

Vesa Helminen

Opetuskäyttöön tarkoitettun robottikäden mallin- taminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinööriytyö

7.1.2015

Tekijä(t) Otsikko	Vesa Helminen Opetuskäyttöön tarkoitettun robottikäden mallintaminen
Sivumäärä Aika	60 sivua + 14 liitettä 7.1.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	Teknologiapäällikkö Sami Kalliokoski Lehtori Timo Tuominen
<p>Insinööriyön tavoitteena oli tuottaa raportti opetuskäyttöön tarkoitettun robottikäden mallintamisprosessista. Työssä suunniteltiin, mallinnettiin ja valmistettiin ihmiskästä muistuttava kiertyvänivelinen robotti 3D-tulostamalla. Työn toimeksiantajana oli Metropolia Ammattikorkeakoulun sovelletun elektroniikan tutkimus- ja kehitysyksikkö Electria.</p> <p>Suunnittelussa määriteltiin robottikädelle tarvittavia ominaisuuksia, kuten koko, edullisuus ja nivelten lukumäärä. Pää tavoitteena oli pitää robottikäsi edullisena ja ihmiskäden kaltaisena. Suunnittelun jälkeen robottikäden osat mallinnettiin käyttäen Solidworks 3D-mallinnusohjelmaa. Mallinnetuista osista tehtiin virtuaalinen kokoonpano, jonka avulla tutkittiin osien yhteensopivuutta. Kokoonpano todettiin toimivaksi ja osat valmistettiin 3D-tulostamalla ABS-muovista.</p> <p>Robottikäden valmistamista varten työssä tutkittiin yleisimpiä pikavalmistustekniikoita, sekä käytetyimpiä 3D-tulostusmateriaaleja. ABS-muovin 3D-tulostaminen todettiin hyväksi valmistusmenetelmäksi robottikäsi-prototyypille, mutta kaupallisten tuotteiden valmistamiseen se ei vielä sovellu hitauden ja kalleuden vuoksi. 3D-tulostamalla valmistettuja osia jouduttiin vahvistamaan epoksihartsilla, jotta ne kestivät robottikäden pidempiaikaisessa käytössä.</p> <p>Työn tuloksena valmistettu robottikäsi oli toimiva, mutta sen pidempiaikainen käyttö paljasti kehitettävää. Robottikäden edullisten toimilaitteiden huonona puolena ilmeni niiden lyhyt käyttöikä ja käsivarren rotaatioissa käytettyjen 3D-tulostamalla valmistettujen pienten hammasrattaiden rakenne ei kestänyt toistuvia liikkeitä. Käden seuraavaan versioon rotaatioiden mekaniikkaa pitää vielä kehittää ja toimilaitteina siirtyä pelkkien tasavirtamoottoreiden käyttöön.</p> <p>Robottikäden toimivuudesta kertoo insinööriyön loppuvaiheilla osallistuminen kansainväliseen The World Embedded Software Contest 2014 -kilpailuun, jossa robottikäsi selvisi finaaleihin. Robottikäsi-projektin onnistumisen johdosta, sen kehittämistyötä päätettiin jatkaa Electrian toimesta.</p>	
Avainsanat	Robotiikka, robottikäsi, 3D-tulostus, Solidworks

Author(s) Title	Vesa Helminen Design process of educational robot arm
Number of Pages Date	60 pages + 14 appendices 7 January 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Sami Kalliokoski, Technology Manager Timo Tuominen, Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to document a design process of an educational robot arm. The work included designing and manufacturing of a humanlike articulated robot arm. Manufacturing was made by using 3D printing. This thesis was made for Electria, an electronics research and development unit of the Metropolia University of Applied Sciences.</p> <p>During the design phase of the thesis, the features for the robot arm were determined, including size, price range and the number of the joints. The focus was to keep the price as affordable as possible and maintain the humanlike features. After specifying the specs for the robot arm, all the parts were modelled using Solidworks 3D modelling software. To inspect how the 3D modelled parts fit together, a virtual assembly was created. After the results of the virtual assembly were found satisfying, the parts were manufactured from ABS plastic by using 3D printer.</p> <p>As a outcome of this study a working robot arm prototype was created, however, further studies showed some need for improvement. The robot arm's affordable actuators had short lifespan. Another weak point was discovered from the arm's rotation mechanics. The small 3D printed gear teeth, which were used as power transmission for the arms rotations, were breaking down when the robot arm was operational for longer periods. As a conclusion for the study some suggestions were made for the next version of the robot arm. Joint mechanics need upgrading and the actuating for them should be made by using only the default current motors.</p> <p>As a proof of robot arms functionality the robot arm was used to take part in The World Embedded Software Contest 2014, in which the arm made it to the finals. As a result of this thesis, Electria decided to continue developing the robot arm in the future.</p>	
Keywords	Robotics, robot arm, 3D-printing, Solidworks

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Robottiikka	3
2.1	International Federation of Robotics (IFR)	3
2.2	Perustietoa robotiikasta	3
3	3D-tulostaminen	6
3.1	Yleistä	6
3.2	FDM (<i>Fused deposition modeling</i>)	6
3.3	SLA (<i>Stereolitografia</i>)	7
3.4	SLS (<i>Selective laser sintering</i>)	8
3.5	LOM (<i>Laminated object manufacturing</i>)	9
3.6	Yleisimmät 3D-tulostusmateriaalit	10
4	Suunnittelu	12
4.1	Yleistä	12
4.2	Kustannustehokkuus	13
4.3	Toimilaitteet	13
4.3.1	Tasavirtamoottorit	14
4.3.2	Servomoottorit	16
4.4	Elektroniikka	19
4.5	Robottikäden koko ja nivelten liikelaajuudet	20
4.6	Käden kaksiversiota	21
4.7	Tarttuja, sormien suunnittelu	22
4.8	Prototyypin toteuttaminen	23
5	Mallintaminen	24
5.1	Yleistä	24
5.2	Solidworks	25
5.3	Robottikäden osien nimeäminen	26
5.4	Kotelo	27
5.5	Pystyvarsi	32
5.6	Olkavarsi	36
5.7	Kyynärvarsi	41

5.8	Kämmen	43
5.9	Muut mallinnettavat	49
5.10	Simulointi	50
6	Osien 3D-tulostaminen ja kokoonpano	52
6.1	3D-tulostaminen	52
6.2	Viimeistely ja kokoonpano	54
7	Yhteenveto ja pohdinta	57
	Lähteet	60
	Liitteet	
	Liite 1. SG90-servomoottorin 3D-malli	
	Liite 2. MG996R – servomoottorin 3D-malli	
	Liite 3. N20-tasavirtamoottorin 3D-malli	
	Liite 4. Servomoottorin vetopyörän 3D-malli	
	Liite 5. N20-tasavirtamoottorin pienen vetopyörän 3D-malli	
	Liite 6. N20-tasavirtamoottorin ison vetopyörän 3D-malli	
	Liite 7. Potentiometrin pidikkeen 3D-malli	
	Liite 8. N20-tasavirtamoottorin kiinnittimen 3D-malli	
	Liite 9. Kyynärnivelen trimmeripotiometriin hatun 3D-malli	
	Liite 10. Servorotaation kiinnityskappaleen 3D-malli	
	Liite 11. Robottikäden 3D-tulostamistiedot	
	Liite 12. Tukimateriaalinpoisto lipeäliuoksella	
	Liite 13. Kotelon kokoonpano	
	Liite 14. Kämmen servomoottoreilla	

Lyhenteet

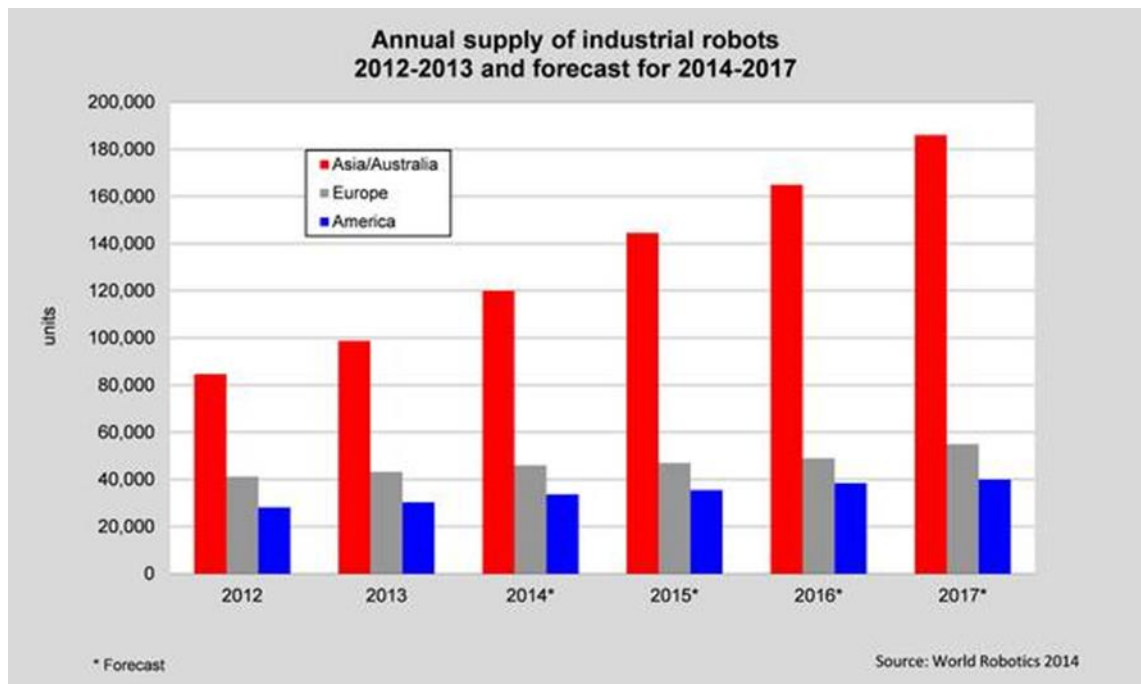
CAD	Computer aided design.
IFR	International federation of robotics.
2D	Kaksiulotteinen.
3D	Kolmiulotteinen.
STL	Stereolithography. 3D-tulostamisessa käytetty tiedostoformaatti.
SLA	Stereolitografia. Pikavalmistustekniikka.
SLS	Selective Laser Sintering. Pikavalmistustekniikka.
FMD	Fused deposition modeling. Pikavalmistustekniikka.
PLA	Polylaktidi. Biohajoava muovilaatu.
ABS	Akryylnitriilibutadienistyreeni. Muovilaatu.
RD	Rapid Prototyping eli pikavalmistustekniikka
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot arm. Robottikäsityyppi.
LED	Light emitting diode. Valaisin.
LCD	Liquid-crystal display. Nestekidenäyttö.
DC	Default current. Tasavirta.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön aiheena oli suunnitella ja valmistaa opetuskäyttöön tarkoitettu robottikäden prototyyppi. Työn toimeksiantajana toimi Metropolia Ammattikorkeakoulun sovelletun elektroniikan tutkimus- ja kehitysyksikkö Electria.

Electria on Metropolia Ammattikorkeakoulun soveltavan elektroniikan tutkimus- ja kehitysyksikkö. Suurelta osin sen toiminta perustuu erilaisiin asiakasyrityksille tehtäviin projekteihin, joissa elektroniikan tutkimustuloksista kehitetään toimivia sovelluksia asiakasyrityksille. Osana toimintaan kuuluu myös asiakkaiden tilauskouluttaminen. Electrian tiloissa on koetuantotehdas, jossa voidaan valmistaa piensarjoja sekä suorittaa elektroniikan testaus ja tarkastuspalveluita. Electrian toiminnan pääpaino on vähävirtaisessa langattomassa elektroniikassa ja sen toiminta on käynnistynyt vuonna 2004. [1]

Ennen työn aloittamista Electriassa oli suoritettu opiskelijatyönä esiselvitysprojekti, jossa oli kartoitettu palvelurobotiikan ja edullisten robottikäsiin markkinatilannetta. Esiselvitysprojektin tuloksena oli todettu, että markkinoilla olevat robottikädet ovat useiden tuhansien eurojen hintaisia ja niitä valmistetaan pääosin teollisuuteen. Kuitenkin uusien robotiikkasovelluksien tuleminen palvelu- ja kuluttajakäyttöön oli kasvanut vuosittain ja ennusteiden mukaan kasvu oli kiihtyvää [2]. Robotiikan kattojärjestön IFR:n ennusteiden mukaan erityisesti Aasiassa teollisuusrobottien myynnin kasvu tulee olemaan voimakasta lähivuosina (kuva 1).



Kuva 1. Teollisuusrobottien myynnin kasvuennuste 2014–2017. [3]

Myös Suomen opetusministeriö oli antanut julkisuuteen lausuntoja ohjelmoinnin opetuksen lisäämisestä peruskoulujen opetukseen, jonka pääteltiin kasvattavan ohjelmoinnin opetukseen tarkoitettujen laitteiden markkinoita. Näiden päätelmien pohjalta Electriassa aloitettiin kehittämään opetuskäyttöön tarkoitettua robottikättä.

Työn ensisijaisena tavoitteena oli dokumentoida opetuskäyttöön tarkoitetun robottikäden mallinnus- ja valmistusprosessit. Työn tarkoituksena on toimia apuna seuraaville robottikäden parissa työskenteleville henkilöille. Toissijaisena tavoitteena oli kerätä tietotaitoa 3D-tulostamisen käytöstä ja soveltamisesta robottikäden mekaniikan valmistamismenetelmänä.

Prototyypin rakentamisessa keskityttiin FDM-menetelmään perustuvaan 3D-tulostamiseen ja osien mallintamiseen. Alunperin tarkoituksena oli käyttää myös SLA-pikavalmistusmenetelmää, mutta kyseistä valmistusmenetelmää käyttävää laitteistoa ei saatu kuntoon tämän insinööriyön aikana. Prototyyppiä varten rakennettu elektroniikka ja ohjelmointi ovat aiheena toisessa insinööriyössä, joten niitä ei tässä työssä käsitellä kuin mallintamisen ja mekaniikan näkökulmasta.

2 Robotiikka

2.1 International Federation of Robotics (IFR)

IFR on kansainvälinen robotiikan alan kattojärjestö, joka koostuu yli 15 maan kansallisista robotiikkayhdistyksistä. Järjestön toimenkuvana on robotiikkateollisuuden maailmanlaajuinen vahvistaminen ja kehittäminen sekä robotiikantietouden julkinen levittäminen. [4]

Alan kattojärjestönä IFR painottaa toiminnassaan robotiikkayritysten yhteistyötä ja alalle tulevien yritysten auttamista sekä näiden kahden välillä kommunikaatiolinkkinä toimimista ja tietojen keräämistä kokoajan kehittyvästä robotiikkateknologiasta. Järjestö ylläpitää maailmanlaajuisia tietopankkia robotiikan markkinatilanteesta, tutkimuksista, tilastoinnista ja alan standardeista. [4]

IFR järjestää vuosittain ISR (International symposium on robotics) tapahtuman, jonka ideana on toimia tapaamispaikkana robotiikan tutkijoille ja kehittelijöille. Tapahtuman järjestämispaikka vaihtuu vuosittain. Ensimmäinen ISR-tapahtuma järjestettiin vuonna 1970. Vuonna 1987 järjestettiin seitsemästoista ISR-tapahtuma, jonka aikana IFR-järjestö perustettiin. [4]

2.2 Perustietoa robotiikasta

Robotiikalla tarkoitetaan alaa jossa tutkitaan, kehitetään, valmistetaan ja ohjataan robotteja. Se pohjautuu useisiin eri tieteenaloihin, kuten fysiikkaan, matematiikkaan, elektroniikkaan, tietotekniikkaan ja mekaniikkaan. Robotiikan perusajatuksena on käyttää robotteja erilaisten ongelmien ratkaisemiseen. Ratkaisuja etsitään tutkimalla erilaisia ohjausjärjestelmiä, antureita ja matemaattisia malleja, niin ihmisistä ja eläimistä kuin koneista. Näistä tiedoista rakennetaan algoritmeja, jotka ohjelmoidaan laitteisiin saaden aikaan autonomisia laitteita, robotteja. [5, s. 8–10.]

Teollisuudessa robotilla tarkoitetaan automaattisesti toimivaa, uudelleen ohjelmoitavaa manipulaattoria, joka on suunniteltu liikuttamaan tai manipuloimaan materiaaleja tai esineitä siihen ohjelmoitujen liikkeiden mukaisesti. Robotti koostuu kahdesta pääosasta: manipulaattorista ja ohjainyksiköstä. Yleiskäyttöisempi määritelmä robotille on laite,

joka voidaan ohjelmoida tekemään itsenäisesti erilaisia tehtäviä, samaan tapaan kuin tietokone on virtapiiri, joka voidaan ohjelmoida suorittamaan erilaisia tehtäviä. [5, s. 8–15, 54–55.]

Teollisuudessa robottikädellä ja robotilla tarkoitetaan monesti samaa asiaa, sillä usein robotit rakennetaan muistuttamaan ihmisen kättä. Ihmisen käsi on evoluution tuloksena muokkaantunut monipuoliseksi manipulaattoriksi. Ihmisen kädessä on seitsemän vapausastetta (*degree of freedom*). Vapausasteiden määrällä tarkoitetaan mekanismin liikemahdollisuuksien määrää. Jotta robotin tarttuja voitaisiin ohjata kaikissa asennoissa, mihin tahansa pisteeseen kolmeulotteisessa avaruudessa, täytyy robotissa olla vähintään kuusi vapausastetta. [5, s. 127, 86–89.]

Teollisuudessa robottikädet luokitellaan niiden rakenteen perusteella. Luokkia ovat: Suorakulmainen robotti, sylinterirobotti, napakoordinaatistorobotti, Scara-robotti, kiertyvänivelinen robotti ja rinnakkaisrakenteinen robotti. Robotit eroavat myös kinematiikaltaan. Kinematiikalla kuvataan robottien sijaintia, liikkeitä ja kiihtyvyyksiä. Sen avulla muodostetaan matemaattisia malleja joilla robotteja ohjataan. [5, s. 78–88, 175–178.]


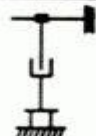
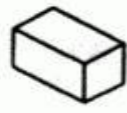







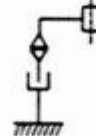




Suorakulmaiset robotit (kuvassa 2 ylimpänä) liikkuvat lineaarisilla liikkeillä käyttäen kolmea vapausastetta. Ne pystyvät liikuttamaan suorakulmion muotoisen työalueensa jokaiseen pisteeseen, mutta eivät kaikissa asennoissa. Yleisimpiä suorakulmaisia robotteja ovat portaalirobotit. Niitä käytetään teollisuudessa kappaleiden siirtelyyn. Hyvinä puolina suorakulmaisissa roboteissa on niiden edullisuus, joka pääosin johtuu toimilaitteena usein käytettävistä pneumaattisista sylintereistä. Lisäksi rakenteen kinemaattinen mallinnus on yksinkertaista. [5, s. 81–88.]

Sylinterirobotit (kuvassa 2, toiseksi ylimpänä) muistuttavat suorakulmaisia robotteja, niissä on kolmen lineaarisesti liikkuvan nivelen sijaan yksi kiertyvä nivel ja kaksi lineaarisista niveltä. Tämä mahdollistaa robotin liikkumisen mihin tahansa pisteeseen sen sylinterin muotoisella työalueella. Suorakulmaisten robottien tapaan niiden rakenne on yksinkertainen ja niiden kinemaattinen mallintaminen helppoa. [5, s. 81–84.]

Napakoordinaatistorobotissa (kuvassa 2 keskellä) on kaksi kiertyvää niveltä ja yksi lineaarisesti liikkuva nivel. Robotin työalue on pallomainen, suoraan robotin yläpuolella olevaa aluetta lukuun ottamatta. Napakoordinaatistorobotin kinemaattinen mallintaminen on vaikeaa. [5, s. 81–84.]

Scara-robotissa (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) on yleensä neljä vapaustastetta (kuva 2). Robotissa on vaakatasossa kaksi tai kolme kiertyvää niveltä, jotka mahdollistavat robotin liikkumisen kaikkiin pisteisiin työtilan vaakatasossa. Työtila on kahden sisäkkäin oleva ympyrän muotoinen. Robottikäden päässä on pystysuunnassa lineaarisesti liikkuva nivel, joka mahdollistaa esineiden poimimisen. Scara-robotteja käytetään teollisuudessa kokoonpanotehtävissä. Niiden hyvänä puolena on liikelaajuuteen nähden yksinkertainen kinemaattinen mallintaminen. [5, s. 81–84.]

Kiertyvänivelinen robotti (kuvassa 2 alimpana) käsittää kaikki robottimallit, joissa on enemmän kuin kolme kiertyvää niveltä. Robottien rakenteista se muistuttaa eniten ihmisen kättä. Niiden työalue ja ulottuvuus ovat robottimalleista suurimmat. Robottikäsi pystyy myös tarttumaan esineisiin useista eri suunnista. Teollisuudessa kiertyväniveliset robotit ovat eniten käytettyjä. Huonoina puolina ovat niiden vaikea kinematiikka ja heikko nostokyky käden ääriasennoissa. [5, s. 83–84.]

Principle	Kinematic Structure	Workspace
 Cartesian Robot		
 Cylindrical Robot		
 Spherical Robot		
 SCARA Robot		
 Articulated Robot		

Kuva 2. Robottien rakenteet [6].

Rinnakkaisrakenteinen robotti perustuu muista roboteista poiketen rinnakkaisiin liikeakseleihin. Rakenne mahdollistaa erittäin nopeat manipulaattorin liikkeitä ja yksinkertaisen kinemaattisen mallintamisen. Huonoina puolina ovat pieni työalue ja vapausasteiden määrän pieneneminen työalueen reunoilla. Rinnakkaisrakenteiset robotit ovat suosittuja elintarviketeollisuudessa, jossa pitää siirrellä pieniä ja kevyitä kappaleita nopeasti. [5, s. 86.]

3 3D-tulostaminen

3.1 Yleistä

3D-tulostaminen kuuluu pikavalmistustekniikoihin (*rapid prototyping = RP*). Kyseessä on joukko valmistustekniikoita, joilla on mahdollista saada suunniteltavan laitteen ensimmäinen prototyyppi lopputuotteen näköiseksi ja kokoiseksi ilman vaativaa käsityötä. Yleinen jako 3D-tulostimille on jako neljään luokkaan niiden toimintatavan perusteella: nestettä kovettavat, sula materiaalista lisäävät, pulverista sintraavat tai sitovat sekä levystä leikkaavat tulostimet. [7; 8, s. 700.]

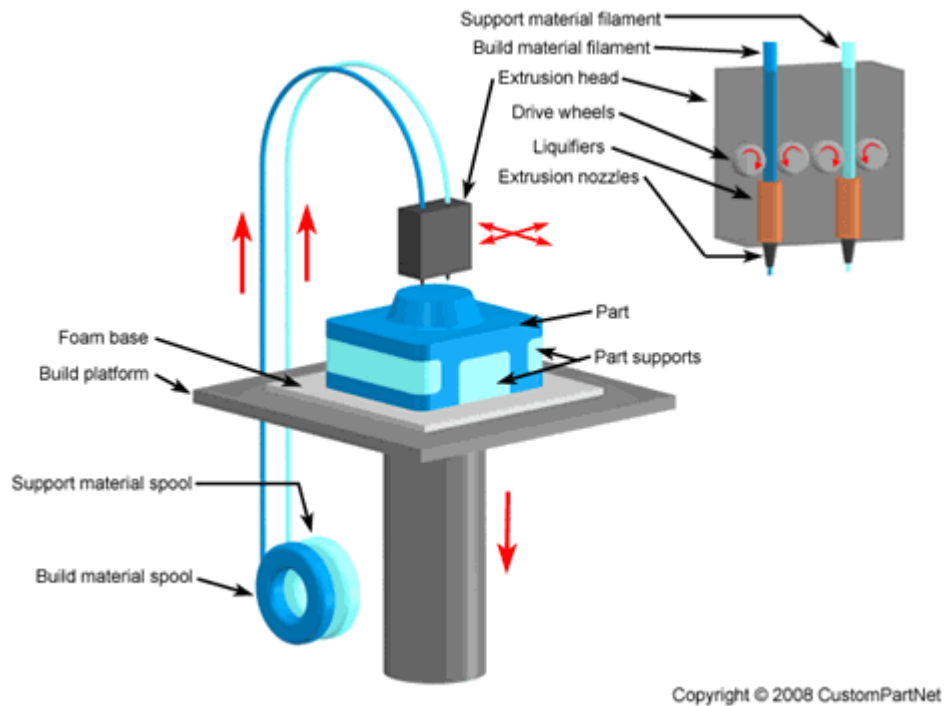
Pikamallinnustekniikat ovat 3D-tulostamisen yleistymisen takia ajankohtainen aihe. Aiheesta löytyy useita kattavia opinnäytetöitä. Tässä opinnäytetyössä esitelläänkin vain yleisimmät ja käytetyimmät pikavalmistustekniikat.

3.2 FDM (*Fused deposition modeling*)

FDM-valmistustekniikka (kuva 3) on yleisin 3D-tulostamisessa käytettävistä tekniikoista. Sen toiminta perustuu muovilankaan, jota syötetään kuumennetusta tulostuspäästä lämmitetylle alustalle. Muovilanka sulaa kuumen tulostuspään sisällä ja tulostuspää levittää sen ohuina jopa 0,1 mm kerroksina lämmitetylle alustalle. Tämän jälkeen tulostuspää siirtyy tulostamaan seuraavaa kerrosta edellisen päälle. Kolmiulotteiset kappaleet rakennetaan alustalle kerroskerrokselta. [9]

Tulostuspäässä on yleensä kaksi reikää, joista toisesta tulee rakennusmateriaali ja toisesta tukimateriaali. Tukimateriaalia käytetään kohdissa, joissa kappaleen rakenteessa tulee kaltevuudeltaan yli 40 asteen kulmassa pystyasennosta olevia pintoja.

Kappaleen tulostuksen jälkeen tukimateriaali voidaan poistaa käsin tai liottamalla lipe-
än avulla. FDM-menetelmällä kappaleista tulee rakenteeltaan kestäviä ja ne kestävät
myös muilla menetelmillä rakennettuja kappaleita paremmin korkeita lämpötiloja.[8, s.
712–713; 9; 10.]

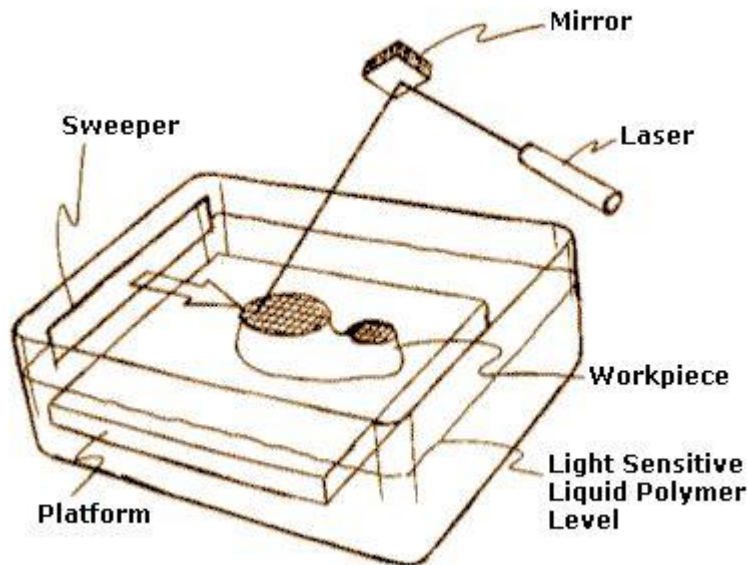


Kuva 3. FDM-menetelmän toimintaperiaate. [10]

3.3 SLA (Stereolitografia)

SLA-valmistustekniikka (kuva 4) on ensimmäinen kaupallinen pikavalmistustekniikka. Se patentoitiin vuonna 1986, 3D systems Inc toimesta [12]. SLA-valmistus perustuu nestemäisen fotopolymeerihartsin käyttöön. Fotopolymeerihartsi kovettuu, kun se altistetaan UV-säteilylle (UV = *ultravioletti*). SLA-valmistuksessa fotopolymeerihartsi pidetään altaassa ja sitä kovetetaan UV-laserin avulla ohuina noin 0,1 mm kerroksina. Jokaisen kerroksen välissä alustaa lasketaan alaspäin kerroksen verran mahdollistaen fotopolymeerihartsin valumisen kappaleen päälle. Kappaletta kasvatetaan kerroskerrokselta kunnes se vastaa mallinnettua kappaletta. Kun kappale on saavuttanut lopullisen muotonsa, se pestään ja jälki kovetetaan UV-valon avulla. SLA-menetelmällä teh-

dyt kappaleet ovat hauraita ja vaativat tukimateriaalien käyttöä, mikäli tulostettava kappale on iso tai siinä on yli 15 asteen kulmia. [8, s. 710; 12; 13; 14.]

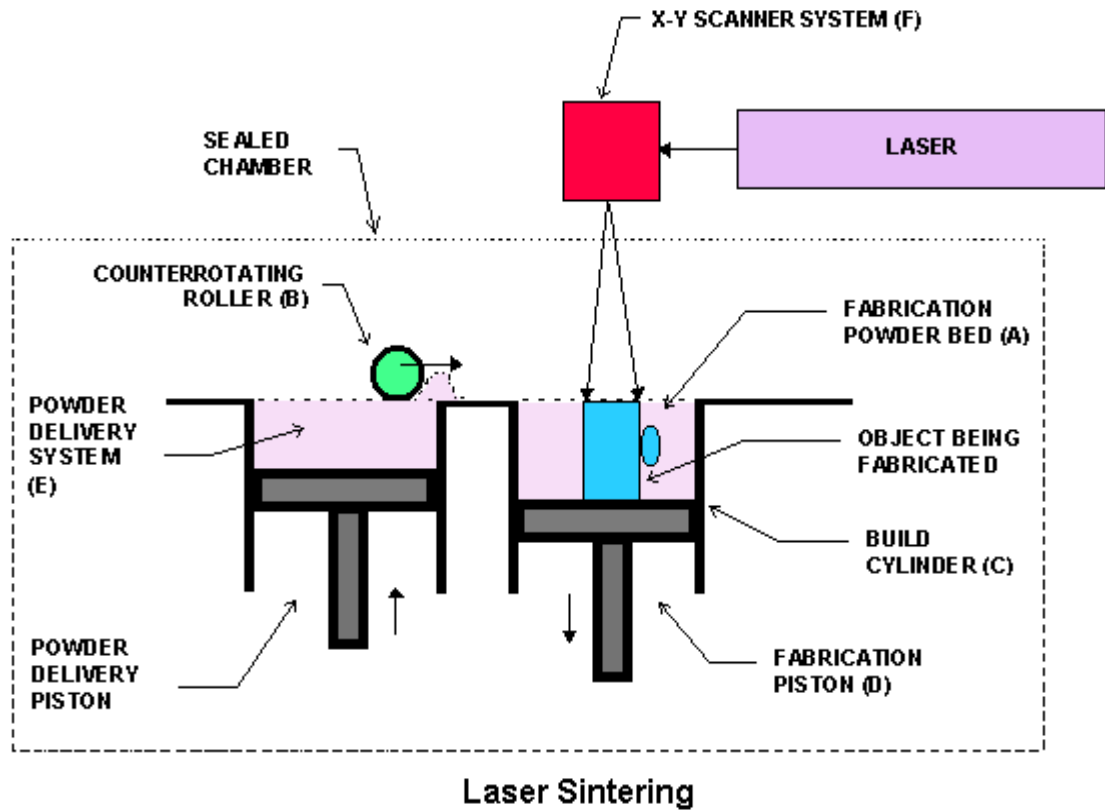


Kuva 4. SLA-tulostamisen toimintaperiaate. [13]

3.4 SLS (*Selective laser sintering*)

SLS eli lasersintraus (kuva 5) on pikavalmistusmenetelmä, jossa tulostustasolle levitetään tiiviisti termoplastista jauhetta, jota kuumennetaan laserilla, kunnes materiaalin hiukkaset tarttuvat toisiinsa. Jauhetta ei kuitenkaan sulateta. Ensimmäisen kerroksen jälkeen tulostustasoa lasketaan alaspäin ja uusi termoplastinen jauhekerros levitetään tasolle. Prosessi toistetaan kunnes mallinnettu kappale on saanut muotonsa.[8, s. 711–712.]

SLS-laitteet ovat teollisuuteen tarkoitettuja, hintavia pikamallinnuslaitteita, ja ne vaativat hyvän ilmanvaihdon. SLS-laitteita on kehitetty toimimaan myös muilla materiaaleilla kuin muoveilla. Nykypäivänä myös metalleita ja kipsiä voidaan tulostaa SLS-menetelmällä. [15]

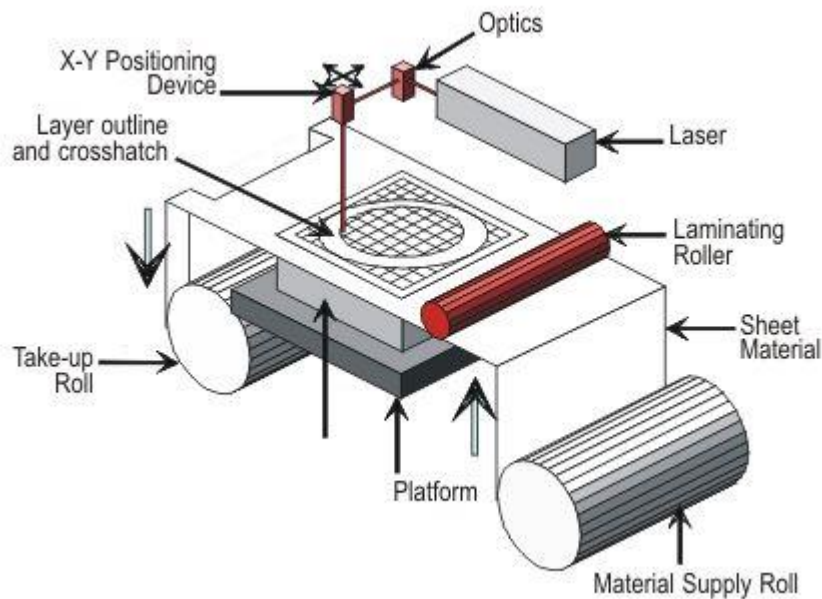


Kuva 5. SLS toimintaperiaate [15].

3.5 LOM (*Laminated object manufacturing*)

LOM-valmistaminen perustuu laminointitekniikkaan (kuva 6). Menetelmässä toimintaperiaatteena on levystä leikkaava tulostaminen. Valmistusmateriaalina kappaleille käytetään metallia, paperia tai muovia. Materiaali on ohuina levyinä arkeissa, joita leikataan laserilla halutun kappaleen ääriviivojen mukaan. Kun yhteen kerrokseen on tehty ääriviivojen mukaiset leikkaukset, kone siirtää uuden ohuen materiaalilevyn edellisen päälle ja liimaa ne yhteen. Prosessia toistetaan, kunnes kappale on valmis. Paperin ja muovin kanssa rakenteen parantamiseen käytetään yleensä hartsia. Tällöin arkin toinen pinta on liimapinta ja kuumen telan avulla eri kerrokset puristetaan ja kovetetaan yhteen. Menetelmä on nopea, eikä se tarvitse tukimateriaalia kappaleiden valmistamiseen. Ongelmia menetelmässä tuottaa epätarkkuus, menetelmällä ei pystytä valmista-

maan yksityiskohtaisia kappaleita ja kerrosten välisten liimauksien kestävyys on heikko. [16]



Kuva 6. LOM-valmistuksen toimintaperiaate [16].

3.6 Yleisimmät 3D-tulostusmateriaalit

Nykyään 3D-tulostusmateriaalien kirjo on valtava. Tekniikoita on useita ja jokaiselle tekniikalle on omat materiaalinsa. Esittelen tässä työssä vain tämän työn kannalta oleellimmat 3D-tulostamismateriaalit. Esiteltävät muovit ovat termoplastisia (thermoplastic) eli lämpömuovattavia ja ne ovat yleisimpiä FDM-pikavalmistustekniikassa käytettäviä muovimateriaaleja. 3D-tulostamista ajatellen termoplastistenmuovien tärkeimpänä ominaisuutena on niiden kyky sulaa ja kiinteytyä useita kertoja, ilman hajoamista. Tämän tyyppisistä materiaaleista käytetään myös usein nimitystä kestopuovi. [17]

3D-tulostamisessa materiaalien täytyy olla kestopuoveja. Tulostamista varten materiaalit sulatetaan ja muovataan 3D-tulostimelle sopivaksi muovinaruksi, joka tulostimessa uudelleen sulatetaan ja kerrostetaan halutun kappaleen näköiseksi. Tämän jälkeen muovin täytyy kestää halutun kappaleen näköisenä. Näitä kolmea tekijää pidetään

määrävinä tekijöinä 3D-tulostusmateriaaleissa ja materiaalin on selvittävä näistä vaiheista, jotta sitä voidaan käyttää 3D-tulostuksenmateriaalina. [17]

ABS eli akryylinitriilibutadieenistyreeni on muovilaatu, jota suositaan käyttöesineiden 3D-tulostamisessa. Se on öljypohjainen muovi ja sen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat korkea mekaanisenrasituksen kesto ja laaja lämpötilankestoalue. ABS-muovi on myös hieman joustava tulostusmateriaali, jonka vuoksi siitä valmistetut kappaleet eivät katkea yhtä helposti kuin muilla tulostusmateriaaleilla valmistetut kappaleet. Materiaalia on helppo työstää, se kestää hyvin hiomista ja leikkaamista. ABS-muovin liukeneminen, yleisessä käytössä olevaan asetoniliottimeen, lisää materiaalin monikäyttöisyyttä. Asetonin avulla materiaalia on helppo liimata tai kiillottaa. [17]

3D-tulostimelta ABS-muovi vaatii lämmitetyn alustan. Ilman lämmitettyä alustaa muovi rupeaa kiertymään, heikentäen tulostamistarkkuutta huomattavasti. Ongelmaa on yritetty ratkaista myös käyttämällä lämmitetyn alustan sijasta asetonia tai hiuslakkaa tulostusalustan esikäsitteilyyn. ABS-muovin tulostuslämpötila on noin 200–250 °C, riippuen muovin laadusta. Yksityiskohtaisten ja terävien pintojen tekemiseen vaaditaan tulostimelta pientä tuuletinta, tulostettujen pintojen nopeaan viilentämiseen. Öljypohjaisena muovina sen sulattaminen vapauttaa kaasuja, jotka voivat aiheuttaa hajuhaittoja. [17]

PLA eli polylaktidi on toinen käytetyimmistä 3D-tulostamismateriaaleista. PLA on biohajoava kasvipohjainen muovi, jonka rakennusaineena käytetään yleensä maissi- tai perunatärkkelystä. Teollisuudessa PLA:ta käytetään elintarvikkeiden paketointiin, sen biohajoavuuden vuoksi. Ominaisuuksiltaan PLA on kova muovi. PLA ei jousta ABS-muovin tapaan, vaan se murtuu helpommin kovanrakenteensa takia. Huomioitavaa kuitenkin on se, että kummatkin esitellyistä materiaaleista ovat yhtä kestäviä. ABS-muovi vain taipuu ennen murtumistaan. Kovuutensa takia PLA-muovista tulostetut kappaleet saavat lasimaisen ulkonäön ja niiden käsin työstäminen on hankalaa verrattuna ABS-muoviin. Materiaalin kiillottaminen on hankalaa, se ei reagoi asetoniin tai muihin yleisessä käytössä oleviin liuottimiin. [17]

PLA-muovin tulostamisessa ei esiinny suuresti materiaalin vääntyilyä tai kiertymistä. Tämän takia PLA-muovi ei vaadi lämmitettyä tulostusalustaa, mutta sen käyttö on suositeltavaa. PLA ei kestä yhtä korkeita lämpötiloja kuin ABS-muovi, vaan se alkaa pehmentyä jo 60 °C. Tämän takia PLA ei sovellu moniin käyttökohteisiin. Heikon lämmönkestokykynsä vuoksi, PLA on tulostamisvaiheessa nestemäisempää kuin ABS-muovi.

Hyvällä pintajähdytyksellä on mahdollista toteuttaa todella yksityiskohtaisia pintoja, ilman vääntyilyä tai halkeilua. Tehokas pintajähdytys myös parantaa tulostettujen kerrosten tarttuvuutta toisiinsa tehden valmiista kappaleesta kovemman. 3D-tulostaminen PLA:lla on myös nopeampaa verrattuna ABS-muoviin. PLA-muovin tulostamislämpötila on noin 180–200 °C riippuen muovin laadusta. Kasvipohjaisena muovina sen tulostamisesta syntyvät kaasut ovat makean tuoksuisia, eivätkä aiheuta voimakasta hajuhaittaa. [17]

4 Suunnittelu

4.1 Yleistä

Robottikäden rungon ja mekaniikan suunnittelu ja mallintaminen on monimutkainen prosessi ja ei sellaisenaan eroa muiden robottilaitteiden suunnittelusta. Mekaniikan merkitys manipulaattorin toiminnassa on hyvin suuri. Vaikka tietotekniikka kehittyy kokoajan, sen riippuvuus mekaniikasta säilyy suurena. Teollisuudessa robotiikan toimintahäiriöistä 80 prosenttia ilmenee manipulaattorin oheislaitteissa, kuten ohjainlaitteissa. Robotin toiminnollisuudessa voidaan saavuttaa vain 99,5 prosentin taso, mikäli mekaniikka on suunniteltu toimimaan 99,9 prosentin toiminnollisuudella. [5, s. 123–125.]

Erityistä huomiota mekaniikansuunnittelussa tulee kiinnittää rakenteiden kestokykyyn niin lämmön kuin rasituksenkin puolesta. Rakenteet tulee suunnitella niin, että niistä ei synny ylimääräistä painolastia, joka kertaantuu kun kädenpituus kasvaa. Myös rattaiden asemointi täytyy suunnitella tarkasti, sillä ne joutuvat kovalle rasitukselle moottorien pyöriessä. Liikkuvien osien väliset kitkapinnat tulee pitää mahdollisimman pieninä, sillä kitkavoimien voittaminen kuluttaa ylimääräistä moottoritehoa. [5, s.125–127.]

Robottikäden osien rakentamisessa haluttiin myös huomioida mahdolliset ongelmat robottikäden kokoamisvaiheessa. Osien suunnittelun ja mallintamisen tuloksena tulevien kappaleiden kokoonpanon tulee olla helppoa. Jokaiselle osalle pitää olla oma paikkansa ja niiden kasaaminen väärinpäin mahdotonta.

4.2 Kustannustehokkuus

Hyvin suunniteltu tuote on mahdollista saada nopeasti markkinoille. Automaatiomyönteisen suunnittelun tuloksena yksittäisen tuotteen hinta on alhainen ja tuotteista saadaan tasalaatuisia. 60–80 prosenttia tuotteiden aiheuttamista kustannuksista määräytyy suunnitteluvaiheessa. Automaatiomyönteisen suunnittelun lisäksi robottikäden hintaan vaikuttaa suuresti valitut toimilaitteet, komponentit ja materiaalit. [18, s. 44–45.]

4.3 Toimilaitteet

Markkinoilla olevien robottien ja robottikäsiä toimilaitteet voidaan jakaa niiden voimälähteiden perusteella. Roboteissa käytetään yleensä sähköä, hydraulikkaa tai pneumatiikkaa voimälähteenä. [5, s. 100–101.]

Kaikilla voimälähteillä on omat hyvät ja huonot puolensa. Pneumatiikka on suhteellisen halpaa, se mahdollistaa nopeat liikkeet ja vuotojen sattuessa siitä ei vuoda nesteitä tai vaarallisia kaasuja. Huonoina puolina ovat muun muassa kaasun kokoonpuristuvuudesta johtuvat ohjauksen epätarkkuudet ja rasituksenalaiset liikkeiden nopeuden säätämiset. Myös mahdollisista vuotokohdista voi aiheutua meluhaittaa. [5, s. 101.]

Hydraulikka mahdollistaa suurten kuormien nostamisen pienellä omamassalla. Nesteet ovat melkein kokoonpuristumattomia, mahdollistaen liikkeiden lukitsemisen. Hydraulisten toimilaitteiden ohjaaminen on tarkkaa ja ohjausliikkeiden vastineet välittömiä. Liikkeet ovat pienillä nopeuksilla hyvin sulavia ja järjestelmät ovat itseään voitelevia ja jäädyttäviä. Huonoina puolina hydraulikassa on muun muassa järjestelmien korkeat paineet. Korkeat yli 100 bar:n paineet vaikeuttavat robottien fyysisen koon pitämistä pienenä. Korkeiden paineiden takia mahdolliset vuodot ovat hengenvaarallisia ja sotkuisia. [5, s. 101.]

Sähköä voimälähteenä käyttävien toimilaitteiden, kuten tasavirtamoottorien, hyvinä puolina voidaan pitää muun muassa niiden ohjauksen tarkkuutta ja nopeutta. Ohjauksen säätö on helppo toteuttaa tietokoneen avulla. Toimilaitteet ovat myös suhteellisen edullisia. Huonoina puolina voidaan muun muassa pitää korkeita kierroslukuja suhteessa heikkoon vääntövoimaan ja ylikuumentuminen asentojen paikoillaan pitämisessä. Sähköiset toimilaitteet siis vaativat usein vaihteiston sekä lukituksen asentojen pi-

toa varten. Myös kipinöinti vaara voi olla haitaksi joissain toimintaympäristöissä. [5, s. 100–101.]

Robottikäden toimintaympäristöksi oli suunniteltu koulut ja niiden tietokonehuoneet. Tämän oletuksen pohjalta, robottikäden toimilaitteiden voimanlähteeksi valittiin sähkö, pneumatiikan ja hydraulikan sijasta. Pneumatiikan ja hydraulikan kontrollointi olisi tullut näin pienessä robottikädessä kalliiksi, sekä niiden vikaantuessa esiintyvät vaarateki- jät, kuten vuodot ja suuret voimat, katsottiin olevan liian riskialttiita kouluympäristöön. Robottikäden suunniteltu edullisuus ja pienikoko mahdollistivat pienten servomoottorien ja tasavirtamoottorien käytön toimilaitteina.

4.3.1 Tasavirtamoottorit

Tasavirtamoottorit on nimetty niiden toimintaperusteen mukaan. Ne toimivat tasavirralla vaihtovirran sijaan. Tasavirtamoottorit ovat yleisin sähkömoottorityyppi robotiikassa ja ne jaetaan kahteen kategoriaan: Harjattomiin ja harjallisiin tasavirtamoottoreihin.[8, s. 558–559.]

Harjalliset tasavirtamoottorit koostuvat roottorista, joka on moottorin liikkuva osa, staattorista, joka on moottorissa paikallaan pysyvä osa ja kommutaattorista, joka toimii sähkövirran suunnankääntäjänä. Staattorissa on kestopagneetit, jotka muodostuvat magneettikentän moottorissa. Roottorissa sijaitsee käämejä, joihin johdetaan virtaa, jolloin ne muodostavat magneettikentän. Roottorissa olevan magneettikentän ja staattorin magneettikentän vuorovaikutuksesta syntyy voimia, jotka pyörittävät roottoria. Magneettikenttien hylkiessä toisiaan, moottori pysähtyisi asentoon, jossa käämit olisivat kauimpana kestopagneeteista. Tämän estämiseksi käytetään tasavirtamoottoreissa kommutaattoria, joka vaihtaa sähkövirransuuntaa, mahdollistaen roottorin pyörimisen. [8, s. 560.]

Kommutaattori sijaitsee roottorissa ja se koostuu alueista, joiden välillä on eristävää materiaalia. Virta johdetaan kommutaattoriin harjojen avulla. Roottorin pyöriessä harjat osuvat kommutaattorin eri alueisiin ja kommutaattorin valitsee, mihin käämeihin virta johdetaan ja mihin suuntaan. Näin roottori jatkaa pyörimistä. Harjat kuluvat niiden ja kommutaattorin välisessä mekaanisessa kosketuksessa, lyhentäen moottorien käyttöikä ja huonontaan niiden hyötysuhdetta. [8, s. 561.]

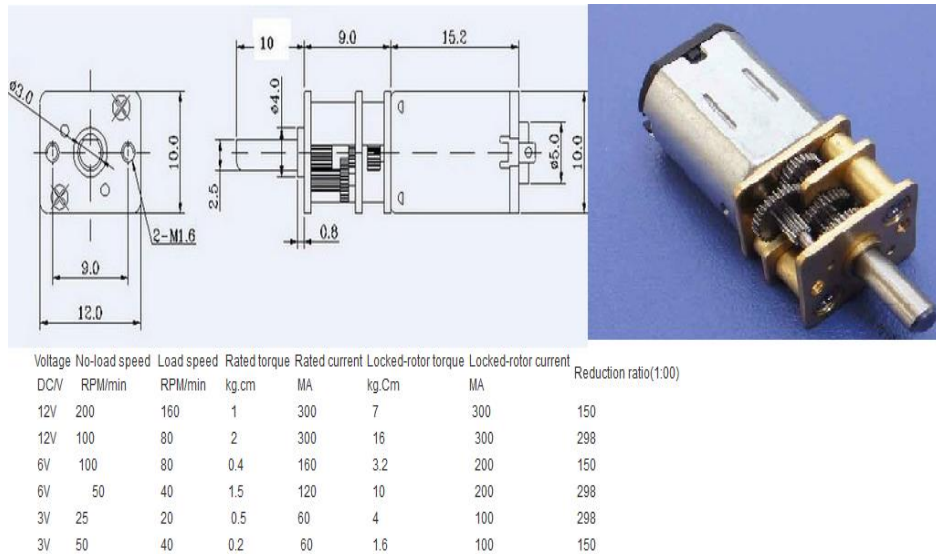
Harjattomissa tasavirtamoottoreissa ei ole samanlaisia mekaanisia kosketuksia. Harjattomassa moottorissa käämit sijaitsevat staattorissa, jolloin ei ole tarvetta jakaa sähkövirtaa liikkuvalla kommutaattorille. Roottorissa sijaitsee kestopagneetti, joka pyörii kun staattorissa oleville käämeille johdetaan virtaa. Kommutaattorin puuttuessa käämeille johdettava virran jaksottaminen ja suuntaaminen hoidetaan erillisellä ohjauselektronikalla. [8, s. 614–617.]

Suunnittelussa päädyttiin käyttämään harjattomia moottoreita. Harjallisten ja harjattomien tasavirtamoottorien ominaisuuksia vertailemalla todettiin harjattomien moottorien sopivan robottikäteen paremmin. Harjattomat tasavirtamoottorit ovat hiljaisempia niin akustiikan kuin elektroniikan puolesta (harjattomuuden takia ei ole kipinöintiä kommutaattorin ja harjojen välillä). Harjat ovat kuluvia, niiden poissaolo lisää moottorin käyttöikä. Harjattomuus takaa myös paremman hyötysuhteen moottorille. Harjallisissa moottoreissa kommutaattorin ja harjojen kontakti synnyttää suhteellisen korkean sähköisen vastuksen ja synnyttää myös kitkaa, jotka vähentävät moottorin hyötysuhdetta. Harjojen ja kommutaattorin kontakti laskee myös moottorin kierrosnopeutta. Suurilla kierrosnopeuksilla harjat kimpoavat kommutaattorista rajoittaen kierrosnopeutta. Harjallisten moottorien maksimikierrosnopeudet ovat noin 10 000 kierrosta minuutissa. Harjattomilla moottoreilla päästään jopa noin 100 000 kierrokseen minuutissa. Harjattomat tasavirtamoottorit on myös helpompi jäähdyttää kuin harjalliset. Harjallisten tasavirtamoottorien lämpö syntyy moottorin käämeissä ja välittyy roottorille, jota on vaikea jäähdyttää ulkoa. Harjattomassa tasavirtamoottorissa taas käämit ovat kiinteästi paikallaan ja kiinni moottorin ulkokuoressa, on niiden jäähdyttäminen huomattavasti helpompaa. [8, s. 623–624.]

Robottikäyttöä varten valittiin N20-tasavirtamoottori (kuva 7), joka on pienikokoinen ja siihen saa valmiita vaihdelaatikoita. Vaihdelaatikon tarkoituksena on parantaa moottorista saatavaa vääntövoimaa kierrosnopeuden kustannuksella. Vaihteistoa käytetään erityisesti sähkömoottoreissa. Harjattomissa tasavirtamoottoreissa, joiden kierrosnopeudet voivat olla jopa 100 000 kierrosta minuutissa, moottorien vääntövoima on usein heikko niiden parhaalla hyötysuhde alueella. Useissa sovelluksissa, kuten robottikäsisä, moottoreilta ei vaadita suuria kierrosnopeuksia, mutta vääntövoiman tarve on suuri. Robottikäteen valittiin vaihteisto 1:298.

Rotaatioissa asentotietoa varten käytetään rajakytkimiä ja sormissa potentiometriä. Potentiometriin suunniteltiin kiinnitettäväksi noin 16 millimetriä halkaisijaltaan oleva

hammasratas. Moottorin akseliin kiinnitetään väkipyörän lisäksi 8 millimetriä halkaisijaltaan oleva hammasratas. Näin potentiometrin yhtä kierrosta varten moottorin akselin pitää pyörähtää kaksi kierrosta. Tämän ja 20 millimetriä halkaisijaltaan olevan vetopyörän avulla saavutetaan riittävän suuri vetoliike sormenvetonaruun, jotta sormen koukistaminen toimii.



Kuva 7. N20-tasavirtamoottorin tiedot [19]

4.3.2 Servomoottorit

Servomoottorit ovat yleensä harjallisia tai harjattomia tasavirtamoottoreita, joihin on liitetty yksinkertainen takaisinkytkentä moottorinasentotiedon saamiseksi. Ne ovat edullisia, helppokäyttöisiä ja niitä on markkinoilla useita eri malleja. Alun perin servomoottorit kehitettiin radio-ohjattavia laitteita, kuten autoja ja lentokoneita varten. Servomoottori yleensä koostuu moottorista, suuren välityssuhteen omaavasta vaihteistosta ja potentiometrillä. Vaihteiston avulla pienestä moottorista saadaan suhteellisen suuri vääntö-

momentti, nopeuden kustannuksella. Nopeus ei kuitenkaan ole servomootorilla tärkein tekijä. Servon liikealue on yleensä vain 160–180 astetta, jolloin sen nopeus ei ole yhtä tärkeä tekijä kuin tarkkuus ja vääntömomentti. Potentiometri on liittyneenä vaihteistoon ja sen avulla saadaan servomootorin asentotieto. [8, s. 662.]

Servomootorit vaativat sähkömoottoreista eroten liitännän virran lisäksi myös ohjaus-signaalille. Servojen ohjaaminen tapahtuu pulssinleveysmodulaation (*PWM = Pulse-width modulation*) avulla. Pulssinleveysmodulaatio perustuu 0–5 voltin digitaaliseen pulssiin jonka leveys ilmoittaa halutun kulman servomootorille. Pulssinleveys vaihtelee noin 0,5–3 mikrosekunnin välillä, 1,5 mikrosekunnin ollessa servomootorin keskiasento. Yleensä pulssien väli on noin 20–30 mikrosekuntia. [8, s. 662.]

Servomootorin helppokäyttöisyyden, edullisuuden ja valmiin ohjauselektronikan takia päädyttiin robottikädessä käytettävän mahdollisimman paljon servomootoreita. Servomootorien 180 asteen liikealue oli sopiva ihmisen kättä jäljittelevälle robottikädelle. Robottikädessä suunniteltiin käytettäväksi kolmea erilaista servomootoria. Jalustassa ja kyynärpäässä käytettäisiin Towerpro MG996R-servomootoria (kuva 8), jossa on metallinen vaihteisto kestävyuden lisäämiseksi.



Weight- 55g
Dimension 40.7*19.7*42.9mm
Stall torque 10kg/cm
Operating speed 0.20sec/60degree(4.8v)
Operating voltage 4.8-7.2V
Temperature range 0_ 55

Kuva 8. Towerpro MG996R tiedot [20].

Olkaniveleen suunniteltiin käytettäväksi metallirattailla olevaa Power HD-1501-MG –servomootoria (kuva 9), joka mitoiltaan vastaa MG996R-servomootoria, mutta on

vääntövoimaltaan suurempi. Olkanivelessä sijoitettava servomootori joutuu suurimmalle rasitukselle robottikädessä, käden pituuden aiheuttaman momenttivaikutuksen takia. Samankokoisilla ulkomitoilla helpotettiin mallinnusvaihetta, poistamalla tarve useille erikokoisille servomootorin kiinnityskappaleille.



Voltage: 4.8~6.0v
Speed: 0.16~0.14sec
Torque: 15.5~17.0kg/cm (215.3~236.1oz/in)
Bearings: 2 Ball Bearings
Gears: Metal
Weight: 60g
Dimension: 40.7x20.5x39.5mm

Kuva 9. Power HD-1501MG tiedot [21].

Sormia ja käsivarren olka- ja kyynärrotaatioita varten suunniteltiin käytettäväksi Towerpro SG90-servomootoreita (kuva 10). SG90-servomootori on muovirattainen, edullinen ja kevyt servomootori, jonka arvioitiin riittävän väännöltään sormien ja rotaatioiden liikkeisiin.



Weight: 9 g
 Dimension: 22.2 x 11.8 x 31 mm
 Stall torque: 1.8 kgf·cm
 Operating speed: 0.1 s/60 degree
 Operating voltage: 4.8 V (~5V)
 Dead band width: 10 μ s
 Temperature range: 0 °C – 55 °C

Kuva 10. Towerpro SG90 tiedot [22].

4.4 Elektroniikka

Robottikäden elektroniikka on aiheena toisessa insinööriyössä, joten sitä ei tässä insinööriyössä käsitellä syvällisesti. Tässä työssä esitellään lyhyesti tärkeimmät elektroniikkakomponentit robottikäden mallintamisen kannalta.

Robottikäden opetuskäyttöä varten oli suunniteltu toteutettavan verkkokurssi. Robottikäden liikkeiden ohjelmoinnin mahdollistamiseksi oli robottikäteen lisättävä mikrokontrolleri ja tarvittava elektroniikka moottorien ja servojen ohjaamiseen Ethernet-yhteyden välityksellä. Robottikäden ohjelmointi USB-väylän kautta haluttiin myös mahdollistaa. Tehtävään valittiin Arduino Mega 2560-kehitysalusta jossa mikrokontrollerina toimii ATmega 2560 [23]. Alustaan löytyi valmis Ethernet-kilpi ja Arduino-kehitysympäristöstä löytyy ohjelmointia varten laajat kirjastot, joiden todettiin nopeuttavan huomattavasti prototyypin ohjelmointia.

Robottikäteen haluttiin pieni näyttö, tilatietojen näyttämistä varten. Näytöksi valittiin 16x2-rivinen Midas MC21605C6WK-SPTLY LCD-näyttö (*liquid-crystal display*) [24]. Tasavirtamoottoreille suunniteltiin omat moottorinohjaimet ja kaikki kytkennät (mootto-

rit, servot, näyttö, led-valot, painonapit ja potentiometrit) suunniteltiin toteutettavaksi yhdelle piirilevyille. Suunniteltu piirilevy oli tarkoitus tilata ulkopuoliselta toimittajalta. Elektroniikan toteutuksesta on kuva liitteessä 13.

4.5 Robottikäden koko ja nivelten liikelaajuudet

Robottikäden fyysinen koko haluttiin alusta alkaen pieneksi. Käden käyttötarkoituksena oli toimia ohjelmoinnin opetuksen apuvälineenä, niin että kouluissa olisi mahdollisesti jopa yksi robottikäsi oppilasta kohden. Ajateltaessa tyypillistä koulun atk-luokkaa, ei pöytätilaa tietokoneiden ympärillä ole paljoa. Robottikäden turvallisen käytön ja siirrettävyyden takia oli käden pysyvä kevyenä ja pienikokoisena. Robottikäden fyysisen koon ja vapausasteiden määrän hahmottelu, aloitettiin miettimällä millaisista toiminnoista käden tulisi selviytyä ohjelmoinnin opetuksessa. Robottikäden haluttiin olevan ihmiskäden kaltainen, sisältäen viisi sormeaa ja samat nivelet ja sen piti pystyä siirtämään pieniä, kevyitä esineitä sekä mahdollisesti käyttämään kädelle suunniteltuja työkaluja kuten kynää ja harjaa. Suunnittelun erikoisuutena robottikäden toimilaitteet oli valittu ennen kuin varsinaisen robottikäden rungon suunnittelua.

Robottikäden tyypiksi suunniteltiin kiertyvänivelinen robotti, sillä se muistuttaa huomattavasti ihmiskättä. Kädestä rakennettiin pahvimalli (kuva 11), jolla pystyttiin määrittelemään tarvittavat nivelten liikelaajuudet. Pahvimallilla pystyttiin käytännössä toteamaan, kuinka suuri robottikäsi voisi olla valituilla servomoottoreilla. Pahvimallin avulla pääteltiin robottikäden tarvitsevan ainakin viisi niveltä. Rotaatiota tarvittiin jalustaan, olkapäähän, olkavarteen, kyynärpäähän ja ranteeseen, jotta vaaditut toiminnot saataisiin suoritettua. Jalustan rotaation laajuudeksi määriteltiin 180 astetta, jolloin käsi voisi toimia alustaan nähden suurella pinta-alalla. Myös olka- ja kyynärnivelen liikkeenlaajuudeksi haluttiin 180 astetta, mahdollistaen monipuoliset nostoliikkeet. Olkavarren ja ranteen rotaatioiden osalta päädyttiin 90 asteen liikelaajuuksiin. Todettiin ettei näiltä rotaatioilta vaadittu kuin kaksi asentoa, alustaan nähden pysty- ja vaaka-asento, jolloin robottikädellä olisi teoreettinen mahdollisuus liikkua avaruuskoordinaatistossa kaikkiin pisteisiin. Kahden asennon rotaatiot suunniteltiin tehtäväksi sekä servomoottoreilla, että rajakytkimillä ja tasavirtamoottoreilla. Kyseiset rotaatiot eivät vaatineet asteittaista asennon muuttamista, vaan riitti että kädellä pystyttiin liikkumaan pysty- tai vaaka-asentoon.



Kuva 11. Robottikäden pahvimalli

Käsivarren pituus määriteltiin empiirisen tutkimuksen avulla käyttäen pahvimallia ja servomooottoreita. Käteen lisättiin nivelten kohdalle servomooottorit ja painoja vastamaan oletettua elektroniikan ja muiden komponenttien painoa. Lisäksi kämmeneen lisättiin noin 150 gramman paino, simuloimaan opetuskäyttöön suunniteltujen apuvälineiden käyttöä. Käsivarren (olkapäästä kämmeneen) pituudeksi määriteltiin maksimissaan 40 senttimetriä, kun olkanivelen toimilaitteena käytettiin Power HD-1501MG-servomooottoria ja kynnärnivelessä vastaavasti Towerpro MG996R-servomooottoria. Samalla testillä selvisi, että 50 millimetriä olisi sopiva halkaisija käsivarrelle, sillä se mahdollistaisi johtojen ja toimilaitteiden sijoittamisen käsivarren sisäpuolelle. Robottikäden muille osille, kuten kotelolle, ei määritelty suunnitteluvaiheessa tarkkoja mittoja. Kotelon tarkoituksena oli toimia jalustana robottikädelle sekä sisältää suurimman osan käden elektroniikasta, muun muassa mikrokontrollerin ja moottorien ohjaimet.

4.6 Käden kaksiversiota

Pienten ja edullisten SG-90 servomooottorien käyttö robottikäden toimilaitteena on riskialtista. Alkuperäisenä suunnitelmana oli toteuttaa olkavarren- sekä ranteenrotaatiot ja sormien liikkeet näiden servomooottorien avulla. Työn edetessä ilmenneet ongelmat

pienien SG90-servojen kestävyssä, muuttivat alkuperäistä suunnitelmaa. Robottikädestä päätettiin suunnitella kaksi versiota. Toisessa versiossa edellä mainitut rotaatiot ja sormien liikkeet toteutettaisiin N20-tasavirtamoottorien avulla. Tasavirtamoottorien hyvänä puolena oli liikelaajuus, jonka takia oli mahdollista asentaa vaihdelaatikko, jonka avulla saatiin pienikokoisesta moottorista suuri vääntövoima. Sormissa tasavirtamoottorien asentotiedon saamiseksi suunniteltiin käytettävän potentiometrejä. Tasavirtamoottorien fyysisten mittojen ollessa samaa luokkaa SG90-servomoottorien kanssa, ei robottikäden ulkoisiinmittoihin tehty muutoksia. SG90-servomoottorit ja N20-tasavirtamoottorit vaihdelaatikkoineen punnittiin ja todettiin että kumpikin toimilaitte painaa saman verran, noin 11 grammaa.

4.7 Tarttuja, sormien suunnittelu

Tarttuja eli robottikäden kämmenosa on tärkein osa manipulaattorissa. Tarttuja on robottikäden osista eniten altis rasitukselle ja kulutukselle. Tästä syystä tarttuja yleensä tehdään metallista ja sormien lukumäärä pidetään pienenä [25, s. 251]. Tässä robottikädessä kuitenkin haluttiin rakennusmateriaalina pitää muovi, jotta rakenne pysyisi mahdollisimman kevyenä. Metallisten sormien painon katsottiin tuovan pienille moottoreille ylimääräistä työtä, eikä moottorien vääntö olisi riittänyt muovisten sormien hajottamiseen. Sormet haluttiin toteuttaa siten, että jokaista sormea voisi ohjata erikseen eli jokaiselle sormelle tulisi olla oma toimilaitte. Toimilaitteina toimisivat versiosta riippuen joko N20-tasavirtamoottorit tai SG90-servomoottorit, niiden tarkoituksena oli narun avulla koukistaa sormia. Sormia määräksi suunniteltiin viisi, kuten ihmiskädessä. Kämmen haluttiin mahdollisimman kevyeksi, kuitenkin sormien toimilaitteiden pysyessä kämmenessä (mahdollisimman lähellä sormia), jottei toimilaitteiden naruilla toteutetussa voimansiirrossa tulisi ongelmia.

Sormet suunniteltiin tehtäväksi kaapelikoteloksi tarkoitetuista muovilenkeistä. Yksi muovilenkki oli mitoiltaan 10 millimetriä korkea ja 12 millimetriä leveä. Yhdistämällä viisi muovilenkkiä saatiin 95 millimetriä pitkä sormiaihio, jossa oli sisällä 7 millimetriä korkea ja leveä onttotila. Tähän tilaan mahtui myös robottikädessä käytettäväksi suunniteltu FSR-anturi (*force-sensing resistor*). Anturin kiinnitys oli tarkoitus toteuttaa silikonilla. Sormien palautukseen suunniteltiin käytettävän kuminauhaa. Kuvassa 12 näkyy kaksi robottikäden sormea.

Servomootorit vaativat noin 10 millimetrin halkaisijaltaan olevan vetopyörätyyppisen rakenteen sormien narujen vetämiseen, jotta narua vedettäisiin tarpeeksi pitkältä matkalta, mahdollistaen sormien kunnollisen taittumisen. (Liite 4)



Kuva 12. Robottikäden sormet

4.8 Prototyypin toteuttaminen

Prototyypin toteutukseen suunniteltiin käytettävän Metropolia ammattikorkeakoulun, Tikkurilan toimipisteestä löytyvää 3D-tulostinta (kuva 13). Tulostin oli FDM-tekniikalla toimiva Stratasys Dimension SST 768, 3D-tulostin. Tulostin oli kooltaan 914 x 686 x 1041 millimetriä ja se painoi 128 kilogrammaa. Tulostimen resoluutio oli 0,33 millimetriä ja tulostus lämpötila noin 75 °C. Tulostusmateriaalina käytettiin ABS-muovia. [26]



Kuva 13. Stratasys Dimension SST 768 3D-tulostin.

5 Mallintaminen

5.1 Yleistä

Tässä työssä prototyyppien osien mallintamiseen käytettiin Solidworks 3D-mallinnusohjelmistoa. Robottikäden rungon ja mekaniikan suunnittelu ja mallintaminen on monimutkainen prosessi ja ei sellaisenaan eroa muiden robottilaitteiden suunnittelusta. Mekaniikan merkitys robottikäden toiminnassa on hyvin suuri. Vaikka tietotekniikka kehittyi koko ajan, sen riippuvuus mekaniikasta säilyy suurena. Teollisuudessa robotiikan toimintahäiriöistä 80 prosenttia ilmenee manipulaattorin oheislaitteissa, kuten ohjainlaitteissa. Robotin toiminnallisuudessa voidaan saavuttaa vain 99,5 prosentin taso, mikäli mekaniikka on suunniteltu toimimaan 99,9 prosentin toiminnollisuudella. [5, s. 123–125.]

Erityistä huomiota mekaniikasuunnittelussa tulee kiinnittää rakenteiden kestäkykyyn niin lämmön kuin rasituksenkin puolesta. Rakenteet tulee suunnitella niin, että niistä ei synny ylimääräistä painolastia, joka kertaantuu kun kädenpituus suurenee. Myös rat-
taiden asemointi täytyy suunnitella tarkasti, sillä ne joutuvat kovalle rasitukselle mootto-

rien pyöriessä. Liikkuvien osien väliset kitkapinnat tulee pitää mahdollisimman pieninä, sillä kitkavoimien voittaminen kuluttaa ylimääräistä moottoritehoa. [5, s. 125–127.]

Mallintaessa pyrittiin huomioimaan automaatiomyönteisyys. Massatuotannossa automaatiomyönteisyydellä päästään osien, osakokoonpanojen ja lopputuotteen kustannusten alentumiseen [18, s. 43–44]. Osien mallintamisessa on pidetty mielessä myös muut valmistustekniikat. Mallintaminen pyrittiin toteuttamaan niin, että valmistustekniikka ei rajoitu vain 3D-tulostamistekniikoihin, vaan mallinnoista voitaisiin tehdä esimerkiksi ruiskuvalumuotit.

Robottikäden mallintamisen perusmittayksikkönä tässä työssä käytettiin yhtä millimetriä (mm).

5.2 Solidworks

Solidworks on ranskalaisen Dassault Systèmes SolidWorks Corporation -yhtiön valmistama CAD-ohjelmisto (*Computer aided design* = Tietokone avusteinen suunnittelu). Ohjelmisto käyttää parametrilla piirremallintamista kappaleiden mallintamiseen. [27]

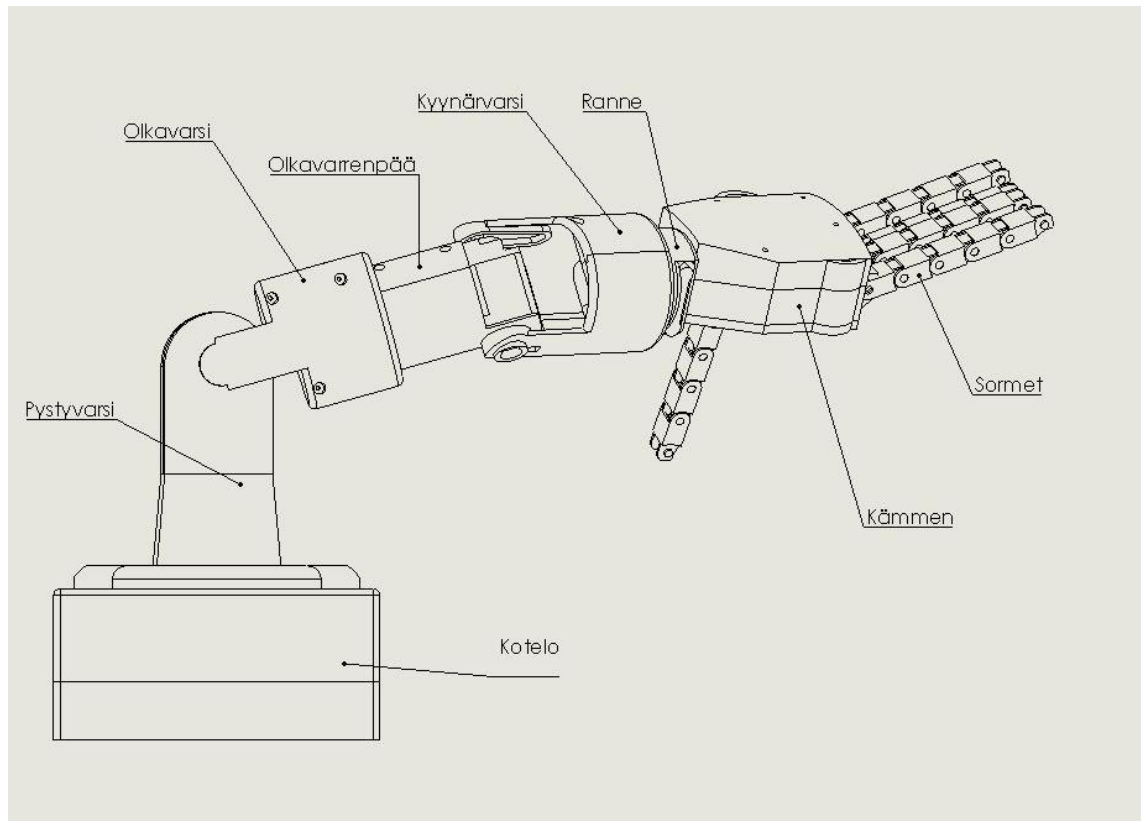
Solidworks oli ensimmäinen Windows-pohjainen parametrinen 3D-mekaniikkasuunnitteluohjelmisto, se julkaistiin vuonna 1995 [27]. Se perustuu kaksiulotteisiin piirustuksiin (*sketch*), joista muodostetaan kolmiulotteisia malleja. Ohjelmistossa on useita eri mallinnus- ja simulointityökaluja, joiden avulla mallinnettuja kappaleiden ominaisuuksia voidaan testata, ilman niiden fyysistä valmistamista. Solidworks pitää sisällään työkalut myös valumuottien ja erilaisten valuprosessien automaattiseen simuloimiseen. Simuloinneista on hyötyä esimerkiksi ruiskupuristettavan kappaleen mallintamisessa, kun voidaan ennakoita simuloinnin avulla, miten muovi kovettuu valumuotissa. [28]

Mallinnetut kappaleet tallennettiin STL-tiedostoformaattissa. STL-tiedostoformaatti on muodostunut standardiksi 3D-tulostamisessa. Se perustuu kolmeulotteisten kappaleiden pintageometrian kuvaukseen pienten tasokolmioiden avulla. Jokaisesta kolmiosta määritellään normaalin suuntavektori (*facet normal*), sekä kärkipisteiden (*vertex*) koordinaatit. Suuntavektorilla määritetään kappaleen ulko- ja sisäpuoli ja kärkipisteillä mää-

ritetään kolmion sijainti. STL-tiedostoja on kahdenlaisia, ASCII- ja binäärimuotoisia. ASCII-muotoinen tiedosto on helpompilukuinen, sillä se sisältää tekstiä, mutta sen tiedostokoko on huomattavasti suurempi kuin binäärimuotoisen STL-tiedoston. 3D-tulostuksessa yleensä käytetään binäärimuotoisia STL-tiedostoja.[29]

5.3 Robottikäden osien nimeäminen

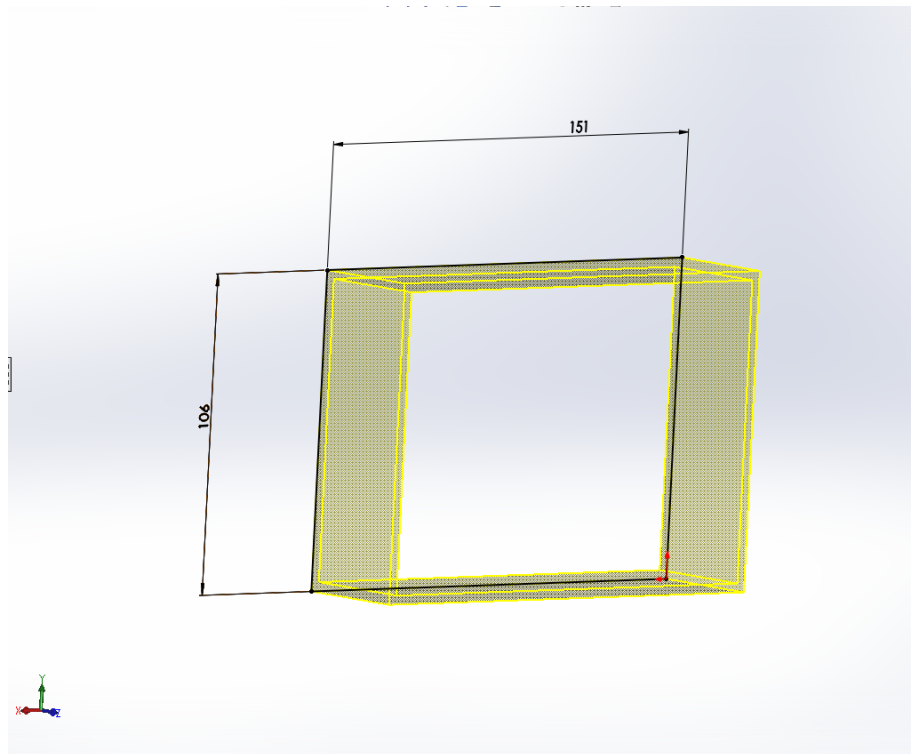
Selvyiden vuoksi tässä on esitelty nimeämiskäytäntö mallinnetuille robottikäden osille. Robottikäsi prototyyppi muodostuu osakokonaisuuksista. Käsi koostuu kuvan 14 mukaisista pääosista. Pääosat jakautuvat pienempiin osakokonaisuuksiin. Kotelo koostuu pohjasta, kansiosasta ja kannenkiinnitysosasta. Pystyvarsi koostuu pohjalevystä, varresta ja kannesta. Olkavarasi koostuu tyviosasta sekä olkavarrenpäädästä, jotka jakautuvat vielä vasemmaksi ja oikeaksi puoliskoksi. Kyynärvarsi koostuu vasemmasta ja oikeasta puolesta sekä ranneosasta. Kämmentä on myös oma kokonaisuutensa, se koostuu kannesta ja rungosta. Sormet on nimetty ihmiskäden sormien mukaan. Poikkeuksena tasavirtamoottoreilla toteutetussa kämmenessä on nimettömän sormen puuttuminen.



Kuva 14. Robottikäden pääosat

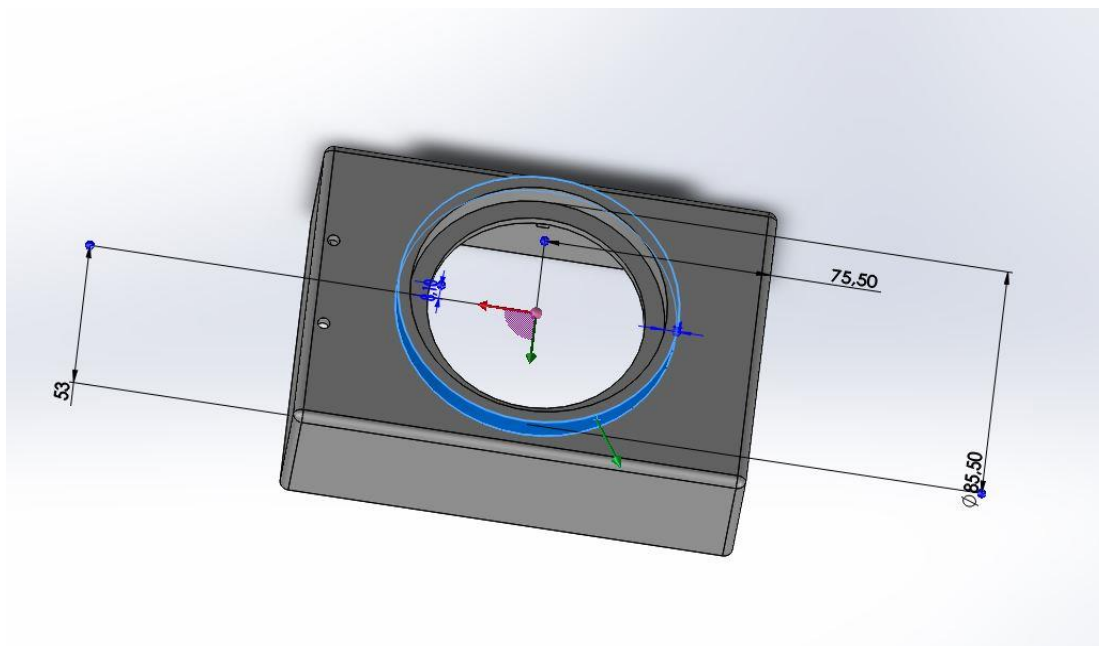
5.4 Kotelo

Mallintaminen aloitettiin robottikäden kotelosta. Kotelon tarkoituksena oli toimia robottikäden jalustana ja se sisälsi suurimman osan robottikäden elektronikasta. Kotelon mallintaminen aloitettiin tekemällä piirros 151 millimetriä pitkästä ja 106 millimetriä leveästä suorakulmiosta (kuva 15). Suorakulmiota korotettiin 40 millimetriä, jolloin kotelolle saatiin seinät. Seinien vahvuudeksi asetettiin 3 millimetriä takaamaan, että seinät kestäisivät robottikäden painon. Seinien mallintamisen jälkeen kotelolle mallinnettiin kansi.



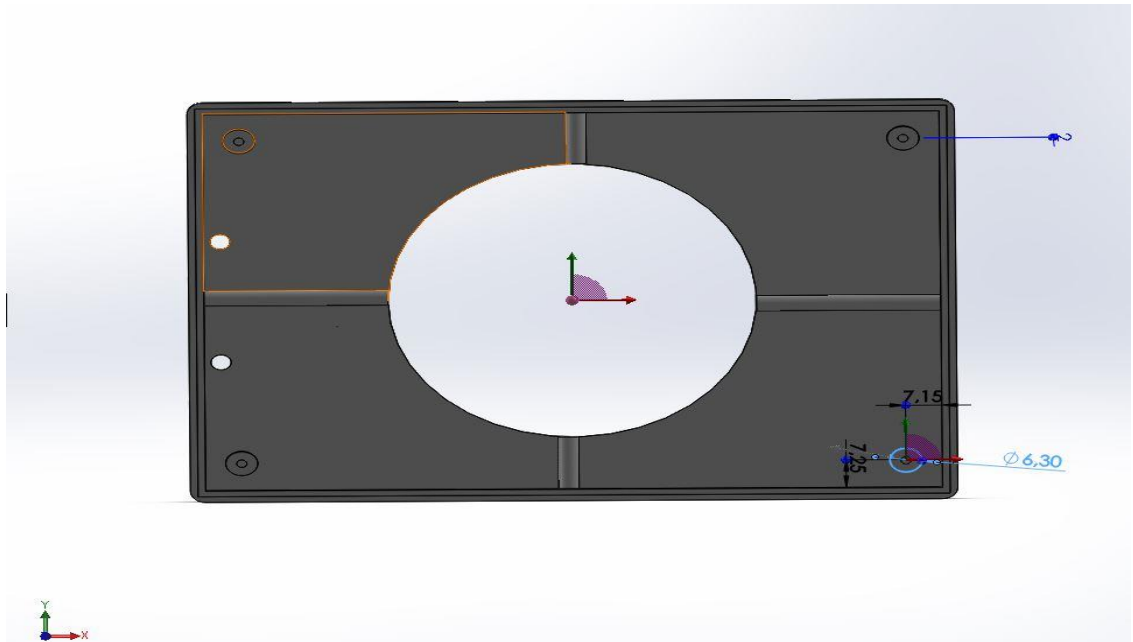
Kuva 15. Kotelon pohjakuva

Kannen mallintaminen aloitettiin yhdistämällä juuri mallinnetut seinät, tämän avulla saatiin aikaiseksi tasainen kansilevy. Kannen vahvuudeksi määriteltiin 3 millimetriä. Robottikäteen oli suunniteltu ensimmäinen vapausaste kotelon ja käden liittymiskohtaan. Rotaatiota varten kotelon kanteen piti tehdä halkaisijaltaan 75,5 millimetrinen aukko, sekä 8 millimetriä korkea ja 85,5 millimetriä sisähalkaisijaltaan oleva koroke, jonka avulla robottikäsi saataisiin lukittua paikalleen (kuva 16).



Kuva 16. Robottikäden ja jalustan liitos

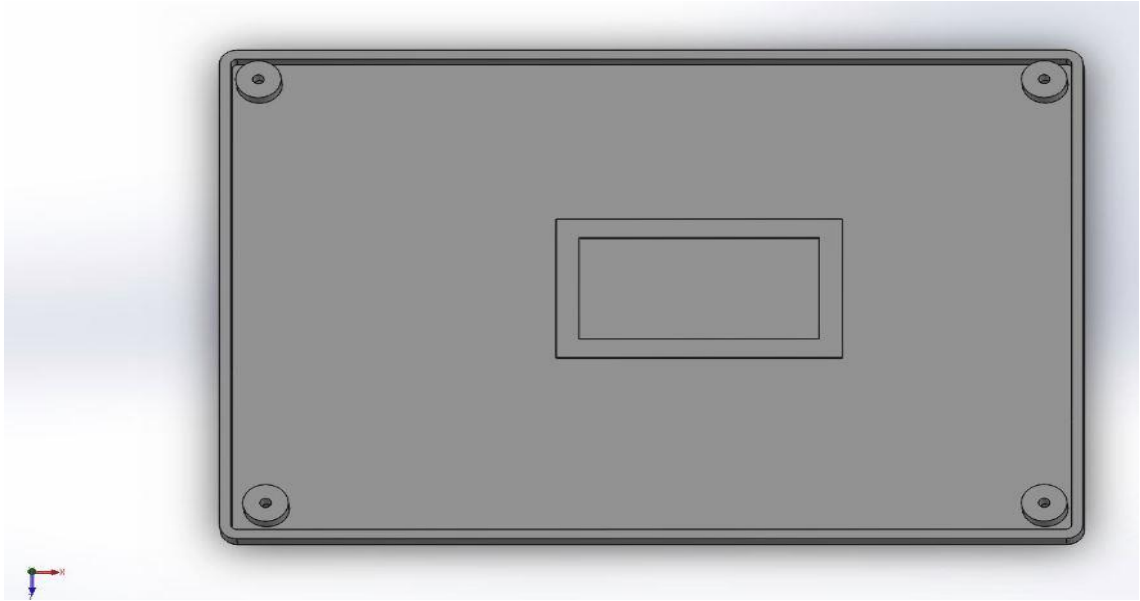
Kotelon rungon rakentamisen jälkeen sen sisäpuolelle lisättiin tukirakenteita, vakauttamaan kansirakennetta (kuva 17). Kannen sisäpuolelle lisättiin myös led-valoja varten kaksi halkaisijaltaan 4 millimetristä reikää. Suunnittelun tuloksena oli päädytty työssä käyttämään 2,5 kertaa 12 millimetriä yleisruuveja. Ruuveja varten kannen sisäpuolelle mallinnettiin neljä ulkohalkaisijaltaan 6,30 millimetriä leveää uloketta, jotta ruuvit ylettyisivät kotelon pohjaosasta kiinnittymään kansiosaan.



Kuva 17. Kotelon kannen sisäpuoli

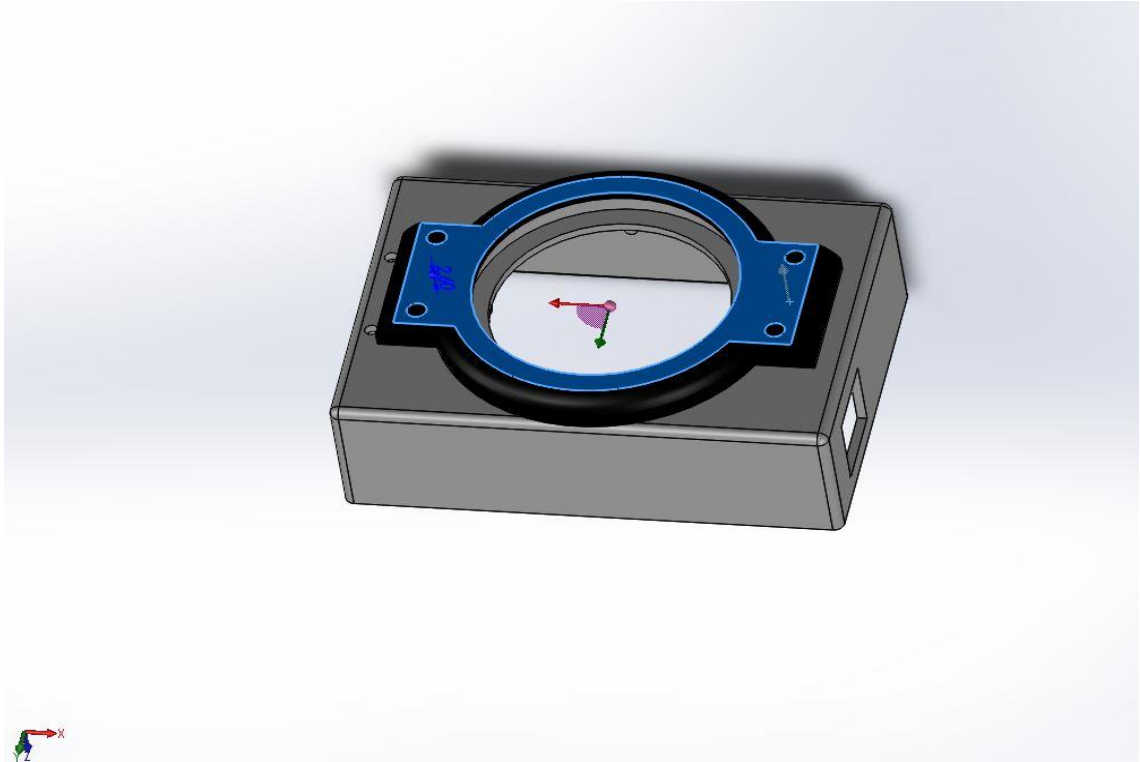
Kotelon etupuolelle leikattiin LCD-näyttöä varten 27 millimetriä korkea ja 71 millimetriä leveä aukko. Kotelon takapuolelle tehtiin samalla menetelmällä 26 millimetriä leveä 24 millimetriä korkea aukko ulkoisille liitännöille. Viimeisenä kannen ulkoreunat pyöristettiin, pyöristyksen säteeksi asetettiin 3 millimetriä.

Viimeisinä mallinnettiin kotelolle erillinen pohja sekä kanteen lukitusosa, jolla robottikäsi pysyy kotelossa kiinni tukevasti. Kotelonpohja mallinnettiin ulkomitoiltaan kantta vastaavaksi. Pohjanseinien korkeudeksi määriteltiin 27 millimetriä. Pohjan keskelle mallinnettiin korotettu alusta MG996R-servomoottorille, jonka tehtävänä oli liikuttaa robottikäden ensimmäistä niveltä (kuva 18). Pohjaosaan tehtiin ruuveille paikat, kantta vastaaviin kohtiin. Pohjan ja kannen tarkka ja kestävä kiinnitys viimeisteltiin Lip&groove-komennolla, jonka avulla saadaan kahteen kappaleeseen yhteensopiva porrastus.



Kuva 18. Kotelon pohjaosa

Lopuksi mallinnettiin kotelon ja käsivarren toisiinsa lukitsevaosa (kuvassa 19 sinisen ja musta värinen osa). Mallinnus tehtiin niin, että lukitusosan ja kannen väliin jäi 8 millimetriä korkea ja 80 millimetriä halkaisijaltaan oleva tila, käsivarren pohjalevyä varten. Osan lukitsemista varten siihen suunniteltiin neljä upotettua ruuvipaikkaa ja lopuksi osaan tehtiin pyöristys (säde 6 mm).



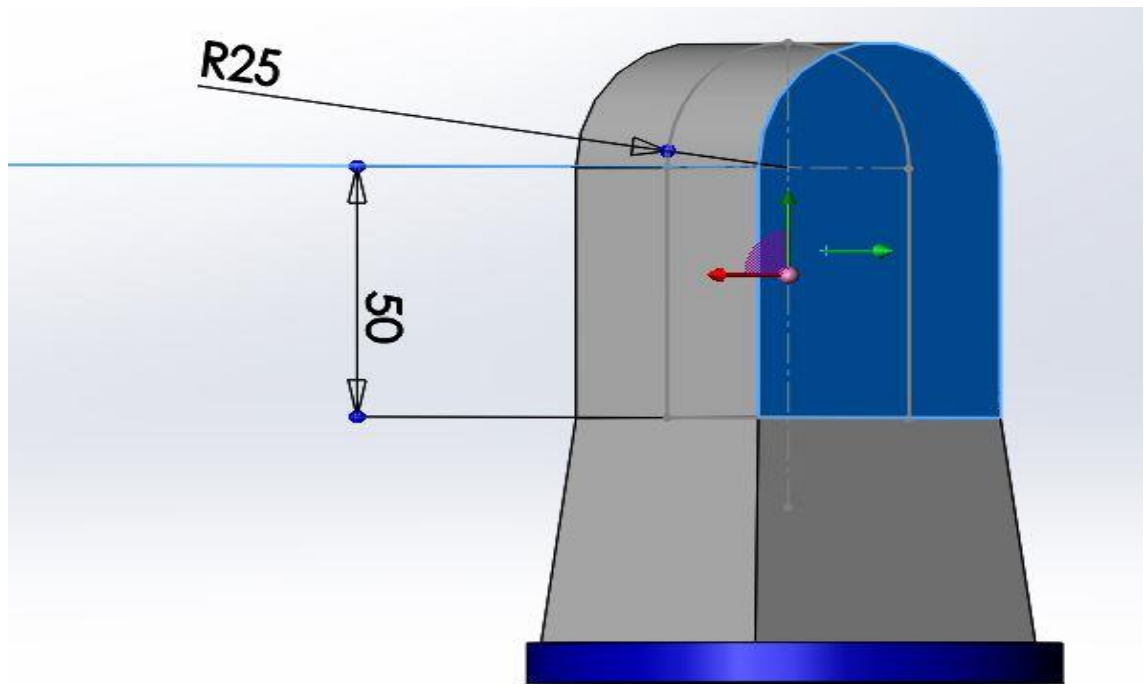
Kuva 19. Kotelo

5.5 Pystyvarsi

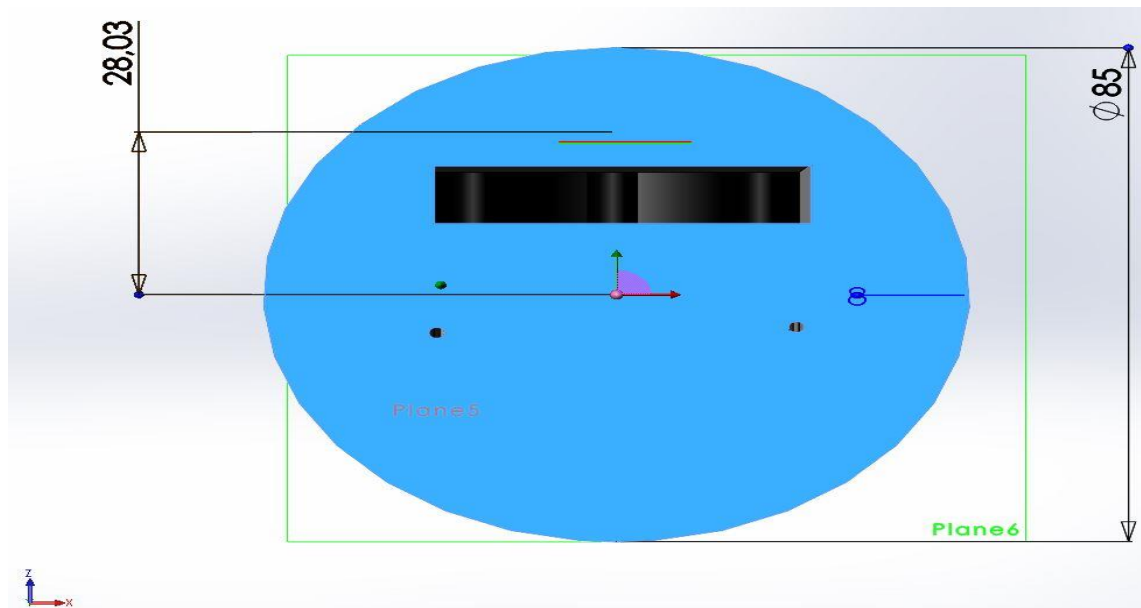
Pystyvarsi mallinnettiin kolmeksi eri osaksi, varreksi, kanneksi ja pohjalevyksi. Kuvassa 20 näkyy kokonaisuudessaan pystyvarren runko. Varsiosan mallintaminen aloitettiin piirtämällä kaksiulotteinen runko varren yläpäästä. Rungon yläpää piirrettiin pyöreäksi (säde = 25 mm), jotta olkanivelen liike saataisiin mahdollisimman suureksi. Rungon suoraosuus määritettiin 50 millimetrin pituiseksi, jotta varteen jäi tarpeeksi tilaa johdoille ja yhdelle HD-1501MG-servolle. Rungon läpimitta asetettiin 45 millimetriin. Rungon alaosa jatkettiin vielä 45 millimetriä ja sen läpimittaa kasvatettiin 5 asteella ulospäin, kokomatkalta (kuva 20). Näin saavutettiin tasapainoinen ja vahva rakenne varrelle.

Varren alapuolelle lisättiin kuvien 20 ja 21 mukainen pohjalevy, jonka avulla käsivarsi ja kotelo pysyvät yhdessä. Pohjalevyn halkaisijaksi asetettiin 85 millimetriä, jotta se sopisi suoraan kotelossa olevaan uraan (kuva 6). Pohjalevyyn leikattiin 10 millimetriä leveä ja 45,50 millimetriä pitkä suorakulmainen läpivientiaukko johtoja varten. Läpivientiaukko

sijaitsee 10 millimetriä pohjalevyn keskipisteen yläpuolella, jotta koteloon sijoitettava servomoottori saadaan myöhemmässä vaiheessa kiinnitettyä pohjalevyn keskipisteseen. Tällä estettiin kokoamisvaiheessa tullut tilanne, jossa käsivarsi ei pääse liikkumaan vaan se kiilaa itsensä kotelon reunaan. Pohjalevyyn lisättiin kaksi 2 millimetrin halkaisijalla olevaa reikää levyn kiinnittämistä varten. Kuvassa 21 on esitetty pohjalevyn rakenne.



Kuva 20. Pystyvarren runko

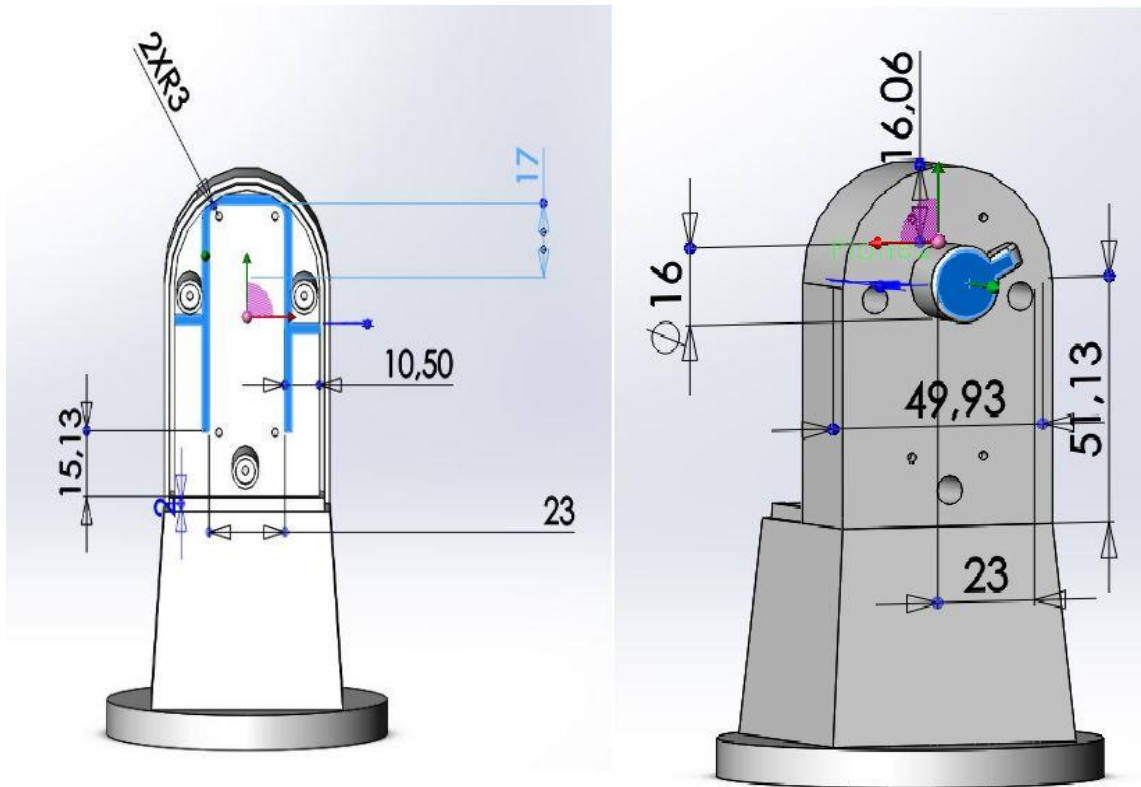


Kuva 21. Pohjalevy

Varren rungon mallintamisen jälkeen runko koverrettiin. Varren seinämän paksuudeksi määrättiin 3 millimetriä. Seuraavaksi kappaletta työstettiin leikkaustoiminnolla. Solidworks:n Split – työkaluilla voidaan leikata mallinnettuja kappaleita haluttuihin osiin ja muodostaa näistä omia kappaleita. Varresta irrotettiin kansiosa (kuva 22). Kansiosa mahdollisti varren sisälle sijoitettavan servomootorin asentamisen ja vaihtamisen, sekä johtojen läpiviennin lopuille robottikäden toimilaitteille. Kannen kiinnittämiseen muuhun varteen käytettiin samaa tekniikkaa kuin kotelonosien kiinnittämiseen. Kannen sisäpuolelle lisättiin kolme 8 millimetrin halkaisijalla olevaa uloketta ruuvien kiinnittämiseen. Kannen sekä käsivarren reunat käsiteltiin Lip&groove-komennolla, jotta niihin saatiin yhteensopiva porrastus.

Onton varsirakenteen sisään mallinnettiin tukirakenne, jonka tarkoituksena oli pitää servo ja sen kotelo paikallaan. Tukirakenteen vahvuudeksi leveydeksi asetettiin 2 millimetriä ja korkeudeksi 3 millimetriä. Tukirakenteen toinen tarkoitus oli varmistaa tilan riittävyys johdotukselle, joiden tarkoituksena olisi kulkea koko kappaleen läpi. Servonkotelon kiinnitystä varten tehtiin vielä neljä, 2 millimetrin halkaisijalla olevaa reikää. Kansiosan kiinnitykseen tehtiin kolme 8 millimetrin ulkohalkaisijalla olevaa uloketta. Ruuvit oli tarkoitus kiinnittää kappaleen takapuolelta, joten ulokkeet mallinnettiin on-

toiksi 6 millimetrin halkaisijalla. Tämä mahdollisti lyhyiden 12 millimetriä pitkien ruuvien käytön myös tässä kappaleessa. Tukirakenne sekä kannen kiinnitys näkyy kuvassa 22.



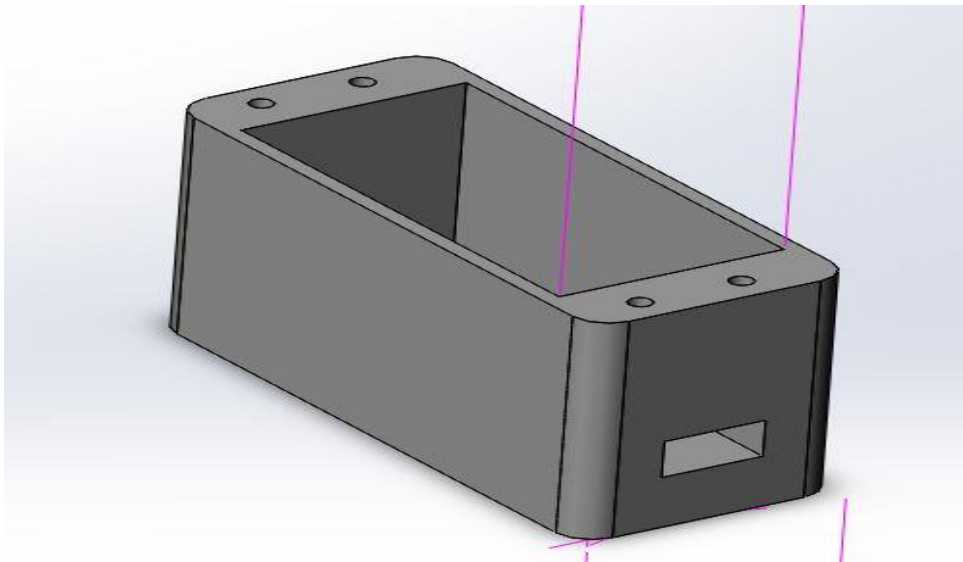
Kuva 22. Varren runko edestä ja takaa

Viimeisenä mallinnettiin läpivientiaukot johdoille ja kiinnityskohta seuraavalle käsivarren osalle. Kappaleenpohjaan tuli pohjalevyssä olevaa aukkoa vastaava läpivientiaukko. Rungon pyöreään yläosaan läpivientiaukko tehtiin vasemmalle puolelle 10 asteen kulmaan kappaleen keskilinjasta.

Olkavarren kiinnitys pystyvarteen oli suunniteltu tehtäväksi servon avustuksella niin, että toiselta puolelta olkavarsi olisi suoraan servomootorissa kiinni. Toiselta puolelta olkavarsi kiinnittyisi mekaanisella liitoksella pystyvarteen. Mekaaninen liitos näkyy kuvassa 22. Rungon takapuolelle mallinnettiin 16 millimetriä halkaisijaltaan ja pituudeltaan oleva akseli, jonka päähän tehtiin 7,4 millimetriä pitkä ja 5 millimetriä leveä uloke. Ulokkeen tarkoituksena oli lukita olkavarsi sivusuunnassa paikalleen. Uloke mallinnet-

tiin takaviistoon noin 35 asteen kulmaan kappaleen keskilinjaan nähden. Ratkaisun takia olkavarsi ei voisi irrota käytön aikana.

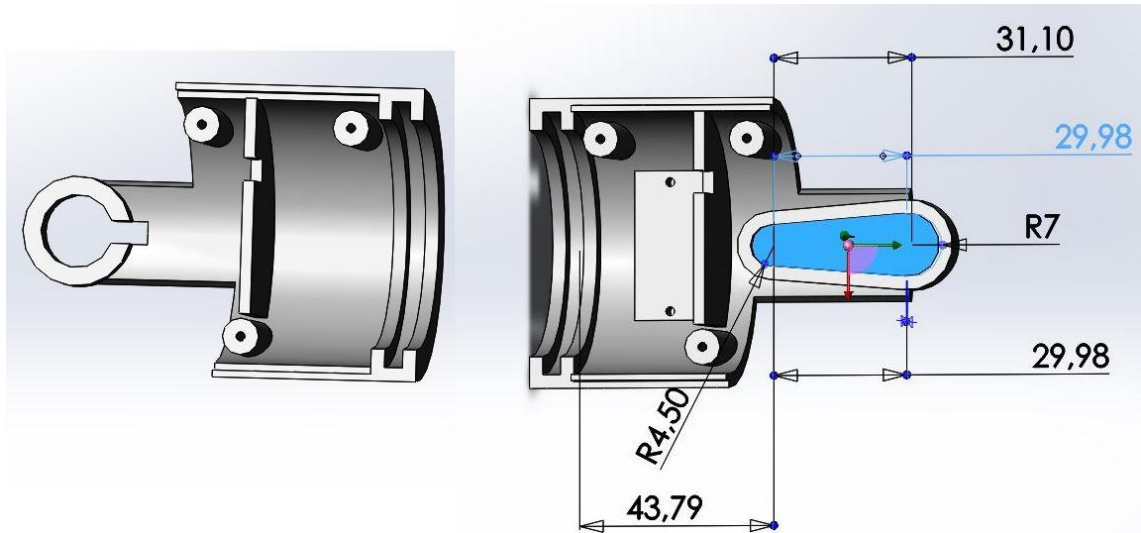
Servon kiinnittämistä varten pystyvarren sisään mallinnettiin servokotelo. Servokotelon tarkoituksena oli servon kiinnittämisen lisäksi pitää myös varren läpimenevät johdot paikallaan. Kuvassa 23 näkyy servolle tehty kotelo.



Kuva 23. Servokotelo

5.6 Olkavarsi

Robottikäden olkavarsi suunniteltiin koostuvan kahdesta kokonaisuudesta, jotka olisivat halkaistavissa kahteen osaan. Tällöin olkavarrenrunko muodostuisi neljästä osasta. Osat näkyvät kuvissa 24 ja 25. Olkavarresta tehtiin kaksi eri versiota. Ensimmäisessä versiossa olkavarrenrotaation toimilaitteena oli suunniteltu käytettävän SG90-servomootoria. Servojen laatuongelmien takia mallinnettiin toinen versio, jossa rotaation toimilaitteena käytettiin N20-tasavirtamootoria.



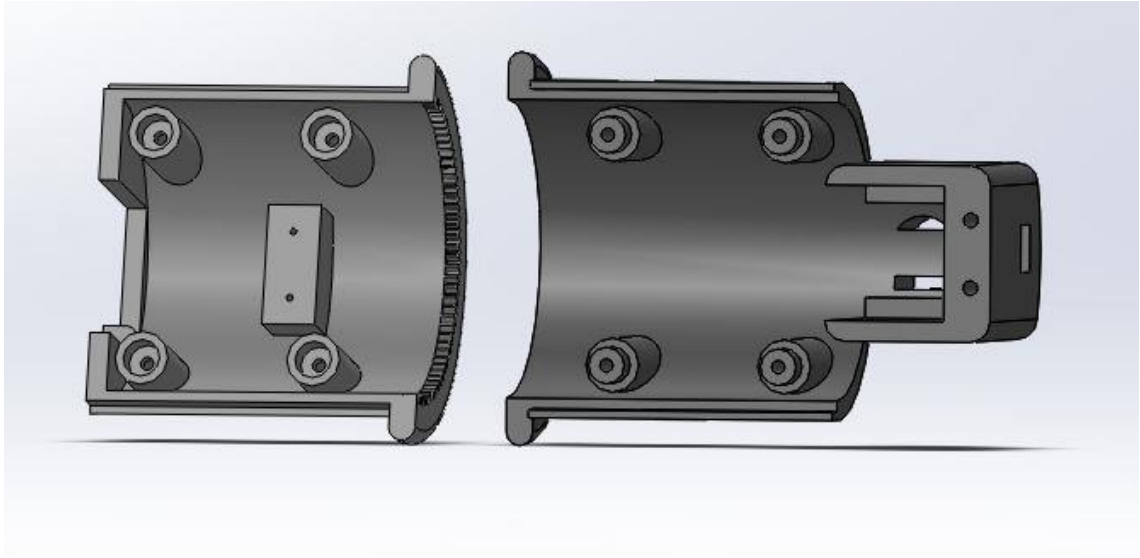
Kuva 24. Olkavarren tyviosan vasen- ja oikeapuolisko

Olkavarren mallintaminen aloitettiin olkavarren tyviosasta, joka näkyy kuvassa 24. Ihmiskäden symmetriaan perustuen tyviosa mallinnettiin leveimmäksi kohdaksi käsivartta. Osan mallintaminen aloitettiin mallintamalla 64 millimetriä halkaisijaltaan ja 45 millimetriä pituudeltaan oleva putki, jonka seinämän vahvuudeksi määriteltiin 3 millimetriä. Putken toiseen päähän mallinnettiin kaksi 37 millimetriä pitkää uloketta. Ulokkeiden tarkoituksena oli olkavarren kiinnittäminen pystyvarteen. Vasemmanpuoleiseen ulokkeeseen tehtiin Kuvassa 22 näkyvää kiinnitysmekanismia varten 16 millimetriä halkaisijaltaan oleva reikä. Varmistustapin takia reikää suurennettiin leikkaamalla sen reunaan 7,4 millimetriä pitkä ja 5 millimetriä leveä aukko.

Oikeanpuoleisen ulokkeen avulla tapahtuisi olkavarrenkiinnitys pystyvarressa olevaan 1501MG–servomoottoriin. Mekaaninen liitos tehtiin servomoottorin mukana olleella kiinnityspalalla, jossa on valmiina servomoottorin rattaisiin sopiva hammastus. Olkavarteen mallinnettiin servomoottorin kiinnityskappaletta varten kuvassa 24 sinisenä näkyvä lokero. Lokeron alapuolelta putkenpäästä leikattiin 10 millimetriä, jotta olkaniveleen saataisiin tarpeeksi liikelaajuutta. Seuraavaksi kappale halkaistiin kahdeksi puoleksi. Puoliskojen kiinnitysmekanismina käytettiin edellisten osien tapaan ruuveja ja reunojen porrastamista.

Tyviosan toiseen päähän mallinnettiin kuvan 24 mukainen ura. Ura tarkoituksena oli toimia mekaanisena liitoksena olkavarren tyven ja kyynärpään välillä, sallien kuitenkin

olkavarren rotaation. Uran seinämien korkeudeksi asetettiin 4 millimetriä ja vahvuudeksi 3 millimetriä. Viimeisenä tyviosaan mallinnettiin koroke, olkavarrenrotaation moottoria varten, sekä kaapelin ohjainlevyt.



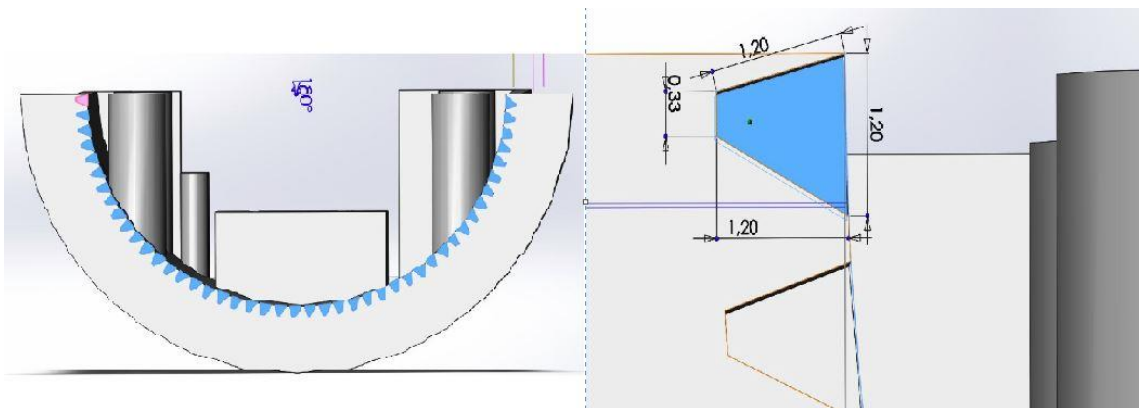
Kuva 25. Olkavarrenpää, oikea ja vasen puolisko

Olkavarrenpään tekeminen aloitettiin suoran putken mallintamisella. Putken halkaisijaksi määriteltiin 50 millimetriä ja seinämän vahvuudeksi 3 millimetriä. Putken toiseen päähän mallinnettiin 4 millimetriä korkea ja 4 millimetriä leveä kaulus. Kauluksen tarkoituksena on pitää olkavarrenosat yhdessä mahdollistaen kuitenkin olkarotaation. Valmiissa robottikädessä kaulus pyörisi kuvassa 24 näkyvässä urassa, versiosta riippuen servo- tai tasavirtamoottorin avulla. Kauluksen mallinnuksen jälkeen putki halkaistiin kahteen osaan. Valmis olkavarrenpää on kuvassa 25.

Olkavarrenpään oikeanpuoliskon tarkoituksena on olla olkarotaation liikkeestä vastaavan toimilaitteen (versiosta riippuen servo- tai tasavirtamoottori) kanssa mekaanisessa liitoksessa hammasrattaiden avulla. Suunnitteluvaiheessa oli päädytty käyttämään moottoreissa valmiiksi löytyviä rattaita, jolloin mallinnuksessa oikeanpuoliskon hampaat piti mallintaa yhtä suuriksi (Kuva 26). Sopiva hammaskoko oli 1,2 millimetriä kannasta ja 0,33 millimetriä huipulta oleva hammastus, hampaiden lukumääräksi tuli 45 kappa-

letta. Mallintaessa huomattiin että sopivan hammastuksen tekeminen on ongelmallista, käytössä olleen 3D-tulostimen tarkkuuden takia. Käytössämme olleen Stratasys Dimensionin sst 768 tulostamisresoluutioksi ilmoitettiin vain 0,33 millimetriä.

Hammastuksen mallintamisen jälkeen oikean puoliskon toiseen pätyyn tehtiin 20,15 millimetriä leveä ja 19,4 millimetriä korkea leikkaus servomoottoria varten. Kappaleen sisäpuolen pohjalle, leikatusta päädyistä 20 millimetrin päähän tehtiin 18 millimetriä leveä, 8 millimetriä pitkä ja 9,6 millimetriä korkea koroke. Korokkeen tarkoituksena oli toimia kyynärnivelen toimilaitteena toimivan MG996R-servomoottorin kiinnityspaikkana. Korokkeeseen lisättiin kaksi kahden millimetrin reikää servonkiinnitysruuveja varten. Servomoottorille leikattu aukko sekä kappaleen sisäpinnalla oleva kiinnityskoroke näkyvät kuvassa 25.

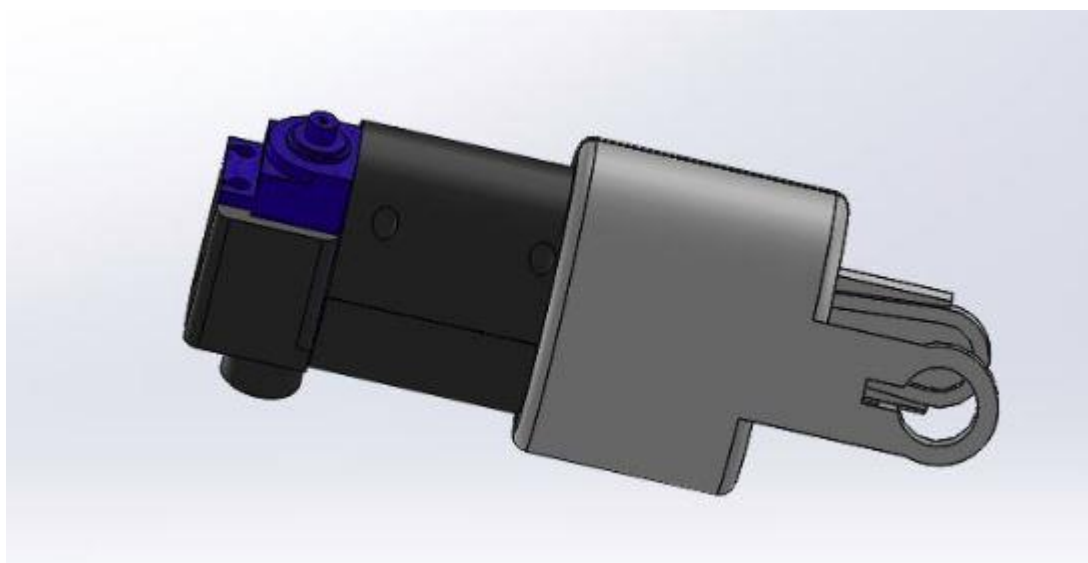


Kuva 26. Olkavarren oikeanpuolen hammastus

Olkavarrenpään vasemman puolen päättehtävä oli toimia kyynärnivelenä. Kyynärvarren kiinnitys olkavarteen oli tarkoitus toteuttaa kahdella mekaanisella liitoksella, olkapään ja pystyvarren liitoksen tapaan. Kyynärvarren oikea puoli oli tarkoitus liittää suoraan kyynärnivelen servomoottoriin ja vasenpuoli liittää mekaanisella tappiliitoksella olkavarren vasempaan puoliskoon. Tätä nivelrakennetta varten olkavarrenpään vasempaan puoleen mallinnettiin kiinteä servokotelo, joka samalla toimisi kyynärnivelenä. Servokotelon mallintaminen aloitettiin tekemällä 25 millimetriä pitkä ja 20 millimetriä leveä uloke olkavarrenpään päähän.

Ulokkeen reunoista korotettiin 3 millimetriä läpimitaltaan ja 31 millimetriä korkeat seinämät. Päätyseinämän läpimitta suurennettiin 7 millimetriin rakenteen vahvistamiseksi. Päätyseinämään leikattiin kehikon pohjasta 4,2 millimetrin korkeudelle 7 millimetriä leveä ja 6 millimetriä korkea aukko servomootorin johdoille. Kehikon pohjalle lisättiin 3 millimetriä korkeat tukipalkit servomootorin pohjan korottamista varten. Tyhjätila servomootorin alle jätettiin potentiometrin johtojen takia. Servomootorin kiinnitystä varten kehikon päätyseinään lisättiin kaksi halkaisijaltaan 2 millimetriä olevaa reikää. Olkavarrenpään vasen puoli näkyy kuvassa 25 oikealla puolella.

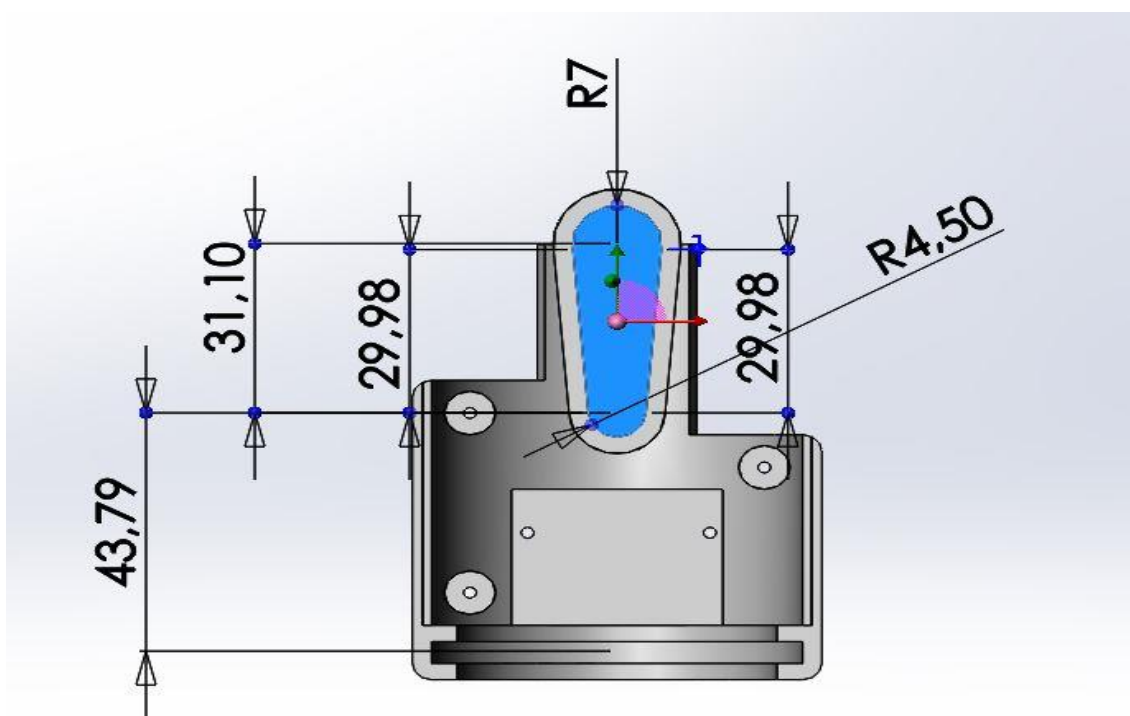
Olkavarrenpään ja kyynärvarren vasemman puoleisten kappaleiden liitosta varten mallinnettiin servokotelon ulkopuolelle halkaisijaltaan 15 millimetriä oleva tappi. Tappi korkeudeksi asetettiin 10 millimetriä. Tappi näkyy kuvassa 27. Tappin sisään tehtiin potentiometrille paikka, sekä johdoille läpiviennit. Johtojen läpiviennit näkyvät kuvassa 25. Kuvassa 27 näkyy olkavarrenpää yhdessä kyynärvarren kanssa, muodostavat robottikäden kyynärnivelen.



Kuva 27. Olkavarsi kokonaisena

5.7 Kyynärvarsi

Robottikäden kyynärvarsi koostuu kolmesta pääosasta. Se koostuu vasemmasta ja oikeasta puolesta sekä ranteesta, jossa on rotaatio. Kyynärvarren mallinnuksessa pohjana käytettiin olkavartta. Ranteen rotaatio perustui samaan tekniikkaan kuin olkavarren rotaatio. Kyynärvarren ja olkavarren eroavaisuutena oli kyynärvarren muutaman millimetrin pienempi ulkohalkaisija ja takaseinän puuttuminen kyynärvarren oikealta puolella. Seinä poistettiin, jotta kyynärvarressa olisi tilaa riviliittimille. Kyynärvarren muutokset näkyvät kuvassa 28. Kyynärvarresta tehtiin toinen versio servomoottorirotatiota varten. Kyseinen versio ei kuitenkaan juurikaan eronnut tasavirtamoottorirotatiosta, muutoin kuin moottoria varten olevan alusta leveyden ja korkeuden pienentymisellä. Servomoottorirotatiion isoin ero oli kiinnityskappaleessa, jonka mallintaminen on käsitelty kohdassa 5.9 Muut mallinnettavat.

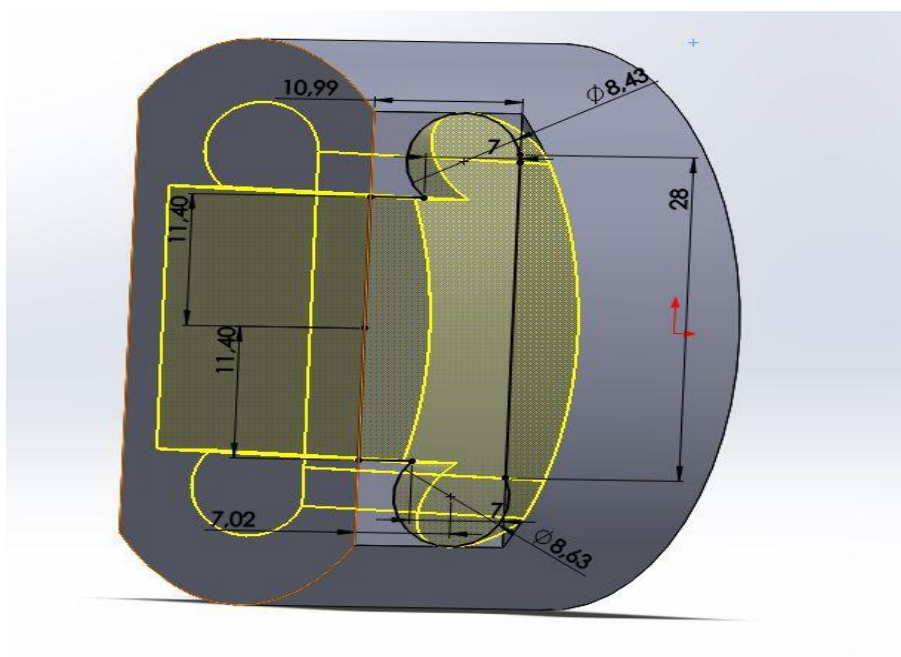


Kuva 28. Kyynärvarren oikeapuoli

Ranneosa mahdollistaa robottikäden kämmenosan rotaation. Se on pieni osa, mutta joutuu kovaan rasitukseen ollessaan liikkuvana linkkinä kämmenen ja muun käden

välissä. Ranteen mallintaminen aloitettiin 12 millimetriä pitkän ja 49 millimetriä halkaisijaltaan olevan putken mallintamisesta. Putken päähän mallinnettiin 11 millimetriä korkea ja 31,47 millimetriä kantiltaan oleva kuutio. Kuution ylä- ja alapuoli levennettiin ja pyöristettiin putken ulkoreunojen mukaisesti. Sivuilla oleville tasanteille mallinnettiin kämmenen mekaanista liittosta varten, sienen kaltainen kuvio.

Kuvion muoto tehtiin niin, että se tarjoaisi tarpeeksi kitkapintaa pitääkseen kämmenen paikoillaan kovassakin rasituksessa. Kuvio koostui kahdesta ympyrästä. Ympyrät yhdistettiin 28 millimetriä pitkällä suorakulmiolla. Suorakulmiota jatkettiin leveysuunnassa niin, että se kohtasi ranneosan ulkoreunan. Ranne leikattiin kuvion mukaisesti, kuitenkin jättäen vasempaan reunaan 4,5 millimetriä leveän ja paksun rakenteen. Tämän rakenteen tarkoituksena oli estää kämmenen liikkuminen toiseen suuntaan. Kuvio ja mitat näkyvät kuvassa 29.

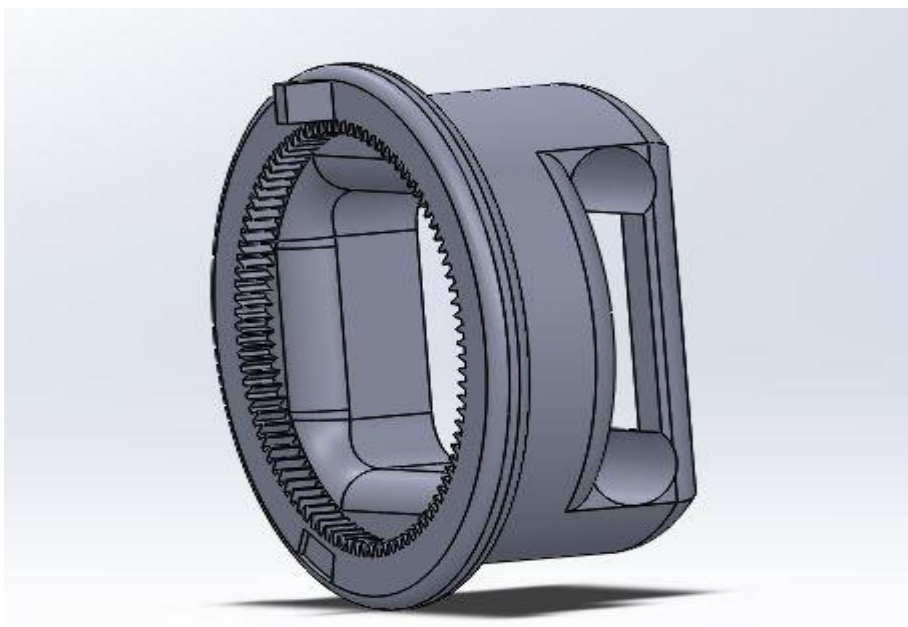


Kuva 29. Ranteen ja kämmenen liittokohta

Liitoskohdan mallintamisen jälkeen ranne piti tehdä ontoksi, kämmeneen menevää johdotusta varten. Tämä toteutettiin leikkaamalla takaosasta 31,47 millimetriä kantiltaan oleva käytävä kappaleen lävitse. Seuraavaksi ranteeseen mallinnettiin kiinnityskaulus, jolla mahdollistettiin ranteen rotaatio. Kaulus toimi samalla tavalla kuin olkaro-

taatiossa (4 millimetriä korkea ja leveä kaulus, joka menee kyynärvarren päässä olevaan syvennykseen).

Kauluksen sivulle, ranneosan päätyyn, lisättiin 4,6 millimetriä korkea, 2 millimetriä leveä ja 4 millimetriä pitkä palanen, jonka tarkoituksena oli rannerotaation pyöriessä osua rajakytkimiin. Rajakytkimien toteutustapa ei ollut vielä mallintaessa täysin selvillä, joten niiden paikoitusta ei tarkemmin otettu mallintaessa huomioon. Kauluksen sisäpuolelle leikattiin hammastus, samalla mitoituksella kuin olkarotaatiossa. Hammastuksen mitat näkyvät kuvassa 26. Viimeisenä vaiheena ranneosan reunat pyöristettiin kitkan vähentämiseksi. Kuvassa 30 on valmis ranneosa.



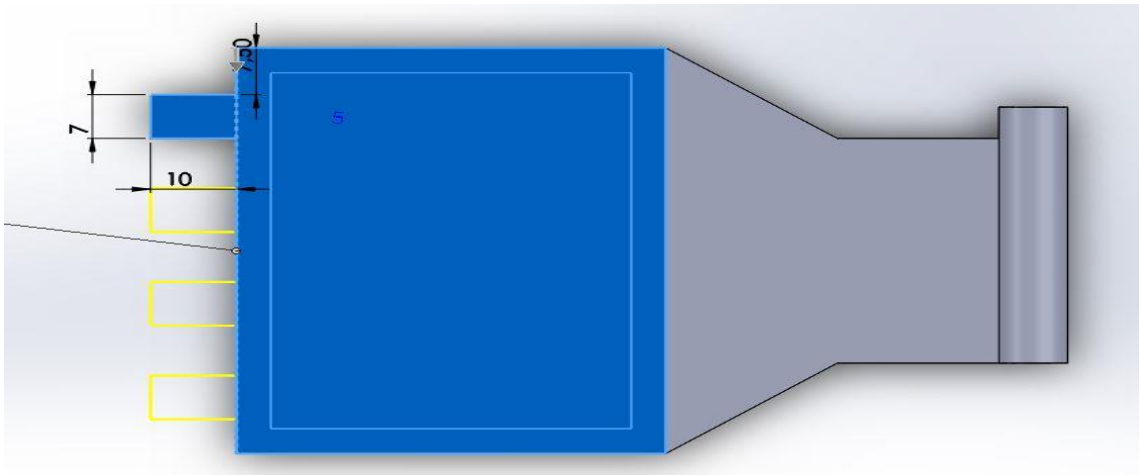
Kuva 30. Valmis ranne

5.8 Kämmen

Kämmen eli robottikäden tarttujaa mallinnettiin kahtena versiona. Ensimmäisessä versiossa sormien toimilaitteena käytettiin servomoottoreita. Servomoottorien laatuongel-

mien toteamisen jälkeen mallinnettiin toinen kämmenosa, jonka toimilaitteina toimivat tasavirtamoottorit. Ensimmäinen versio koostui kolmesta osasta, ylä- ja alakannesta sekä rungosta. Tasavirtamoottorit eivät vaatineet kahdesta eri suunnasta kiinnitystä, jolloin osien määrä saatiin laskettua kahteen. Tasavirtamoottoreilla toimiva versio koostui kannesta ja rungosta.

Servomooottoreilla toimivan kämmenen mallintaminen aloitettiin ranteeseen tulevasta liittimestä. Liittimen mitat otettiin ranneosasta. Liitin mallinnettiin 0,5 millimetriä pienemmällä mitoilla kuin kuvassa 30 näkyvä ranteen vastaava leikkaus. Tällä tavoiteltiin helpompaa kokoamista. Liittimen rakentamisen jälkeen liittimen vasemmasta reunasta aloitettiin varsinaisen kämmenosan mallinnus. Kämmenosa aloitettiin 36 millimetriä korkealla ja 22,4 millimetriä leveällä suorakulmiolla, jonka korkeudeksi määrättiin 20 millimetriä. Kappaletta levennettiin ja pidennettiin kuvassa 31 näkyvällä tavalla, kunnes sen pituus oli 90 millimetriä ja leveys 65 millimetriä. Kämmenen päähän lisättiin sormia varten neljä paikkaa. Sormien kiinnityskohdan leveydeksi asetettiin 7 millimetriä ja pituudeksi 10 millimetriä. Ensimmäinen sormi asetettiin 7,5 millimetrin päähän kämmenen oikeasta reunasta. Alaspäin läpimitta sormen kiinnitykselle oli 17,3 millimetriä. Sormi kopioitiin kolmesti, jotta saatiin aikaiseksi neljälle sormelle paikat. Sormien väliksi asetettiin 15 millimetriä. Sormien kiinnittämistä varten, kiinnityspaikoihin tehtiin sivusuunnassa, 6 millimetrin halkaisijalla olevat reiät.

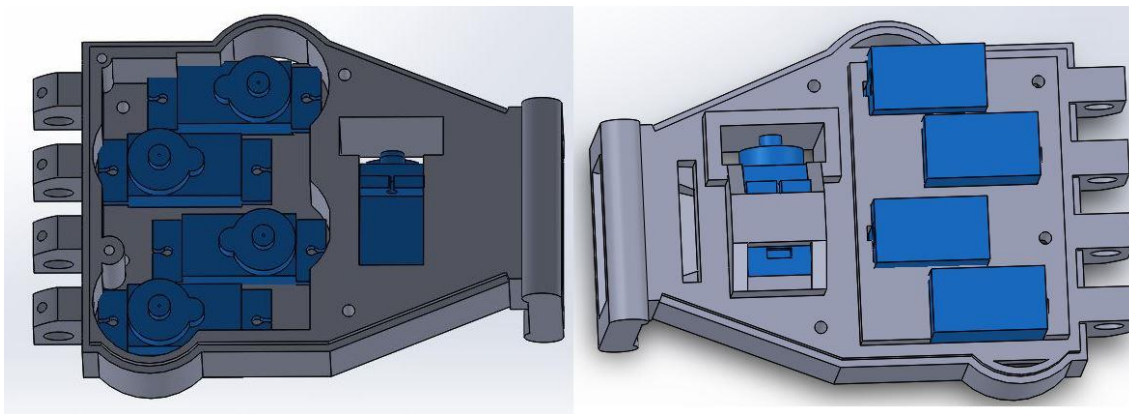


Kuva 31. Kämmenen rungon mallinnus

Seuraavaksi kämmenosaan mallinnettiin moottoritila. Se tehtiin kovertamalla kämmen ontoksi. Seinämien vahvuudeksi jätettiin 4 millimetriä kaikkialta paitsi pohjasta, joka leikattiin avoimeksi. Peukaloa varten runkoon tehtiin T-kirjaimen muotoinen leikkaus. Leikkaus tehtiin 34 millimetriä pitkäksi ja 13 millimetriä leveäksi. Vasemmasta reunasta leikkausta levennettiin 21 millimetriin asti, muodostaen ison T-kirjaimen. Peukalon servomoottorille tehty aukko näkyy kuvassa 32.

Servomoottorien kiinnittämistä varten kämmenen rungon yläpuolelle mallinnettiin tukirakennelmat. Kämmenen yläpuoli, joka oli koverrettu läpimitaltaan 4 millimetriseksi, suurennettiin ulospäin vielä 5 millimetriä. Peukalon servomoottorille tehtiin kämmenen yläpuolelle korkeimmillaan 12 millimetriä korkea kiinnityskehikko. Kehikon reunat kiersivät koko T-kirjaimen muotoisen aukon reunat. Reunojen paksuudeksi asetettiin 3 millimetriä ja korkeudeksi 7 millimetriä. Aukon kapeimmalta kohdalta korkeus nostettiin 12 millimetriin ja aukon ylitse mallinnettiin 5 millimetriä leveä ja paksu kiinnityspalkki. Palkki toimi peukalon servomoottorin kiinnityspaikkana.

Reunimmaisten servomoottorien suuren kääntösäteen takia kämmeneen mallinnettiin pyöreät laajennukset kyseisten servojen kohdalle. Servomoottorien suuri kääntösäde johtui servojen päällä olevista vetopyöristä, joiden avulla saatiin tarpeeksi suuri liikelaajuus sormen koukistamiseen. Vetopyörien halkaisijat olivat 20 millimetriä. Liitteessä 4 näkyy servojen vetopyörä. Kämmenen leveyden kasvamisen välttämiseksi, leikattiin kämmenen 9 millimetriä paksuun yläosaan servojen paikat niin, että servomoottorit menivät limittäin. Eli joka toinen servomoottori laitettiin toisinpäin kämmeneen. Tällöin servomoottoreissa kiinni olevat vetopyörät olivat osittain peräkkäin ja veivät vähemmän tilaa. Kuvassa 32 näkee servomoottorien asetelmat, sekä niiden kiinnitystä varten mallinnetut rakenteet.

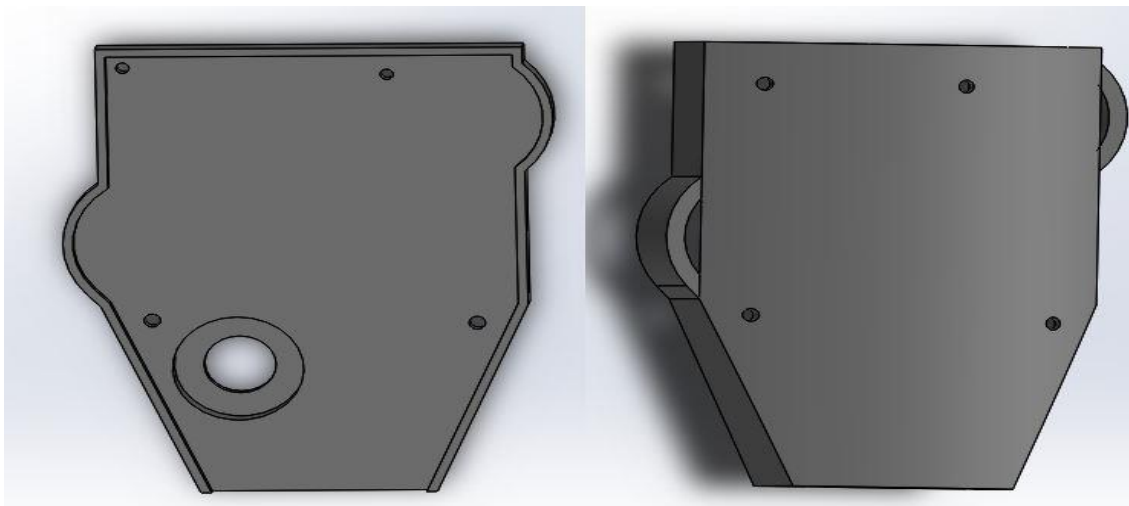


Kuva 32. Servomootoreilla toimivan kämmenen runko ala- ja yläpuolelta

Antureiden ja toimilaitteiden johdotuksia varten kämmeneen tehtiin läpivienti. Läpivienti toteutettiin kuvassa 32 näkyvällä tavalla. Kämmenen liitin ranteeseen koverrettiin ontoksi ja kämmenen yläosaan, lähelle peukalon servomoottoria, leikattiin 25 millimetriä pitkä ja 4 millimetriä leveä aukko, joka yhdistyi liittimeltä tulevaan käytävään. Lopuksi kämmeneen tehtiin kulmien pyöristykset, kiinnitysruuvien paikat, sekä läpiviennit sormien naruille.

Kämmettä varten mallinnettiin vielä kansi ja pohja. Kannen tarkoitus oli lähinnä esteettinen. Sen tarkoituksena oli piilottaa servomoottorien ja anturien johdot. Kannen korkeudeksi asetettiin 14 millimetriä ja sen seinänvahvuudeksi 3 millimetriä. Kannen yläosan vahvuudeksi asetettiin 2 millimetriä. Kannen ja kämmenen rungon kiinnitys toteutettiin samalla tavalla kuin muidenkin osien. Kiinnitys tapahtui ruuvien ja reunojen porastamisen avulla.

Pohjan tarkoituksena oli peittää rungossa oleva moottoritila ja näin tehdä kämmeneen yhtenäinen pinta, jota vasten sormet voivat painautua. Peukalon kiinnitys tapahtui alakanteen. Tätä varten alakanteen tehtiin 11 millimetriä halkaisijaltaan oleva reikä suoraan rungossa olevan peukalon servomoottorin alapuolelle. Reiän ympärille tehtiin ympyrän muotoinen halkaisijaltaan 24 millimetrinen koroke. Korokkeen korkeudeksi asetettiin 4 millimetriä ja sen lävitse tehtiin millimetrin levyinen reikä sormen kiinnitystappia varten. Pohjan kiinnitys tehtiin samalla tavalla kuin aiempien osien kiinnittäminen. Servomootoreilla toimivan kämmenen kansi ja pohja näkyvät kuvassa 33.



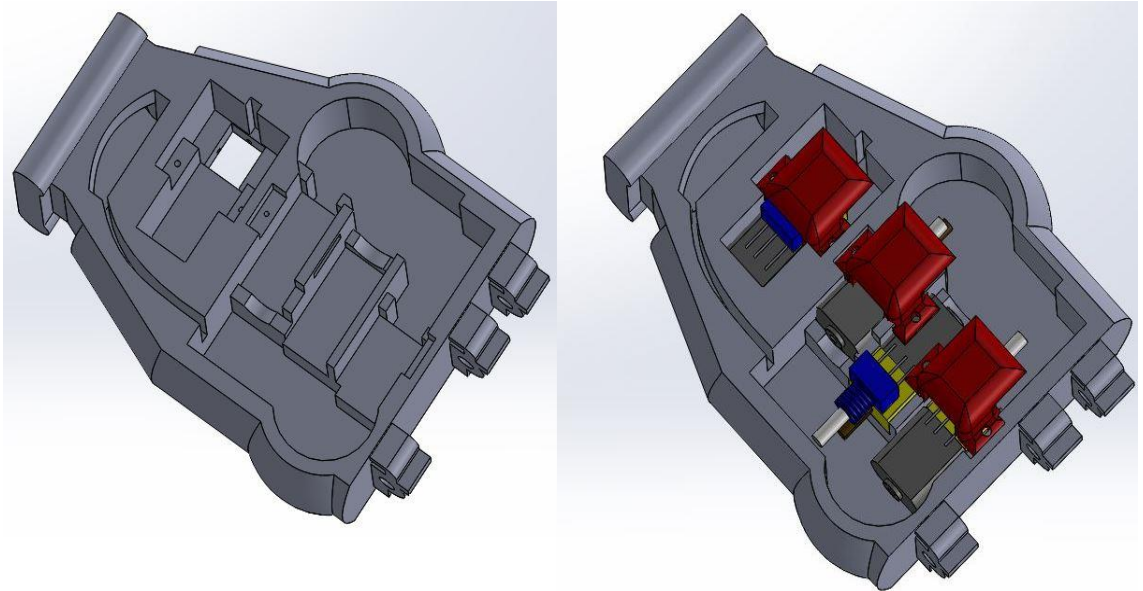
Kuva 33. Servomoottori kämmenen ala- ja yläkansi

Toinen versio kämmenestä toteutettiin tasavirtamoottorien avulla. Kämmen mallinnettiin servomoottori kämmenen pohjalta, jottei kämmenestä tulisi liian raskas. Moottoreille tarkoitetun tilan pysyessä samana jouduttiin yhdestä sormesta luopumaan, sillä N20-tasavirtamoottoreita ei potentiometrien kanssa saanut sopimaan kuin neljä kämmenen sisälle. Erillistä alakantta ei tarvittu, moottorit voitiin kiinnittää vain yhdestä suunnasta, jolloin mallintaa ei tarvinnut kuin runko ja kansi.

Rungon muokkaaminen moottoreille sopivaksi aloitettiin moottoritalasta. Moottoritalan pohja mallinnettiin umpinaiseksi ja 3 millimetrin vahvuiseksi. Tämän jälkeen tehtiin moottoreita varten kiinnitys- ja tukirakenteet. Moottoritalan pohjalle tehtiin kolmesta 12 millimetriä leveästä ja 24 millimetriä pitkästä suorakulmiosta muodostuva kuvio. Kuvion korkeudeksi asetettiin 8 millimetriä. 8 millimetriä korkea tasanne toimi moottorien alustana. Tasanteen sivut korotettiin 10 millimetrisiksi ja niiden vahvuudeksi asetettiin 2,4 millimetriä. Mallinnettuihin reunoihin leikattiin aukot potentiometrien kiinnikepaloja varten ja tasanteen päihin tehtiin pyöristetyt päädyt moottorien pitkittäisliikkumisen estämiseksi. Kuvassa 34 näkyy moottorien kiinnityspaikat.

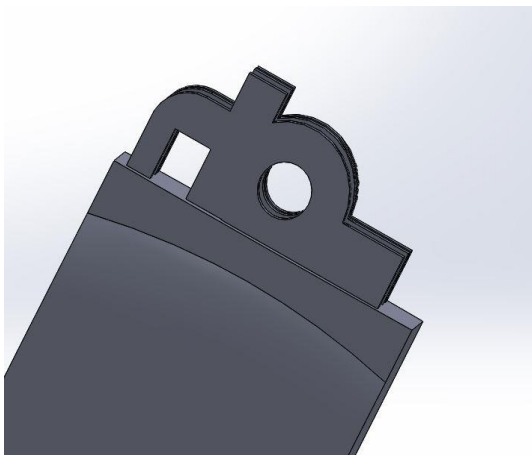
Peukalon moottoritalan leveää osaa pidennettiin 21 millimetrin pituiseksi. Tällä mahdollistettiin potentiometrin ja moottorin rattaille riittävä liikkumistila. Pohjan paksuudeksi määritettiin 5 millimetriä, jolloin moottori tuli riittävän korkealle peukalosta, jotta sen vetopyörä pystyi kiristämään peukalon naruja. Peukalon moottoritalan taakse tehtiin joh-

toja varten 2 millimetriä leveä ja 13 millimetriä syvä leikkaus, joka yhdisti varsinaisen moottoritilan onttoon ranneliittimeen. Kämmenen rungon rakenne moottoreilla ja ilman moottoreita näkyy kuvassa 34.



Kuva 34. Kämmenen rungon rakenne

Etu-, keski- ja pikkusormen kiinnitystä varten olevien kiinnityspaikkojen rakennetta muutettiin hieman. Sormien vetonaruja varten olevat reiät kohdistettiin samalle korkeudelle moottorien vetopyörien kanssa. Kiinnitysrakennetta vahvistettiin ja niihin lisättiin mahdollisuus sormien palautukseen tarvittavien kuminauhojen kiinnitystä varten. Sormien kiinnityskappale näkyy kuvassa 35.



Kuva 35. Sormien kiinnitys

5.9 Muut mallinnettavat

Edellä esiteltyjen osien lisäksi robottikättä varten mallinnettiin monia pieniä osia. Robottikäden toimintaa haluttiin tarkastella mahdollisimman tarkasti ennen 3D-tulostamiseen ryhtymistä, joten myös moottorit, potentiometrit, servomoottorit ja niiden kiinnityskappaleet mallinnettiin kolmiulotteisesti. Myös sormista tehtiin mallinnukset, vaikka ne käytännössä toteutettiin valmiista komponenteista. Servomoottoreilla toimivat rotaatiot ja sormet poistettiin käytöstä ja korvattiin tasavirtamoottoreilla, tämän vuoksi rotaatioihin liittyviä pieniä osia, jotka tehtiin itse, ei tässä työssä tarkemmin esitellä. Osien kuvat löytyvät liitteistä.

Liitteessä 1 ja 2 näkyy SG90- ja MG996R-servomoottorien 3D-mallit. Mallit on tehty kappaleessa 4.3.2 esiteltyjen mittojen mukaisesti. Olkanivelessä käytetty HD-1501MG-servomoottori on fyysisiltä mitoiltaan MG996R-servomoottorin kokoinen, joten sitä ei erikseen tarvinnut mallintaa simulointi tarkoitusta varten. Liitteessä 3 on N20-tasavirtamoottorin ja sen vaihdelaatikon 3D-malli. Moottorin mallinnus tehtiin kappaleessa 4.3.1 esitettyjen mittojen mukaisesti.

Liitteessä 4 on kuva servomoottoreilla varustetun kämmenen vetopyörästä. Vetopyörän halkaisijaksi määriteltiin 20 millimetriä, jolloin siinä kiinni oleva sormenvetonaru tulisi vedettyä tarpeeksi, kunnollisen sormiliikkeen aikaansaamiseksi. Liikkeen laajuus ei

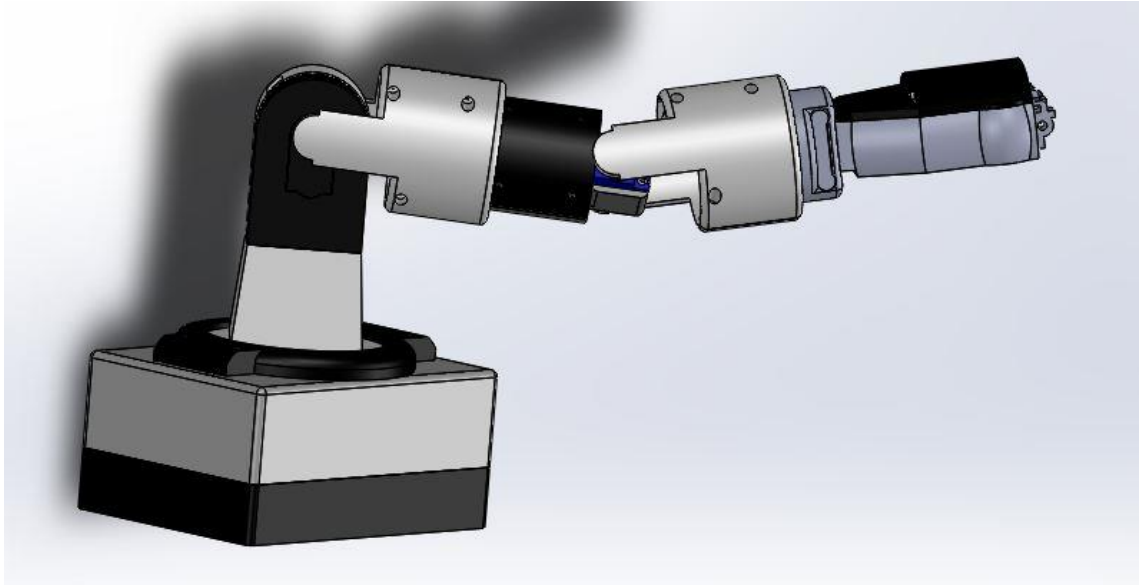
muodostunut ongelmaksi vaan servojen vääntövoima ja kestävyys. Liitteessä 5 ja 6 on kuvat ongelman ratkaisusta. Niissä on kaksi erikokoista vetopyörää tasavirtamoottoriin kämmeneen. Pienempää vetopyörää käytettiin peukalolle ja keskisormelle, isompaa versiota etu- ja pikkusormelle.

Asentotiedon saamiseksi sormien moottorit tarvitsivat potentiometrit (potentiometrien ja N20-moottorien mekaaninen yhdistäminen on selitetty kappaleessa 4.3.1). Potentiometrien kiinnittäminen tasavirtamoottorien päälle toteutettiin liitteessä 7 näkyvän kappaleen avulla. Potentiometri asetetaan kappaleessa olevan reiän läpi ja lukitaan potentiometrin mukana tulevalla mutterilla.

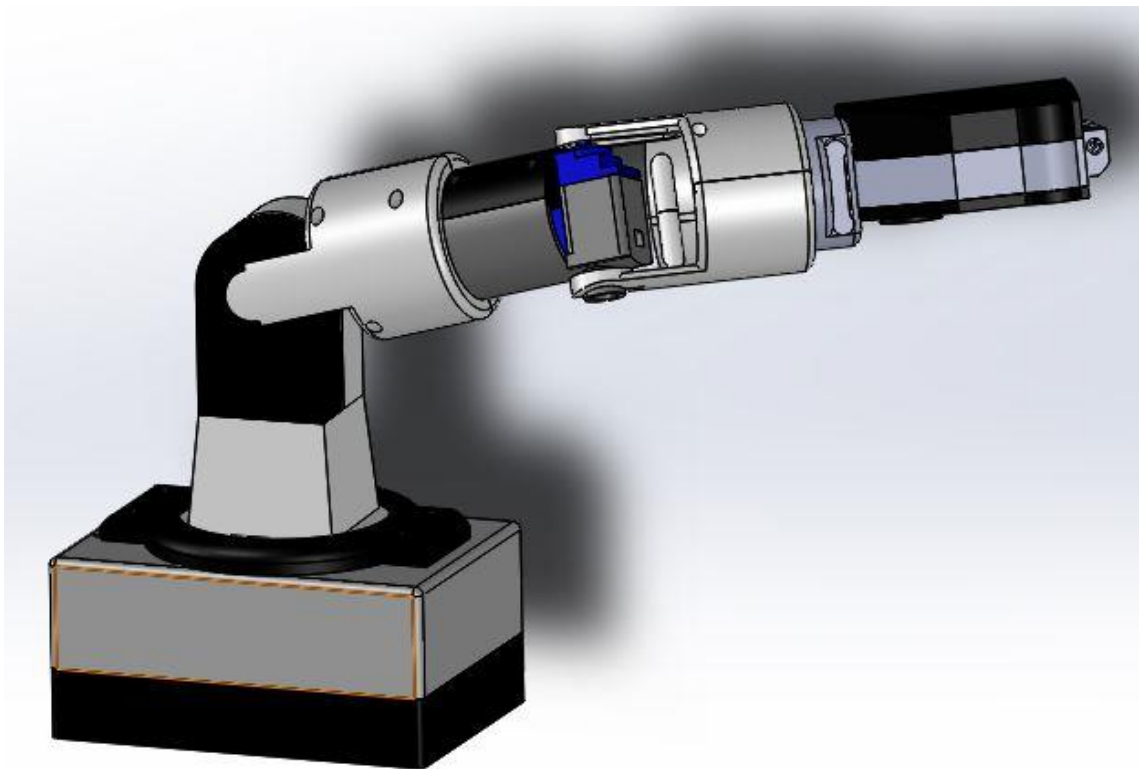
Olka- ja kyynärvarren rotaatioiden toimilaitteiden kiinnitykseen käytettävät osat näkyvät liitteissä 8 ja 10. Liitteessä 8 on N20-tasavirtamoottorin kiinnityskappale, jolla moottori kiinnitetään olka- tai kyynärvarteeseen. Liitteessä 10 on servomoottorilla toteutettavaa rotaatiota varten kiinnityskappale. Servomoottorin kiinnityskappaleessa on myös mahdollisuus trimmeripotiometrin käyttöön, mikäli olisi haluttu ylimääräistä asentotietoa servomoottorilta. Liitteessä 9 on kuva olka- ja kyynärniveleen lisättävästä trimmeripotiometrin hatusta. Hatun ideana oli antaa nivelten ylimääräistä asentotietoa nivelten servomoottoreista. Asentotiedolla olisi voitu estää ohjelmallisesti servomoottoreiden käynnistämisen tapahtuva hallitsematonliike.

5.10 Simulointi

Kaikkien osien mallintamisen jälkeen niiden kokoonpano simuloitiin Solidworks:llä. Kokoonpano simuloinnilla nähtiin, sopivatko osat yhteen ennen niiden 3D-tulostamista. Ohessa ovat kuvat sekä tasavirtamoottoreilla toteutetusta robottikädestä että servomoottoreilla toimivasta versiosta (kuvat 36 ja 37).



Kuva 36. Robottikäsi tasavirtamoottoreilla



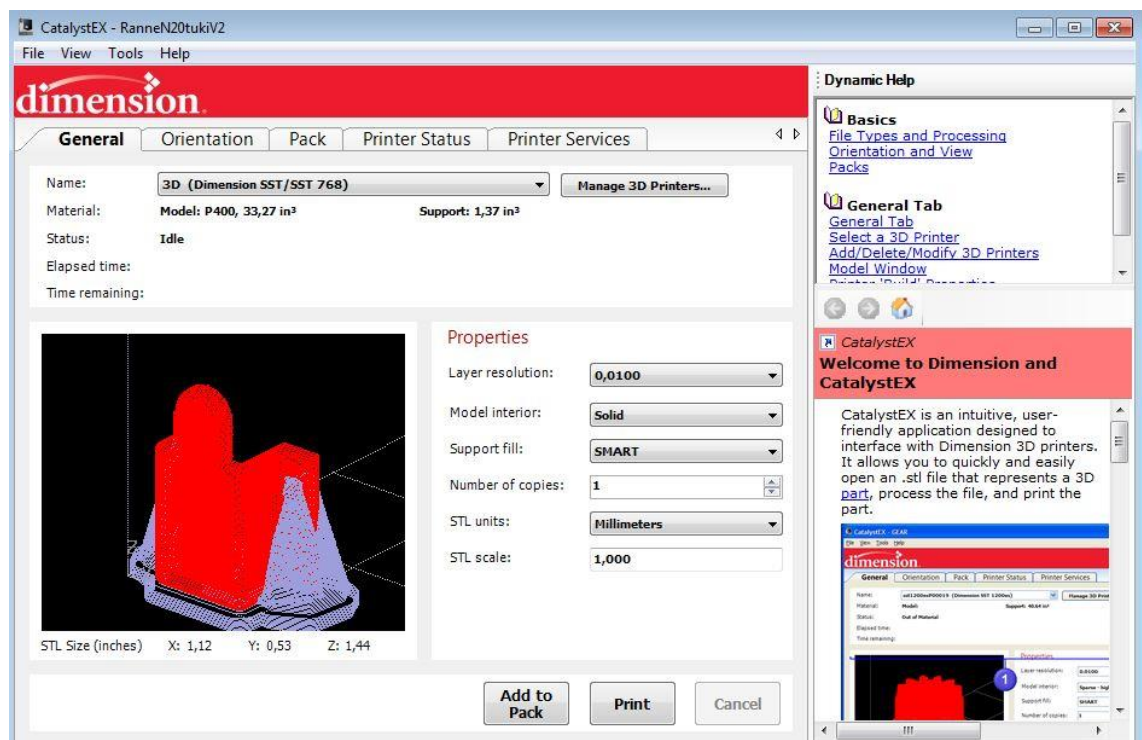
Kuva 37. Robottikäsi servomoottoreilla

Kuvista 36 ja 37 nähdään, että ulkoisilta mitoiltaan kaksi kädenversiota ovat hyvin samankaltaisia, oli toimilaitteina servoja tai tasavirtamoottoreita. Ainoat erot ovat kämmenosan muodoissa ja korkeudessa. Kokoonpano simuloinnin tuloksena todettiin, että osien pitäisi sopia yhteen ja niiden valmistus 3D-tulostamalla voitiin aloittaa.

6 Osien 3D-tulostaminen ja kokoonpano

6.1 3D-tulostaminen

Robottikäden osien tulostaminen tapahtui Metropolian Ammattikorkeakoulun, Tikkurilan toimipisteessä. Tulostuslaitteistona käytettiin aiemmin esiteltyä Stratasys Dimension SST 768 3D-tulostinta. Tulostus tapahtui CatalystEx-ohjelman (kuva 38) avulla [26]. Ohjelma on tarkoitettu käyttöliittymäksi Stratasys dimension 3D-tulostimille.

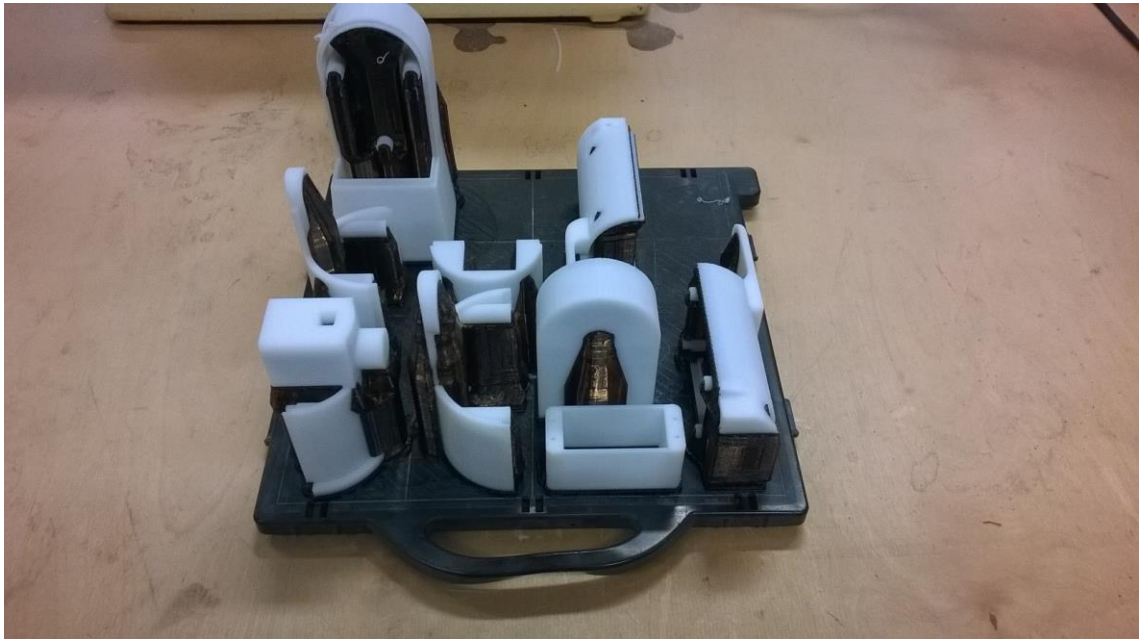


Kuva 38. Kuvakaappaus CatalystEX-tulostusohjelmasta

CatalystEX-ohjelmaan lisätään tulostettavat kappaleet STL-tiedostoina. Ohjelma määrittelee automaattisesti, minne kohtiin tulostettavaa kappaletta tarvitaan tukimateriaalia. Kappaleita voi hieman muokata ohjelman työkaluilla. Kappaleiden kokoa, asentoa ja sijaintia voi muuttaa tulostusalustalla. Ohjelma laskee, kuinka kauan tulostuksessa kuluu, sekä tulostuksessa kuluvat materiaalit. Materiaaleja on kahta tyyppiä, varsinaista ABS-muovia, mistä kappale tulostetaan, sekä tukimateriaalina toimivaa vesiliukoista muovia.

Liitteessä 11 on esimerkkikuva tulostusalustasta ja materiaaleista, kun alustalle on kasattu kaikki robottikäteen tarvittavat osat. Liitteestä nähdään, että robottikäden tulostamiseen kuluisi teoriassa noin 31,12 kuutiometriä eli 526,35 kuutiosenttimetriä ABS-muovia ja tukimateriaalia kuluisi noin 15,07 kuutiometriä eli 246,95 kuutiosenttimetriä. Tunteja tulostamiseen kuluisi teoriassa 79,07 tuntia. Käytännössä robottikäsi jouduttiin tulostamaan monessa osassa, osien kokojen ollessa niin suuria, etteivät ne mahdu yhdelle alustalle kerralla. Tämä lisää huomattavasti tulostusaikaa ja tukimateriaalin kulumista.

Kuvassa 39 näkyy tulostimesta valmistuneita osia. Tulostamisen jälkeen osat irrotettiin tulostusalustasta ja laitettiin lipeäliuokseen, jotta tukimateriaali saatiin pois. Lipeäliuos tehtiin viemäripuhdistusrakeista (Liite 12).



Kuva 39. 3D-tulostimesta valmistuneita robottikäden osia

6.2 Viimeistely ja kokoonpano

Ennen osien kokoonpanoa ne hiottiin käsin mahdollisten tulostuksessa tapahtuneiden epätarkkuuksien poistamiseksi. Kokoonpano aloitettiin kotelosta edeten osa kerrallaan kämmentä kohti. Liitteessä 13 on kuva kotelon kasaamisesta. Kokoonpanossa ilmenneet ongelmat johtuivat pääosin liian tarkaksi mitoitetuista liitoksista. Mallintaessa kapaleita olisi voinut käyttää suurempia toleransseja liitoksissa ja ruuvienkiinnityspaikoissa. Kokoonpano näkyy kuvassa 40.

Olkavarressa jouduttiin leikkaamaan johtojen läpivientiä varten tehty takaseinä johtojen ja niiden liittimien oletettua suuremman koon takia. Alkuperäinen takaseinä näkyi kuvassa 24. Myös olkavarrenpään kaulusta varten oleva uraa, joka näkyi myös kuvassa 24, jouduttiin muokkaamaan. Rotaatiota varten sisemmästä seinämästä poistettiin noin

40 millimetriä pitkä palanen. Jäljelle jääneisiin seinämän palasiin kiinnitettiin pienet rajakytkimet. Olkavarrenpään, kauluksen kylkeen, liimattiin pieni 8 millimetriä leveä ja 5 millimetriä korkea palanen. Palasen tarkoituksena oli osua rajakytkimiin olkavarrenrotaation pyöriessä, ilmoittaen, missä asennossa kädenrotaatio on. Palanen näkyy kuvassa 40, olkavarrenpään kauluksessa.



Kuva 40. Robottikäden kokoonpano

Kyynärvarressa poistettiin myös takaseinä, sekä noin 40 millimetriä pitkä pala rannetta paikoillaan pitävästä seinämästä. Rotaation rajakytkimet asennettiin liimalla, kuten olkavarressa. Ranteeseen ei tehty, pientä hiomista lukuun ottamatta, muutoksia.

Servomoottorikämmeneen ei tarvinnut tehdä muutoksia. Servojen paikkoja jouduttiin hieman suurentamaan ja ruuvien reiät poraamaan puhtaiksi. Liitteessä 14 on kuva valmiista servomootoreilla toimivasta kämmenestä. Servomootoreilla toimivat rotaatiot ja kämmen hylättiin kokoonpanon ja pienien käyttötestien jälkeen. SG90-servojen vääntövoima ja toimintavarmuus eivät yltäneet servoista annettujen tietojen tasolle. Sormien koukistaminen toimi eri tavalla jokaisella robottikäden käyttökerralla ja servomoottorien voimat eivät muutaman käyttökerran jälkeen riittäneet sormien koukistamiseen. Rotaatiot toimivat servomootoreilla, kunnes kaikki käden elektroniikka oli saatu

kytkettyä. Servomootoreilla toimivat rotaatiot veivät liikaa tilaa käden sisältä, kiristäen johtoja, jonka seurauksena rotaatiot eivät toimineet kunnolla.

N20-tasavirtamootoreita toimilaitteena käyttävä versio robottikäden kämmenestä vaati hieman enemmän muokkausta. Potentiometrien kiinnitys ei onnistunut niille tarkoitetuilla kiinnittimillä (kiinnitin näkyy liitteessä 7). Kiinnittimien jalkojen levikkeet jouduttiin katkaisemaan, jolloin niitä ei voinut ruuvata paikoilleen, vaan moottorit sekä potentiometrit liimattiin paikoilleen. Kuvassa 34 näkyy valmis kämmen ilman kantta. Potentiometreissä olevat hammasrattaat olivat hieman erikokoisia, mikä johti niiden kiinnitykseen käytettävien kappaleiden pohjien hiomiseen. Moottoripaikoissa 2 ja 3 (numerointi näkyy kuvassa 41) jouduttiin leikkaamaan myös potentiometrejä pienemmäksi, jotta ne sopivat hammasrattaidensa kanssa moottorien päälle. Moottoreille ja potentiometreille menevät johdot vaihdettiin suunniteltua paksummiksi. Paksumpien johtojen takia johdoille tehtyä uraa moottorilasta ranteeseen (johdoille tehty ura näkyi kuvassa 34) jouduttiin leventämään useilla milleillä, mikä osoittautui ongelmalliseksi uran pyöreän muodon takia.

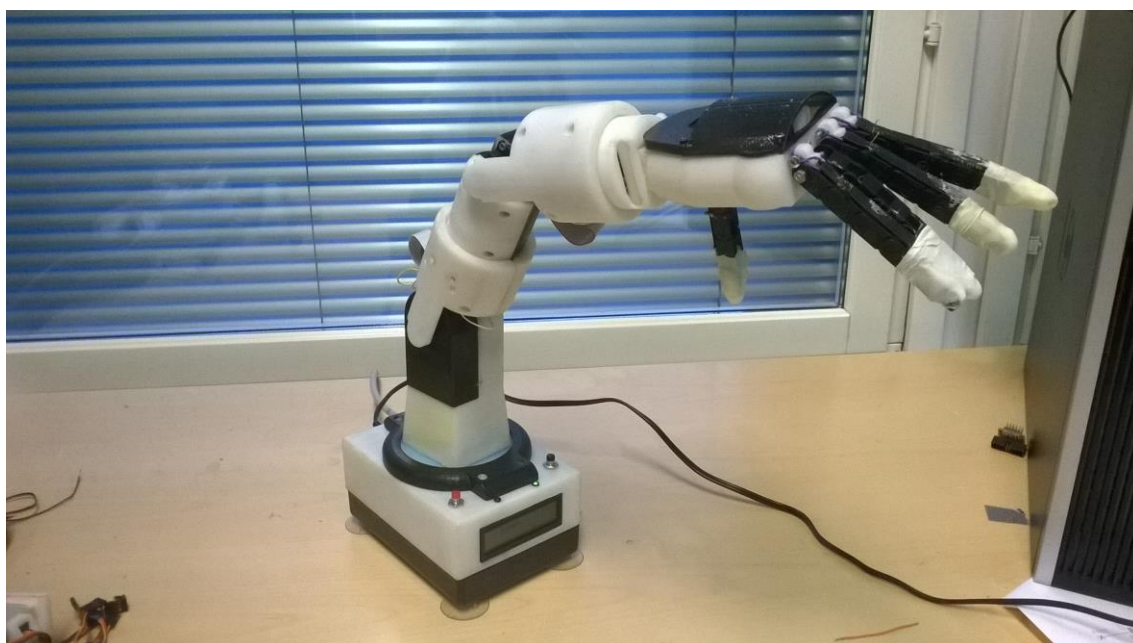


Kuva 41. Tasavirtamootorit kämmenessä

Sormien kiinnittäminen kämmeneen toteutettiin pienten 3 millimetriä halkaisijaltaan olevien pulttien avulla. Sormien ensimmäisen nivelen asennon palauttamista varten

sormiin lisättiin kuminauhat, jotka kiristettiin sormien yläpuolelle pienillä pulteilla. Kuvassa 41 on nähtävissä sormien kiinnitysmekanismi ja kuminauhat. FSR-anturien käyttöä ei kämmenessä kokeiltu aikatauluongelmien takia. Sormenpäät kuitenkin käsiteltiin silikonilla paremman tartuntapinnan saavuttamiseksi. Viimeistelynä käteen lisättiin nimetönsormi. Sormelle ei ollut moottoria, vaan se liikkui pikkusormen mukana. Lisäyksen syy oli ulkonäöllinen.

Lopuksi olka- ja kyynärvarren osien pinnoille levitettiin epoksihartsia. Epoksihartsin tarkoituksena oli lisätä osien kestävyttä. Kotelon pohja, kannenkiinnitin, pystyvarren kansi, olkavarrenpään vasenpuoli ja kämmenen kansiosa maalattiin mustaksi. Robottikäden keveyden takia, kotelon pohjaan lisättiin neljä imukuppia, jotka pitävät käden tiukasti alustassa kiinni. Kuvassa 42 näkyy valmis robottikäden prototyyppi.



Kuva 42. Valmis robottikäsi

7 Yhteenveto ja pohdinta

Insinööriyössä suunniteltiin, mallinnettiin ja valmistettiin opetuskäyttöön tarkoitetun edullisen robottikäden prototyyppi Metropolia Ammattikorkeakoulun sovelletun elektronikan tutkimus- ja kehityksyksikölle Electricalle. Toimivan robottikäsi prototyypin tekemi-

nen onnistui (kuva 42). Robottikäden lisäksi työn tuloksena saatiin tietotaitoa 3D-tulostamisen soveltuvuudesta robotiikkaan, sekä mekaniikan suunnittelusta ja mallintamisesta.

Työn tuloksena voidaan todeta 3D-tulostuksen toimivan hyvin prototyyppien rakentamisessa, mutta kaupallistettavien tuotteiden valmistamiseen se ei sovellu. Tulostaminen on massavalmistuksessa liian hidasta ja kallista. Tulostamalla valmistettujen kappaleiden taipumus hajota tulostuskerrosten mukaisesti heikentää kappaleiden kestäkykyä verrattuna muihin valmistamismenetelmiin. Tulostusmateriaalina ollut ABS-muovi sopi prototyyppien rakentamiseen, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Edellä mainittu kappaleiden hajoaminen tulostuskerrosten mukaisesti pakotti tulostamaan kappaleet tietyissä asennoissa riippuen millaiseen rasitukseen ne käytössä joutuvat.

Tasavirtamoottoreiden hammasrattaiden hankinnassa tuli ongelmia, minkä vuoksi jouduttiin käyttämään hyvin pieniä hammasrattaita käden mekaniikan toteutukseen. Tästä muodostui ongelma olka- ja kyynärvarsien rotaatioissa. Näihin kappaleisiin jouduttiin tekemään 3D-tulostamalla sopivat hammastukset, joiden koko oli aivan tulostimen tarkkuuden alarajoilla. ABS-muovista tulostetut hammastukset eivät kestäneet moottorien väännössä muutamaa käyttökertaa pidempään. Seuraavassa käden versiossa rotaatioiden toteutukseen täytyisi käyttää isompia hammasrattaita tai suunnitella niiden toiminta täysin eri mekaniikalla.

Kämmenen ja sormien mekaniikka saatiin tasavirtamoottorien avulla toimimaan luotettavasti. Seuraava kehitysaskel niiden mekaniikan parantamisessa on kämmenen muodon muuttaminen enemmän ihmiskättä muistuttavaksi. Nykyinen malli toimii hyvin mekaniikan toimivuuden testaukseen, mutta sen toimivuus esineiden manipuloinnissa ei ole vielä tarpeeksi hyvällä tasolla. Lonkeromaiset sormet, joissa oli jopa viisi niveltä, sopivat hyvin esineisiin tarttumiseen, sillä ne kietoutuvat narun tapaisesti esineiden ympärille. Niiden ongelmana on tarkkuus: on vaikea saada moninivelinen, yhdellä moottorilla toimiva sormi tiettyyn asentoon esimerkiksi ihmiskädelle luonnollinen kynäote on tällä sormimekaniikalla vaikea toteuttaa. Mekaniikan jatkokehityksessä täytyy kuitenkin muistaa robottikäden käyttötarkoitus, opetuskäytössä käden ei tarvitse pystyä kaikkeen samaan, mihin ihmiskäsi kykenee, vaan käden mekaniikan pitää pystyä suorittamaan opetuksessa annetuista tehtävistä sujuvasti ja käden hinnan tulee pysyä edullisena.

Servomoottorien korvaaminen tasavirtamoottoreilla, vaihteistoilla ja antureilla voisi olla hyödyksi robottikäden seuraavaa versiota kehittäessä. Edullisten servomoottoreiden kanssa oli pieniä ongelmia projektin aikana. Niiden laaduissa oli selkeitä eroja ja samaa mallia olevat servomoottorit, eivät aina olleet yhtä voimakkaita ja kestäviä toisensa kanssa. Servomoottorien väännöissä oli suuria eroja verrattuna valmistajan antamiin arvoihin. Näiden ongelmien ratkaisu olisi käyttää pieniä tasavirtamoottoreita, joihin voisi mitoittaa sopivat vaihteistot suuren vääntövoiman tuottamiseksi. Tämän jälkeen pitäisi anturien avulla tehdä takaisin kytkentä moottorinasentotiedon saamiseksi. Moottorien räätälöinti jokaiselle nivelelle mahdollistaisi voimakkaamman ja kestävämmän rakenteen tekemisen robottikädelle. Myös robottikäden fyysinen koko ei olisi niin sidottu, kun moottorien vääntövoimaa voitaisiin tehostaa vaihteiden suhdetta muuttamalla, jolloin käsivarren pituutta voitaisiin lisätä ilman kalliimpien moottorien hankkimista. Käden ulkonäön mallintaminen erilaiseksi helpottuisi, kun voitaisiin sijoitella moottorit, vaihteistot ja niiden anturit nivelen ympärille eritavoilla. Servomoottoreissa kaikki komponentit ovat samassa paketissa.

Robottikäden rakentaminen oli mielenkiintoinen ja haastava projekti, jossa kuitenkin onnistuttiin hyvin. Robottikäsiprojektin onnistumisesta kertoo myös insinööriyön loppuvaiheilla osallistuminen kansainväliseen The World Embedded Software Contest 2014 -kilpailuun, jossa robottikättä päästiin näyttämään finaaleihin Etelä-Koreaan. Robottikäden prototyyppi saatiin niin hyvälle tasolle, että sen kehittämistyötä päätettiin jatkaa Electriassa ja insinööriyön loppuvaiheilla teollisenmuotoilun opiskelijoille julkaistiin kilpailu, jossa he saivat suunnitella seuraavan robottikäsiversion ulkoasua.

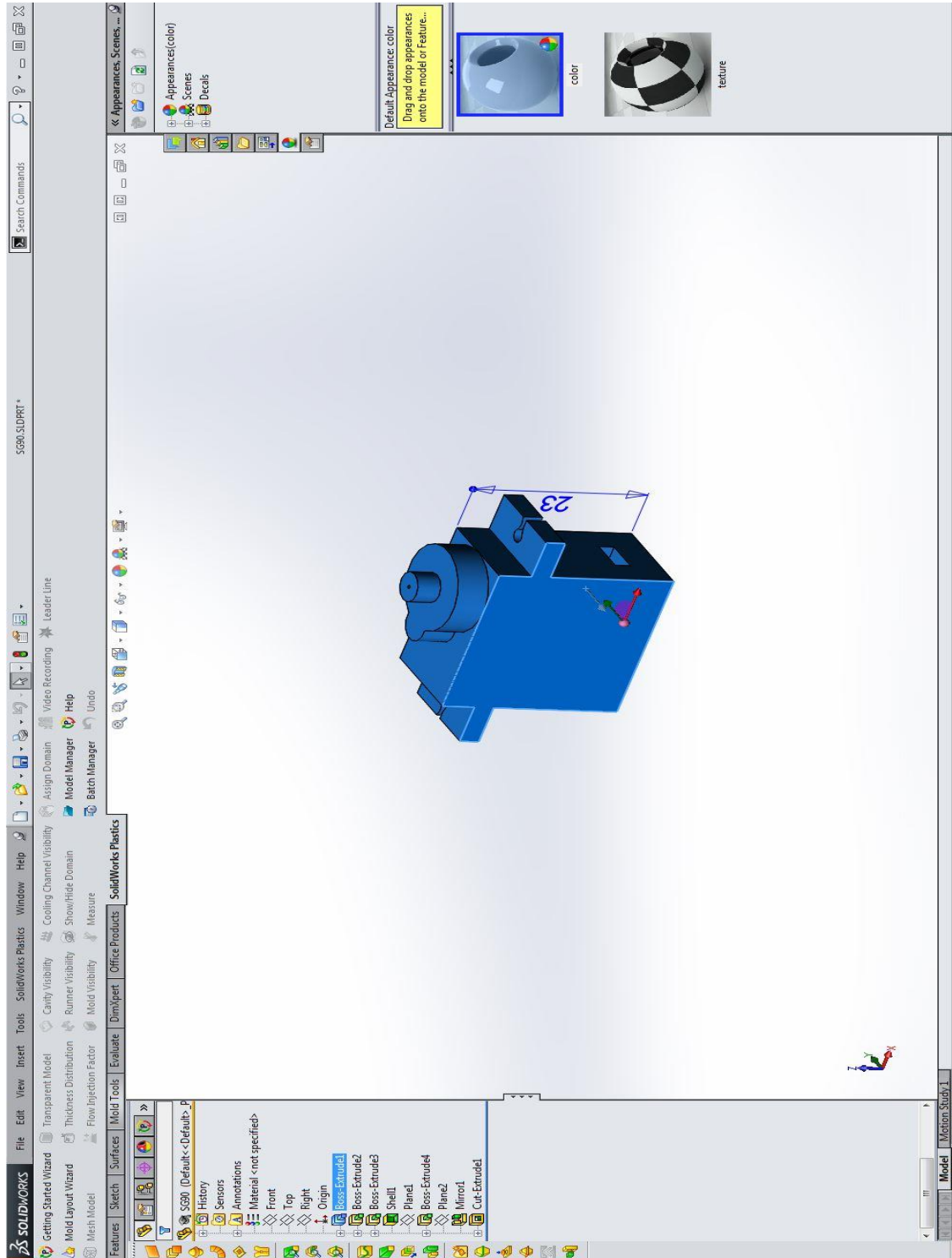
Lähteet

- 1 Tuomme digitaalisuuden arkipäivän esineisiin, Electria 2012. verkkodokumentti [Http://electria.metropolia.fi/](http://electria.metropolia.fi/). Luettu 27.11.2014.
- 2 World Robotics 2014 Service Robots.2014. Verkkodokumentti. <http://www.ifr.org/service-robots/statistics/>. Luettu 2.12.2014.
- 3 World Robotics 2014 Industrial Robots.2014.Verkkodokumentti. <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>. Luettu 2.12.2014.
- 4 IFR association.2014. Verkkoartikkeli. <http://www.ifr.org/association/>. Luettu 3.12.2014
- 5 McKerrow, Phillip.1991. Korjattu 1993. Introduction to robotics. Addison-Wesley Pub. Co.
- 6 Robot Parts: Mechanisms and Kinematics.2015. Verkkoartikkeli. <http://www.robots.com/education/mechanisms>. Luettu 6.1.2015.
- 7 What is rapid prototyping? 2014. Verkkodokumentti. <http://www.stratasys.com/resources/rapid-prototyping>. Luettu 2.12.2014
- 8 Carryer, J.Edward, Ohline, R.Matthew & Kenny,Thomas W. Introduction to Mechatronic design.2011.
- 9 Griffey, Jason.Types of 3D Printing: Fused Deposition Modeling. 5.11.2014. Verkkoartikkeli. <http://www.alatechsource.org/blog/2014/11/types-of-3d-printing-fused-deposition-modeling.html>. Luettu 2.12.2014.
- 10 FDM and 3D printing support material explained. Shapeways. 18.9.2008. Verkkoartikkeli. <http://www.shapeways.com/blog/archives/89-fdm-and-3d-printing-support-material-explained.html>. Luettu 2.12.2014
- 11 Fused Deposition Modeling.Custompartnet.2008. Verkkoartikkeli. <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>. Luettu 2.12.2014.
- 12 The History of Stereolithography.2010. Verkkoartikkeli. <http://www.intechrp.com/the-history-of-stereolithography-sla/>. Luettu 2.12.2014.
- 13 Rapid Prototyping:SLA.2014. Verkkoartikkeli. http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/sla.cfm. Luettu 2.12.2014

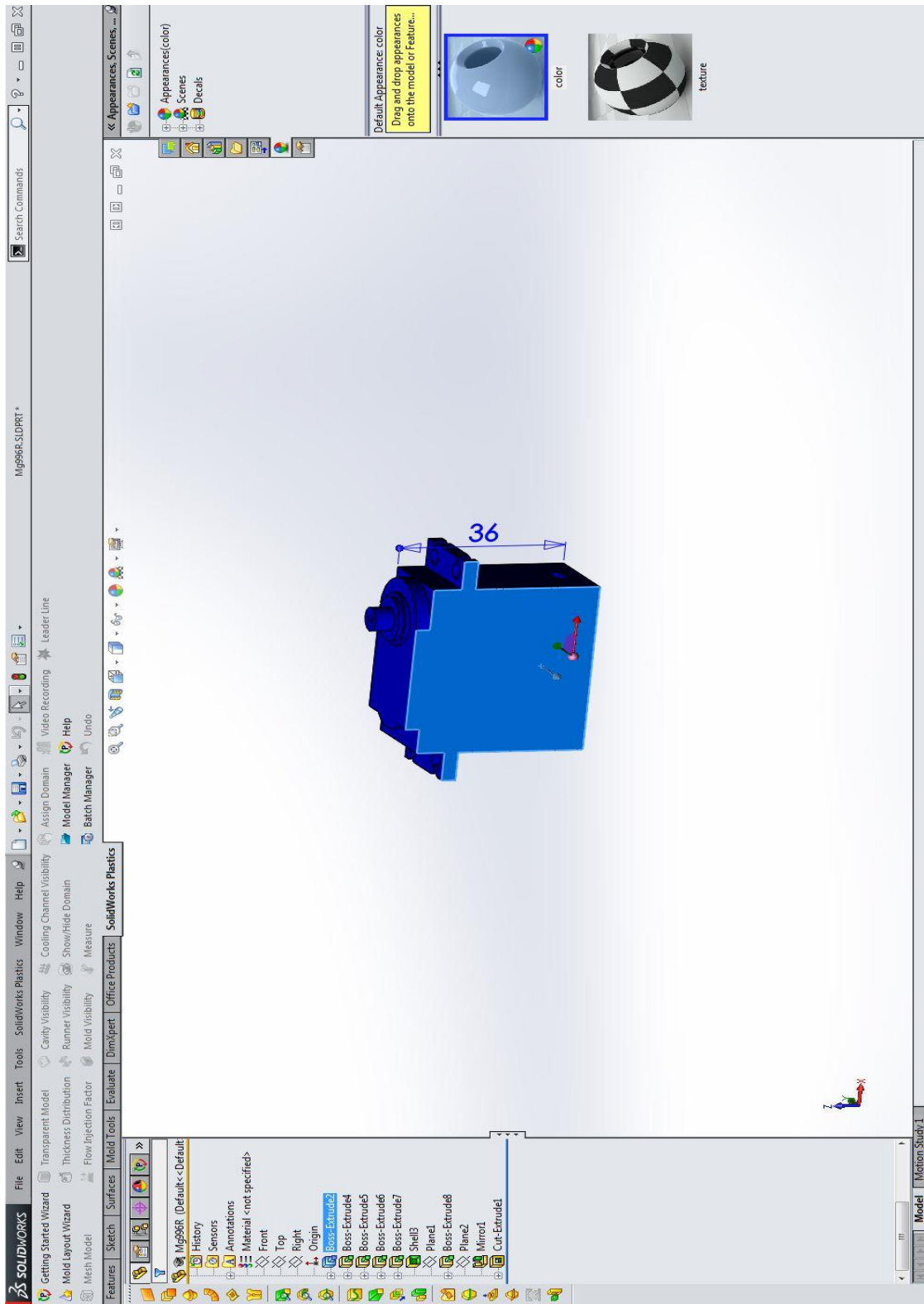
- 14 Stereolithography.Custompartnet.2008. Verkkoartikkeli
<http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>. Luettu 2.12.2014
- 15 Laser sintering.17.8.2012.Verkkodokumentti.
http://www.additive3d.com/sls_int.htm. Luettu 2.12.2014
- 16 RP – Laminated Object modelling and computer aided manufacturing of laminated engineering materials. CERAM research Ltd. 2002. Päivitetty 11.7.2013. Verkkoartikkeli. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1650>. Luettu 9.12.2014
- 17 Chilson, Luke. 27.1.2013.The difference between ABS and PLA for 3D printing. Verkkoartikkeli. <http://www.protoparadigm.com/news-updates/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing/> . Luettu 11.12.2014.
- 18 Lempiäinen, Juhani & Savolainen, Jari. 1.Painos.2003. Hyvin suunniteltu - puoliiksi valmistettu. Hakapaino Oy. Helsinki
- 19 N20 motor.2015. Verkkodokumentti. <http://www.aliexpress.com/item/N20-MMini-12V-DC-200-RPM-High-Torque-Electric-Gear-Box-Motor-10PCS/529306644.html>. Luettu 3.1.2015.
- 20 Towerpro MG996R – Standard Servo.2014. Verkkodokumentti.
<http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/mg996r>. Luettu 18.12.2014.
- 21 Power HD HD-1501MG – Standard Servo. 2014. Verkkodokumentti.
<http://www.servodatabase.com/servo/power-hd/hd-1501mg>. Luettu 18.12.2014.
- 22 Towerpro SG90 servomotor.Sparkgo.2014.Verkkoartikkeli.
<http://datasheet.sparkgo.com.br/SG90Servo.pdf>. Luettu 18.12.2014.
- 23 Arduino mega 2560.2015. Verkkodokumentti
<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>. Luettu 4.1.2015.
- 24 Midas LCD.2015. Verkkodokumentti.
<http://au.element14.com/midas/mc21605c6wk-sptly/lcd-16x2-stn-black-on-green-euro/dp/2218958>. Luettu 18.12.2014.
- 25 Asfahl,C.Ray. 2.painos.1992. Robots and manufacturing automation. John Wiley & Sons Inc.
- 26 Dimension 768 User Guide. Stratasys. 2007. Manuaali.
<http://fab.cba.mit.edu/content/tools/dimension/Dimension%20768%20Elite%20User%20Guide.pdf>. Luettu 6.1.2015.

- 27 Solidworks.2014. Verkkodokumentti.
http://www.solidworks.com/sw/183_ENU_HTML.htm. Luettu 27.11.2014
- 28 Solidworks vision 2014+.2014. Verkkodokumentti. <http://tech-clarity.com/solidworks-vision-2014/3896>. Luettu 01.12.2014.
- 29 Midas LCD.2015. Verkkodokumentti.
<http://au.element14.com/midas/mc21605c6wk-sptly/lcd-16x2-stn-black-on-green-euro/dp/2218958>. Luettu 18.12.2014

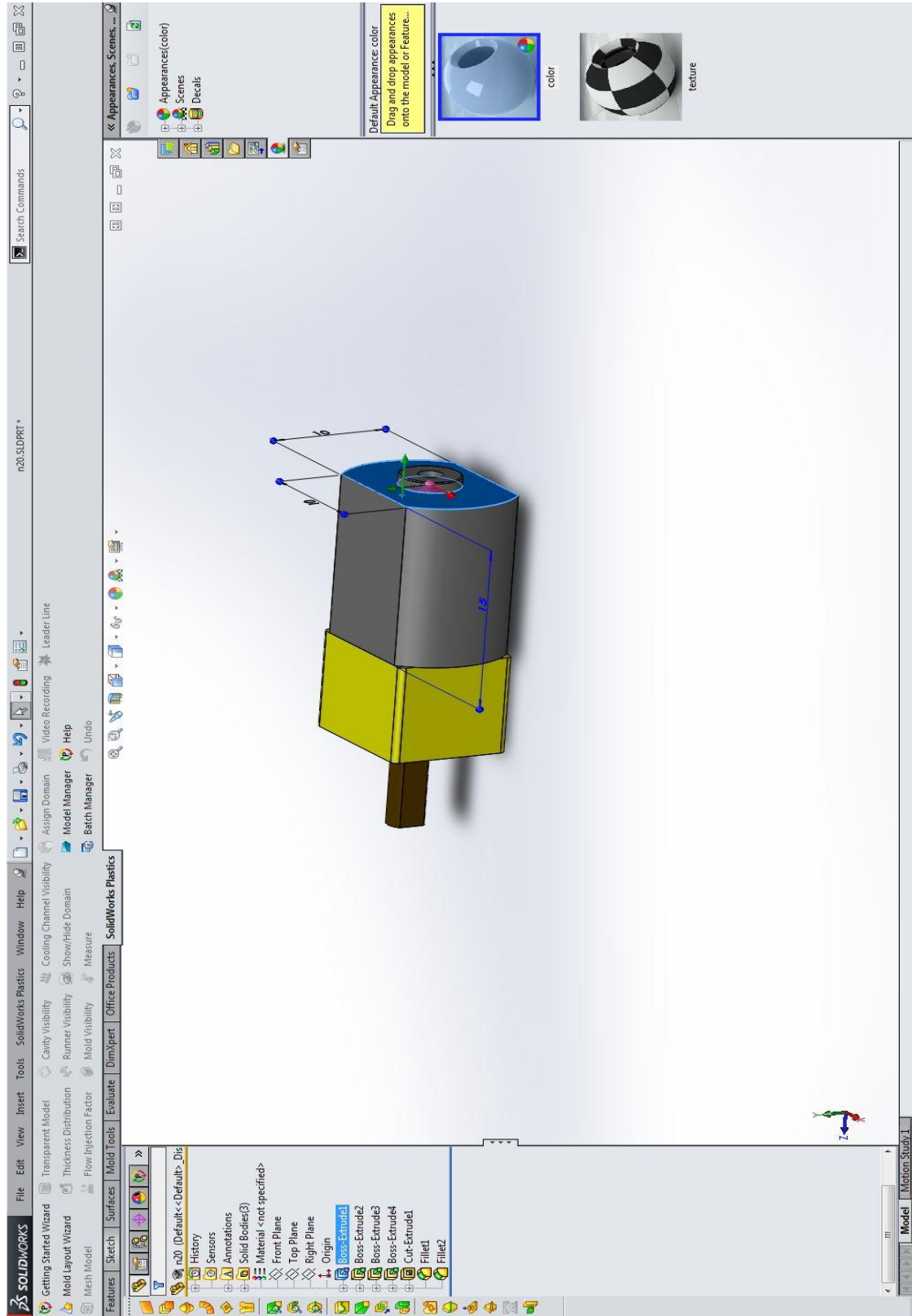
SG90-servomoottorin 3D-malli



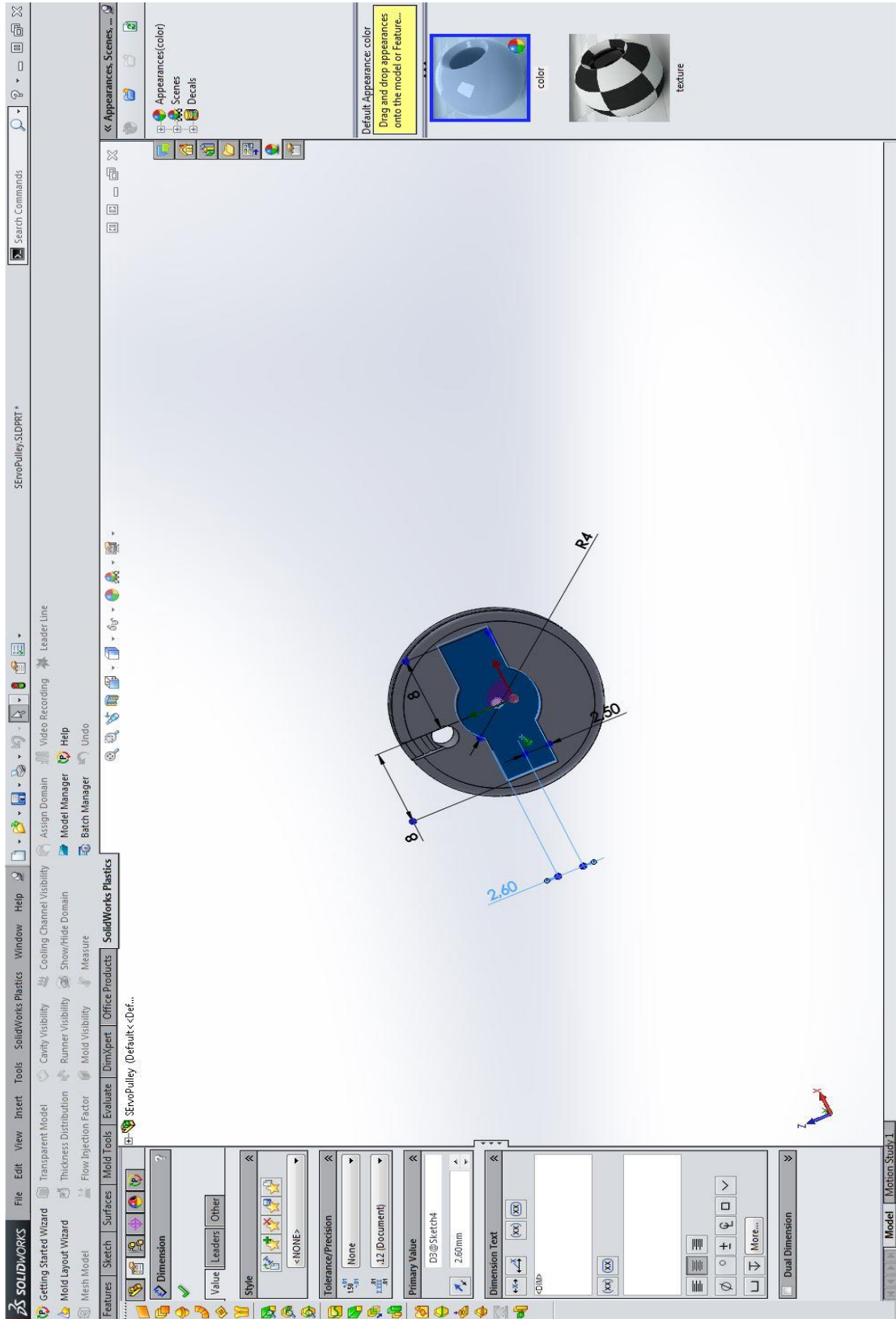
MG996R – servomootorin 3D-malli



N20-tasavirtamoottorin 3D-malli



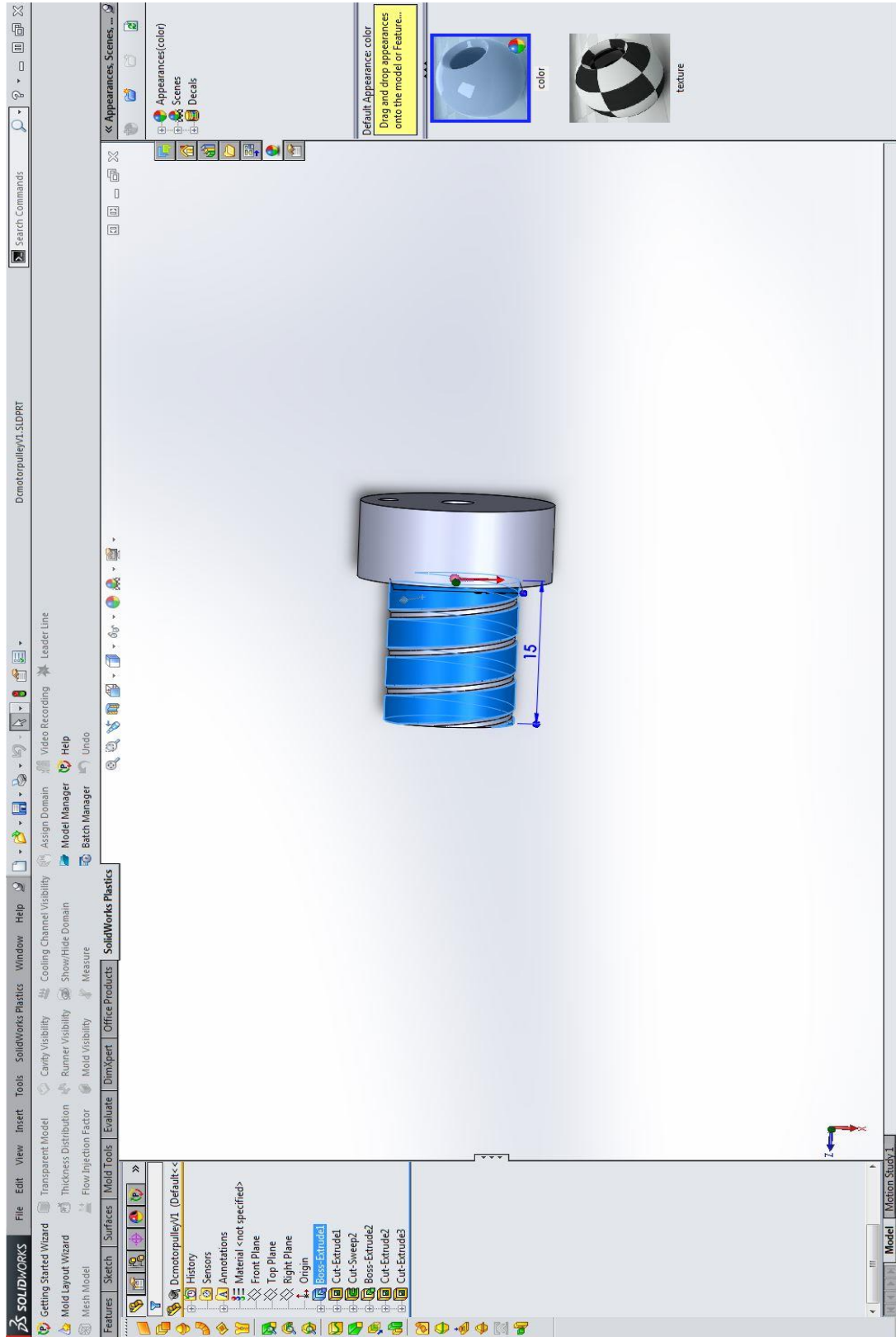
Servomoottorin vetopyörän 3D-malli



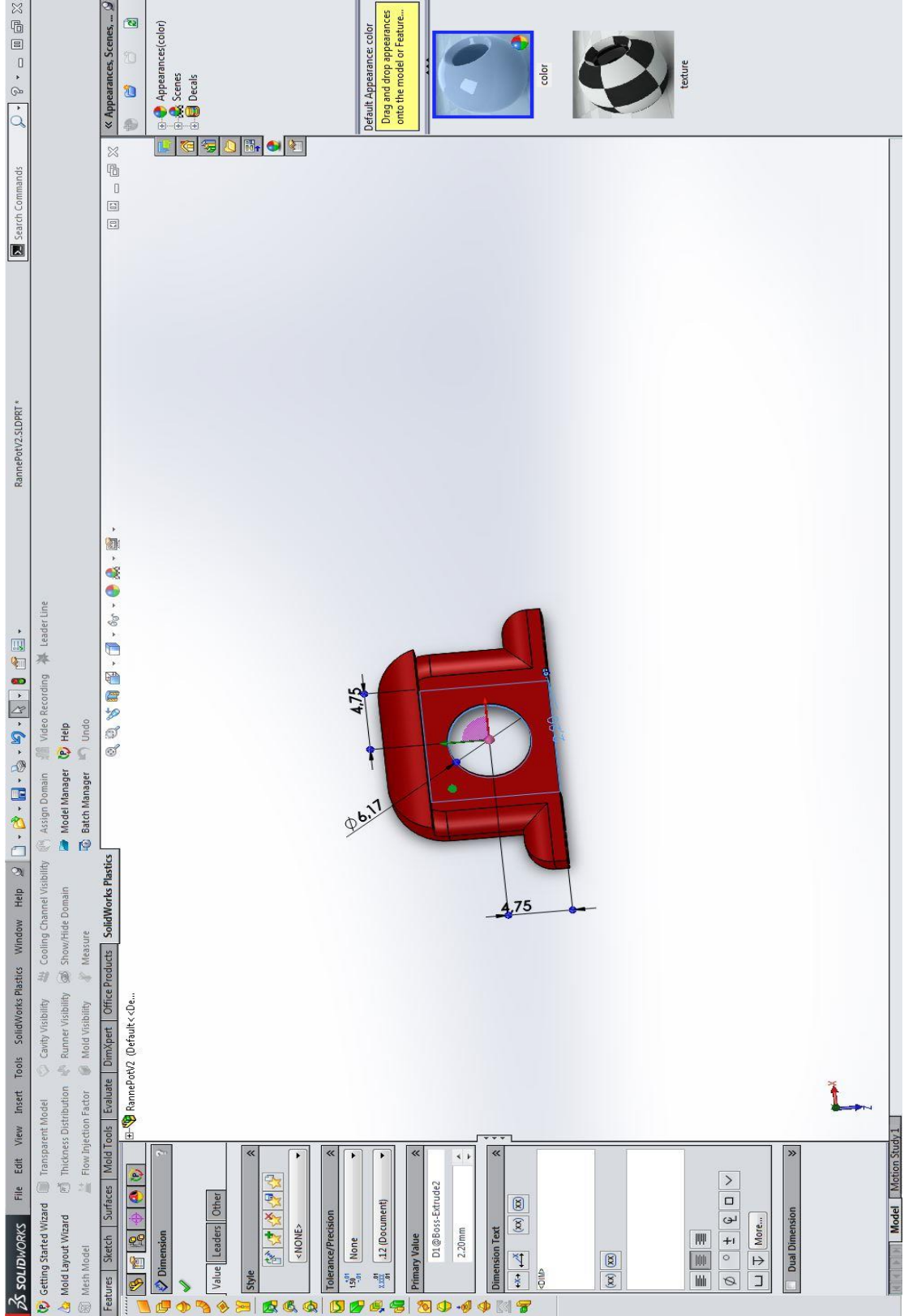
N20-tasavirtamoottorin pienen vetopyörän 3D-malli



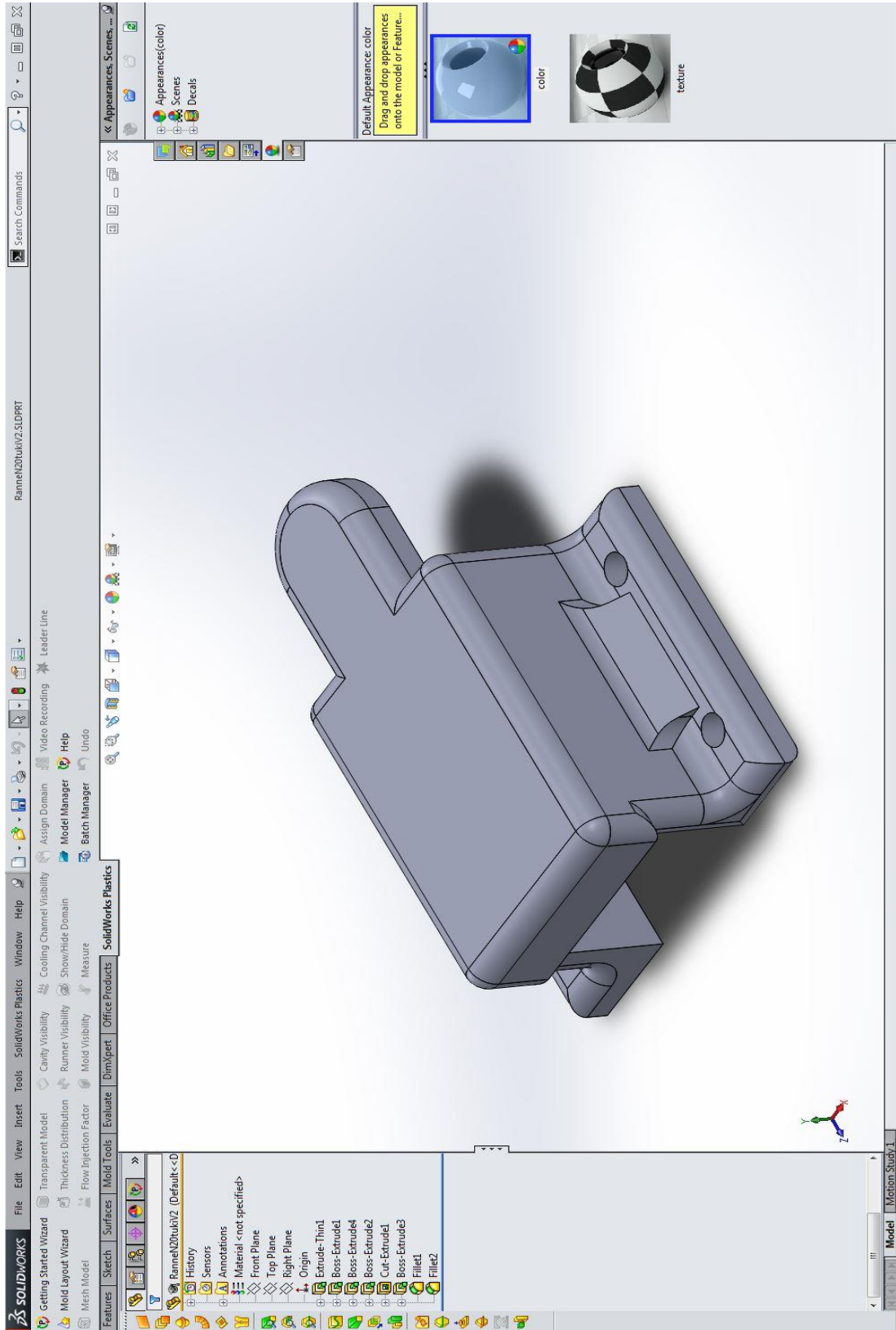
N20-tasavirtamoottorin ison vetopyörän 3D-malli



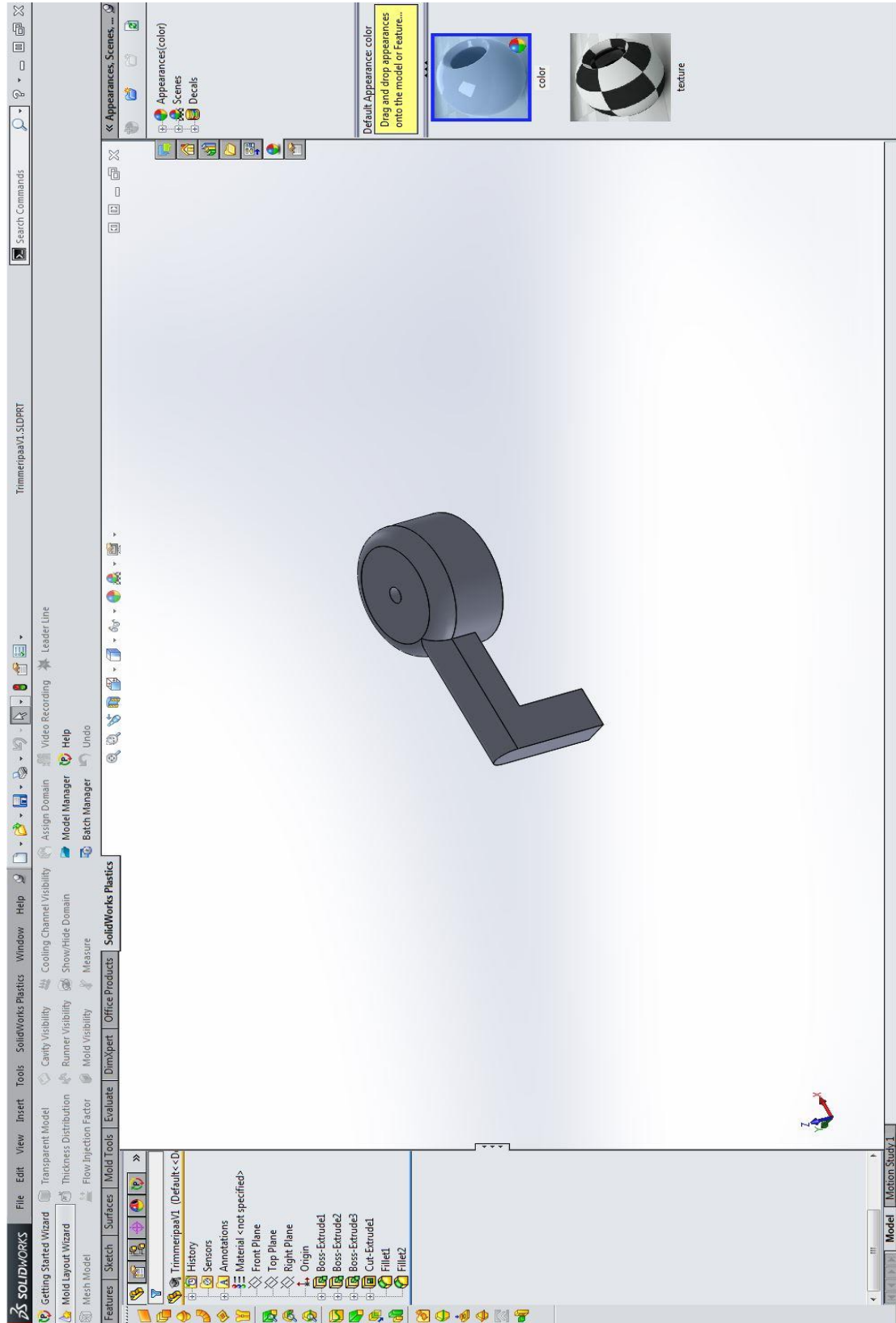
Potentiometrin pidikkeen 3D-malli



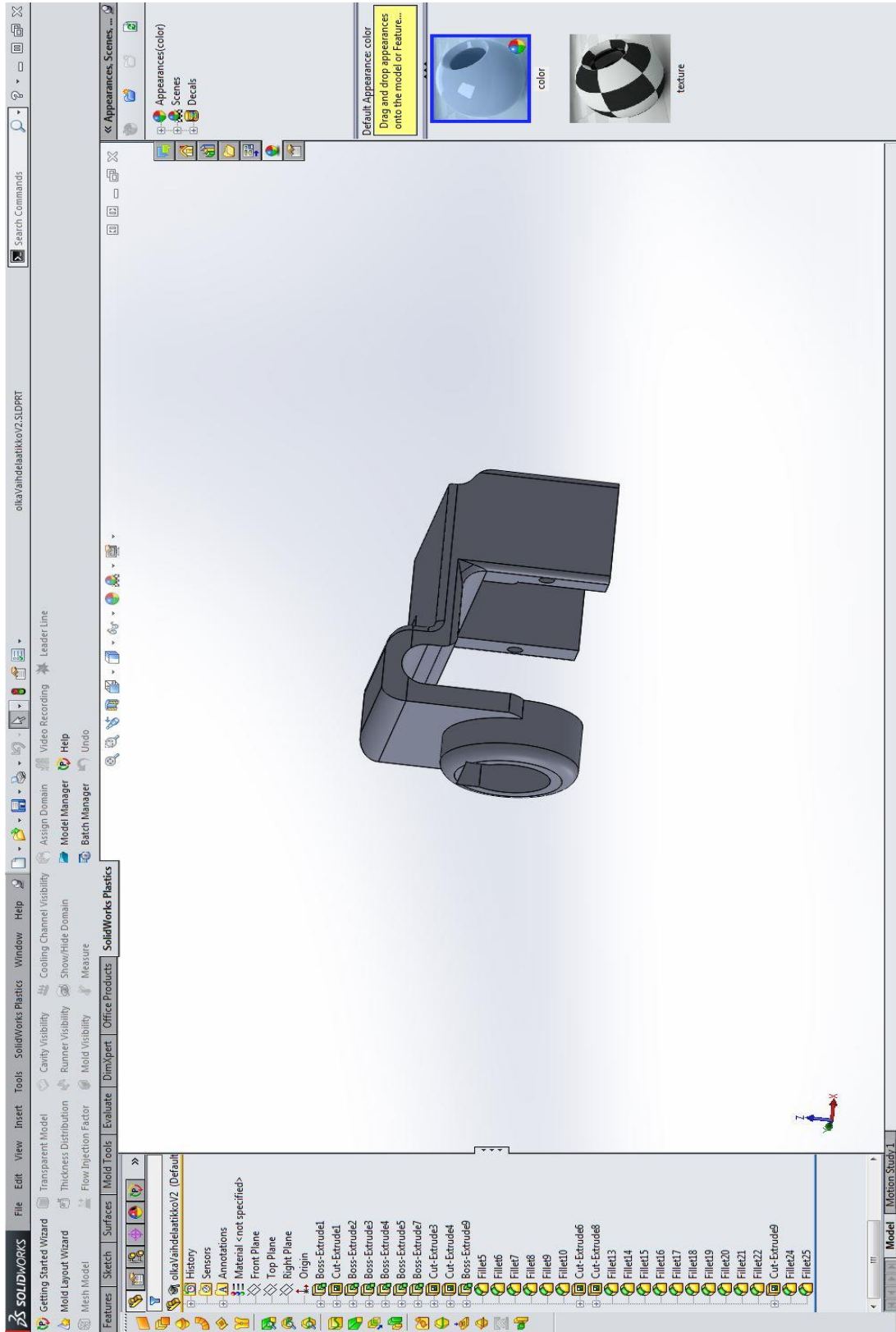
N20-tasavirtamoottorin kiinnittimen 3D-malli



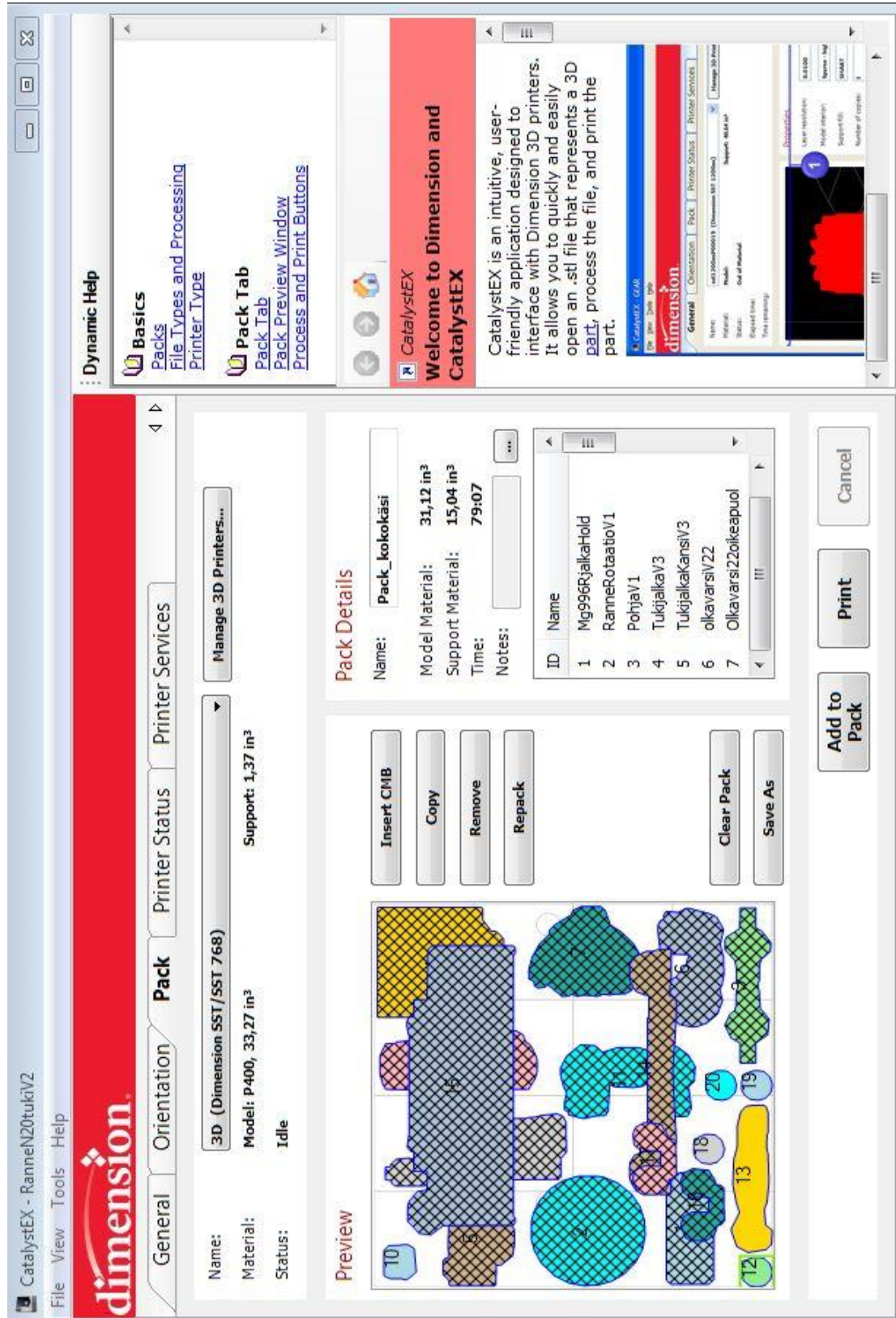
Kyynärnivelen trimmeripotentiometrin hatun 3D-malli



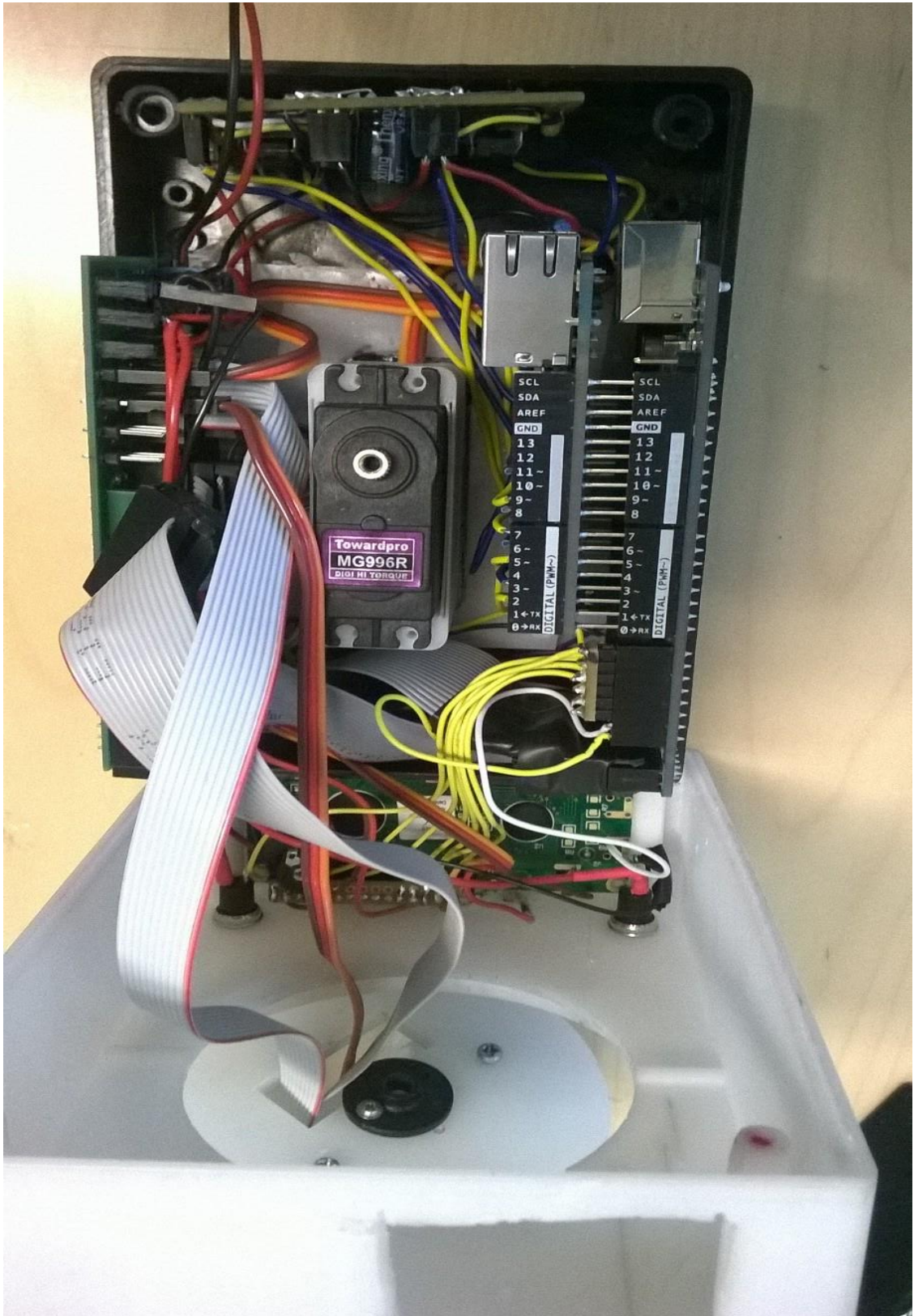
Servorotaation kiinnityskappaleen 3D-malli



Robottikäden 3D-tulostamistiedot



Kotelon kokoonpano



Kämmen servomootoreilla

