

Hannu Taskinen

Menetelmä suuskannerin kumulatiivisen mittavirheen määrittämiseksi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Hammasteknikko

Hammastekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyö

Syksy 2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Hannu Taskinen Menetelmä suuskannerin kumulatiivisen mittavirheen määrittämiseksi 22 sivua Syksy 2014
Tutkinto	Hammasteknikko (AMK)
Koulutusohjelma	Hammastekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Hammastekniikka
Ohjaajat	Yliopettaja Pekka Paalasmaa Päätoiminen opettaja Heimo Lehtimäki
<p>Suoraan suusta tapahtuvan kuvantamisen (skannauksen) tarkoitus on syrjäyttää perinteinen käsin otettava jäljennös ja tämän avulla tehtävä kipsimalli. Suuskanneri tuottaa hampaiston geometrian suoraan digitaaliseen muotoon. Hammaskaarta pitkin tapahtuvassa skannauksessa syntyy matkan pidentyessä kasautuva mittavirhe (kumulatiivinen mittavirhe). Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää menetelmä tämän virheen määrittämiseksi.</p> <p>Suuskannerin tuottamaa digitaalista kolmioverkkomallia verrattiin digitaaliseen alkuperäismalliin. Malli suunniteltiin vastaamaan mahdollisimman hyvin todellisen suun geometriaa ja siihen lisättiin elementtejä, joista oli helppo ottaa tarkkoja mittapisteitä vertailua varten. Digitaalisesta vertailumallista tehtiin kolmioverkkomalli ja se tulostettiin 3D-tulostimella. Tuloste skannattiin kahdella eri skannerilla. Skannauksia verrattiin alkuperäismalliin. Skannaus suoritettiin käsin, kuten hammaslääkärin vastaanotollakin tehdään, ja se toistettiin neljä kertaa kummallakin skannerilla. Vertailumitaksi valittiin viisaudenhampaiden paikalle asetettujen kuutiollisten elementtien bukkaalisivujen etäisyys, joka alkuperäismallilla oli 66 mm. Vertailumitta mitattiin neljästä eri kohdasta jokaiselle skannaukselle. Tuloksista laskettiin mediaani, vaihteluväli, vaihteluvälin pituus ja mittavirhe.</p> <p>Ensimmäisellä skannerilla saatiin etäisyyksien mediaaniksi 66,040 mm, vaihteluväliksi 66,035 - 66,115 mm, vaihteluvälin pituudeksi 0,08 mm ja mittavirheeksi -0,095 mm. Toisella skannerilla saatiin etäisyyksien mediaaniksi 66,310 mm, vaihteluväliksi 66,170 - 66,455 mm, vaihteluvälin pituudeksi 0,285 mm ja mittavirheeksi 0,175 mm.</p> <p>Tuloksista havaittiin, että mittavirhe voitiin määrittää opinnäytetyön tuloksena syntyneellä menetelmällä. Skannattava malli pitäisi kuitenkin valmistaa mahdollisimman mittatarkasti ja se tulisi tarkkuusmitata valmistuksesta aiheutuneen virheen eliminoimiseksi. Näin saataisiin määritettyä todellinen kumulatiivinen mittavirhe.</p>	
Avainsanat	Suuskanneri, skannaus, kolmioverkkomalli, kumulatiivinen mittavirhe

Author Title	Hannu Taskinen A Method for Determining Intraoral Scanner Cumulative Measurement Error
Number of Pages Date	22 pages Autumn 2014
Degree	Bachelor of Health Care
Degree Programme	Dental Technology
Specialisation option	Dental Technology
Instructors	Pekka Paalasmaa, Principal Lecturer Heimo Lehtimäki, Lecturer
<p>The purpose of scanning geometry directly from mouth is to displace traditional handmade impressions and plaster models. The teeth geometry is obtained by scanning directly in a digital format. By scanning the teeth geometry can be obtained directly to a digital format. Scanning made along a dental arch will produce cumulative measurement error. The aim of this study was to develop a method for the determination of that measurement error.</p> <p>The digital triangulated model produced by the intraoral scanner was compared to the reference model what was also modeled in digital triangulated form. The model was designed to meet the actual geometry of the mouth as closely as possible and geometrical elements were added to it where accurate measurement points could be easily taken for comparison. Digital reference model was printed with a 3D printer and print was scanned with two different intraoral scanners. The results were compared with the digital reference model. The scanning was performed manually like in a dental practice and it was repeated four times with both scanners.</p> <p>As a result, the calculated cumulative measurement error with the first scanner was -0,095 mm and with the second scanner 0,175 mm. The range of measurement results with the first scanner was 66,035 - 66,115 mm and with the second scanner 66,170 - 66,455 mm. The original distance in the digital model was 66 mm.</p> <p>The results showed that cumulative measurement error could be determined with a method developed in this thesis. In order to determine the measurement error accurately, the model to be scanned should be manufactured as dimensionally accurately as possible. The manufactured model should be precision measured in order to eliminate the error during manufacturing. With this method an actual cumulative measurement error could be determined precisely.</p>	
Keywords	intraoral scanner, scanning, triangulated model, cumulative measurement error.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Suuskanneri	3
2.1	Laitteiston rakenne	3
2.2	Resoluutio	4
2.3	Laskenta-algoritmi	6
2.4	Ohjelmisto	7
3	Menetelmän vaatimukset	9
3.1	Digitaalinen vertailumalli	9
3.2	Skannattava malli	9
4	Menetelmän toteutus	10
4.1	Digitaalinen vertailumalli	10
4.2	Skannattava malli	15
4.3	Tutkittavat skannerit	15
4.4	Menetelmän testausmetodi	16
5	Tulokset	18
6	Yhteenveto ja pohdinta	20
	Lähteet	22

1 Johdanto

Suoraan suusta tapahtuvan kuvantamisen (suuskannaus / eng. *intraoral scanning*) tarkoituksena on syrjäyttää perinteinen käsityönä tapahtuva silikoni- ja alginaattijäljentäminen, sekä näistä tehtävät kipsimallit. Hampaiston geometria saadaan skannaamalla suoraan digitaaliseen muotoon. Skannausta voidaan käyttää välittömästi hyväksi hammaslääkärin vastaanotolla yksinkertaisten restauraatioiden (kruunu, inlay, onlay) valmistamiseen tai se voidaan lähettää sähköisesti hammaslaboratorioon monimutkaisempien töiden (perinteiset sillat, implanttisillat, irtoproteesit) tekemistä varten. Laboratorioon tulevien töiden osalta skannauslaitteiston tuottaman geometrian tarkkuus on olennainen tekijä. Skannattu digitaalinen geometria on aina epätasmainen esitys alkuperäisestä geometriasta eli se on approksimaatio. Vastaanotolta tulevan digitaalisen mallin tulisi olla tarpeeksi mittatarkka, jotta laboratorio kykenisi sitä hyödyntämään.

Laitteiston muuttaessa suun geometrian digitaaliseen muotoon pintamalliksi tapahtuu pinnan suhteen tiettyä virhettä, mutta tämän on todettu olevan nykyisissä laitteistoissa hyväksyttävällä tasolla (Burgess – Lawson – Robles 2013). Sen sijaan pidemmällä skannausmatkalla (esim. koko hammaskaari) tapahtuvaa kumulatiivista (kasautuvaa) mittavirhettä ei ole tutkittu. Tällä mittavirheellä saattaa olla vaikutusta esimerkiksi pitkiä siltarestauraatioita tai purennan hoitokojeita valmistettaessa. Lopputuote ei sovi paikalleen ja nykyaikainen tietokoneavusteinen suunnittelu/valmistus (CAD/CAM-tekniikka) käy hyödyttömäksi, mikäli hammaslääkärin vastaanotolta laboratorioon tuleva geometria ei ole tarpeeksi tarkka.

Hampaiston skannaus tapahtuu liikuttamalla lukupäätä hampaiston lähellä pintaa koskettamatta. Lukupäällä otetaan useita kuvia peräkkäin ja sen kuva-alueen koko määrittää lopullisen kuvan fyysisen koon. Otettujen kuvien on oltava tietyltä osin päällekkäisiä, jotta ohjelmisto osaa yhdistää edellisen kuvan seuraavaan. Koko hampaiston kuvantaminen on tällä menetelmällä tänäpäivänä nopeampaa kuin perinteisen jäljennöksen ottaminen ja säästää myös useita hammasteknisiä välivaiheita (Patzelt – Lamprinos – Stampf – Wael 2014). Restauration tuotantokustannusten ja potilaskäyntien määrän laskiessa, tulee työ myös asiakkaalle halvemaksi eikä asiakkaan usein epämiellyttäviksi kokemia perinteisiä jäljennöksiä tarvitse ottaa.

Eri valmistajien skannerit eroavat toisistaan muun muassa kameran tarkkuuden (resoluution), kuvapään koon, kuvanottotavan, valon aallonpituuden ja laadun sekä ohjelmiston laskentakyvyn suhteen (van der Meer – Andriessen – Wismeijer – Ren 2012). Nämä edellä mainitut laitteistojen ominaisuudet vaikuttavat siihen, kuinka suuri kumulatiivinen mittavirhe syntyy, kun skannerilla kuvannetaan esimerkiksi kokonainen hammaskaari (takamolaarista inkisiivien kautta vastakkaiseen takamolaariin) ja kuinka nopeasti kuvantaminen voidaan suorittaa. Tämä opinnäytetyö ei paneudu skannereiden yksittäisten ominaisuuksien eroavaisuuksiin vaan työn tarkoituksena on kehittää menetelmä, jolla skannauksessa tapahtuva kumulatiivinen mittavirhe voidaan määrittää. Kuvantamisnopeutta ei siis valitettavasti päästä tutkimaan opinnäytetyön rajallisuuden takia.

2 Suuskanneri

Suun skannaukseen on markkinoilla tarjolla useiden eri valmistajien laitteistoja eli suuskannereita (eng. *oral scanner / intraoral scanner*). Laitteistot koostuvat yleensä käsikappaleesta ja laskentayksiköstä ohjelmistoineen, eivätkä ne ole vaihtokelpoisia eri valmistajien kesken. Käsikappale koostuu pääasiallisesti lukupäästä, kamerasta ja valonlähteestä, joka tuottaa kuvantamiseen tarvittavan valon (van der Meer – Andriessen – Wismeijer – Ren 2012). Suuskannerilaitteistojen perusrakenne on siis jokaisella valmistajalla pääosin sama. Suurimmat käytännön erot ovat resoluutiossa, laskenta-algoritmeissa ja ohjelmistossa.

2.1 Laitteiston rakenne

Käsikappale on monesti integroitu liikuteltavaan pyörillä kulkevaan konsoliin, joka sisältää laskentayksikön ohjelmistoineen ja muut tarvittavat työkalut. Yhä useammin kuitenkin laskentayksikkönä käytetään tavallista kannettavaa tietokonetta, johon kuvantamis- ja muokkausohjelmisto on asennettu (kuvio 1). Tosin kannettaville laitteistoillekin on eri valmistajilla olemassa pyörällisiä telineitä.



Kuvio 1. Esimerkkejä suuskannerilaitteistojen rakenteesta.

2.2 Resoluutio

Resoluutio ilmoitetaan yleensä numeerisena arvona, kuten 150 dpi tai 96 ppi. Luku ilmoittaa, kuinka monta pistemäistä elementtiä mahtuu tietylle matkalle tai alueelle. Graafisista kuvista puhuttaessa näkyy usein käytettävän ilmaisua 300 dpi (*dots per inch*). Painomuste-elementtejä mahtuu siis tuuman matkalle 300 kappaletta. Tietokoneen näytön ollessa kyseessä, käytetään lyhennettä ppi (*pixels per inch*). Yleisimmät arvot näytön resoluutiolle ovat 72 ppi ja 96 ppi. Digitaalikameroissa ilmoitetaan kuvan kaappaavan kennon pikselien kokonaismäärä esimerkiksi 5184x3456 eli 5184 pikseliä vaakasuuntaan ja 3456 pikseliä pystysuuntaan. Tällöin kennon resoluutio on $5184 \times 3456 = 17\,915\,904$ pikseliä eli 18 megapikseliä (Mp). Sanan resoluutio sijasta käytetään myös usein termejä erottelukyky ja tarkkuus. Näillä tarkoitetaan monitorin, skannerin tai kameran kykyä lukea tai toistaa kuvan yksityiskohtia. (Taskinen 2014) Suurempi resoluutio tarkoittaa siis parempaa erottelukykyä/tarkkuutta (kuvio 2).

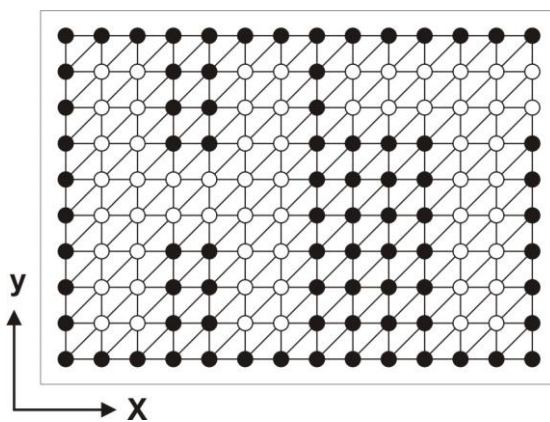


Kuvio 2. Vasemman puoleisen kuvan resoluutio on 300 dpi ja oikeanpuoleisen 30 dpi.

Normaali tasoskanneri eli 2D-skanneri, jota käytetään tulosteiden tallentamiseen, tuottaa aina kuvatiedoston, ja 3D-skanneri (kuten suuskanneri) tuottaa avaruudellisen pistejoukon, jota kutsutaan pistepilveksi. 2D-skannerin tuottama kuvatiedosto on sekin pistejoukko, mutta pisteet sijaitsevat tasossa. Pisteiden etäisyys toisiinsa vaakasuunnassa on vakio ja samoin myös pystysuunnassa olevien pisteiden etäisyys toisiinsa. Pisteillä on vain x- ja y-koordinatit. Mitä enemmän skanneri kykenee tallentamaan pisteitä vaakasuunnassa ja pystysuunnassa, sitä suurempi on resoluutio. 3D-skannerin tuottamassa pistepilvessä pisteet sijaitsevat 3D-

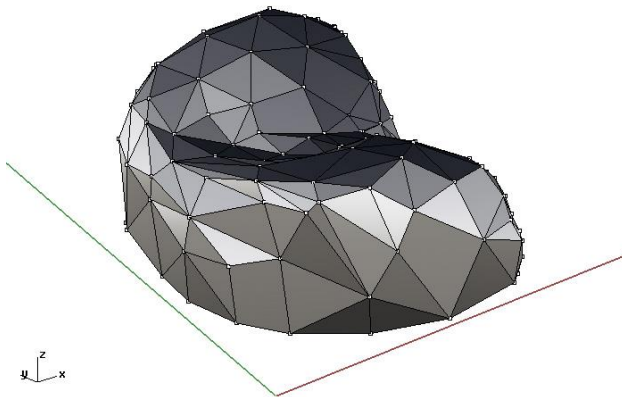
avaruudessa, ja niillä on x -, y - ja z -koordinaatti (Remondino 2003). Koska 3D-skannerin kamera kennoineen kaappaa skannattavasta esineestä myös syvyyskoordinaatin z , ei pisteiden todellinen etäisyys toisiinsa siten ole vakio. Pistepilven kohdalla puhutaan yleensä pilven tiheydestä. Mitä suurempi on kameran resoluutio, sitä tiheämpi on pistepilvi. Tällä on merkitystä opinnäytetyössä myöhemmin esiintulevissa laskenta-algoritmien toiminnoissa.

Pistejoukon pisteiden vakioetäisyyden hahmottamista varten voidaan tilannetta havainnollistaa piirtämällä 2D-kuvaan kuvitteellinen kolmioverkko ikäänkuin kyseessä olisi tasopinta. Tällöin huomaamme, että kaikki kolmiot ovat saman kokoisia (kuvio 3).



Kuvio 3. 2D-kuvasta tehty kuvitteellinen kolmioverkkomalli.

Kolmiulotteisessa pintamallissa taas kaikki kolmiot ovat erikokoisia, koska kolmioiden kärkipisteiden (pistepilven pisteiden) etäisyydet toisiinsa nähden eivät ole vakioita (kuvio 4).

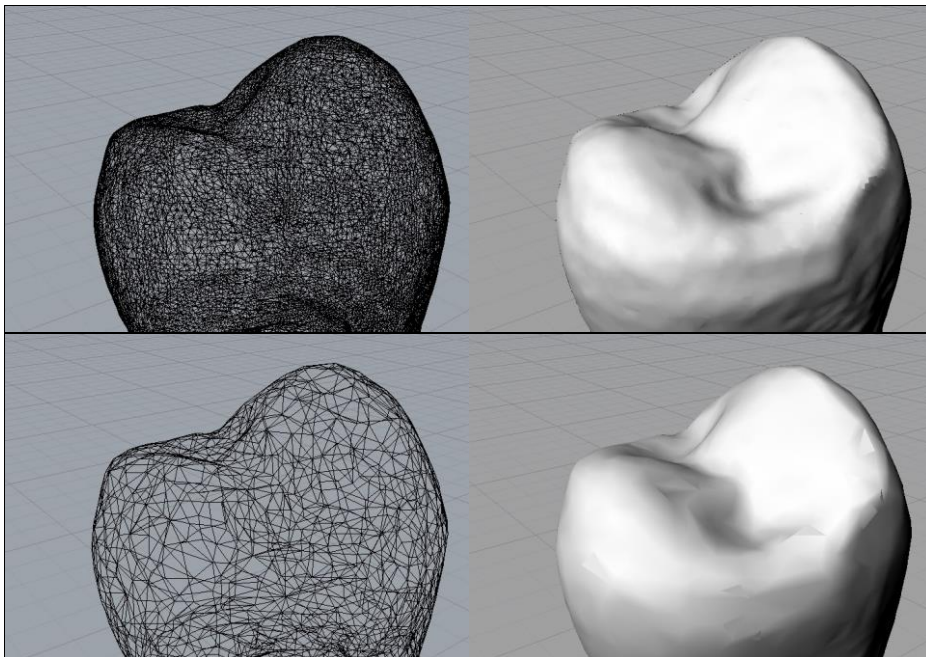


Kuvio 4. Karkea kolmioverkkomalli premolaarin puolikkaasta.

2.3 Laskenta-algoritmi

Laskenta-algoritmeilla tarkoitetaan tietokoneeseen ohjelmoitua matemaattista laskentatapaa. Tällä on suuri merkitys laitteiston nopeuteen ja lopputuloksen mittatarkkuuteen. Skannerin tuottama pistepilvi muutetaan ohjelmallisesti pintamalliksi käyttäen siihen suunniteltua laskenta-algoritmia. Algoritmi poistaa pistepilvestä pinnanmuotoon sopimattomat pisteet ja muodostaa jäljelle jäävien pisteiden kesken kolmioista muodostuvan pinnan eli kolmioverkkomallin. Tällaisesta mallista muodostetun tiedoston koko saattaa olla hyvinkin suuri eli malli koostuu valtavasta määrästä kolmioita. Tämä saattaa aiheuttaa ongelmia, mikäli tietokoneen laskentakapasiteetti ei ole riittävä. Älykkäällä algoritmilla luotu kolmioverkkomalli nopeuttaa laskentaa pienentäen mallin datan määrää. Vähemmän kolmioita siellä, missä niiden vaikutus lopulliseen pinnan-tarkkuuteen on pienempi. (Hollenbeck – Allin – van der Poel 2012:2)

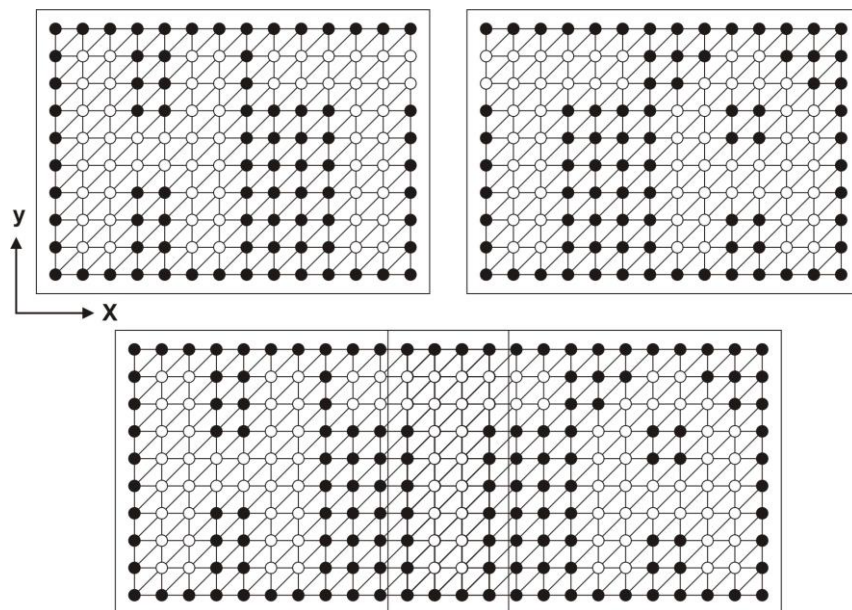
Vähemmän älykkään algoritmin optimoidessa pintaa vähentämällä kolmioiden määrää, saattaa tämä vaikuttaa yksityiskohtiin pintaa tasoittaen, mikä voi joskus olla eduksi ja joskus taas haitaksi (kuvio 5). Kolmioverkkomallista muodostetun tiedoston muoto (tunniste) on yleensä ".stl" eli yleisesti puhutaan stl-tiedostoista. Jotkut valmistajat "lukitsevat" stl-tiedoston estääkseen sen käytön muiden valmistajien järjestelmissä. Tällöin tiedostomuodon tunniste on jotain aivan muuta.



Kuvio 5. Ylempänä optimoimaton ja alempana optimoitu premolaarin kolmioverkkopinta. Ylemmän mallin tiedostokoko on 3 Mb ja alemman 1,2 Mb.

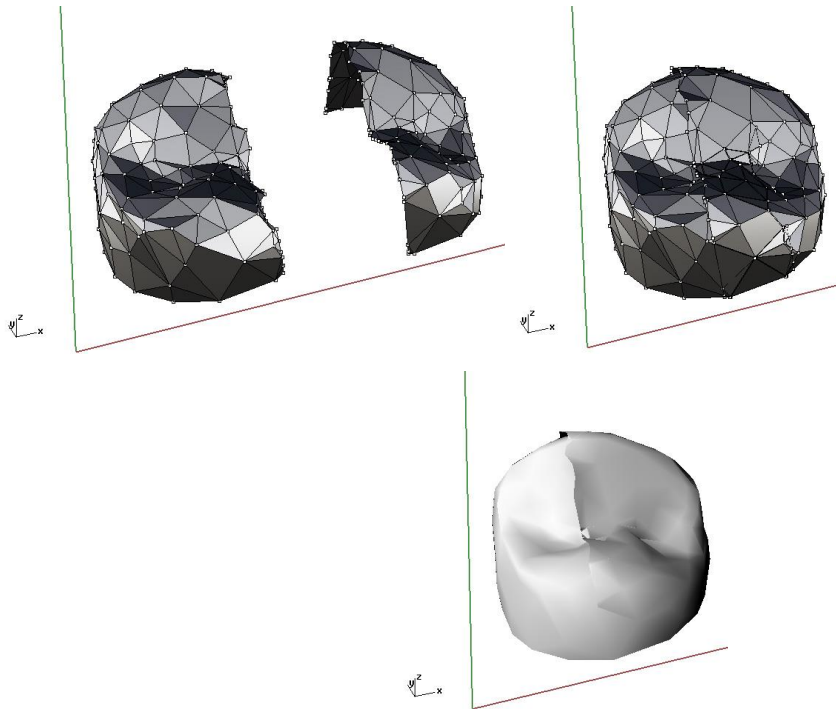
2.4 Ohjelmisto

Ohjelmistolla tarkoitetaan tässä skannerilaitteiston mukana tulevaa ohjelmistoa. Ohjelmisto koostuu erilaisista laskenta-algoritmeista, joiden tehtävänä on laskea erityyppisten toimintojen suorittamista. Aivan kuten 2D-maailmassa muodostettaessa panoraamakuvaa asettamalla peräkkäiset kuvat osin päällekkäin, on suuskanneriohjelmiston erään laskenta-algoritmin tehtävänä yhdistää laitteiston taltioimat pistepilvet toisiinsa. Näin hampaistosta saadaan vain yksi pilvi, joka sitten muutetaan kolmioverkopinnaksi. Kuten aiemmin todettiin, yksittäisen pistepilven muodostuessa pisteistä, joiden etäisyys ei ole vakio, ei peräkkäisten ja osin päällekkäisten pistepilvien yhdistäminen ole yksinkertainen tehtävä, ja vaatii laskenta-algoritmilta paljon. (Remondino 2003: 3-6) 2D-maailmassa tämäntyyppinen tilanne on huomattavasti yksinkertaisempi ja skannatut peräkkäiset pistejoukot saadaan yhdistettyä tarkasti (kuvio 6).



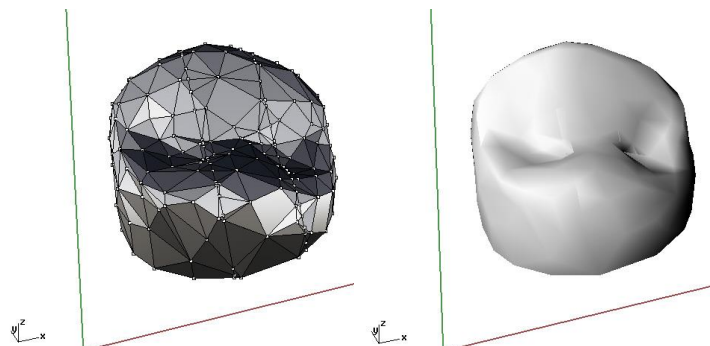
Kuvio 6. Ylempänä yhdistämättömät 2D-kuvat ja alempana lopputulos, kun kuvat on yhdistetty.

3D-maailmassa joudutaan ottamaan huomioon myös koordinaatti z ja tilanne aiheuttaa siksi laskennallista päänvaivaa (kuvio 7). Tosin mitä tarkemmalla kameralla (suuremmalla resoluutiolla / erottelukyvällä) pistepilvi on taltioitu, sitä suurempi mahdollisuus on saada peräkkäiset pistepilvet asemoitua lähes päällekkäin. Suurella resoluutiolla ja älykkäällä laskenta-algoritmillä voimme siis pienentää skannausmatkan edetessä tapahtuvaa mittavirhettä.



Kuvio 7. Ylempänä peräkkäisistä pistepilvistä muodostettu premolaarin kolmioverkkomalli ennen pistepilvien laskenta-algoritmin käyttöä. Alempana graafinen esitys siitä, miltä malli näyttäisi skanneriohjelmistossa.

Kuviosta 7 nähdään, että skannerin tuottamat pistepilvet eivät osu täsmällisesti päällekkäin, ja siksi tarvitaan laskenta-algoritmia suorittamaan seulonta pintaan sopimattomien pisteiden suhteen. Lisäksi algoritmi päättelee mahdollisesti puuttuvat pisteet (Remondino 2003: 4-6). Tästä seulonnasta ja päättelystä aiheutuu skannausmatkan edetessä kasautuvaa mittavirhettä. Algoritmin tuottama lopullinen geometria saattaa päällisin puolin näyttää hyvältä (kuvio 8), mutta on kuitenkin vain approksimaatio alkuperäisestä geometriasta.



Kuvio 8. Vasemmalla karkea kolmioverkkomalli laskenta-algoritmin tuottamasta pistepilvien yhdistämisestä ja oikealla graafinen esitys siitä miltä malli näyttää skanneriohjelmistossa.

3 Menetelmän vaatimukset

Suusta ei voida ottaa tarkkoja mittapisteitä, eikä siksi myöskään mitata tarkkoja välimatkoja. On tehtävä konkreettinen skannattava malli, jonka avulla voidaan todentaa mahdollinen skannauksessa tapahtuva mittavirhe. Jotta mallin skannausta voitaisiin pitää mahdollisimman realistisena, on mallin vastattava tietyltä osin todellista hampaistoa. Lisäksi skannattava malli on saatava tarkasti digitaaliseen muotoon, johon skannaustuloksia verrataan.

3.1 Digitaalinen vertailumalli

Koska skannerilaitteisto tuottaa digitaalisen 3D-mallin, on järkevää mallintaa vertailuun käytettävä malli suoraan tietokoneelle digitaaliseen muotoon. Näin skannaustulosta päästään vertaamaan helposti tarkkaan alkuperäismalliin, johon lämpötila ja kosteus eivät ole vaikuttaneet. Tämän opinnäytetyön puitteissa on mahdollista luoda ainoastaan menetelmä kumulatiivisen mittavirheen määrittämiseksi, mutta malli tulisi suunnitella myös siten, että tieteellisesti pätevä absoluuttisen mittavirheen määrittäminen vakiolla skannausnopeudella olisi mahdollista.

Kumulatiivisen mittavirheen toteamista varten on 3D-mallilla oltava useita mittapisteitä, joiden välimatka on helposti mitattavissa. Näiden pisteiden etäisyyttä verrataan toisiinsa skannaustuloksen ja digitaalisen vertailumallin kesken. Koska skannerilaitteisto tuottaa stl-tiedoston, niin myös digitaalisen mallin on oltava stl-muodossa ja mittapisteiden oltava selkeästi määritettävissä kolmioverkkomallista.

Mallin hammaskaaren olisi syytä olla mahdollisimman pitkä, mikä helpottaisi mittavirheen määrittämistä ja lisäksi vastaisi mahdollisimman ison suun hammaskaaren pituutta. Mallinnettavan hampaiston ikenen tulisi myös vastata mahdollisimman hyvin oikeassa suussa vallitsevaa tilannetta. Lisäksi hampaiden, ja niiden asettelun tulisi olla mallilla mahdollisimman hyvin totuutta vastaavia.

3.2 Skannattava malli

Opinnäytetyön tarkoituksena on ainoastaan kehittää menetelmä suuskannerin mittavirheen määrittämiseksi. Skannattavan mallin tarkkuudesta voidaan siis hieman tinkiä.

4 Menetelmän toteutus

Menetelmän toteutuksessa lähdettiin liikkeellä luvun 3. lähtökohdista. Lisäksi pyrittiin ottamaan huomioon myös mahdollinen jatkotutkimus, joka selvittäisi kattavasti mittatarkkuuksien erot markkinoilla olevien eri suuskannereiden kesken.

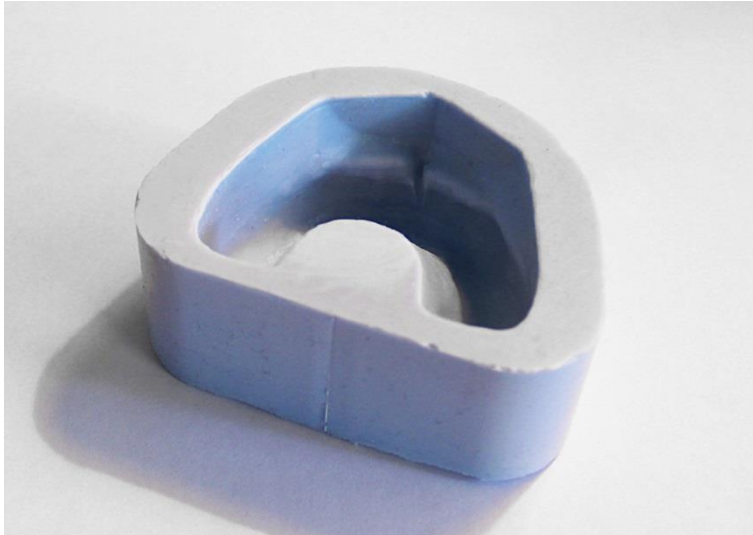
4.1 Digitaalinen vertailumalli

Tietokoneohjelmalla (Rhino 4.0, Rhinoceros 3D) luotiin kolmiulotteinen malli mukaellen hampaiston geometriaa. Mallia varten olisi ollut luonnollista skannata hampaattoman suun kipsimalli, mutta ikenen surkastumisen takia tilanne ei olisi vastannut todellisen hampaallisen suun ientä. Vaihtoehdoksi jäi siis hampaallisen suun jäljentäminen ja valaminen kipsiin. Kipsimallilta poistettiin hampaat, ja se vahattiin mahdollisimman sileäksi (kuvio 9).



Kuvio 9. Kipsimalli suusta. Hampaat poistettu ja malli tasoitettu vahalla.

Vahalla tasoitetusta kipsimallista otettiin muotti. Muotin materiaaliksi valittiin kestävä Bego WIROSIL -silikoni siltä varalta, että skannattavia malleja jouduttaisiin valamaan useampia kappaleita (kuvio 10).



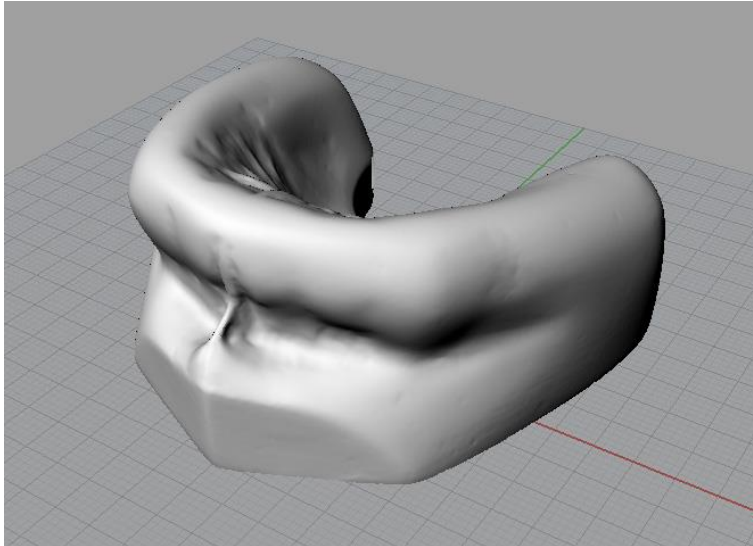
Kuvio 10. Kipsimallista otettu silikonimuotti (Materiaalina Bego WIROSIL).

Silikonimuotin avulla valettiin varsinainen skannattava ien. Kipsilaaduksi valittiin skannausta varten suunniteltu GC FUJIROCK EP OptiXscan (kuvio 11).



Kuvio 11. Silikonimuotilla valettu skannattava kipsimalli (Kipsinä GC FUJIROCK EP OptiXscan).

Kipsimalli skannattiin 3D-pöytäskannerilla (3Shape D900) digitaaliseen muotoon. Digitaalisen mallin pintaa optimoitiin kolmioiden määrää vähentämällä, jolloin laskenta kävi tietokoneelle kevyemmäksi ja mallin pinta tasoittui entisestään (kuvio 12).



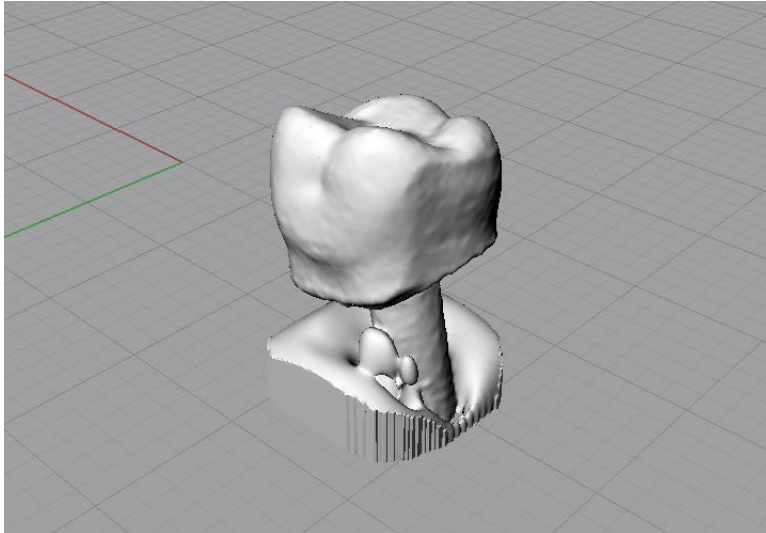
Kuvio 12. Hampaaton kipsimalli skannattuna ja optimoituina (Skannerina 3Shape D900).

Hampaattomaan ienmalliin asemoitavien hampaiden skannaamista varten rakennettiin mallisarja. Mallihampaat kiinnitettiin ositusnastoihin, jolloin hampaat saatiin skannattua kokonaisena nastaa hyväksikäyttäen. Inkisiiveiksi valittiin Acry Rock Ruthinium C2/48 ja molaareiksi Duratone-n N4/4A (kuvio 13).



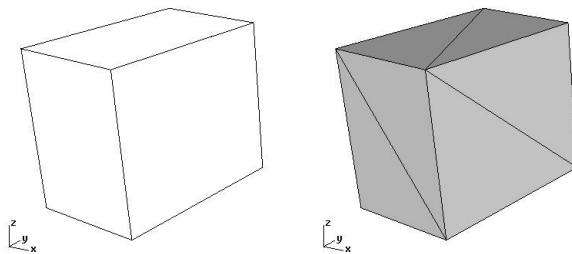
Kuvio 13. Acry Rock ja Duratone hampaista tehty mallisarja skannausta varten.

Mallisarja skannattiin Planmecan PlanScan suuskannerilla (kuvio 14). Ositusnastat poistettiin skannaustuloksesta ja hampaiden pinnat optimoitiin kuten ienkin aiemmin.



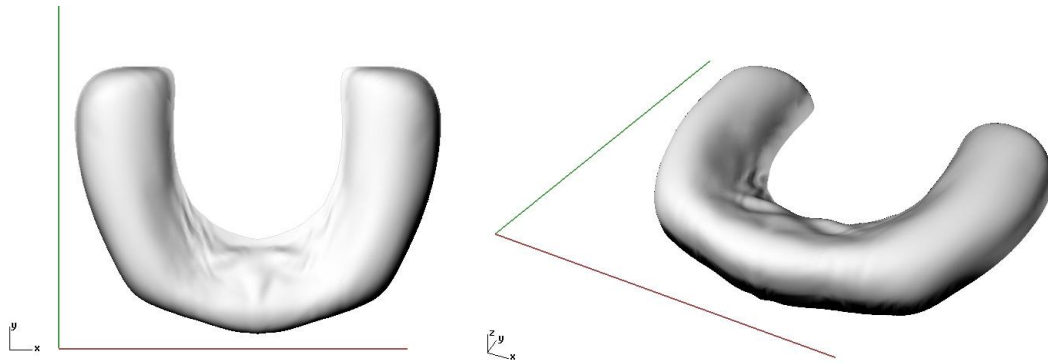
Kuvio 14. Mallihampaistosta skannattu molaari ennen pinnan optimointia (Skannerina Planmeca PlanScan).

Hampaiden lisäksi mallilla tuli olla elementtejä, jotka sisältävät tarkkoja avaruudellisia pisteitä, joiden etäisyys on kolmioverkkomallista helposti mitattavissa. Elementin muodoksi valittiin kuutio tai sen johdannainen, koska kuution pinnan muodostuessa kolmioista saamme nurkkakohtiin aina tarkan mittauspisteen (kuvio 15).



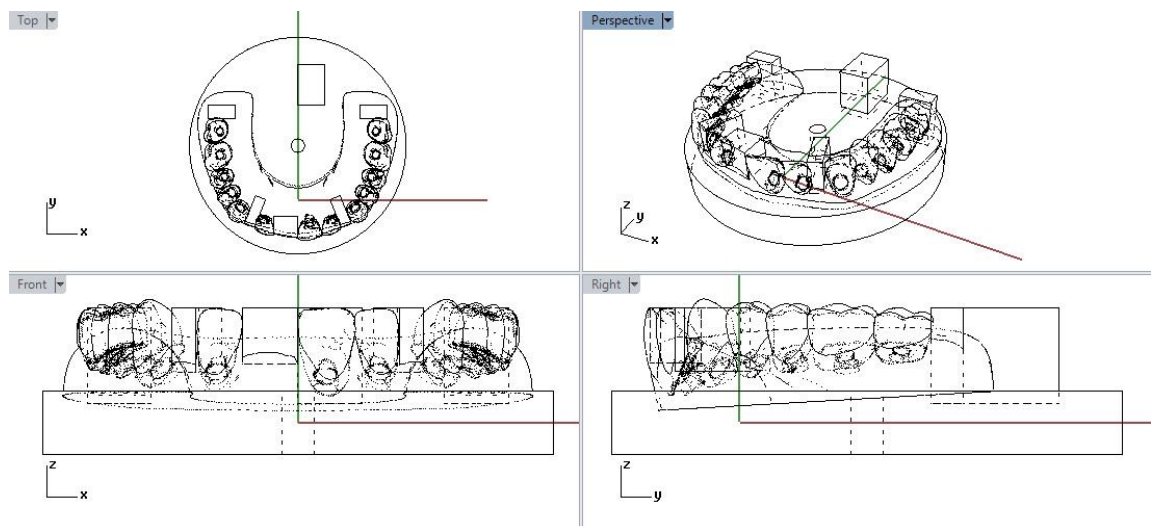
Kuvio 15. Vasemmalla kuutiomainen pintamalli ja oikealla siitä tehty kolmioverkkomalli.

Mahdollista jatkotutkimusta varten mallin ikenen skannauksessa paremmin onnistunut puolikas peilattiin huonomman päälle, ja ientä venytettiin leveämmäksi, jotta lopullinen hammaskaari saataisiin mahdollisimman pyöreään muotoon (kuvio 16). Pyöreä muoto mahdollistaa mallin koneellisen pyörittämisen, jolloin skanneria voidaan pitää paikallaan, ja kuvantamisetäisyys säilyy vakiona koko hammaskaaren skannauksen aikana.



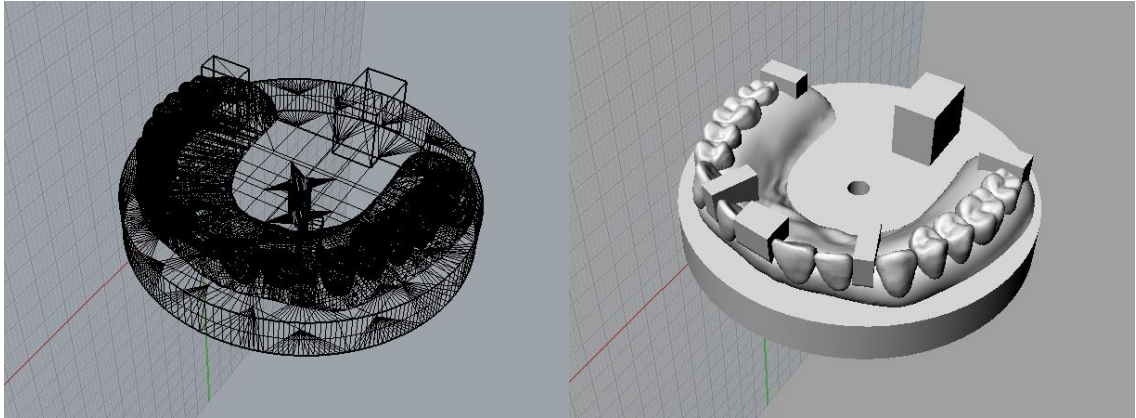
Kuvio 16. Mallin ien venytettynä.

Hammaskaaren pituuden tuli vastata mahdollisimman suurta suuta. Tätä varten mitattiin useita isosta suusta otettuja jäljennöksiä, ja lisättiin pituutta varmuuden vuoksi vielä hieman. Lopulliseksi mallin hammaskaaren pituudeksi saatiin n. 14 cm. Hampaat ja mittaelementit asetoitiin ikeneen, ja malli skaalattiin vastaamaan haluttua hammaskaaren pituutta. Kuutiollisia mittaelementtejä asetettiin mallille useampia, jotta myöhemmin voitaisiin ottaa vertailumittoja eri kohdista. Hammaskaaren takimmaiseta mittaelementit sijoitettiin viisaudenhampaiden kohdalle. Mallille rakennettiin myös pyöreä alusta, johon tehtiin keskireikä pyöritysmoottorin akselia varten (kuvio 17).



Kuvio 17. Hampaat ja mittaelementit asetoituna ikenen päälle. Mallilla pyöreä alusta, jossa reikä pyöritysmoottorin akselia varten.

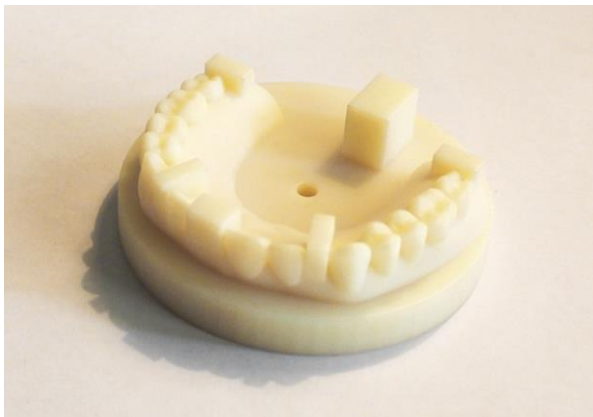
Skannattu hampaisto ja ien olivat kolmioverkkopintoja, mutta mittaelementit ja mallin pyöreä pohja olivat vielä ohjelman tuottamia pintamalleja. Malli muunnettiin kokonaisuudessaan kolmioverkoksi ja tallennettiin stl-tiedostoksi (kuvio 18).



Kuvio 18. Vasemmalla lopullinen malli kolmioverkkopintana ja oikealla tästä tehty varjostus.

4.2 Skannattava malli

Malli tulostettiin 3D-tulostimella (Stratasys EDEN260V). Tämän katsottiin olevan riittävän tarkka skannausmalliksi, jotta opinnäytetyön tavoitteena olevan menetelmän toimivuus voitaisiin todeta (kuvio 19).



Kuvio 19. 3D-tulostettu skannattava malli (Tulostin Stratasys EDEN260V).

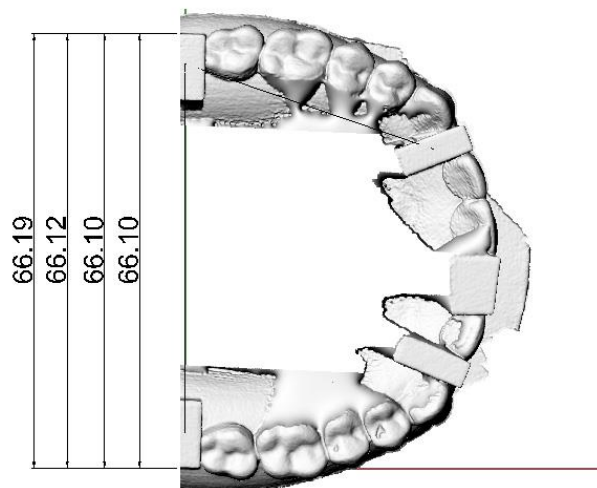
4.3 Tutkittavat skannerit

Markkinoilta valittiin satunnaisesti 2 suuskanneria menetelmän toimivuuden testaamiseksi. Kummatkin laitteistot olivat uusinta mallia ja niiden ohjelmistot oli päivitetty juuri ennen testiä. Laitteistojen maahantuojien kanssa sovittiin, että valmistajia ei mainita opinnäytetyössä, koska työn tarkoituksena oli ainoastaan kehittää testausmenetelmä ja todeta sen toimivuus.

4.4 Menetelmän testausmetodi

3D tulostettu malli skannattiin käsin kummallakin skannerilla neljä kertaa. Skannaus suoritettiin asettaen käsikappaleen lukupää noin 45 asteen kulmaan okklusaalitasoon nähden bukkaalikusprien kohdalle. Kokeissa skannattiin koko hammaskaari lähtien viisaudenhampaan kohdalla olevasta kuutiomaisesta elementistä päätyen vastapuolella olevaan samanlaiseen elementtiin. Skannausmatkan pituudeksi tuli noin 14 cm.

Mallilta valittiin kaksi mittapistettä, joiden välimatkaa verrattiin skannaustulosten ja digitaalisen vertailumallin kesken. Mittapistet sijaittivat viisaudenhampaiden kohdalla olevien elementtien distobukkaalisissa kulmissa. Koeskannauksessa huomattiin, että 3D tulostettu malli ei ollut pinnankarkeudeltaan tarpeeksi sileä ja mittapistekulmat olivat liian pyörityneet. Varsinaisen skannauksen tuloksena saatu kolmioverkkomalli oikaistiin vertailuun käytetyn tietokoneohjelman (Rhino 4.0, Rhinoceros 3D) koordinaatiston mukaiseksi, ja mittapistet otettiin elementtien bukkaalisivuilta. Pinnankarkeuden takia etäisyysmittaus toistettiin neljä kertaa eri kohdista kullekin skannaustulokselle (kuvio 20). Näistä mitoista laskettiin jokaiselle skannaukselle mittapisteiden etäisyyksien mediaani M_d , jolla kompensoitiin pinnankarkeuden vaikutusta. Mediaania käytettiin tunnuslukuna keskiarvon sijasta, koska etäisyyksien jakauma ei välttämättä ollut symmetrinen (Tunnusluvut n.d.).



Kuvio 20. Bukkaalisivuilta otettiin neljästä eri kohdasta mittauspisteet kullekin skannaukselle tulostetun mallin pinnankarkeuden kompensoimiseksi.

Koska malli skannattiin neljä kertaa jokaisella skannerilla, saatiin mitattavasta etäisyydestä siis neljä pinnankarkeutta pienentävää mediaania kutakin skannausta kohden. Näistä mediaaneista laskettiin jälleen mediaani, sekä vaihteluväli ja vaihteluvälin pituus. Saatua mediaania käytettiin laitteiston skannaustuloksena lopullisessa vertailussa. Vaihteluvälistä W (pienin etäisyys ja suurin etäisyys) saatiin alustava käsitys skannerin mittatarkkuuden heilahtelusta (Tunnusluvut n.d.). Heilahtelun suuruuden tunnuslukuna käytettiin vaihteluvälin pituutta w (Hajontaluvut n.d.).

Skannausmallilta tarkkuusmitattiin vertailtava etäisyys eri kohdista neljä kertaa, jotta tulostuksessa tapahtunut mittavirhe saataisiin eliminoitua mahdollisimman tehokkaasti. Mittaustuloksista laskettiin mediaani, jolloin saatiin selville kohtuullisen hyvin tulostetun mallin mittavirhe suhteessa alkuperäiseen digitaaliseen malliin. Mittavirhe poistettiin skannaustuloksista, ja näin saatiin selville lopullinen mittavirhe.

5 Tulokset

Digitaaliselta alkuperäismallilta määritettynä mittapisteiden etäisyydeksi saatiin tasan 66 mm. Skannausmallilta tarkkuusmitatut etäisyydet olivat 66,12 mm, 66,13 mm, 66,14 mm ja 66,16 mm. Näistä saatiin mediaaniksi 66,135 mm. Tulostetun skannausmallin laskennalliseksi mittavirheeksi saatiin siis +0,135 mm. Mittavirhe laitteistoa kohden laskettiin kaavalla: mittausten mediaani - alkuperäisen digitaalisen mallin tarkka arvo - tulostetun skannausmallin laskennallinen mittavirhe = lopullinen mittavirhe.

Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty kummankin skannerin kohdalta skannaustuloksista mitatut arvot ja näistä lasketut mediaanit. Taulukossa 3 on esitetty kummankin skannerin lopulliset laskennalliset tunnusluvut koottuna.

Taulukko 1. Skannerilla I saadut etäisyydet mallin takaelementtien bukkaalisivuille.

	I mittaus	II mittaus	III mittaus	IV mittaus	Md (mm)
Skannaus 1	65,94	66,01	66,10	67,25	66,055
Skannaus 2	65,86	65,99	66,10	67,34	66,045
Skannaus 3	65,80	65,95	66,12	67,26	66,035
Skannaus 4	65,87	66,04	66,19	67,23	66,115
Vertailtava Md					66,040

Skannerin I tuloksista saatiin vaihteluväliksi 66,035 - 66,115 mm ja vaihteluvälin pituudeksi 0,080 mm. Mittavirheeksi saatiin skannausmallin virhe huomioituna 66,040 mm - 66 mm - 0,135 mm = -0,095 mm.

Taulukko 2. Skannerilla II saadut etäisyydet mallin takaelementtien bukkaalisivuille.

	I mittaus	II mittaus	III mittaus	IV mittaus	Md (mm)
Skannaus 1	66,24	66,23	66,18	66,21	66,195
Skannaus 2	66,50	66,43	66,42	66,49	66,425
Skannaus 3	66,14	66,16	66,18	66,21	66,170
Skannaus 4	66,44	66,45	66,47	66,46	66,455
Vertailtava Md					66,310

Skannerin II tuloksista saatiin vaihteluväliksi 66,170 - 66,455 mm ja vaihteluvälin pituudeksi 0,285 mm. Mittavirheeksi saatiin skannausmallin virhe huomioituna $66,310 \text{ mm} - 66 \text{ mm} - 0,135 \text{ mm} = 0,175 \text{ mm}$.

Taulukko 3. Skannereiden tunnusluvut koottuna.

	Skanneri I	Skanneri II
Mittausten mediaani M_d (mm)	66,040	66,310
Vaihteluväli W (mm)	66,035 - 66,115	66,170 - 66,455
Vaihteluvälin pituus w (mm)	0,080	0,285
Laskennallinen mittavirhe (mm)	-0,095	0,175

6 Yhteenveto ja pohdinta

Ensimmäisellä skannerilla saatiin viisaudenhampaiden paikalle asetettujen kuutiollisten elementtien bukkaalisivujen etäisyyksien mediaaniksi 66,040 mm, vaihteluväliksi 66,035 - 66,115 mm, vaihteluvälin pituudeksi 0,08 mm ja mittavirheeksi -0,095 mm. Toisella skannerilla saatiin etäisyyksien mediaaniksi 66,310 mm, vaihteluväliksi 66,170 - 66,455 mm, vaihteluvälin pituudeksi 0,285 mm ja mittavirheeksi 0,175 mm. Mittavirheiden arvot eivät kuitenkaan ole täysin luotettavia, koska skannausmallin pinnankarkeus oli liian suuri. Tuloksista voitiin kuitenkin havaita, että suuskannerit tuottivat kasautuvan mittavirheen koko hammaskaaren käsittävällä skannausmatkalla, ja mittavirhe voitiin määrittää opinnäytetyön tuloksena syntyneellä menetelmällä. Virheen mitta-arvo voi kuitenkin pienentyä tai kasvaa skannausmatkan aikana, joten jatkossa tulisi myös suorittaa ristikkäismittauksia muiden (hammaskaaren keskelle asemoitujen) mittaelementtien suhteen.

Jotta mittavirhe voitaisiin määrittää tarkasti, pitäisi skannattava malli valmistaa menetelmällä, joka olisi mahdollisimman mittatarkka. Tällainen menetelmä voisi olla vaikkapa jyrshintä, jonka pinnanlaatu on myös tunnetusti erinomainen. Lisäksi jyrshintävän materiaalin tulisi olla skannerin luettavissa sellaisenaan ilman eri pinnoitusta, joka saattaa aiheuttaa skannaus tulokseen lisävirhettä. Malli olisi myös muutettava jyrshintälle otolliseen muotoon, eli palatinaalipuoli tulisi suunnitella mahdollisimman kantikkaaksi ja bukkaalipuoli mukailisi oikean hampaiston geometriaa. Valmistettu malli tulisi tarkkuusmitata, jotta sen mittavirhe verrattuna digitaaliseen alkuperäismalliin saadaan selvitettyä. Saatu tarkkuusmitattu mittavirhe poistettaisiin lopullisesta mittavirheestä ja näin saataisiin selville skannerin todellinen kumulatiivinen mittavirhe.

Opinnäytetyössä suunnitellun mallin hammaskaari asemoitiin vastaamaan varsin tarkasti ympyrän kehää, ja mallin alustassa oleva reikä asemoitiin tämän ympyrän keskipisteeseen. Jatkotutkimuksen kannalta tämä on erityisen tärkeää, sillä skanneri voitaisiin nyt asettaa kiinteästi paikalleen tiettyyn kulmaan (esim. 45 astetta) ja tietylle etäisyydelle suhteessa skannausmallin hammaskaareen. Skanneri pysyisi paikallaan ja mallia voitaisiin pyörittää esimerkiksi servomootorilla ympyrän keskipisteen suhteen eri nopeuksilla. Näin testi olisi toistettavissa tarkasti, ja eri laitteistojen mittatarkkudet olisivat keskenään vertailukelpoisia. Skannereiden nopeutta käsitellä dataa voitaisiin testata muuttamalla moottorin pyörimisnopeutta. Tämä selvittäisi, miten laitteistot sijoittuvat keskenään verrattaessa lukupään liikkumisnopeutta. Tällä saattaisi olla

merkitystä siihen kuinka pitkään suun skannaaminen hammaslääkärin vastaanotolla kestää. Markkinoille tulevat uudet skannerit voitaisiin ajaa aina saman testiohjelman läpi. Koneellisesti suoritettava skannaus antaisi tarkan pohjan eri skannereiden vertailulle.

Lähteet

Burgess, John O – Lawson, Nathaniel C – Robles, Augusto 2013. Comparing Digital and Conventional Impressions. Inside Dentistry, Volume 9, Issue 11. Published by AEGIS Communications.

Hajontaluvut n.d. Verkkodokumentti. <<http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/hajontaluvut/hajontaluvut.html>>. Luettu 5.10.2014.

Hollenbeck, Karl – Allin, Thomas – van der Poel, Mike 2012. Dental Lab 3D Scanners - How they work and what works best. 3Shape Technology Research, Copenhagen.

Patzelt, Sebastian B M – Lamprinos, Christos – Stampf, Susanne – Att, Wael 2014. The time efficiency of intraoral scanners: an in vitro comparative study. The Journal of the American Dental Association, vol. 145 no. 6 542-551.

Remondino, Fabio 2003. From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol .XXXIV-5/W10.

Taskinen, Antti 2014. Värihallinta-asiantuntija. Color Connection Ky. Lohja. Haastattelu 11.9.2014.

Tunnusluvut n.d. Verkkodokumentti. <<http://www2.amk.fi/mater/tutkimusmenetelmat/kvantitat/kuvailu/tunnu.htm>>. Luettu 5.10.2014.

van der Meer, Wicher J – Andriessen, Frank S – Wismeijer, Daniel – Ren, Yijin 2012. Application of Intra-Oral Dental Scanners in the Digital Workflow of Implantology. DOI: 10.1371/journal.pone.0043312.

