

VAATIVA 3D-MALLINNUS KÄYTÖSTÄ POISTETULLA KANNETTAVALLA TIETOKONEELLA JA AVOIMELLA OHJELMISTOLLA

Yleistä

Seuraavassa esittelen käyttökokemuksia vaativasta 3d-cad pintamallinnustyöstä, joka suoritettiin noin 11 vuotta vanhalla kannettavalla tietokoneella, käyttäen avoimen koodin Linux-käyttöjärjestelmää ja FreeCAD-ohjelmistoa.

Olen aina ollut jossain määrin vastaan loputonta laitteiden uusimista, joka tehdään usein pienten uudistusten vuoksi. Tästä syystä olen hakenut vaihtoehtoja, joilla voisi jatkaa käytettävien tuotteiden elinkaarta. Jos laitteiden elinkaarta voisi kasvattaa, niin tämä vähentäisi uuden tuotannon tarvetta ja voisi myös ohjata uusien laitteiden suunnittelun valintaperusteita pidemmän elinkaaren tuotteisiin. Tällä kaikella olisi myönteinen vaikutus kestävän kehityksen ja kiertotalouden päämäärien saavuttamiseksi. Mielestäni elinkaaren kasvattamiseen olisi seuraavia vaihtoehtoja:

1. Käyttöjärjestelmä ja käytettävät ohjelmistot täytyisi perustua avoimen lähdekoodin Linux / Unix -järjestelmiin, jolloin kaupalliset tekijät eivät olisi osaltaan vaikuttamassa yhteensopivuuteen ja tuotteen käyttöikään. **Suljetun lähdekoodin käyttöjärjestelmien ja ohjelmistojen päivitysten loppuminen usein päättää edelleen täysin toimivan laitteiston elinkaaren.**
2. Käytettävän kannettavan tietokoneen olisi oltava riittävän laadukas ja riittäväillä ominaisuuksilla ja suorituskvyyllä varustettu. Laitteita pitäisi olla myös hyvin saatavilla käytettyjen tietokoneiden markkinoilla. Avoimen lähdekoodin käyttöjärjestelmät ja ohjelmistot pitäisi olla yhteensopivia. Tämän perusteella sopivia laitteita olisivat esimerkiksi yritysten käytöstä poistetut kannettavat tietokoneet.

Haluan perustella edellisiä kohtia eli mitä etuja avoin teknologia tuo ja miksi vanhentuneet "business line" -tuotteet ovat hyvä ja varma vaihtoehto. Avoin teknologia on yhteisöohjattua tuotekehitystä ja usein yhteisöjen päämääränä on luoda pitkäikäistä ja uudelleenkäytettävää tekniikkaa ja ohjelmistoja. Tämä tukee kestävän kehityksen ja kiertotalouden päämääriä. Avoimen teknologian haasteita voivat aiheuttaa esimerkiksi puutteellinen tuotetuki ja dokumentointi sekä päivitysten ja kehitystyön epävarmuus pidemmällä aikavälillä. Tosin ainakin isoimmat yhteisöohjatut projektit ovat hyvin dokumentoituja ja varmalla pohjalla, koska ovat saavuttaneet jo paljon käyttäjiä ja kehittäjiä. Toisaalta kun on kysymys avoimesta teknologiasta, niin yhteisön hajotessa kuka vaan voi "forkata" eli ottaa koodin tai tekniikan käyttöön ja jatkaa kehitystyötä uuden yhteisön voimin. Eli projektien elinkaari on mahdollisesti hyvinkin pitkä, joka ei ole suljetun teknologian kaupallisissa yrityksissä niin itsestään selvää. Yritys voi esimerkiksi lopettaa toimintansa tai ajautua taloudellisiin vaikeuksiin. Tämän seurauksena tuotekehitys voi loppua ja tuotteiden käyttäjät jäävät vaille tukea. Kaupallisessa tuotekehityksessä on usein kyse immateriaalioikeuksien suojatusta suljetusta teknologiasta, joten tuotekehitys on hyvin vaikeaa jatkossa ulkopuolisille toimijoille. Esimerkki avoimen teknologian yhteisöstä:

<https://www.gnu.org/home.en.html>

Käytettävän tietotekniikan olisi hyvä olla riittävän laadukasta, joten kestävyys olisi sellaisella tasolla, että pidempi elinkaari olisi mahdollista. Tämä vaatimus toteutunee parhaiten ns. yritystason tuotteissa. Laitteita on valmistettu paljon ja niitä on hyvin saatavilla, joten

varaosasaatavuus ja korvattavuus samanlaisella tuotteella on helpompaa, kuin esimerkiksi lyhyen elinkaaren kuluttajaelektroniikkaa käytettäessä. Yritystason tietotekniikka on usein rakennettu standardi-rajapinnoilla ja vaikka varsinainen tuotantodokumentaatio ei ole saatavilla, niin takaisinmallinnuksen keinoin (reverse engineering) esimerkiksi ajureita on menestyksekkäästi toteutettu. Tästä syystä avoimien käyttöjärjestelmien asennus ja niiden käyttäminen tämän tyyppisissä laitteistoissa on helppoa.

On olemassa projekteja ja yhteisöjä, jotka kehittävät avointa teknologiaa rautatasolla ja jopa ihan mikropiirien tuotantoon saakka. Tällainen tuotekehitys on usein paljon kalliimpaa kuin ohjelmistotuotteiden kehittäminen ja työt vaativat erikoislaitteistoja, joten tästä syystä usein projektit pysähtyvät pääoman puutteeseen, vaikka muuten toiminta tukisikin hienosti kestävän kehityksen periaatteita ja olisi muutenkin ideologialtaan kannatettavaa.

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_open-source_hardware_projects

Tämän seurauksena avoimen raudan projektit ovat valitettavasti usein epävarmoja päivittäisessä käytössä ja sopivat paremmin harrastuskäyttöön ja tuotekehityksen tarpeisiin. Näitä projekteja tulisi kuitenkin tukea ja mikä olisi parempaa tukea kuin käyttää niitä uuden kehityksessä, protoilussa ja oppimisympäristöissä. Esimerkkeinä voisi mainita Arduino-ympäristön ja avoimeen rautaan perustuvan Linux-puhelimen tuotekehityksen, jota useat yhteisöt ovat yrittäneet. Näistä parhaiten mielestäni on pärjännyt PINE64-projekti, jonka Linux-puhelin on käytettävyydeltään päivittäiseen käyttöön soveltuva, vaikka jääkin edelleen jälkeen suurten kaupallisten toimijoiden laitteista.

<https://www.pine64.org>, <https://www.arduino.cc/>

Käytettävä laitteisto

Valitsin projektiin HP Elitebook 8470w kannettavan tietokoneen. Kone on yli 10 vuotta vanha, ensiesittely ja myynti alkoi vuonna 2012. Elitebook edustaa ajalleen tyypillistä ammattikäyttöön tehtyä kannettavaa tietokonetta. Projektissa käyttämäni laite oli vuonna 2012 ominaisuuksiltaan mallistonsa huipulla ja siinä on neliytiminen i7-3820QM 2,7GHz Ivy Bridge prosessori, 16Gb RAM muistia, erillinen ATI FirePro M2000 näytönohjain ja paikat kahdelle 2,5” kiintolevyille. Koneeseen on vaihdettu alkuperäisten pyörivälevyisten kiintolevyjen tilalle noin 6 vuotta vanhat 500Gb:n SSD-levyt. Koneen näyttö on 14 tuumaa ja 1600x900 resoluutioon kykenevä. Näytön kuvan laatu on riittävä, mutta jää selvästi jälkeen esimerkiksi uusimpien kannettavien tietokoneiden näytöistä. Lähinnäkin katselukulma on liian rajoittunut ja resoluutio voisi olla suurempi. Mutta mikä tärkeintä, koneen uudelleen käyttö tukee kestävän kehityksen periaatteita mallikkaasti ja sopii kurssin projektiin hienosti.

Käytettävä ohjelmisto

Päädyin käyttämään käyttöjärjestelmänä avoimen lähdekoodin Debian Linuxia, joka on muutaman vuoden vanha asennus SSD-levyllä ja ollut pöytäkoneessa käytössä. Linux ei vaatinut Elitebook:ssa suurempia säätöjä vaan näytönohjaimen ja wifi ajureiden päivitys riitti. Tein myös versiomuutoksen stablesta unstableksi, jolloin sain Debianin uusimmat ominaisuudet käyttöön. Asensin Libreoffice-toimistosovellukset, Meshlab ohjelman 3d-skannatun geometrian käsittelyyn ja katseluun sekä tietenkin FreeCAD 3d-mallinnusohjelman. FreeCAD:stä minulla on käytössä niin sanottu ”development”-versio, jossa on ohjelmiston uusimmat ominaisuudet käytettävissä. On olemassa pieni mahdollisuus, että puutteellisesti testattu ohjelmakoodi aiheuttaisi ongelmia, mutta mitään mainittavaa ei projektin aikana esiintynyt. FreeCAD ohjelmisto on erillisiin

add-in-moduuleihin perustuva ja erilaiset makrot ovat tyypillisiä, ohjelmistossa on myös mahdollista luoda omia funktioita esimerkiksi Python ohjelmointikielen avulla ja näin ollen FreeCAD on helposti mukautettavissa tuotekehityksen erilaisiin tarpeisiin. **Voit ladata käytetyt ohjelmat ja käyttöjärjestelmän seuraavien linkkien kautta:**

www.debian.org, www.freecad.org, www.meshlab.net ja www.libreoffice.org/

Käyttöönottokynnys

Avoimen koodin ohjelmistojen käyttöönoton kynnystä pidetään usein korkeampana kuin vastaavien kaupallisten ohjelmistojen ja tämä ainakin aikaisemmin on pitänyt paikkaansa. Tämä johtui siitä, että usein yhteisön ohjaamien projektien koordinointi oli usein puutteellista ja muutenkin kehittäjät tekivät ohjelmistoja omiin tarpeisiin ja omien mieltymysten mukaan. Kun kaupallista tuotetta ei oltu tekemässä, niin tuotteen menestyminen markkinoilla ei ollut tärkeä ja ohjaava kehityksen valintaperuste. Nykyisin ainakin isompien projektien tuotteet ovat suunniteltu käytettävyyttä edellä ja käyttöohjeet sekä muut dokumentaatiot löytyvät ja ovat hyvin laadittuja. Tosin edelleenkin pienemmät ja erikoisemmat avoimen lähdekoodin ohjelmistotuotteet ovat monesti alkeellisella tasolla, kun puhutaan käytettävyydestä ja ohjelman vaatimasta opetteluajasta, mutta ovat hyviä työkaluja moneen tarpeeseen.

FreeCAD on vaikeampi käyttää kuin vastaavat kaupalliset ohjelmistot, mutta Youtubesta esimerkiksi löytyy runsaasti laadukasta opetusmateriaalia, joten sieltä on hyvä aloittaa ominaisuuksien opettelu. Perinteinen yritä ja erehdy tyylinen ohjelman käyttäminen on myös hyvä tapa opetella ainakin perusasiat. Tilavuus-, pinta- ja ohutlevymallinnus periaatetasolla toimii kuin vastaavissa kaupallisissa ohjelmistoissa, joten jos 3d-mallintimet ovat tuttuja, niin tämä on iso apu FreeCAD:in kanssa mallintamisen aloittelussa. Toisaalta FreeCAD:in työkaluilla pystyy tekemään hyvinkin monimutkaisia asioita, koska kaikkea voi säätää ja kaikkeen voi vaikuttaa. Varsinaisia bugeja löytyi yksi vakavampi ja joitain satunnaisia kaatumisia tai jumittumisia tapahtui, jos yritti tehdä jotain, mikä ei ole mahdollista. Mainitsemani vakavampi bugi liittyy ohjelman OpenSCAD geometria-ytimen toimintaan ja on syvälle ohjelmointiin liittyvä jonkinlainen topologia virhe. Virhe aiheutuu kun reunaviivojen indeksointi piirretyn geometrian muutosten jälkeen menettää johdonmukaisuutensa ja muutkin piirteet voivat mennä tämän vuoksi sekaisin. Ongelmaa esiintyy ainakin pyöristysten ja viisteiden sekä skissiin lainatun geometrian käsittelyn yhteydessä. Ongelman voi oikealla mallinnustyön järjestyksellä kiertää, jolloin siitä ei ole sanottavasti haittaa. FreeCAD-yhteisö on ilmeisesti ohjelmoimassa omaa geometria-ydintä, jolloin tämäkin ongelma pitäisi olla ratkaistu tulevissa versiopäivityksissä. Seuraavassa kaksi hyvää Youtube videokokoelmaa FreeCAD:in käytön opiskeluun:

<https://www.youtube.com/@JokoEngineeringhelp>

<https://www.youtube.com/@MangoJellySolutions>

Mallinnustyön suorittaminen

Minulla on pitkäkö kokemus teollisen tason 3d-mallinnus- ja simulaatiojärjestelmistä ja olen käyttänyt useampia tunnettuja kaupallisia ohjelmistoja, tässä on muutama mainittuna: SolidWorks, Pro Engineer, Catia, GibbsCAM ja myös näihin liittyvät elementtimetelmään perustuvat FEM/FEA-simulaatiosysteemit ovat tuttuja.

Projektissa testasin 3d-skannatun koneenosan mallin tuomista FreeCAD:iin ja mallin hyödyntämistä referenssimittatietona uuden ja muutettavan osan suunnittelussa. Skannauksessa syntyneiden pistepilvien pohjalta laskettujen mesh-tiedostojen avaaminen

Linux ohjelmistoihin oli sujuvaa ja vailla mitään ongelmia. Käytin Meshlab-ohjelmaa mallien katseluun ja mittailuun ja FreeCAD-ohjelmaa varsinaiseen uuden suunnitteluun.

FreeCAD mahdollistaa tilavuusmallinnuksen, ohutlevysuunnittelun, pintamallinnuksen ja FEM/FEA-analyysit, lisäksi on saatavilla lukuisia erilaisiin erikoisempiin tilanteisiin soveltuvia lisäosia. Ja kuten aikaisemmin mainitsin, niin kaikki lisäosat ovat avoimen lähdekoodin lisensseillä julkaistuja.

Varsinainen periaatteellinen mallinnustyö ei poikkea juurikaan tunnettujen kaupallisten ohjelmistojen vastaavasta eli kaiken voi luoda parametrisesti muokattavaksi, mallinnushistoria säilyy ja assosiatiivisuus mittojen, piirteiden ja muiden mallinnusparametrian välillä on halutessa käytettävissä. Ohjelmisto on piirrepohjainen eli uutta 3d-geometriaa luodaan avaruuden eri pisteisiin sijoitettujen 2d-luonnosten avulla. Vertailin mallinnustyön kokemuksia Fusion 360 järjestelmällä tehtyyn työhön. **Katso myöhempanä olevat kokemukset ja kuvamateriaali töiden eri vaiheista.**

Vaikutukset kestäväen kehityksen näkökulmasta

Kun lähdemme pohtimaan kestäväen kehityksen näkökulmasta elektroniikkalaitteiden uudelleenkäyttöä, niin tärkeimpiä seikkoja on mielestäni käytettävyys ja monistettavuus sekä mahdollisuus elinkaariajatteluun eli järjestelmä olisi tulevaisuudessakin käytettävissä sekä päivitettävissä uudempiin systeemeihin. Tiedostoformaattien pitäisi olla avattavissa tulevaisuuden versioissa ja järjestelmissä. Tiedostoformaateissa olisi tämän vuoksi hyvä suosia avoimia ja mahdollisimman monien järjestelmien kanssa yhteensopivia muotoja. FreeCAD projekti on ollut olemassa yli 20 vuotta, yhteisö on aktiivinen, laaja ja asiantunteva sekä tuetut tiedostoformaatit ovat hyvin valittuja. Joten voisin olettaa, että järjestelmä on varmalla pohjalla ja käytettävissä pitkälle tulevaisuuteen.

Tässä projektissa arvioin ensisijaisesti järjestelmän käytettävyyttä, koska käytettävyys lähtökohtaisesti ratkaisee sen otetaanko järjestelmä käyttöön laajemmin ja käytetäänkö järjestelmää vuodesta toiseen siirtymättä toisiin systeemeihin. Jos haluaisimme vaikuttaa kestäväen kehityksen näkökulmasta maapallon tilanteeseen, niin meidän olisi löydettävä mahdollisimman laajalle ihmisjoukolle monistuvia ja skaalautuvia järjestelmiä, jolloin vaikutus tuotteiden ja materiaalien virtoihin olisi muutakin kuin marginaalinen.

Mahdolliset kustannussäästöt

Projekti antoi mahdollisuudet pohtia, onko kustannussäästöt mahdollisia käyttämällä vanhoja kannettavia työasemia uudelleen ja jatkamalla niiden elinkaarta avoimilla ohjelmistoilla. Nykyaikainen pienten ja keskisuurten yritysten käyttöön räätälöity 3d-mallinnusohjelmisto maksaa noin 7500-10000 euroa ja siihen täytyisi vielä lisätä vuosittainen ylläpito 2500 euroa. Lisäksi tulisivat henkilöstön koulutukset, tämä tosin olisi edessä myös FreeCAD:iä käytettäessä. Raskaaseen käyttöön soveltuva uusi mobiilityöasema maksaa noin 2500-4000 euroa ja FreeCAD käyttöön riittävän työaseman saa noin 500 euron hinnalla. Tästä päätellen kustannussäästöt voivat olla mahdollisia, joten mahdollisesti vanhan elektroniikan ja avoimien ohjelmistojen käyttö olisi kestäväen kehityksen mukaista. Ehkä tällä tavoin voisi olla mahdollista lisätä palveluiden myyntiä yrityksille ja toisaalta vähentää tuotteiden ja materiaalien virtoja.

Yleisesti ajateltuna, jos laajassa mittakaavassa tuotteiden elinkaaret jatkuvat, niin seurauksena voi olla tuotantolaitosten kapasiteettien väheneminen ja työttömyys. Tämän seurauksena tehtaat ja tuotantolaitokset voisivat erikoistumisen sijaan keskittyä

laajentamaan tuotantomahdollisuuksia eli sama tehdas voisi tuottaa laajempaa tuotevalikoimaa. Tosin poliittiset päätökset ja markkinatalouden mekanismien muuttaminen olisi myös välttämätöntä, kuten se lienee välttämätöntä muutenkin ilmastonmuutoksen torjunnassa.

Sopiiko periaate muille laitteille

Projektin myötä heräsi kysymyksiä, voisiko kuvatuslaista menetelmää käyttää muidenkin elektroniikkatuotteiden elinkaaren jatkamiseksi. Tässä vaiheessa olisi syytä myös mainita, että suositut pelikonsolit, esimerkiksi Playstation ja Xbox, ovat huomattavasti pidempään käyttökelpoisia. Tämä ehkä johtunee siitä, että näiden laitteiden myyntimäärät jäävät pienemmiksi kuin esimerkiksi mobiililaitteiden vastaavat, jolloin ansaintalogiikka on painottunut palveluiden, pelien ja sovelluskauppojen suuntaan. Ohjelmoijat ottavat raudasta kaiken hyödyn irti ja näin jopa 10 vuoden elinkaari on mahdollinen.

Kannettavat tietokoneet, puhelimet ja tabletit ovat eniten tuotettuja elektroniikkalaitteita ja valmistajat ohjaavat kuluttajia uusimaan laitteensa lopettamalla käyttöjärjestelmä- ja tietoturvapäivitykset. Tietokoneissa Linux- ja BSD-käyttöjärjestelmät ovat tietoturvallinen tapa jatkaa laitteen käyttöikä. Linux / Unix graafiset käyttöliittymät ovat kevyempiä, joten ne toimivat sujuvammin vanhoissa laitteissa kuin esim. Windows tai Mac OS ja sovellusvalikoima on vähintäänkin riittävä.

Esimerkiksi puhelimet ja niiden kamerat ovat olleet jo vuosia vaativaankin käyttöön riittävän tehokkaita ja niidenkin elinkaaren määrittelee kuinka kauan on saatavilla käyttöjärjestelmä- ja tietoturvapäivityksiä. Akkujen elinikä on rajallinen, mutta useimpiin malleihin lienee akun vaihto mahdollinen ja tähän mahdollisesti tuleva EU-laki lupaa helpotusta eli akun tulisi olla ilman työkaluja vaihdettava.

<https://muropaketti.com/mobiili/mobiiliuutiset/eu-antoi-vihreaa-valoa-saatelyle-joka-tekee-puhelimien-akuista-kayttajien-itse-vaihdettavia/>

Monien Android puhelinmallien elinkaarta voi jatkaa asentamalla avoimen Android version, joko Googlen palveluilla ja sovelluskaupalla varustettuna tai ilman Googlea. Minulla on vuosia käyttökokemusta OnePlus- ja Google Pixel-puhelimien käytöstä avoimella Androidilla ja käyttökokemukset ovat hyvin myönteisiä. Avoimia AOSP-projektin pohjalta kehitettyjä Android käyttöjärjestelmiä on saatavilla esimerkiksi seuraavien yhteisöjen sivuilta:

<https://lineageos.org> tai <https://grapheneos.org>

Kuluttajien kannattaisi jo ostopäätöstä tehdessään ottaa huomioon, että laitteen rauta on sopivaa avoimien järjestelmien asentamiselle. Monet valmistajat ikävä kyllä tekevät esimerkiksi biosit ja bootloaderit niin vaikeiksi konfiguroida ja avata, että avoimien järjestelmien avulla elinkaaren jatkaminen ei ole helppoa. Myöskin laitteisto saattaa vaatia sellaisia laiteajureita, joita ei ole saatavilla avoimille käyttöjärjestelmille. Tähänkin voi olla luvassa mahdollisia parannuksia tulevien EU-lakien myötä.

FreeCAD ja HP Elitebook verrattuna Fusion 360 ja Macbook Pro 15”

Seuraavassa on vertailua kahdesta saman tyyppisestä työstä, joista toinen on tehty FreeCAD -järjestelmällä ja 11 vuotta vanhalla HP Elitebook mobiili-työasemalla ja toinen on tehty kaupallisella ja pilvilaskentaan perustuvalla Fusion 360 -järjestelmällä ja uudehkolla Macbook Pro 15” kannettavalla tietokoneella. Macbook on laadukas ja siinä on erittäin hyvä ja tarkka näyttö ja paljon laskentatehoa. Macbook Pro on kuvankäsittelijöiden ja muiden 3d-ohjelmistojen käyttävien ammattilaisten suosiossa.

Esimerkkien pintamallinnustyöt ovat vaatimustasoltaan vertailukelpoisia ja mittaavat hyvin järjestelmien käyttökelpoisuutta. Lähtökohtana molemmissa töissä on 3d-skannattu geometria ja stl-formaatissa oleva mesh-malli. Mallit ovat polttomootorin ilman saantiin liittyviä koneenosia ja skannattujen mallien perusteella saadaan referenssitietoa olemassa olevan kappaleen muotoilusta ja malleihin tehdään ilman virtauksia optimoivia parannuksia muokkaamalla pintojen muotoja. Varsinaista CFD-analyysiä ei tällä kertaa tehty, mutta mahdollisesti ainakin FreeCAD:iin olisi tällaisen laskennan vaatima lisäosa saatavilla.

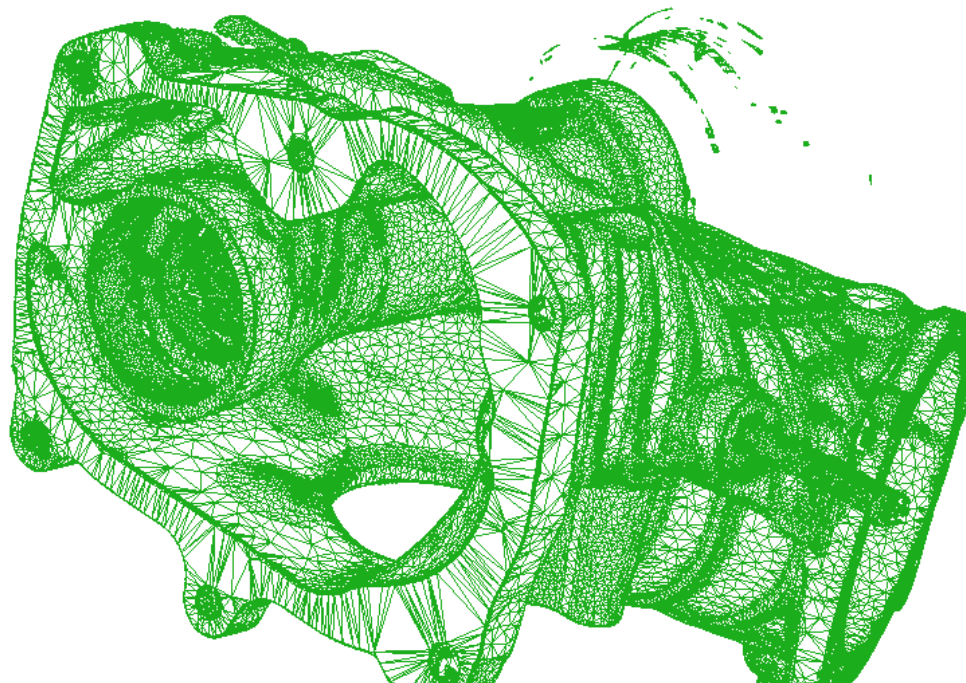
Molemmilla järjestelmillä työt sujuivat mallikkaasti kun oikea työtapo oli alkuun kokeiltu. FreeCAD toimi nopeasti ja varmasti HP:ssa, ainoastaan jotkin vaikeat laskentaoperaatiot, joita ohjelmisto ei pystynyt jollain lähtöarvoilla suorittamaan jumittivat järjestelmän ja vaati ohjelman uudelleenkäynnistyksen. Jumittumisen aikana toimi tallennus, joten mahdollisia tallentamattomia työvaiheita ei menetetty. Fusion 360 oli pilvipohjaisena riippuvainen internet-yhteydestä ja palvelimen kuormitustasosta, jotka molemmat aiheuttivat satunnaista, kieltämättä hieman rasittavaa hidastelua.

Kokemuksieni mukaan, molemmat ohjelmistot soveltuvat kaupalliseen käyttöön ja ammattimaiseen mallinnukseen. FreeCAD vaatii enemmän opettelua ja säätöä, mutta toimii nopeasti vanhemmissakin tietokoneissa ja on tarvittaessa asennettavissa Windows, Linux ja mac OS -järjestelmiin. FreeCAD-projektin kehitystyön uusimmalla versiolla 0.21 pystyy tekemään kaikki tarvittava vaativissakin mallinnuksissa. Vaikka ohjelmiston sivuilla varoitetaan mahdollisista kehitystyön keskeneräisyyden aiheuttamista ongelmista, niin en havainnut ongelmia päivittäisessä käytössä. Fusion 360 vaatii hyvän nettiyhteyden ja uudehkon tietokoneen, on myös muistettava kaupallisessa käytössä Fusionin noin 70 euron suuruinen kuukausimaksu, mutta **harrastelijoille, opettajille ja opiskelijoille ohjelmisto on maksuton (ei kaupallisessa käytössä)**. Kustannus on pienehkö, kun verrataan sitä esimerkiksi suosittujen Inventor tai SolidWorks-ohjelmiston hankintahintaan ja vuotuisiin ylläpitokuluihin. Olisiko maksullisten ohjelmistojen tulevaisuuden kehitys menossa kuukausimaksullisiin käyttöoikeuksiin ja pilvilaskentaan. FreeCAD ei pyri visuaalisesti fotorealistiseen ja raskaaseen grafiikkaan kuten Fusion 360, mutta FreeCAD:in 3d-pintojen laatu on virheetöntä diagnostiikkaohjelmilla tutkittaessa ja ne avautuvat vaivatta muihin järjestelmiin. **Katso tämän raportin lopusta vertailevaa kuvamateriaalia!**

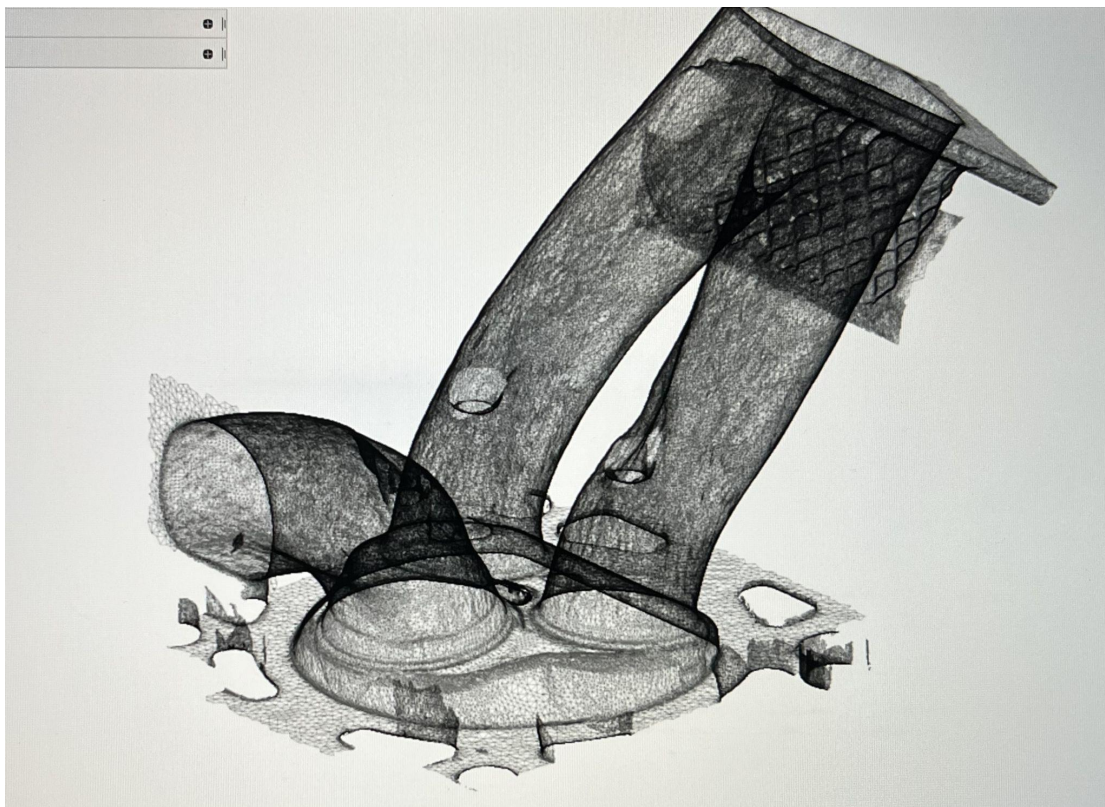
<https://en.wikipedia.org/wiki/FreeCAD>, https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_360
<https://www.freecad.org/index.php>, https://wiki.freecad.org/Release_notes_0.21
<https://www.autodesk.fi/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Johtopäätökset

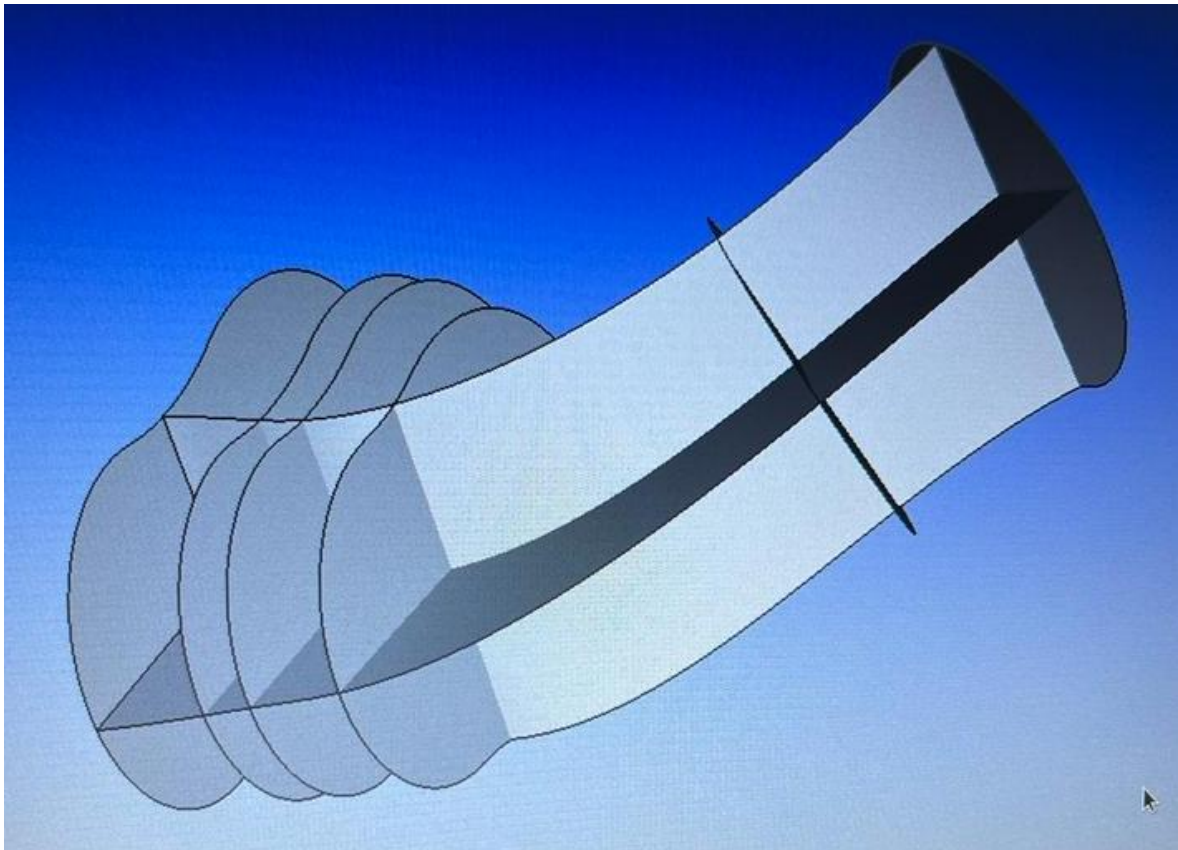
Mielestäni tässä esitetyn tyyppinen FreeCAD 3D-mallinnus järjestelmän toteutus, joka perustuu käytöstä poistettuun elektroniikkaan ja avoimeen ohjelmistoympäristöön, osoittautui toimivaksi ja hyväksi vaihtoehdoksi vaativaankin käyttöön. Opetteluun ja järjestelmän säätöön todennäköisesti täytyisi varautua ja tämän vuoksi voisikin olla mahdollista toteuttaa lisäksi kestävä kehityksen periaatteisiin sopivaa koulutuspalveluita tuottavaa liiketoimintaa. Kiertotalouden yksi perusperiaate on tuottaa palveluita, ei omistaa ja hankkia uutta. Tarkemmat pidemmällä aikavälillä tehtävät tutkimukset voisivat antaa kuitenkin paljon lisätietoa kulurakenteista, systeemin tehokkuudesta ja näin vakuuttaa käyttäjiä ottamaan tekniikkaa laajempaan käyttöön. **Mikä tärkeintä, mielestäni kokeiltu systeemi on lupaava ja sopii hyvin kestävä kehityksen ja kiertotalouden mukaiseen ajattelumalliin.**



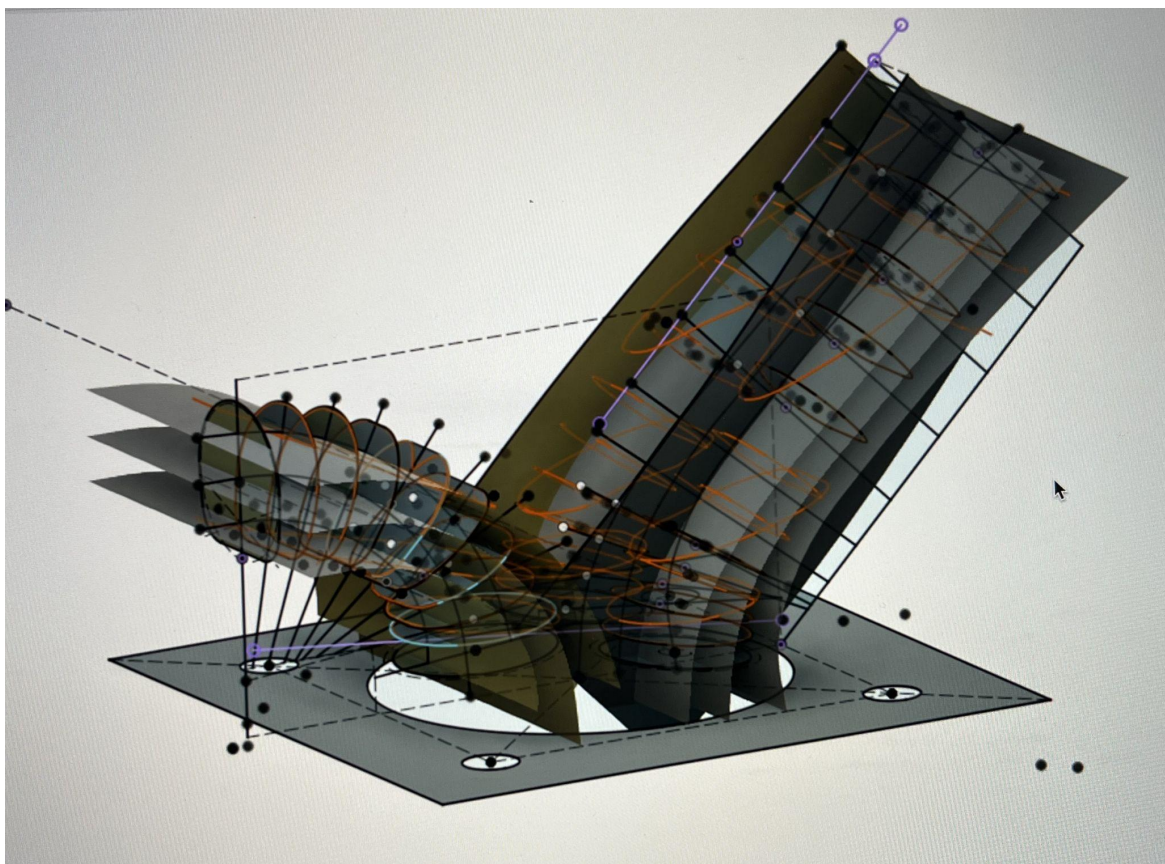
FreeCAD, lähtökohtana 3d-skannattu malli



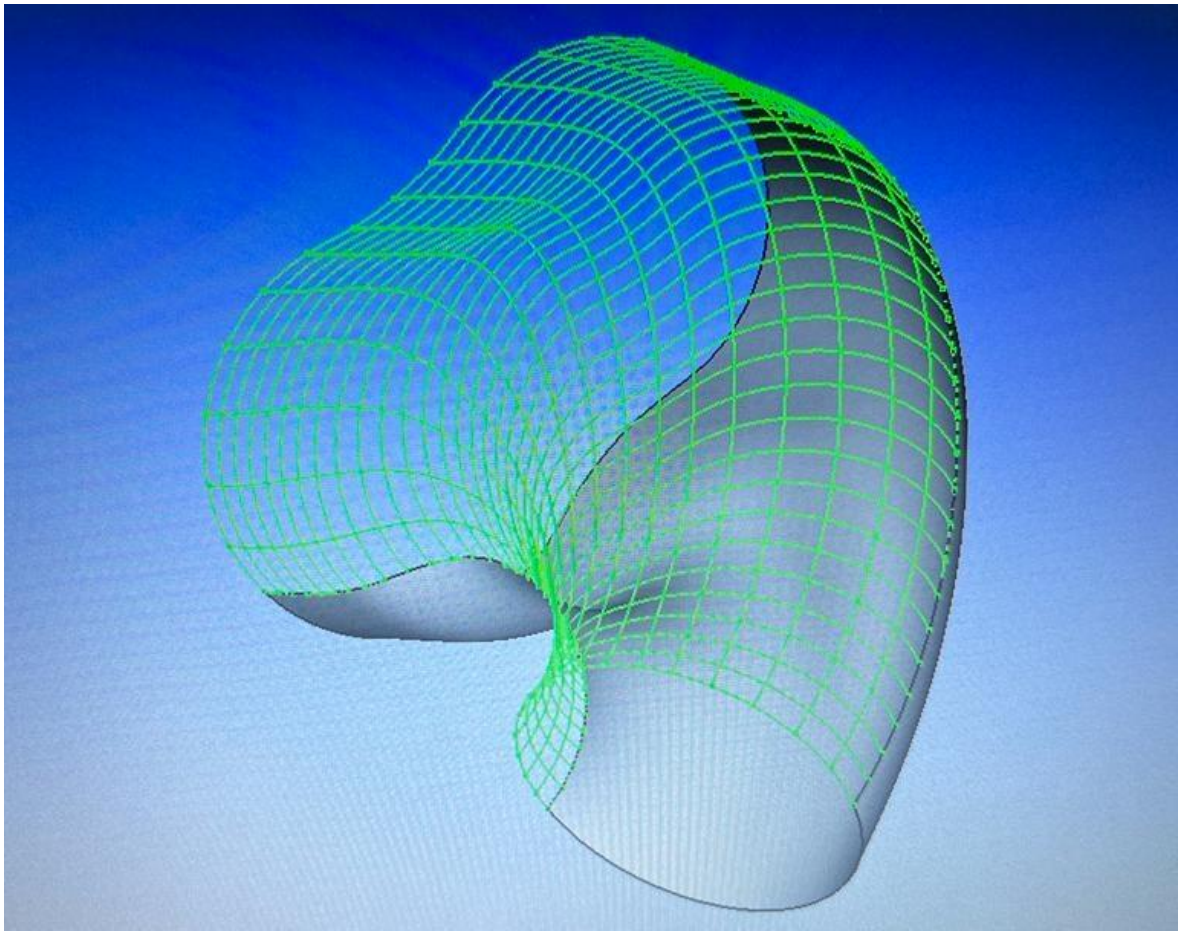
Fusion 360, lähtökohtana 3d-skannattu malli



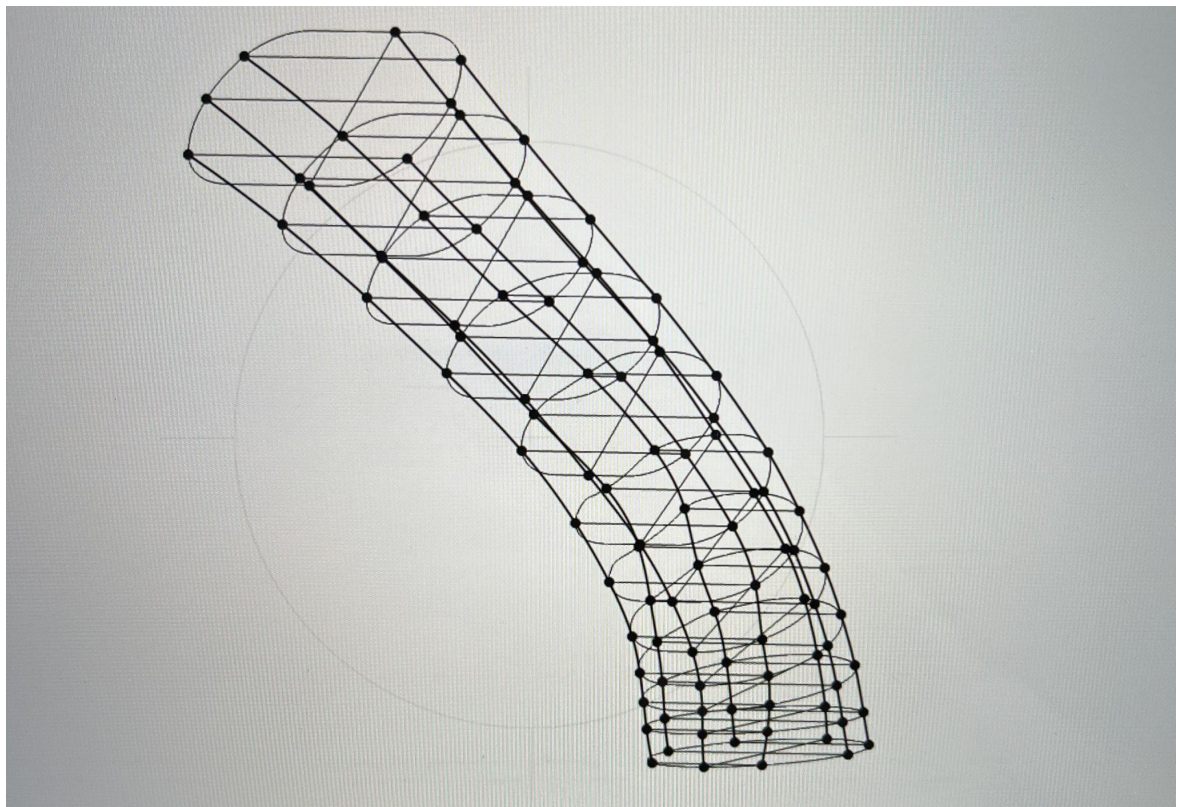
FreeCAD, muodon poikkileikkauksien valmistelua



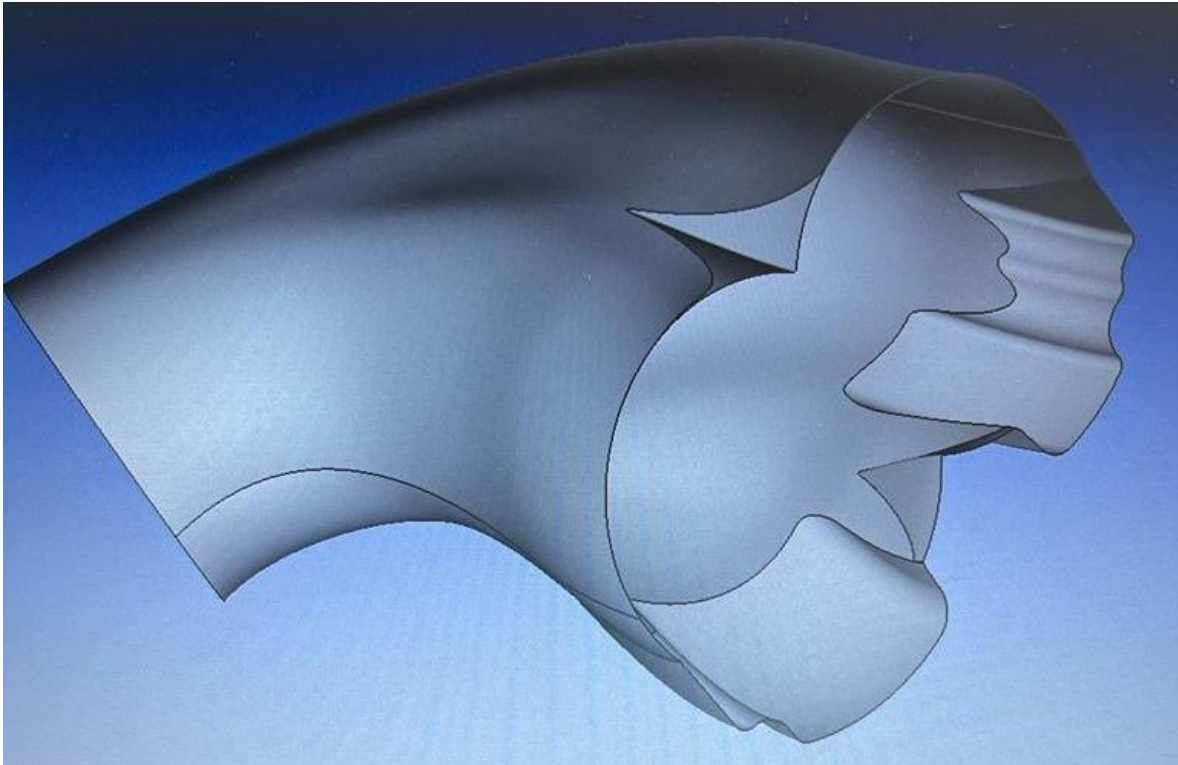
Fusion 360, muodon poikkileikkauksien valmistelua



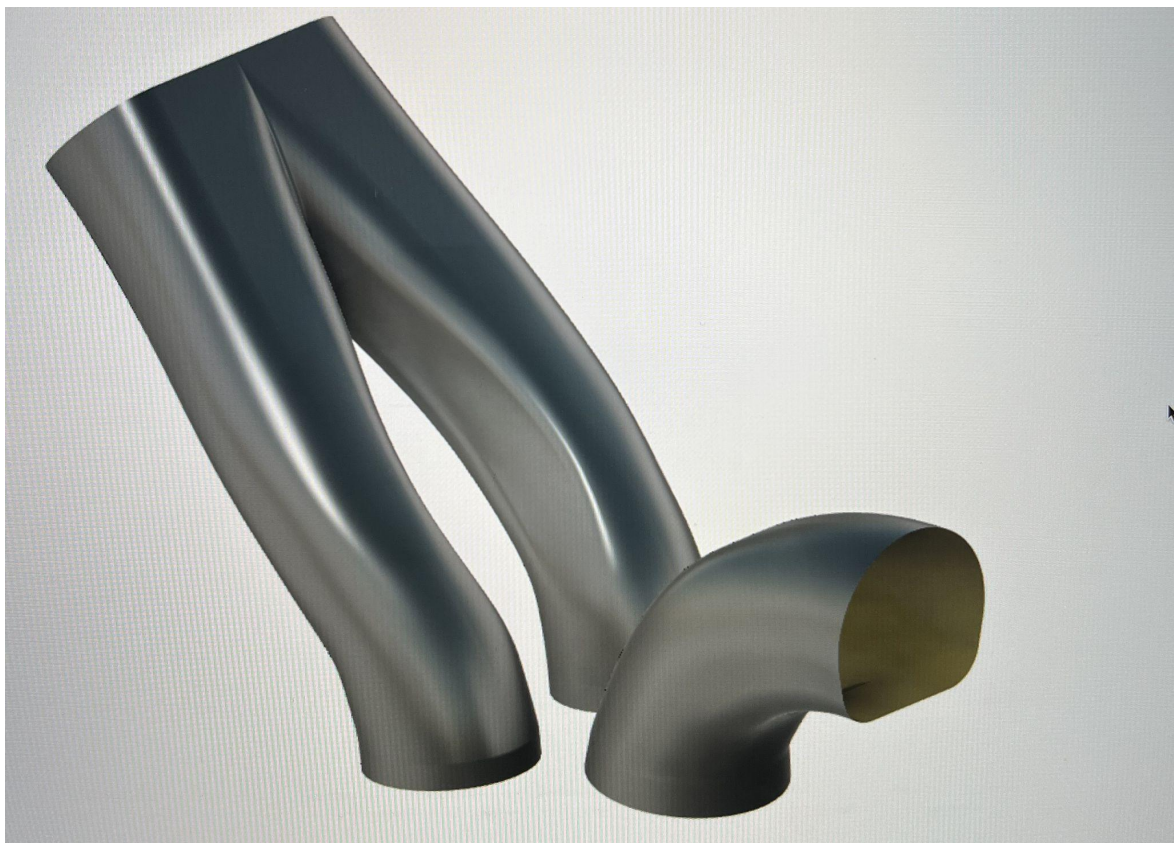
FreeCAD, pintamallinnusta curves-workbench gordon-surface työkalulla



Fusion 360, pintamallinnusta rautalankamallin perusteella loft-surface työkalulla



FreeCAD, valmis paranneltu pintamalli



Fusion 360, valmis paranneltu pintamalli