## Lähteet

- Blender Documation Team. (2020). Blender 2.82 Manual. Modifiers. Haettu 6.4.2020, osoitteesta: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/modifiers/introduction.html>
- Budowick, M., Bjälie, J.G., Rolstad, B., Toverud, K.C. & Sillman, K. (1994). Anatomian atlas. WSOY.
- Cotterell, A., Kämäräinen, A. & Virtanen, T. (1996) Maailman myytit ja tarut. WSOY.
- Leppäluoto, J., Kettunen, R., Rintamäki, H., Vakkuri, O., Vierimaa, H. & Lätti, S. (2008). Anatomia ja fysiologia: rakenteesta toimintaan. WSOY Oppimateriaalit Oy.
- Levin, D.G. Day of the Dead Art. n.d. Haettu 10.2.2020, osoitteesta: <https://www.mexican-folk-art-guide.com/day-of-the-dead-art.html>
- Levin, D.G. La Catrina. n.d. Haettu 10.2.2020, osoitteesta: <https://www.mexican-folk-art-guide.com/catrina.html>
- Miller, M., Karl, T. (1997). An illustrated dictionary of the gods and symbols of ancient Mexico and the Maya. Thames and Hudson.
- Petty, J. What is 3D Rigging For Animation & Character Design? n.d. Haettu 20.3.2020, osoitteesta: <https://conceptartempire.com/what-is-rigging/>
- Skeleton (undead). (2020). Haettu 3.2.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/Skeleton\\_\(undead\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Skeleton_(undead))
- Skeletons. n.d. Haettu 3.2.2020, osoitteesta: <https://www.giantbomb.com/skeletons/3015-2293/>
- Slick, J. (2020). 3D Model Components—Vertices, Edges, Polygons & More. Haettu 20.3.2020, osoitteesta: <https://www.lifewire.com/3d-model-components-1952>
- Slick, J. (2019). 7 Common Modeling Techniques for Film and Games. Haettu 20.3.2020, osoitteesta: <https://www.lifewire.com/common-modeling-techniques-for-film-1953>
- Slick, J. (2020). Polygonal 3D Modeling: Common Box and Edge Modeling Workflows. Haettu 20.3.2020, osoitteesta: <https://www.lifewire.com/polygonal-3d-modeling-2139>



Thomas, F. & Johnston, O. (1995). The Illusion of life: Disney animation. Hyperion.

Tieteen kuvalehti, toimitus. (2013). Miten luurangon sukupuoli määritellään? Haettu 6.1.2020, osoitteesta: <https://tietu.fi/ihminen/elimisto/miten-luurangon-sukupuoli-maaritellaan>

Trammell, K. & Lampel, J. Fundamentals of Texturing. n.d. Haettu 20.3.2020 osoitteesta: <https://cgcookie.com/course/introduction-to-texturing/>

Williams, R. (2009). The Animator's Survival Kit. Faber and Faber.

## Kuvälähteet

Kuva 1. Encyclopædia Britannica. (2016). Mictlantecuhtli Aztec Deity. Haettu 6.2.2020, osoitteesta: <https://www.britannica.com/topic/Mictlantecuhtli>

Kuva 2. Hugo Simberg. (1897). Kuolema kuuntelee. Haettu 10.2.2020, osoitteesta: <https://www.kansallisgalleria.fi/fi/object/419419>

Kuva 3. Gluszek, A. (2019). La Calavera Catrina. A Skeleton Lady. Haettu 10.2.2020, osoitteesta: <https://www.dailyartmagazine.com/la-calavera-catrina-a-skeleton-lady/>

Kuva 4. Finnkino. (2018). Coco (2D dub). Haettu 19.2.2020, osoitteesta: [https://www.finnkino.fi/event/302498/title/coco\\_2d\\_dub/](https://www.finnkino.fi/event/302498/title/coco_2d_dub/)

Kuva 5. Peter Cybers. (2016). Dark Souls 3: Carthus skeleton trap. Haettu 3.2.2020, osoitteesta: [https://www.youtube.com/watch?v=wTAF\\_75vnOk](https://www.youtube.com/watch?v=wTAF_75vnOk)

Kuva 6. BanjoKazooie. (2008). Skeletons. Haettu 3.2.2020, osoitteesta: <https://www.giantbomb.com/skeletons/3015-2293/images/>

Kuva 7. Tailby, S. (2009). MediEvil PS4 Demo Confirmed, Available Right Now on PS Store. Haettu 3.2.2020, osoitteesta: [https://www.pushsquare.com/news/2019/09/medieval\\_ps4\\_demo\\_confirmed\\_available\\_right\\_now\\_on\\_ps\\_store](https://www.pushsquare.com/news/2019/09/medieval_ps4_demo_confirmed_available_right_now_on_ps_store)

Kuva 8. Dingman, H. (2015). Grim Fandango Remastered review: A legendary adventure brought back to life. Haettu 3.2.2020, osoitteesta: <https://www.pcworld.com/article/2875955/grim-fandango-remastered-review-a-legendary-adventure-brought-back-to-life.html>

Kuva 9. Mariana Ruiz Villarreal. (2007). Appendicular skeleton diagram.svg. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Appendicular\\_skeleton\\_diagram.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Appendicular_skeleton_diagram.svg)

Kuva 10. Encyclopædia Britannica. (2018). Skull Anatomy. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: <https://www.britannica.com/science/skull>

Kuva 11. Ammerman, J. (2019). Anatomy of Spinal Stenosis. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: <https://www.spineuniverse.com/conditions/spinal-stenosis/anatomy-spinal-stenosis>

Kuva 12. Schnuerer, T. & Mummaneni, P. (2018). Cervical Spine Surgery: Will You Need Surgery For Your Neck Pain? Haettu 6.1.2020, osoitteesta: <https://www.spineuniverse.com/conditions/neck-pain/cervical-spine-surgery-will-you-need-surgery-your-neck-pain>

Kuva 13. Henry Vandyke Carter. (1858). Gray112.png. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gray112.png>

Kuva 14. Mariana Ruiz Villarreal. (2007). Pectoral girdle front diagram.svg. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pectoral\\_girdle\\_front\\_diagram.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pectoral_girdle_front_diagram.svg)

Kuva 15. Anatomography. (2012). Humerus - anterior view.png. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Humerus\\_-\\_anterior\\_view.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Humerus_-_anterior_view.png)

Kuva 16. Anatomography. (2013). Ulna - anterior view.png. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ulna\\_-\\_anterior\\_view.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ulna_-_anterior_view.png)

Kuva 17. Anatomography. (2013). Radius - anterior view2.png. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Radius\\_-\\_anterior\\_view2.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Radius_-_anterior_view2.png)

Kuva 18. Mariana Ruiz Villarreal. (2007). Scheme human hand bones-en.svg. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Scheme\\_human\\_hand\\_bones-en.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Scheme_human_hand_bones-en.svg)

Kuva 19. Henry Vandyke Carter. (1858). Gray241.png. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gray241.png>

Kuva 20. Anatomography. (2013). Femur - anterior view2.png. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Femur\\_-\\_anterior\\_view2.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Femur_-_anterior_view2.png)

Kuva 21. Anatomography. (2013). Tibia - frontal view.png. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tibia\\_-\\_frontal\\_view.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tibia_-_frontal_view.png)

Kuva 22. Anatomography. (2013). Fibula - anterior view.png. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Fibula\\_-\\_anterior\\_view.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Fibula_-_anterior_view.png)

Kuva 23. Von Tasha & Mario Modesto. (2009). Ospied.svg. Haettu 6.1.2020, osoitteesta: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ospied.svg>

Kuva 24. Missing Tooth Investigators. (2012). Male Skull & Female Skull (Part 2: Cranium). Haettu 6.1.2020, osoitteesta: <http://lemissingtooth.blogspot.com/2012/10/male-skull-female-skull-2.html>

Kuva 25. Walt Disney Animation Studios. (2015). Silly Symphonies - The Skeleton Dance. Haettu 24.2.2020, osoitteesta: <https://www.youtube.com/watch?v=vOGhAV-84il>

Kuva 26. Sachs, B. (2014). An interview with veteran special effects supervisor Scott Squires (part two). Haettu 20.3.2020, osoitteesta: <https://www.chicagoreader.com/Bleader/archives/2014/08/20/an-interview-with-veteran-special-effects-supervisor-scott-squires-part-two>

Liitteet

Valmis animoitu luuranko:

<https://sketchfab.com/3d-models/skeleton-warrior-1684fad3af5c4236b1e83c75bf5e9b38>