

Antti Kokko

Formula Student -kilpa-auton
rungon valmistustarkkuuden todentaminen
3D-skannauksen avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Autoinsinööri
Auto- ja kuljetustekniikka
Insinöörityö
16.10.2012

Tekijä(t) Otsikko	Antti Kokko Formula Student -kilpa-auton rungon valmistustarkkuuden todentaminen 3D-skannauksen avulla
Sivumäärä Aika	30 sivua + 2 liitettä 16.10.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Tuntiopettaja Pasi Oikarinen
<p>Insinööriyössä tarkastellaan Formula Student -sarjassa kilpailevan HPF011-kilpa-auton rungon valmistustarkkuutta 3D-skannauksen avulla. Työn tarkoituksena on etsiä putkirungon valmistuksessa syntyneitä valmistusteknisiä virheitä.</p> <p>Työssä selvitetään myös, miten virheet ovat mahdollisesti aiheutuneet ja miten ne vaikuttavat auton ominaisuuksiin. Kun virheiden aiheuttajat on saatu selville, pystytään samankaltaisten virheiden tekemistä välttämään seuraavien runkojen valmistus- sekä suunnitteluvaiheissa.</p> <p>Putkirungon valmistuksessa syntyneitä poikkeamia tarkastellaan vertaamalla digitoitua mallia suunniteltuun CAD-malliin. Työssä käydään läpi digitointitapahtuman eri vaiheet, sekä esitetään kuinka digitoidun mallin vertaaminen suunniteltuun CAD-mallin tapahtuu.</p> <p>Lisäksi työssä esitellään 3D-skannauksen ja optisen mittaamisen peruseriaatteita sekä esitellään pääpiirteittäin saksalaisen GOMin valmistamia mittalaitteita, joilla formula-auton rungon mittaus on suoritettu.</p> <p>Työn tuloksena rungosta saatiin tietokoneelle mittatarkka 3D-malli, jota CAD-malliin vertaamalla tutkittiin valmistusvirheitä. Rungosta löytyi muutamia selviä valmistuksessa syntyneitä poikkeamia. Myös poikkeamien aiheuttajat pystyttiin kartoittamaan. Poikkeamien vaikutukset auton ominaisuuksiin todettiin kuitenkin verrattain pieniksi.</p>	
Avainsanat	3D-skannaus, digitointi, optinen mittaustekniikka

Author(s) Title	Antti Kokko Verification of Fabrication Accuracy of the Frame for a Formula Student Race Car with 3D-scanner
Number of Pages Date	30 pages + 2 appendices 16 Oct 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Pasi Oikarinen, Lecturer
<p>Fabrication accuracy of the frame of a HPF011 race car, which participates in the Formula Student race series, was verified with 3D-scanner in this Bachelor's thesis. The aim of this thesis was to find errors that occurred during the fabrication process.</p> <p>How the errors occurred and what their effects on the car were, is also analyzed in this thesis. When the sources of failures are found, errors can be avoided when designing and fabricating a new frame.</p> <p>Deviations which occurred during the fabrication process of the tubular frame were inspected by comparing the digitized model to the CAD-model. This thesis describes the various steps of the digitizing process and presents how comparison between the digitized model and the CAD-model is carried out.</p> <p>In addition, the basic principles of 3D-scanning and optical measuring are presented in this thesis. Also measuring devices made by the German GOM, which was used to measure the frame of the Formula car, are presented in the outline.</p> <p>As a result of this thesis an accurate 3D computer model was created and it was compared to the CAD-model. There were few clear deviations on the frame which had occurred in the fabrication process. The sources of deviations were also clarified. However, the effects of the deviations on the car were comparatively small.</p>	
Keywords	3D-scanning, digitizing, optical measurement technique

Sisälllys

1	Johdanto	1
2	Mittalaitteet	3
2.1	ATOS Triple Scan II -3D-skanneri	3
2.1.1	Toimintaperiaate	3
2.1.2	Kolmiomittaus	5
2.2	TRITOP	7
2.2.1	Toimintaperiaate	7
2.2.2	Fotogrammetria	8
2.2.3	Stereonäkö ja stereokuva	10
3	Rungon mittaus	11
3.1	Digitointi	12
3.2	Skannauksen vertaaminen CAD-malliin	15
4	Tulokset	18
4.1	Runko	18
4.2	Alustapisteiden tarkastelu	22
4.3	Jousituksen keinuvivut	24
5	Yhteenveto	27
	Lähteet	29
	Liitteet	
	Liite 1. Rungon mittaraportti	
	Liite 2. Linkkujen mittaraportit	

1 Johdanto

Formula Student on yliopistojen ja ammattikorkeakoulujen välinen kilpasarja. Kilpasarja on saanut alkunsa 1970-luvun lopulla, jolloin Amerikan autoinsinöörien järjestö kehitti USA:n yliopistojen autotekniikan opiskelijoille kilpailun, jossa opiskelijoiden on tarkoitus suunnitella ja rakentaa yksipaikkainen formulatyypinen kilpa-auto. Kilpailuluokan nimi oli aluksi SAE Mini Indy. Myöhemmin nimeksi tuli nykyinkin Yhdysvalloissa käytössä oleva Formula SAE. Vuosituhannen vaihteessa kilpailuja alettiin järjestää myös Pohjois-Amerikan ulkopuolella. Euroopan suurimmat kilpailut ovat Formula Student (FS) Englannissa sekä Formula Student Germany (FSG) Saksassa. Kilpailussa arvostellaan auton nopeuden lisäksi myös opiskelijoiden tekemiä teknisiä ratkaisuja sekä markkinoinnin ja kustannuslaskennan osaamista. Vuodesta 2000 lähtien Formula Studentin suosio on kasvanut maailmalla räjähdysmäisesti. Koko maailmassa on nykyisin noin 500 FS-tiimiä, ja sarja jatkaa kasvuaan edelleen.

Helsingin Metropolia Ammattikorkeakoulu (aikaisemmin Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia) on ollut mukana Formula Student -kilpailuissa opiskelijoistaan koostuvalla tiimillä vuodesta 2002 ja rakentanut uuden Formula Student -kilpa-auton lähes joka vuosi. Entinen Stadia Motorsport on vuoden 2008 jälkeen toiminut nimellä Metropolia Motorsport, oppilaitoksen nimen uudistumisen myötä. Uusin valmistunut auto kantaa nimeä HPF011, jonka runko on tämän työn tarkastelun kohteena.

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tarkastella 3D-skannauksen avulla, onko rakennettu putkirunko suunnitellun 3D-mallin mukainen sekä eroavatko varsinaiset alustapisteiden koordinaatit suunnitelluista pisteistä. Rungon lisäksi tarkastelun kohteena ovat myös linkut eli jousituksen keiuvivut, jotka toimivat iskunvaimentimien ja työntötankojen yhdysvipuina auton runkoon laakeroituina. Kiinnostavin ja tärkein asia linkuissa on iskunvaimentimen, työntötangon sekä runkolaakeroinnin kiinnityspisteiden sijainti toisiinsa nähden.

Tämän insinööriyön tarkoituksena on myös selvittää rungon sekä muiden osien valmistuksessa mahdollisesti tapahtuvia virheitä optisen mittaustekniikan menetelmiä käyttäen. Lisäksi pohditaan, mistä mahdolliset virheet ovat voineet aiheutua. Näin voitaisiin eliminoida samojen virheiden aiheuttajat seuraavaa runkoa valmistettaessa.

Lisäksi työssä tutkitaan, onko mahdollisilla virheillä vaikutusta auton sekä rungon ominaisuuksiin.

Rungon mittaaminen suoritettiin saksalaisen GOMin valmistamilla optisilla mittalaitteilla. Rungon digitointi suoritettiin ATOS Triple Scan -3D-skannerilla ja apuna käytettiin TRITOP-koordinaattimittauslaitetta.

Rungon vertailu tapahtui vertaamalla CAD-mallin ja skannatun mallin pintoja toisiinsa, kun rungot ovat samassa koordinaatistossa. Alustapisteiden sijaintia tutkittiin vertaamalla mitattujen pisteiden koordinaatteja suunniteltujen pisteiden koordinaatteihin kun skannattu ja suunniteltu runko ovat samassa koordinaatistossa. Samaan koordinaatistoon rungot asetettiin skannerin ohjelmiston avulla automaattisesti.

3D-skannauksessa skannattavasta kohteesta muodostetaan todellisuutta vastaava mittatarkka digitaalinen malli. Optinen 3D-skannaus on saanut alkunsa autoteollisuudesta. Useat autotehtaat käyttävät 3D-skannereita korin osien mittaamiseen ja laadunvarmistamiseen valmistuksen aikana. Optisen mittaamisen hyviä puolia ovat nopea ja tarkka mittaaminen, ilman että kappaleeseen tarvitsee koskettaa.

Yleisempiä 3D-skannauksen käyttökohteita ovat

- käänteinen suunnittelu, jossa kappale skannataan ja siitä luodaan 3D-mallin avulla mittapiirrustukset valmistusta varten
- kappaleiden digitointi, esimerkiksi historiallisten patsaiden tai muiden esineiden turvallinen kopioiminen digitaaliseen muotoon
- laadun varmistus, jossa skannattua kappaletta verrataan suunniteltuun CAD-malliin mahdollisten valmistusvirheiden varalta, kuten tässä työssä tehtiin
- kappaleen mittaaminen, jossa skannatusta kappaleesta halutaan ottaa sellaisia mittoja, mihin muilla mittausten menetelmillä on vaikea päästä.

Laadunvarmistus on olennainen osa valmistusprosessia niin autoteollisuudessa kuin muussakin teollisuudessa. Samankaltaista rungon mittausta ei Metropolia Motorsportin yli 10 vuotisen historian aikana ole koskaan tehty. Myöskään kukaan Formula Student –sarjassa ei tiettävästi ole vastaavan laajuista rungon mittausta aikaisemmin tehnyt. Tämän insinööriyön mittaustuloksia käytettiin myös vuoden 2012 toukokuussa järjestetyissä Formula Student kilpailuissa Yhdysvalloissa sekä Kanadassa tuomareille esiteltävänä design -materiaalina.

Metropolia Motorsportin osa-aluepäälliköt Markus Ketonen (runko) ja Toni Ristolainen (alusta) toimivat asiantuntija-apuna rungon sekä tukivarsikiinnikkeiden valmistusvirheiden tarkastelussa.

2 Mittalaitteet

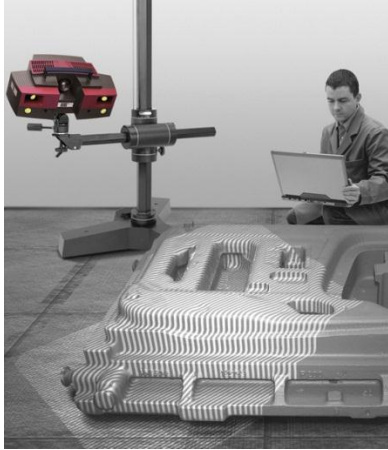
2.1 ATOS Triple Scan II -3D-skanneri

2.1.1 Toimintaperiaate

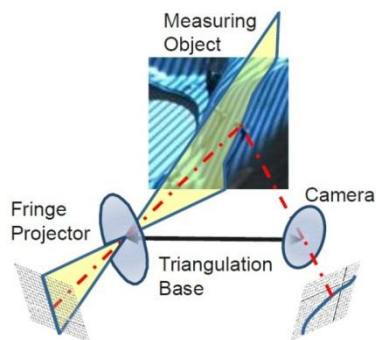
ATOS -3D-skannerin toiminta perustuu kolmiomittaamiseen kahden kameran ja valonlähteen avulla. Projektori projisoi valojuovaston mitattavan kohteen pinnalle, jonka kamerat havaitsevat. Optisiin muunnosyhtälöihin perustuen tietokone laskee automaattisesti 3D-koordinaatit jokaiselle kameran pikselille korkealla tarkkuudella. Tämä stereokamerajärjestelmä ja valonlähteenä toimiva projektoriyksikkö on intergoitu samaan pakettiin. [1, s. 1.]

ATOS Triple Scan II on varustettu kahdella 5 megapikselin kameralla. Valonlähteenä toimii edellisten mallien valkoisen valon sijaan sininen LED-valo. Sinistä valoa käytettäessä ympäristön valaistusolosuhteet eivät pääse vaikuttamaan mittausprosessiin. LED-tekniikka ei myöskään vaadi samanlaista jäähdytystä kuin perinteinen projektorin lamppu, joten ATOS Triple Scan II on myös huomattavasti hiljaisempi verrattuna GOMin valmistamiin vanhempiin skannereihin.

Kuvasta 1 ja 2 nähdään, kuinka mittausprosessissa mitattava kohde valaistetaan valokuovilla. Kameran kaappaavat kuvia ja näkevät juovien kulun muutokset kohteen pinnalla. Kun kameroiden väliset kulmat ja etäisyys tiedetään, skanneri osaa laskea valokuovien pinnalta löytyneiden pisteiden koordinaatit skanneriin nähden ja luoda näin pistepilven tietokoneelle kuvatusta pinnasta.



Kuva 1. Valokuovat kappaleen pinnalla [2].



Kuva 2. Mittaustapahtuma [3, s. 5].

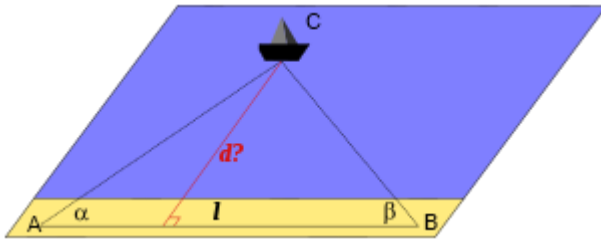
Mitattavan kappaleen pinnalle tai sen ympäristöön kiinnitetään tarralappuja, jotka toimivat referenssipisteinä mittauksen aikana. Skannerin ohjelmisto yhdistää pinnasta otetut useat kuvat yhdeksi otokseksi samaan koordinaatistoon referenssipisteiden avulla. Jos pisteitä kiinnitetään kappaleen ympäristöön, täytyy muistaa, että silloin kappaletta ei saa liikuttaa kuvien ottamisen välissä, koska kappaleen paikka muuttuu koordinaatistossa referenssipisteisiin nähden. Skannauksen voi myös suorittaa kokonaan ilman referenssipisteitä, jolloin ohjelma etsii eri kaappauksista samoja pintoja, jotka se yhdistää toisiinsa pintojen muotojen perusteella.

Riippuen mitattavan kappaleen koosta ja halutusta mittatarkkuudesta, skannerissa voidaan käyttää eri mittavolyymeja. Rungon mittaamiseen mielestäni sopivimmat vaihtoehdot olivat MV560 ja MV1500. Mittavolyymien numero merkitsee mitattavan alan sivunpituutta. MV560 on tarkempi, mutta kuvaa pienemmän alueen kerrallaan. MV1500 hieman epätarkempi mutta nopeampi, koska kameroiden kerralla kuvaama alue on suurempi. Valitsin MV560-mittavolyymien sen paremman tarkkuuden takia, koska rungossa oli kiinnikkeitä, jotka oli hyvä saada mitattua yksityiskohtaisesti. Kyseistä mittavolyymia käytettäessä suurin mahdollinen mittaepätarkkuus puolen metrin matkalla on 0,011 mm [4, s. 4]. Noin 2-metrinen rungon mittaamisessa mittaepätarkkuutta rungon pituuteen voi tulla enintään neljä sadasosamillimetriä. Kun halutaan mitata pienempiä kappaleita, voidaan käyttää pienempää mittavolyymia. Mittavolyymien vaihto tapahtuu vaihtamalla skannerin kameroiden linssit. Pienempää mittavolyymia käytettäessä mitattava alue on pienempi, jolloin kameroiden megapikselit asettuvat pienemmälle alueelle ja kuvat ovat siten tarkempia. Seuraavaksi pienemmällä mittavolyymillä MV170 mittaepätarkkuus on 0,001 mm [5, s. 4]. Pienin skanneriin saatava mittavolyymi on MV38.

2.1.2 Kolmiomittaus

Trigonometriassa ja geometriassa kolmiomittauksella tarkoitetaan prosessia, jossa määritetään pisteen etäisyys mittaamalla kulmat pisteeseen nähden kahdesta ennalta tunnetusta pisteestä. Kolmiomittaus on kehitetty Hollannissa 1600-luvun alkupuolella. Kolmiomittauksia käytetään yleisesti maaston mittauksissa; tällä menetelmällä voidaan mitata sekä etäisyyksiä että maanpinnan korkeuksia. Koska menetelmä perustuu näköyhteyteen kiintopisteiden välillä, maanmittauksien avuksi on rakennettu korkeita kolmiomittaustorneja. Se on ollut yksi tärkeimmistä maanmittausmenetelmistä ennen satelliittijärjestelmän tuloa 1980-luvulla. [6]

Kolmiomittauksia voidaan käyttää koordinaattien laskemiseen. Kuvan 3 esimerkissä lasketaan laivan etäisyys rannasta. Pisteessä A mitataan kulma α eli pisteen B ja laivan välinen kulma. Vasvaavasti mitataan kulma β pisteessä B. Kun pisteiden A ja B koordinaatit tai niiden välimatka tunnetaan, sinilauseen perusteella on laskettavissa laivan sijaintipiste C sekä laivan etäisyys rannasta d.



Kuva 3.

Kun kulmat α ja β tunnetaan, voidaan komion kolmas kulma pisteessä C laskea kolmion kulmasumman perusteella.

$$\gamma = 180^\circ - (\beta + \alpha)$$

Nyt voidaan laskea pisteen C etäisyys pisteistä A ja B sinilauseen avulla.

$$AC = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} * AB \qquad BC = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} * AB$$

Kun pisteiden A ja C sekä pisteiden B ja C väliset matkat tunnetaan, voidaan laskea etäisyys d perustrigonometrian avulla.

Esimerkiksi $d = BC * \sin \beta$

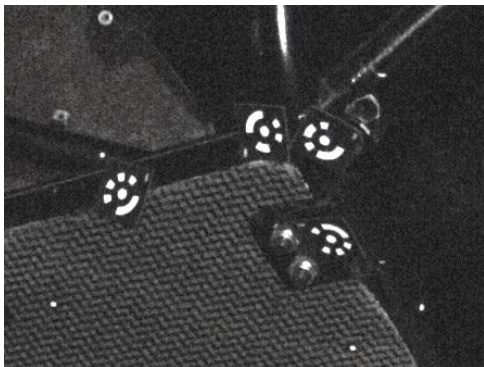
2.2 TRITOP

2.2.1 Toimintaperiaate

Tritop koordinaattimittauslaitteen toiminta perustuu fotogrammetriaan. Järjestelmällä voidaan mitata suuria kappaleita, kuten autoja, junan vaunuja, veneitä ja lentokoneita. Järjestelmää käytetään myös referenssipisteiden etukäteen tallentamiseen ATOS -3D-skannerin apuna. Kun pisteet on valmiiksi kuvattu, skannaustapahtuma on nopeampi ja mittavirheiden mahdollisuus pienenee. Tästä johtuen rungon skannauksen apuna käytettiin kyseistä järjestelmää.

Tritopilla otettujen kuvien avulla muuten harmaaseen skannausdataan voidaan lisätä myös kohteen oikeat värit. Teollisuudessa tästä ei ole juuri hyötyä, mutta historiallisten esineiden digitoinnissa tai muussa taiteellisessa yhteydessä tätä menetelmää käytetään.

Mittaustapahtuma on yksinkertainen. Kuvattavaan kohteeseen ja sen ympäristöön asetetaan koodattuja pisteitä ja mittasauvat (kuva 4 ja kuva 5), jotka ovat valmiiksi kalibroitu Tritop-ohjelmistoon, sekä referenssipisteitä jotka tallentuvat 3D-koordinaatistoon. Mittasauvojen tarkoitus on antaa kameralle referenssimitta. Tämän jälkeen kohteesta aletaan ottaa kuvia kameralla, joka siirtää kuvat langattomasti tietokoneelle. Kuvia pyritään ottamaan niin, että uudessa kuvassa näkyisi aina viisi koodattua pistettä, jotka ovat olleet aikaisemmin otetuissa kuvissa. Näin tietokone pystyy asettamaan kaikki kohteesta otetut kuvat samaan kohdekoordinaatistoon merkattujen pisteiden avulla.



Kuva 4. Koodatut pisteet



Kuva 5. Mittasauvat ja koodatut pisteet aseteltuna

Tritop järjestelmään kuuluu digitaalijärjestelmäkamera, tietokone, ohjelmisto sekä kalibroitivälineet (kuva 6).



Kuva 6. Tritop.

2.2.2 Fotogrammetria

Fotogrammetrialla tarkoitetaan menetelmää, jolla tutkitaan mitattavan kohteen muotoja siitä otettujen valokuvien perusteella. Termi fotogrammetria, englanniksi *photogrammetry*, on yhdeydessä kolmeen kreikankieliseen sanaan: *photos* tarkoittaa valoa, *gramma* tallennusta, ja *metreo* mittausta. [7, s. 2.]

Tyypillisimpiä fotogrammetrian avulla tehtyjä tuotoksia ovat kartat, piirrokset ja 3D-mallit, joistain todellisista kappaleista, maisemista tai maastosta. Useimmat nykyaikaiset kartat on valmistettu fotogrammetriaa käyttäen lentokoneesta kuvaamalla.

Fotogrammetriaa hyödynnetään myös rakennusten ja muiden arkkitehtuuristen kohteiden 3D-mallintamiseen. Muita yleisiä käyttökohteita fotogrammetrialle ovat rikospaikka- ja onnettomuuspaikkatutkimukset sekä geologiset tutkimukset. [8]

Valokuvauksessa muutetaan oikea 3D-maailma 2D-kuviksi. Tässä tapahtumassa häviää joitakin tietoja kohteesta, ensisijaisesti syvyystiedot. Fotogrammetriaa voidaan pitää käänteisenä tapahtumana valokuvaamiselle, koska siinä muutetaan 2D-kuvat takaisin 3D-muotoon. Koska valokuvausprosessissa häviää tietoja kohteesta, ei yksi 2D-kuva riitä 3D-mallin muodostamiseen. Kohteesta vaaditaan teoriassa vähintään kaksi kuvaa eri kuvakulmista otettuna, jotta saadaan rakennettua todellisuutta vastaava 3D-malli kuvatusta kohteesta. Todellisuudessa kaksi kuvaa harvoin riittää antamaan riittävästi informaatiota kohteesta, useimmiten tarvitaan siis useampia kuvia. Lopputuloksena useamman kuvan fotogrammetrisista mittauksista ovat kohteesta saadut 3-ulotteiset koordinaatit. [8]

Käsiteltäessä 2-ulotteisia kuvia täytyy ohjelman laskea kameran sijainti ja asento avaruudessa kuvanottohetkellä eli orientaatio jokaiselle otetulle kuvalle erikseen mahdollisimman hyvän tarkkuuden aikaan saamiseksi. Tarkka orientaatio saavutetaan kun kuvista pystytään tunnistamaan tarvittava määrä pisteitä. Onnistuneeseen orientaatioon tarvitaan minimissään 5 koodattua pistettä. Kuvassa 7 Tritop-järjestelmään kuuluva risti, jossa yksi koodatuista pisteistä on jäänyt tunnistamatta.



Kuva 7. Koodatut pisteet ristissä.

2.2.3 Stereonäkö ja stereokuva

Kaikki ihmiset, joilla on kaksi tervettä silmää, näkevät ympäristönsä stereoskooppisesti. Kuten 3D-skannerin kamerat, ihmisellä silmät ovat tietyn matkan päässä toisistaan. Ne näkevät kohteen hieman eri kulmista, joten kuvat eroavat hieman toisistaan. Tämän voi todeta vaikka sulkemalla silmiään vuorotellen, pitämällä sormea pystyssä naaman edessä ja vertaamalla näkemäänsä. Näiden eroavaisuuksien avulla aivot muodostavat kolmiulotteisen vaikutelman näkemästään kuvasta. [9]

Stereonäkymä voidaan luoda keinotekoisesti ottamalla kohteesta kuva kahdesta eri kohdasta tai kahdella eri kameralla, jotka ovat vähän matkan päässä toisistaan, kuitenkin niin, että kummassakin kuvassa on nähtävissä osittain sama alue. Sitten sopivan laitteiston avulla näytetään oikealle silmälle oikeanpuoleista kuvaa ja vasemmalle silmälle vasemmanpuoleista kuvaa. Kumpikin silmä näkee hieman erilaisen näkymän samasta kohteesta, jolloin aivot tulkitsevat kyseessä olevan todellinen kohde ja muodostavat kolmiulotteisen kuvan näkemästään. Tällaista otosta kutsutaan stereokuvapariksi. Samalla periaatteella tehdään myös punavihreälaseilla katsottavat 3D-kuvat. Vihreä linssi näyttää kuvassa olevat punaiset piirteet, kuin taas punainen linssi näyttää vihreät piirteet ja hävittää kuvan punaiset piirteet häiritsemästä vaikutelmaa. 3D-elokuvat käyttivät aikaisemmin tätä menetelmää, mutta nykyisin 3D-vaikutelma tehdään polarisaation avulla. [9]

3 Rungon mittaus

HPF011-auton runko on suunniteltu syksyllä 2010 ja rakennettu keväällä 2011. Autolla ajettiin yksi Metropolia Motorsportin historian menestyksekkäimmistä kausista vuonna 2011. Talven ja kevään aikana 2012 auto purettiin täysin ja siihen tehtiin pieniä muutoksia tulevan alkukesän kisoja varten. Maaliskuun alussa ennen rungon uudelleen maalaamista runko digitoitiin ATOS -3D-skannerilla.

Skannaus suoritettiin Helsingin Metropolia Ammattikorkeakoulun autosähkölaboratoriossa. Koska skannausprosessi vaatii tilaa skannattavan kohteen ympärillä liikkumiseen ja ulkona skannausta vaikeuttaa auringonvalo, autosähkölaboratoria osoittautui parhaimmaksi paikaksi mittausta ajatellen. Skannaamiinen onnistuu helpoiten hämärässä, koska skannerin oma valonlähde hoitaa kohteen valottamisen. Loisteputkivalaisimien tuottama valo sekä muut ihmissilmällä havaitsemattomat välkkyvät valot häiritsevät ja tuottavat hankaluuksia kuvausprosessiin. Autosähkölaboratorion pystyi hämärtämään sopivaksi, eikä siellä ollut suuria ikkunoita, joista auringonvalo olisi päässyt sisään.

Mustaksi maalattu formulan runko oli myös haasteellinen pinta skannausta ajatellen. Musta väri absorboi valon itseensä, joten se tuo valotusasetuksiin haastetta kuten normaalissa valokuvauksessakin. Koska runko oli menossa hiontaan ja maalaukseen seuraavaksi, runkoputket voitiin värjätä valkoiseksi. Värjäämiseen käytettiin valoa läpäisemätöntä titaanioksidia, jota käytetään yleisesti valkoisena pigmenttinä muun muassa maaleissa, muoveissa ja meikeissä sekä makeisten väriaineena. Titaanioksidipöly sumutettiin spraypurkista, jossa on titaanioksidin lisäksi ponneaineena butaani-propaani sekä liuotinaineena isopropanoli-etanolia. Kun sumu tarttuu värjättävään pintaan, alkoholi haihtuu melko nopeasti pois ja pintaan jää pelkkä pöly ilman mitään sidosaineita. Pöly lähtee normaalisti pyyhkimällä pois tasaisilta pinnoilta, mutta huokosiin ja epätasaisiin pintoihin jää usein jäänteitä erittäin hienojakoisesta pölystä.

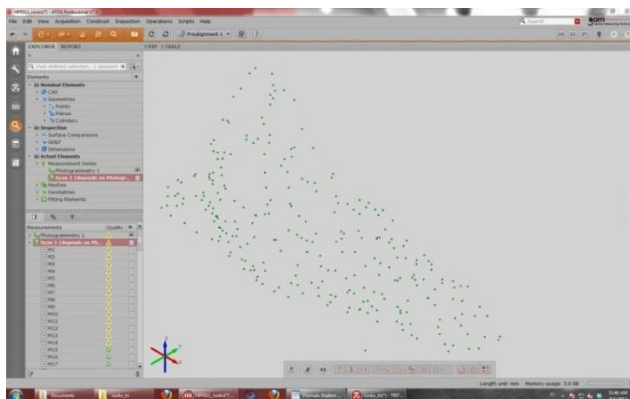
3.1 Digitointi

Kuvaus aloitettiin Tritop-koordinaattimittausjärjestelmällä. Kun referenssipisteet oli kiinnitetty runkoon ja koodatut pisteet sekä mittasauvat oli asetettu paikoilleen, rungosta otettiin kuvia joka puolelta, niin että jokainen koodattu piste löytyi vähintään kahdesta otetusta kuvasta. Kuvassa 9 näkyy vihrellä pisteet, jotka on jo tunnistettu useammasta kuvasta, sekä keltaisella pisteet, jotka ovat uusia tunnistettuja pisteitä.



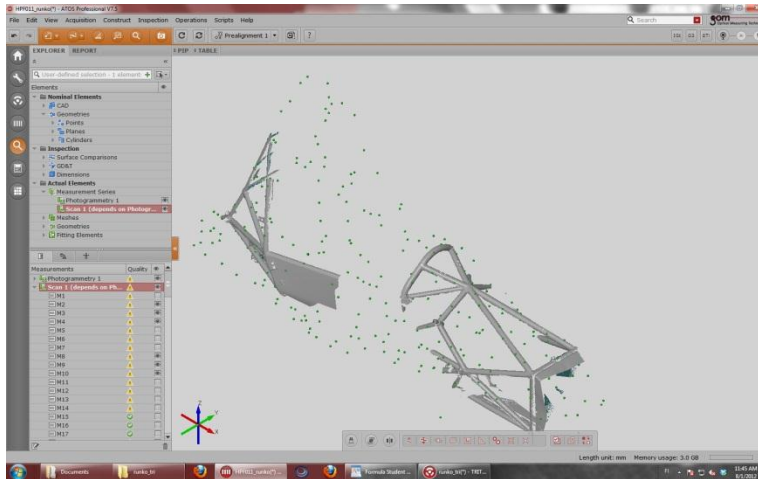
Kuva 9. Tritopilla kuvatut pisteet.

Kuvien ottamisen jälkeen ohjelmisto orientoi 2D-kuvat pisteiden avulla niin, että niistä saadaan luotua 3-ulotteinen kuva. Kun runkoon liimatut referenssipisteet ovat tietokoneella 3D-koordinaatistossa, voidaan pisteet tuoda skannerin ohjelmaan ja aloittaa skannaus. Kuvassa 10 Tritop-kameralla kuvatut referenssipisteet on tuotu ATOS-ohjelmaan.



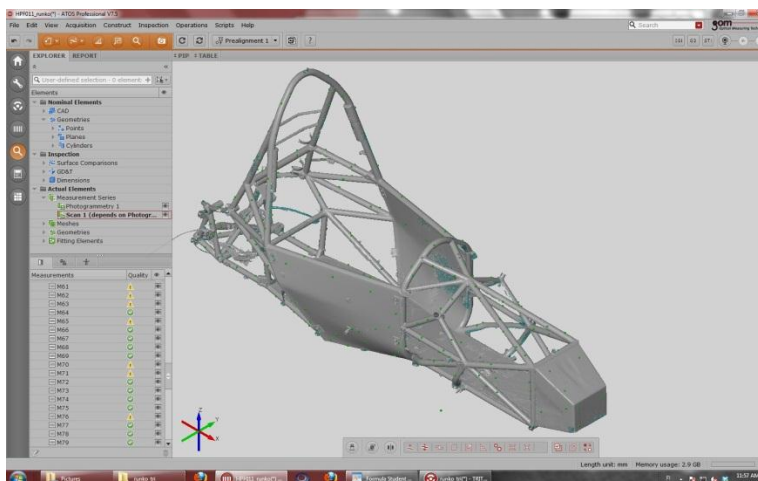
Kuva 10. Runkoon kiinnitetty referenssipisteet 3D-mallina.

Kun skanneri näkee vähintään kolme tuttua pistettä, jotka kuvattiin Tritopilla, se osaa laskea oman sijaintinsa avaruudessa kolmeen pisteeseen nähden. Kun skanneri tietää sijaintinsa koordinaatistossa referenssipisteisiin nähden, skannatut pinnat tallentuvat myös oikeille paikoilleen koordinaatistossa. Kuvassa 11 rungosta on skannattu kuudella otoksella keulaa sekä oikeaa takasivua.



Kuva 11. Rungon pintojen muodostuminen.

Skannerilla jatkettiin otosten ottamista ympäri runkoa niin pitkään, että kaikki halutut pinnat saatiin skannattua tietokoneelle. Koska referenssipisteet olivat kiinnitettyinä formulan runkoon, runkoa voitiin liikuttaa niin, että myös pohja saatiin kuvattua. Kuvassa 12 nähdään koko runko skannattuna yli 100 otoksen jälkeen.



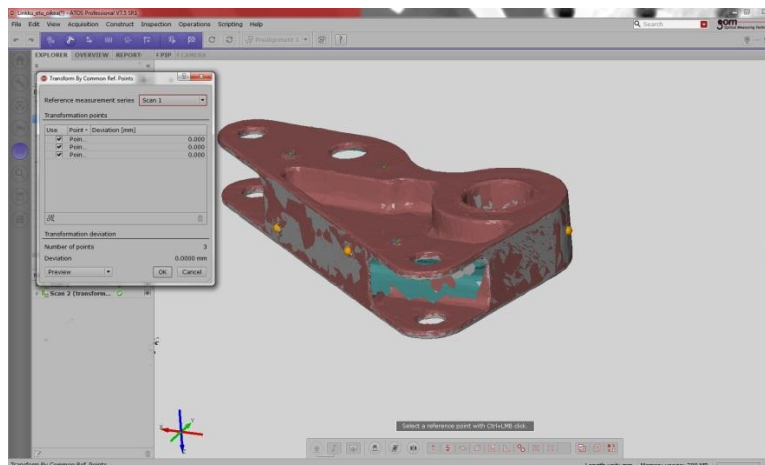
Kuva 12. Skannattu runko.

Kun koko runko oli skannattu, laitettiin tietokone suorittamaan laskenta eli skannauksen finalisointi, jossa kaikkien otosten skannatut pinnat yhdistetään samaksi yhtenäiseksi kolmiopinnaksi. Laskennan jälkeen käytettävissämme on mittatarkka 3D-malli Formula Student -kilpa-auton rungosta.

Samat proseduurit suoritettiin myös jousituksen keinoivuille, mutta niiden mittaamisen apuna ei käytetty Tritop-järjestelmää. Linkkujen pienen koon vuoksi Tritopin käytöstä ei olisi ollut merkittävää hyötyä. Jokainen linkku skannattiin ensin päältä ja sitten alapuolelta. Kylkiin kiinnitettiin 3–4 pistettä, jotka kaikki näkyivät sekä ylä- että alapuolen skannauksissa.

Skannauksen jälkeen ylä- sekä alapuoli yhdistettiin vähintään kolmen pisteen avulla toisiinsa, minkä jälkeen skannaus voitiin laittaa laskentaan. Skannauksien yhdistäminen onnistuu, kun kummassakin skannauksessa on vähintään 3 referenssipistettä, jotka näkyvät molemmissa skannauksissa. Referenssipisteitä on kuitenkin usein järkevä laittaa varmuuden vuoksi ainakin 4, koska tarralla kiinnittyvät pisteet saattavat siirtyä hieman, kun kappaletta liikutellaan ja näin ollen skannauksien yhdistäminen ei enää onnistu.

Kuvassa 13 linkun ylä- sekä alapuoli on skannattu erikseen, minkä jälkeen skannaukset on yhdistetty käyttämällä kuvassa keltaisella näkyviä yhteisiä referenssipisteitä.

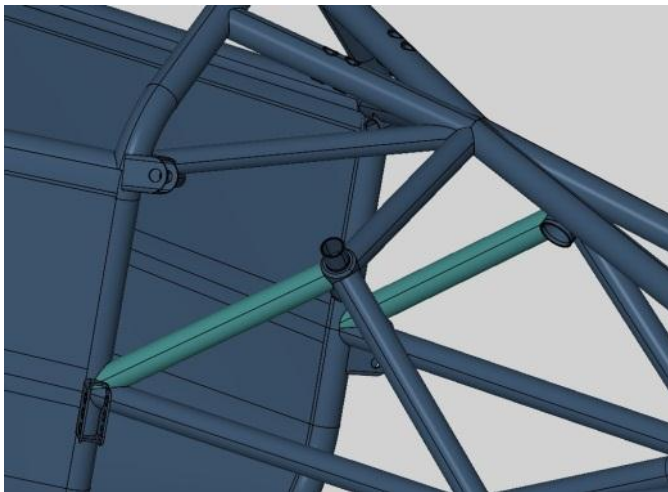


Kuva 13. Kahden skannauksen yhdistäminen yhteisten referenssipisteiden avulla.

3.2 Skannauksen vertaaminen CAD-malliin

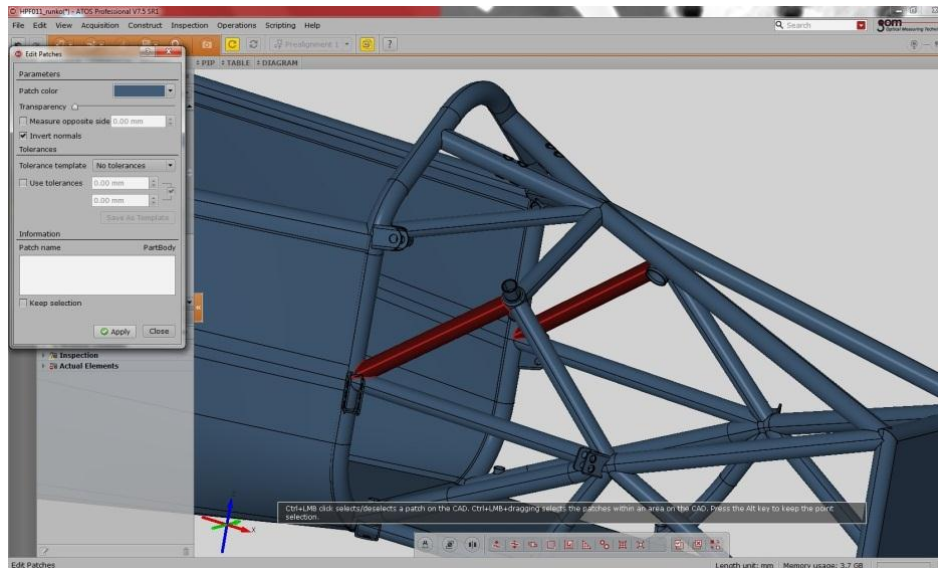
Rungon digitoinnin jälkeen vuorossa oli skannatun rungon laittaminen Catialla suunnitellun 3D-mallin kanssa päällekkäin ja niiden vertaaminen toisiinsa. Rungon 3D-kokoonpanosta otettiin kaikki runkoon kuulumaton pois ja jätettiin pelkät rungossa olevat kiinnikkeet. Myös keulassa oleva törmäysvaimennin jätettiin pois, koska sen ei katsottu olevan kiinnostava osa mittauksen kannalta. Kun rungon mallissa oli kaikki tarpeellinen kiinni, eli kaikki ne kiinnikkeet, jotka olivat rungossa kiinni myös skannausvaiheessa, tallennettiin 3D-malli step-formaatissa, joka on yleinen tiedostomuoto siirrettäessä 3D-tiedostoja ohjelmasta toiseen.

Tiedoston siirto Catiasta ATOS-ohjelmaan ei sujunut täysin ongelmitta. Muutamissa rungon putkissa pinnan normaalit olivat väärinpäin, eli ATOS ymmärsi putkien ulkopinnan olevan sisäpinta ja sisäpinnan ulkopinta. Kuvassa 14 kahden putken väri poikkeaa muiden putkien väristä. Vaaleanvihreissä putkissa pinnan normaali on putken sisäpintaa kohti.



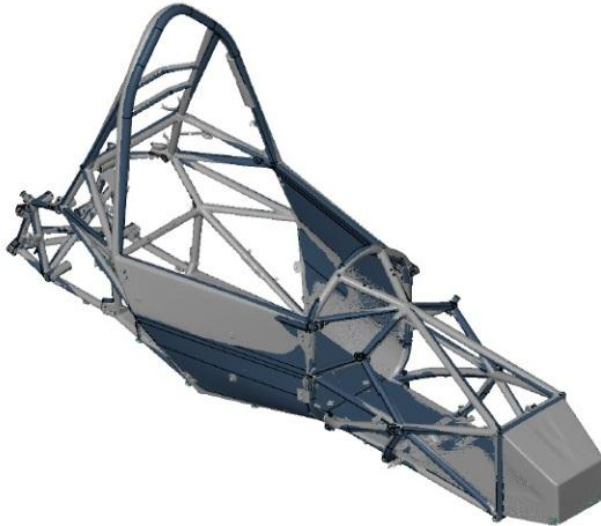
Kuva 14. Pinnan normaalit väärinpäin kahdessa putkessa.

Pintojen normaalien on oltava samaan suuntaan, jotta pintojen vertaaminen toisiinsa onnistuisi. Kyseessä on melko harvinainen ongelma tuotaessa CAD-malleja skannerin ATOS-ohjelmaan. Emme keksineet, mistä tämä johtuu, koska kaikki runkoputket oli piirretty samalla tavalla Catiassa. Näitä ei voinut kuitenkaan Catiassa muuttaa, mutta ATOS-ohjelman valikosta löytyy käsky, jolla valittujen pintojen normaalit saa käännettyä päinvastoin (kuva 15).



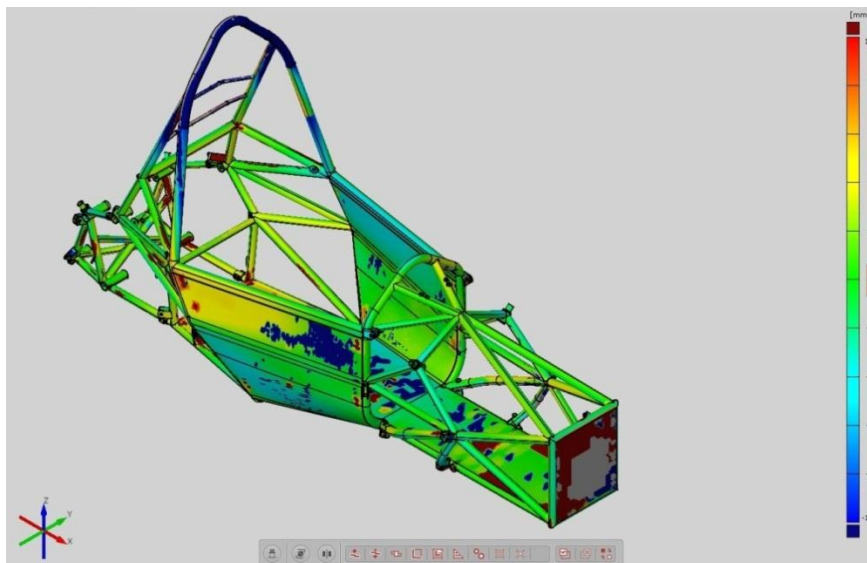
Kuva 15. Pinnan normaalien muuttaminen ATOS-ohjelmalla

Kun CAD-malli oli lopulta valmisteltu vertailua varten ja tuotu skannatun mallin kanssa samaa ATOS-projektiin, voitiin mallit asettaa toistensa päälle ja verrata toisiinsa. Pre Alignment -käskyllä tietokone etsii skannatusta mallista samoja muotoja ja piirteitä, joita on CAD-mallissa. Niiden perusteella ohjelma asettaa skannausdatan CAD-mallin päälle, niin että mallien pinnat ovat mahdollisimman paljon toistensa kanssa päällekkäin. Päällekkäin asettelu voi myös tehdä niin, että valitaan kummastakin mallista vähintään kolme pistettä, joiden halutaan olevan mahdollisimman tarkasti samassa kohdassa. Tätä menetelmää käytetään usein, jos kappaleessa on vaikkapa kiinnityspisteet, joiden tiedetään olevan melko suurella tarkkuudella kohdallaan. Kuvassa 16 harmaapintainen skannattu malli ja sininen CAD-malli asetettu pintojen mukaan päällekkäin.



Kuva 16. Skannattu 3D-malli ja CAD-malli päällekkäin.

Pintavertailulla tutkitaan, kuinka kaukana skannatun mallin pinnat ovat referenssinä olevista CAD-mallin pinnoista. Sen mukaan, kuinka paljon kauempana skannattu pinta on CAD-mallin pinnan yläpuolella, muuttuu pinnan väri keltaisesta punaiseksi. Sen mukaan, kuinka paljon kauempana skannattu pinta taas on CAD-mallin pinnan alapuolella, muuttuu pinnan väri vaaleansinisestä tummansiniseksi. Kun skannattu pinta kulkee CAD-mallin pinnan mukaisesti, vertailukuvassa pinta on vihreä. Kuvassa 17 päällekkäin laitetuille 3D-malleille on tehty pintavertailu.



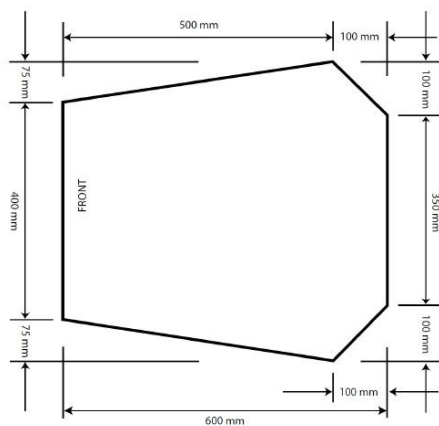
Kuva 17. Skannatun mallin vertaaminen CAD-malliin.

4 Tulokset

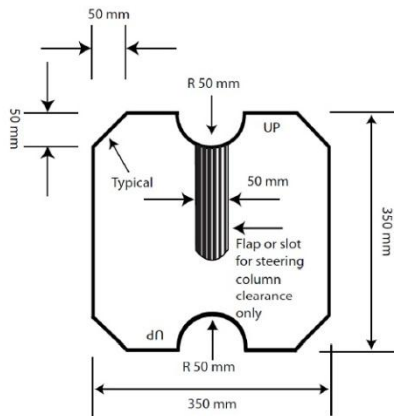
4.1 Runko

Pintavertailusta havaitaan, että rungon valmistus on onnistunut varsin hyvin. Runkoputket menevät keskimäärin ± 5 millimetrin tarkkuudella tarkkuudella CAD-mallin kanssa yhtenevästi. Tarkkuus on todella hyvä käsityönä tehdyille tämän kokoluokan putkirungolle.

Tarkasteltuamme mittaraportissa ilmenneitä virheitä totesimme, että rungon valmistuksessa syntyneet alle 5 mm:n poikkeamat putkien kulkulinjoissa eivät vaikuta käytännössä rungon ominaisuuksiin. Rungon vääntöjäykkyys ja muut ominaisuudet eivät ole herkkiä suhteessa pieniin geometrisiin virheisiin. Niin kauan kun Formula Student -sääntöjen mukaiset sapluunat (kuvat 18 ja 19) mahtuvat auton ohjaamoon, pienet virheet runkoputkissa eivät vaikuta oleellisesti mihinkään. Lähes kaikki mittaraportissa ilmenneet muutamien millimetrien poikkeamat runkoputkissa johtuvat putkien kulmavirheistä. Esimerkiksi 250 mm pitkissä runkoputkissa, jotka ovat lyhimpiä putkia, 5 mm:n heitto tarkoittaa noin 1 asteen kulmavirhettä. [11]

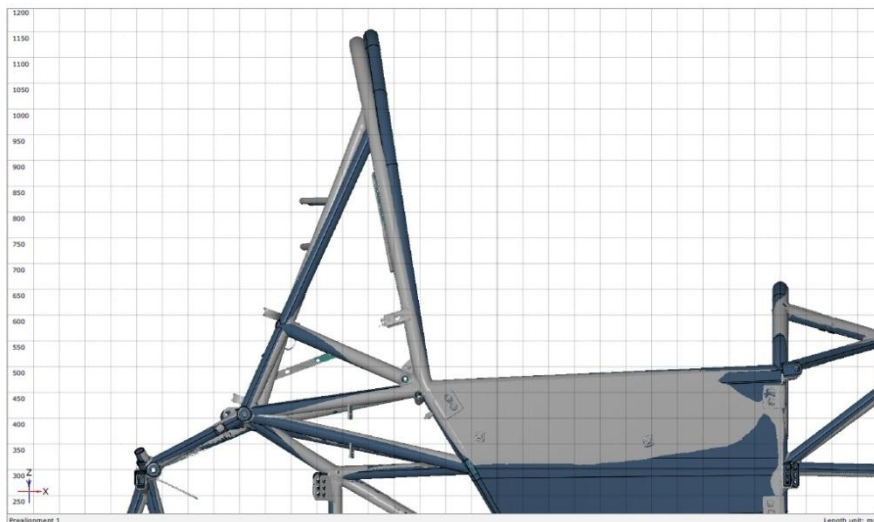


Kuva 18. Ohjaamoon ylhäältä tiputettava sapluuna [10, s. 67].

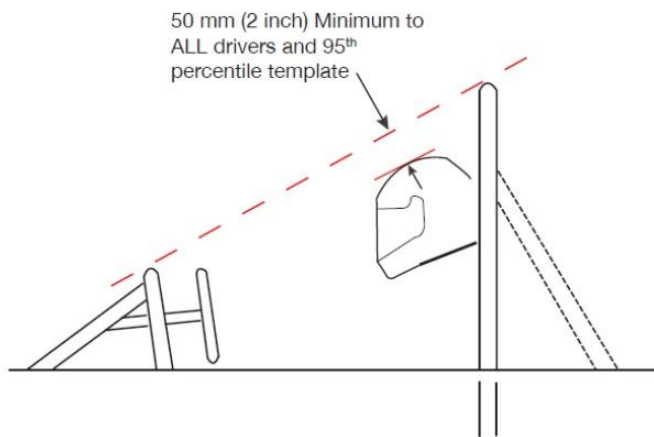


Kuva 19. Ohjaamon jalkatilaan menevä sapluuna [10, s. 68].

Kuvassa 20 näkyy suurin rungossa oleva poikkeama, joka sijaitsee pääkaaren yläpäässä. Harmaa todellinen malli on ylimmästä kohdastaan runkoputken paksuuden verran eli noin 30 mm kallistunut taaksepäin verrattuna suunniteltuun CAD-malliin. Pääkaaren poikkeama johtuu putkien taivutuksissa käytetyistä ilmeisen suurista toleransseista. Putki on voitu taivuttaa oikeaan kulmaan, mutta materiaalin joustosta johtuen kulma on jäänyt liian suureksi. Kyseisestä virheestä saattaisi koitua ongelmia Formula Student -säännön takia, jonka mukaan etukaaren ja pääkaaren väliin vedetyn viivan ja kuljettajan kypärän väliin on jätävä vähintään 50 mm:n väli (kuva 21). [11]



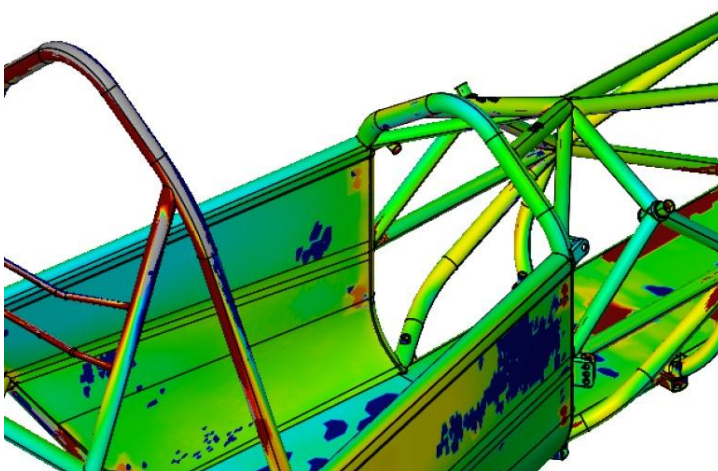
Kuva 20. Pääkaari



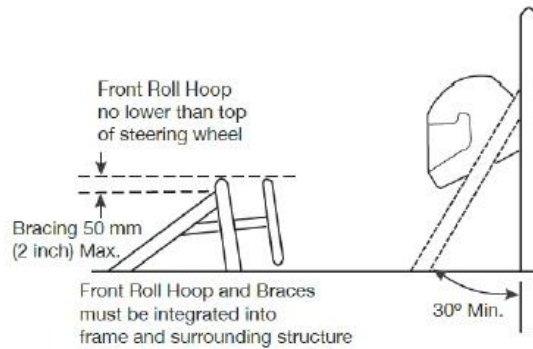
Kuva 21. 50 mm:n sääntö [10, s. 63].

Pääkaaren liallinen taaksepäin kallistuminen olisi voinut aiheuttaa isojakin ongelmia, mutta kuvassa 21 näkyvän 50 mm:n säännön täyttämiseksi oli kuitenkin toimittu varman päälle eikä pääkaaren taaksepäin kallistuma vaikuttanut testin läpäisemiseen katsastuksissa.

Kuvassa 22 nähdään, kuinka myös etukaari on korkeimmasta kohdastaan hieman liian alhaalla johtuen todennäköisesti liian suuresta putken taivutussäteestä. Värivertailun vaalensinisen värin mukaan se on noin 5 mm liian alhaalla suunniteltuun CAD-malliin nähden. Valmistusvaiheessa huomattiin, että ratti joudutaan tekemään uusiksi, koska ratin yläosa ei ollut etukaaren alapuolella sääntöjen mukaisesti (kuva 23).



Kuva 22. Etukaari



Kuva 23. Sääntö, jonka mukaan etukaari ei saa olla alempana kuin ratin yläosa millään ratin asennollaa [10, s. 65].

Kuvan 23 säännön ongelmat saattoivat johtua myös esimerkiksi rattiakselin väärästä kulmasta, koska 5 mm:n poikkeama pelkästään etukaaressa on vielä melko pieni. Ratti ja rattiakseli ei kuitenkaan ollut skannausvaiheessa rungossa kiinni, joten niiden oikein paikoittamista ei saatu selvitettyä.

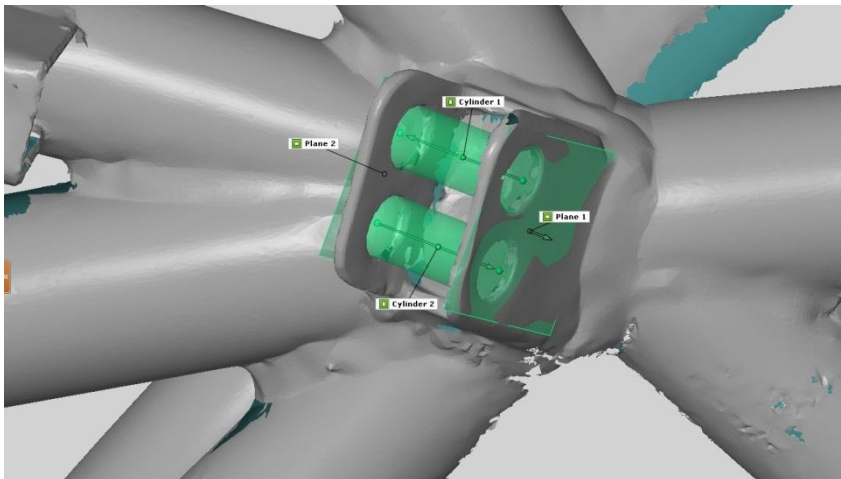
Vaikka vakavimmat virheet runkoputkissa johtuivat putkien taivutuksista, virheistä ei voida kuitenkaan syyttää vain putkien taivuttajaa. Suunnitteluvaiheessa olisi pitänyt ottaa paremmin huomioon putkien valmistettavuus ja toleranssikontrolli. Näistä etenkin toleranssikontrolliin olisi pitänyt valmistusvaiheessa panostaa huomattavasti enemmän. Pääkaaren ongelmakohtaan se ei olisi todennäköisesti auttanut, mutta etukaaren olisi mahdollisesti voinut korjata, jos putkentaivutusvirheen olisi huomannut ajoissa. [11]

Runkoputket voitaisiin tulevaisuudessa mitata 3D-skannerilla ja verrata CAD-malleihin heti taivutuksen jälkeen, jolloin saataisiin varmuus, ovatko putket samallaiset kuin on suunniteltu. Näin virheet huomattaisiin välittömästi eikä ongelmia taivutusten suhteen pitäisi ilmetä valmistusvaiheessa. Myös runkoputkien taivuttajan kanssa tarkkojen toleranssien sopiminen tulee muistaa, jotta taivuttaja tietää kuinka suuret kulmavirheet ovat sallittuja putkien taivutuksissa.

4.2 Alustapisteiden tarkastelu

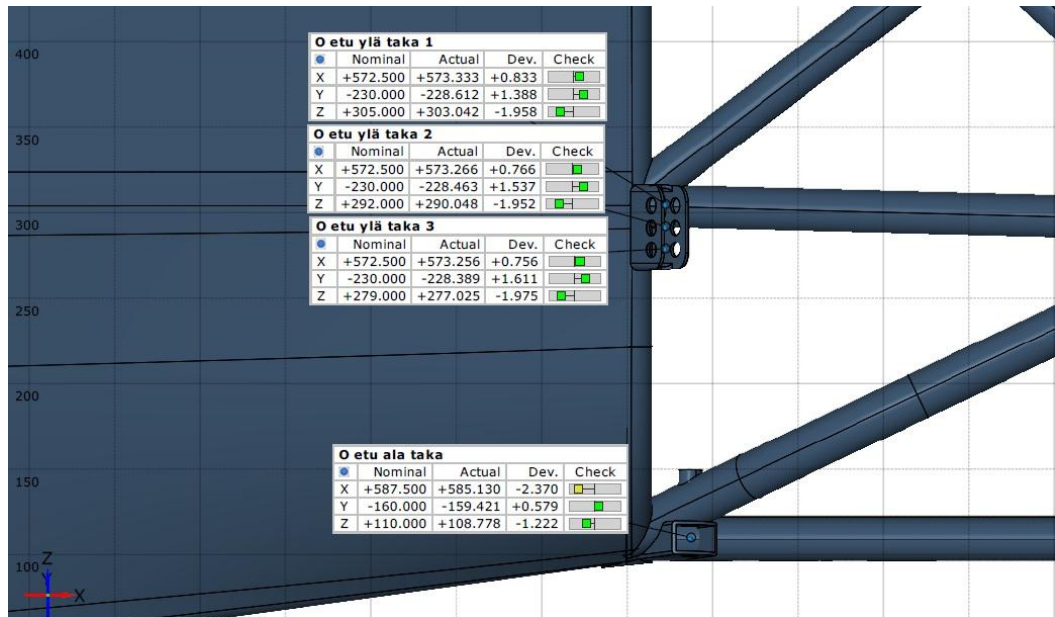
Rungon putkien lisäksi tarkemman tarkastelun kohteena olivat myös rungon alustapisteet eli kiinnikkeet, joihin tukivarret, iskunvaimentimet ja jousituksen keinovivut kiinnitetään. Runkoputkissa muutamien millimetrin heitot eivät vaikuttaneet oleellisesti mihinkään niin kauan kuin auto on sääntöjen mukainen. Alustapisteiden osalta asia voi olla toinen. Jos alustan osien kiinnityspisteissä heittoa on usean millimetrin verran, voi sillä olla joissain tapauksissa vaikutusta alustan ominaisuuksiin, ainakin teoriassa.

Kiinnikkeiden keskipisteet etsittiin skannatusta rungosta ATOS-ohjelman avulla luomalla matemaattisia tasoja ja sylinterejä kiinnikkeisiin kuvan 24 mukaisesti. Sylinterin keskilinjalle ja kiinnikkeen sivupintojen puoleenväliin luotiin piste, joka vastaa suunniteltua alustapistettä. Tällä menetelmällä etsittiin jokainen alustan kiinnityspiste sekä sen koordinaatit.



Kuva 24. Kiinnikkeiden keskipisteiden määrittäminen.

Kun jokaisen alustapisteen koordinaatit olivat selvillä, voitiin niitä verrata CAD-mallin vastaavien pisteiden koordinaatteihin. Kuvassa 25 nähdään oikean etukulman tukivarsien takimmaisten kiinnityspisteiden koordinaatit ja niiden heitot x , y ja z -suunnassa. Nominal-koordinaatit merkitsee pisteen suunniteltua paikkaa CAD-mallissa, ja actual-koordinaatit ovat todellisten pisteiden tarkat koordinaatit. Näiden sarakkeiden oikealla puolella, sarakkeessa dev nähdään, kuinka paljon ja mihin suuntaan todelliset alustapisteiden koordinaatit poikkevat suunnitelluista alustapisteistä.



Kuva 25. Oikean etukulman tukivarsien takimmaiset kiinnityspisteet.

Kuvan 25 pisteissä suurimmat poikkeamat ovat 2 mm luokkaa. Myös muissa alustapisteissä poikkeamat jäävät 2–3 mm:n tuntumaan (liite 1) lukuun ottamatta takimmaisten ylätukivarsien kiinnityspisteitä. Kyseiset kiinnikkeet olivat vertailussa käytetyssä CAD-mallissa 5 mm liian korkealla, joten poikkeamaan näiden pisteiden kohdalla täytyy lisätä 5 mm, jotta poikkeama on paikkansa pitävä. Virhe CAD-mallin kiinnityspisteissä huomattiin vasta, kun vertailu oli tehty, eikä uuden vertailun tekemistä nähty tarpeelliseksi.

Kiinnikkeiden jigitys runkoon on onnistunut hyvin ja poikkeamat ovat sitä luokkaa kuin voitiin odottaakin. Kiinnikkeiden jigityksessä ei kiinnitetty huomiota niiden geometrisesti oikeaan sijaintiin rungossa, vaan siihen että kiinnikkeet on jigitetty saman origon mukaisesti suhteessa toisiinsa eli etäisyydet pisteiden välillä on pyritty saamaan oikein. [12]

Tukivarsikiinnikkeet jigitettiin runkoon jigipöytää ja erilaisia apuvälineitä käyttäen. Jigityksen jälkeen kiinnikkeet hitsattiin yhdestä tai kahdesta pisteestä kiinni, minkä jälkeen jigit poistettiin kiinnikkeen ympäri hitsaamisen mahdollistamiseksi. Tässä vaiheessa kiinnikkeet ovat voineet hitsauksen lämpövaikutuksesta päästä vääntymään hieman, mikä osaltaan selittää poikkeamia suunniteltujen ja todellisten pisteiden

koordinaateissa. Hitsaksen lämpövaikutuksesta johtuneet kiinnikkeiden vääntymät ovatkin todennäköisesti suurin yksittäinen syy pisteiden poikkeamiin. [12]

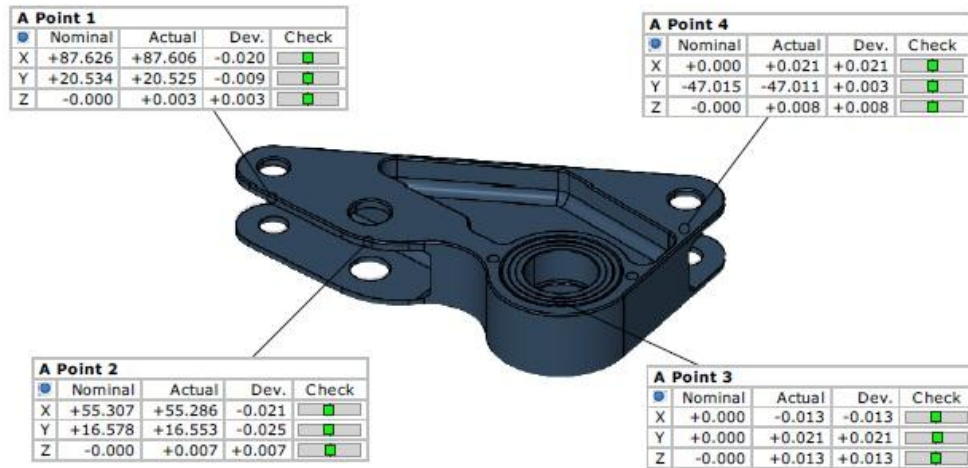
Teoreettisesti tarkasteltuna tukivarsipisteiden poikkeamat aiheuttavat alustageometrioiden epäsymmetrisyyttä. Tämän seurauksena kallistuskeskiö ei ole auton keskilinjalla tai suunnitellulla korkeudella, camber-muutokset voivat olla erilaisia auton eri kulmissa, pyöränkulmat eivät vastaa suunniteltua, joten renkaat kääntyvät eri verran. Tämä voi aiheuttaa sen, että auto käyttäytyy erilailla kääntyessä vasemmalle tai oikealle. Vaihtoehtoisesti suorituskyky ei ole toivotunlainen missään ajotilanteessa. Käytännössä muutaman millimetrin poikkeamat ovat kuitenkin niin pieniä, että niillä ei ole huomattavaa vaikutusta auton suorituskykyyn. Samanlaisia muutoksia voi syntyä jo pelkästään alustan osien joustosta. Jos kiinnikkeet olisivat kuitenkin kymmeniä millimetrejä sivussa, tulisi varmasti ongelmia jo osien paikalleen istuvuuden kannalta. [12]

Mikäli tarkkuutta halutaan parantaa kiinnikkeiden osalta, parempien jigitys menetelmien suunnitteleminen on tulevaisuudessa kannattavaa. 3D-mittakäden käyttäminen apuna kiinnikkeitä paikottaessa parantaa tarkkuutta merkittävästi. Lisäksi kiinnikkeiden parempi tukeminen hitsauksen aikana lämmöstä johtuvien vääntymien välttämiseksi parantaisi lopputulosta. Yksi vaihtoehto olisi myös kiinnikkeiden kiinnittäminen runkoon pulteilla hitsaamisen sijaan, jolloin runkoon porattaisiin vain reiät oikeille paikoilleen vaikkapa 3D-mittakättä apuna käyttäen. Pulteilla kiinnikkeiden runkoon kiinnittäminen eliminoisi hitsauksessa syntymät vääntymät täysin. [12]

4.3 Jousituksen keinuvivut

Vaikka linkuissa ei odotettu olevan merkittäviä valmistusteknisiä virheitä, skannattiin ne rungon skannauksen yhteydessä. Kuvassa 26 nähdään poikkeamat etummaisesta oikeanpuoleisesta linkun reikien keskipisteissä. Poikkeamat tässä ovat suurimmillaan 0,025 millimetriä, kuten myös kolmessa muussa linkussa (liite 2). Kun poikkeamat ovat muutamia millimetrin sadasosia, voidaan koneistusta pitää onnistuneena. Otettakoon myös huomioon, että linkut on skannattu samalla mittavolyymilla kuin koko runko, jossa mittaepätarkkuus on 0,011 millimetriä [3, s. 4]. Jos reikien paikkojen täytyisi olla sadasosamillimetrin tarkkuudella oikeassa paikassa, mittaus olisi voitu suorittaa

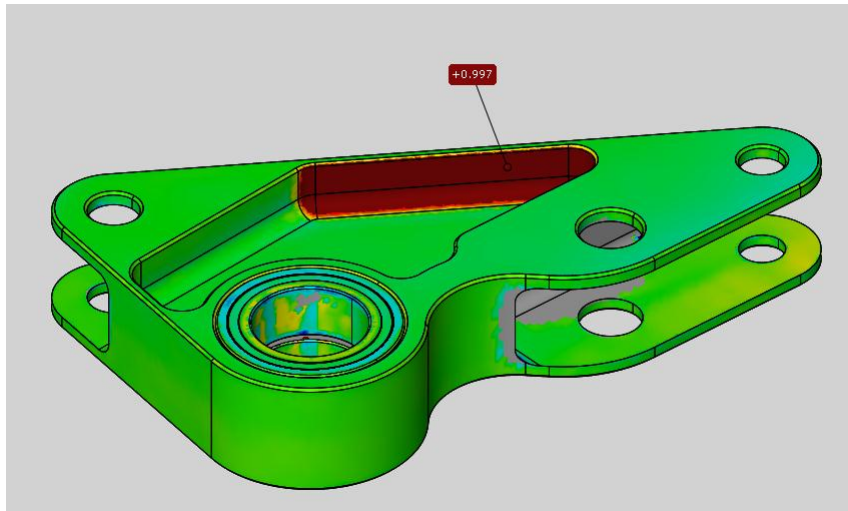
käyttämällä pienempää mittavolyymia skannerissa, jolloin mittaepätarkkuus olisi huomattavasti pienempi.



Kuva 26. Etummainen oikeanpuoleinen jousituksen keinuviipu.

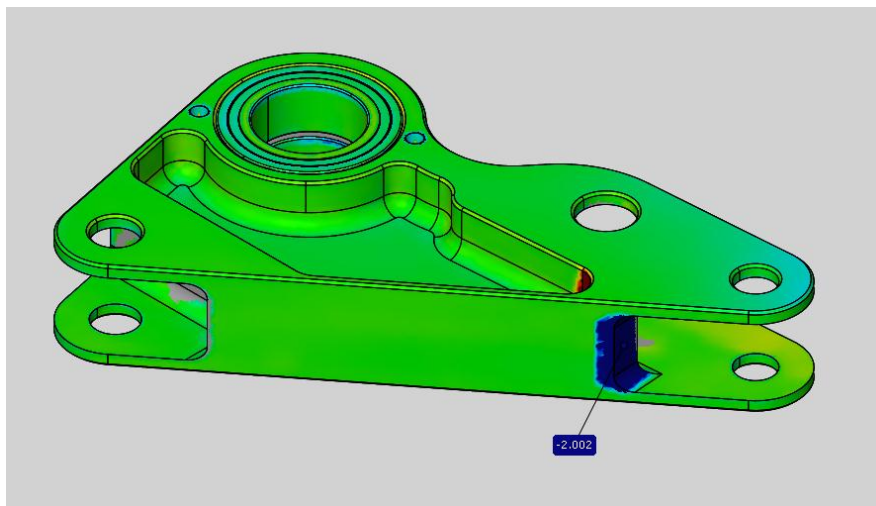
Muutaman sadasosamillimetrin poikkeamat keinuviipujen kiinnityspisteissä eivät vaikuta auton käyttäytymiseen radalla millään lailla. Kuten aikaisemminkin on tullut todettua, samansuuruisia poikkeamia syntyy jo alustan osissa tapahtuvassa joustossa ajon aikana.

Reikien tarkastelun lisäksi keinuviuille tehtiin myös pintavertailu. Pintavertailussa havaittiin yhdessä linkussa kaksi selvää koneistuksessa tullutta virhettä. Kuvan 27 etupään oikeanpuoleisen linkun pintavertailusta nähdään punainen alue, jossa kohtaa ainevahvuutta linkulla on 1 mm enemmän kuin on suunniteltu. Kyseinen virhe ei kuitenkaan vaikuta oleellisesti mihinkään. Paksumpi ainevahvuus tuo kuitenkin teoriassa hieman lisämassaa sekä jäykkyyttä keinuviulle.



Kuva 27. Etupään oikeanpuoleisen keinuivun koneistuksessa tullut virhe.

Kuvassa 28 sinisessä kohdassa kappaleen pinta kulkee 2 millimetriä CAD-mallin pintaa alempana. Edellisestä virheestä johtunut massan lisäys kompensoituu hieman sekä korvakkeiden jäykkyys huonontuu hienoisesti. Tämänkin virheen vaikutukset käytännössä ovat häviävän pienet, koska iskunvaimentimen ja työntötangon kiinnittämiseen poikkeama ei vaikuta eikä massan muutosta käytännössä huomaa. Vastaavanlaisia virheitä, jotka eivät vaikuta osien istuvuuteen, on kuitenkin vaikea havaita ilman osien mittaamista.



Kuva 28. Etupään oikeanpuoleisen keinuivun koneistuksessa tullut toinen virhe.

5 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä digitoitiin Formula Student -kilpa-auton runko 3D-skannerilla. Digitoitua 3D-mallia vertaamalla CAD-malliin tutkittiin rungon valmistuksessa syntyneitä poikkeamia. Työssä on käyty läpi kaikki valmistuksen yhteydessä syntyneet merkittävät poikkeamat sekä pohdittu, mistä virheet ovat voineet johtua ja miten poikkeamat ovat voineet vaikuttaa auton ominaisuuksiin.

Tässä insinööriyössä on myös esitelty ATOS 3D-skannerin toimintaperiaate pääpiirteittäin sekä perehdytty 3D-skannauksen ja optisen mittaamisen perusteisiin. Monimutkaisten osien ja laitteiden mittaaminen on vaikeaa tai jopa mahdotonta ilman optisia mittalaitteita. Optinen mittaustekniikka on usein nopein ja taloudellisin tapa saada halutut mitat vaikean muotoisesta kappaleesta. Formulan rungon mittaamiseen ei juuri muita mittalaitteita ole. 3D-mittakädellä mittaus olisi mahdollista tehdä, mutta yhtä tarkkaan mittaustulokseen pääseminen olisi vaikeaa tai lähes mahdotonta.

Työssä ilmenneet poikkeamat runkoputkissa olivat valtaosin putkien taivutusvirheitä sekä kulmavirheitä putkien hitsausliitoksissa. Virheet olivat kuitenkin verrattain pieniä rungon kokoon nähden, joten niillä ei todettu olevan vaikutusta rungon ominaisuuksiin. Myös alustapisteiden poikkeamat olivat niin pienet, ettei niiden vaikutusta auton suorituskykyyn radalla voi huomata. Samansuuruisia muutoksia voi syntyä jo pelkästään alustan osien joustosta ajotilanteissa.

Lähes kaikki mittauksen tuloksena selvinneet poikkeamat suunniteltuun CAD-malliin nähden voitaisiin välttää uutta runkoa valmistettaessa. Runkoputkien tarkan valmistettavuuden varmistaminen putkien taivuttajalta, tarkkojen toleranssien sopiminen sekä heti taivutuksen jälkeen tehtävät putkien mittaukset vähentäisivät valmiiseen runkoon syntyvien poikkeamien määrää huomattavasti. Tukivarsikiinnikkeiden kiinnitykseen käytettäviä jigitys- ja kiinnitysmenetelmiä kehittämällä päästäisiin tarkempaan lopputulokseen.

Suurin hyöty työstä on seuraavien runkojen suunnittelusta ja rakennuksesta vastaaville tiimin jäsenille. Kun tiedetään missä virheitä on aikaisemmin syntynyt, voidaan samojen virheiden tekemistä välttää tulevaisuudessa. Myös Formula Student -sarjan tuomarit arvostavat suuresti tämänkaltaisen laadunvarmistuksen tekemistä.

Skannaustyön mittatarkkuutta pystyttäisiin parantamaan mittaamalla tukivarsikiinnikkeiden ympäristö pienemmällä mittavolyymilla kiinnikkeiden pienestä koosta ja yksityiskohtaisuudesta johtuen. Tässä työssä menetelmää ei kuitenkaan käytetty, koska 0,011 mm:n mittaepätarkkuutta pidettiin riittävänä myös kiinnikkeiden osalta.

3D-skannauksen lisäksi myös dynaamisten muodonmuutosten mittaaminen optisilla mittalaitteilla olisi kannattavaa etenkin FEM-laskennan tulosten todentamiseksi. Rungon ja alustan osien käyttäytymistä vaikkapa jarrutustilanteessa pystyttäisiin tarkastelemaan optisilla mittalaitteilla. Myös hiilikuituvanteiden muodonmuutokset paikaltaa kiihdytykseen lähettäessä voitaisiin helposti mitata ja verrata tuloksia FEM-laskuihin.

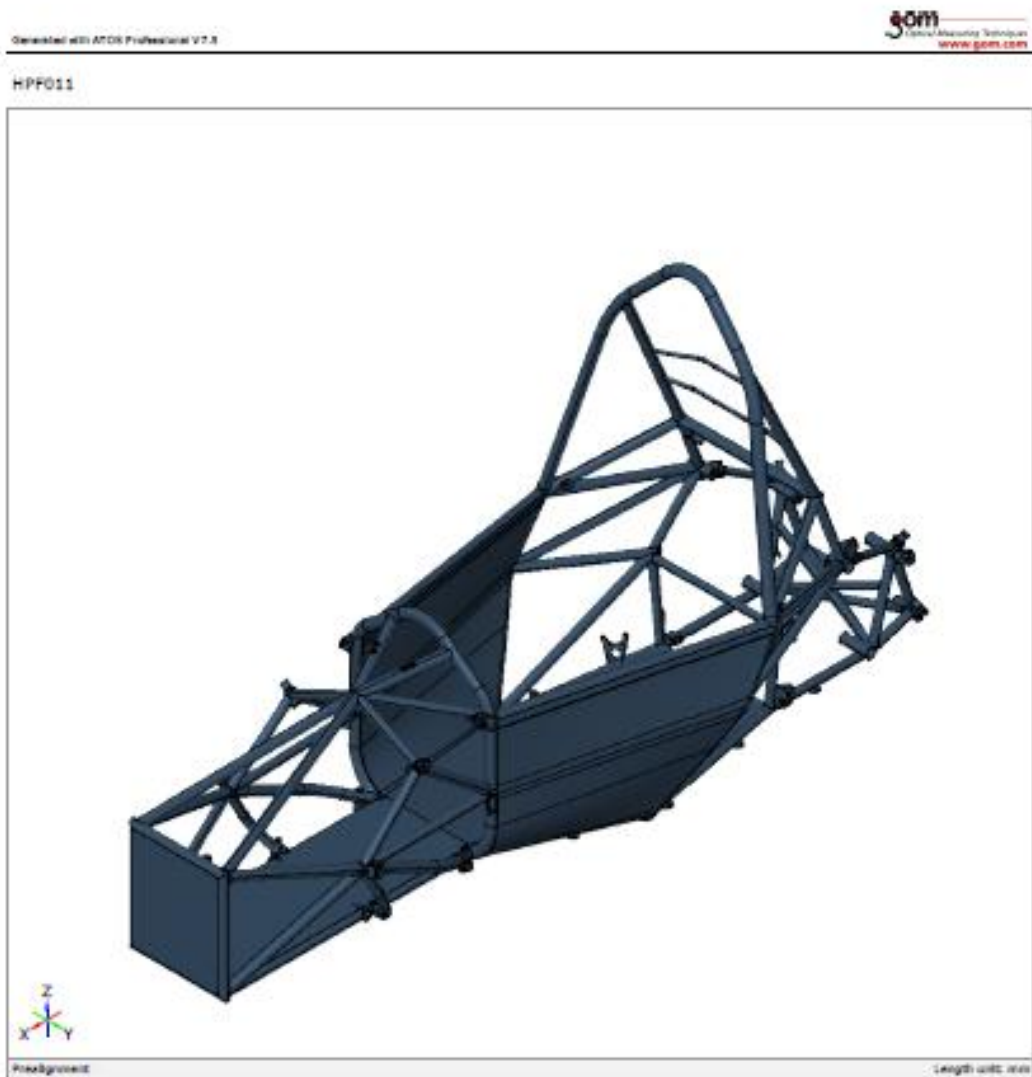
Lähteet

- 1 Principal of Optical 3D digitizing. 2005. PDF-dokumentti. GOM. Luettu 12.3.2012.
- 2 ATOS Triple Scan – Revolutionary scanning technique. 2011 . Verkkodokumentti. GOM. <<http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-triple-scan.html>>.
- 3 Optical 3D measuring. 2010. PDF-dokumentti. Institut für Produktionsmesstechnik, Werkstoffe und Optik (PWO).
- 4 GOM Acceptance Test. Certificate No. 110826_CP40-560-60086. Acceptance/Reverification Base on VDI/VDE 2634, Part 3. 2011. GOM. Luettu 14.3.2012.
- 5 GOM Acceptance Test. Certificate No. 110826_CP20-170-60086. Acceptance/Reverification Base on VDI/VDE 2634, Part 3. 2011. GOM. Luettu 14.3.2012.
- 6 Kolmiomittaus. 2012. Verkkodokumentti. Geocaching. <http://www.geocaching.com/seek/cache_details.aspx?guid=5f3b2a8c-197f-48db-b694-a7bff7f37317>. Luettu 15.4.2012.
- 7 Górski, F., Kuczko, W., Wichniarek, R. & Zawadzki, P. 2010. APPLICATION OF CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY IN REVERSE ENGINEERING. Verkkodokumentti. Poznan University of Technology Division of Production Management. <<http://innomet.ttu.ee/daaam10/proceedings/PDF/gorski.pdf>>. Luettu 23.4.2012
- 8 The Basics of Photogrammetry. 2006. Verkkodokumentti. Geodetic Systems. <<http://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry.aspx>>. Luettu 26.4.2012
- 9 Vinni, Päivi. 2003. Kuva kertoo enemmän kuin tuhat sanaa – Mitä on forogrammetria? Verkkodokumentti. Vinni Päivi. <<http://www.kotikone.fi/faryan/Teksteja/JatkokurssiB.htm>>. Luettu 23.4.2012
- 10 2012 Formula SAE rules. 2011. Verkkodokumentti. SAE International. <<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2012fsaerules.pdf>>. Luettu 22.06.2012

10 Ketonen, Markus. 2012. HPF011-auton rungon suunnittelija, Metropolia Motorport, Helsinki. Keskustelu. 22.06.2012

11 Ristolainen, Toni. 2012. HPF011-auton alustan suunnittelija, Metropolia Motorsport, Helsinki. Keskustelu. 8.9.2012

Rungon mittaraportti

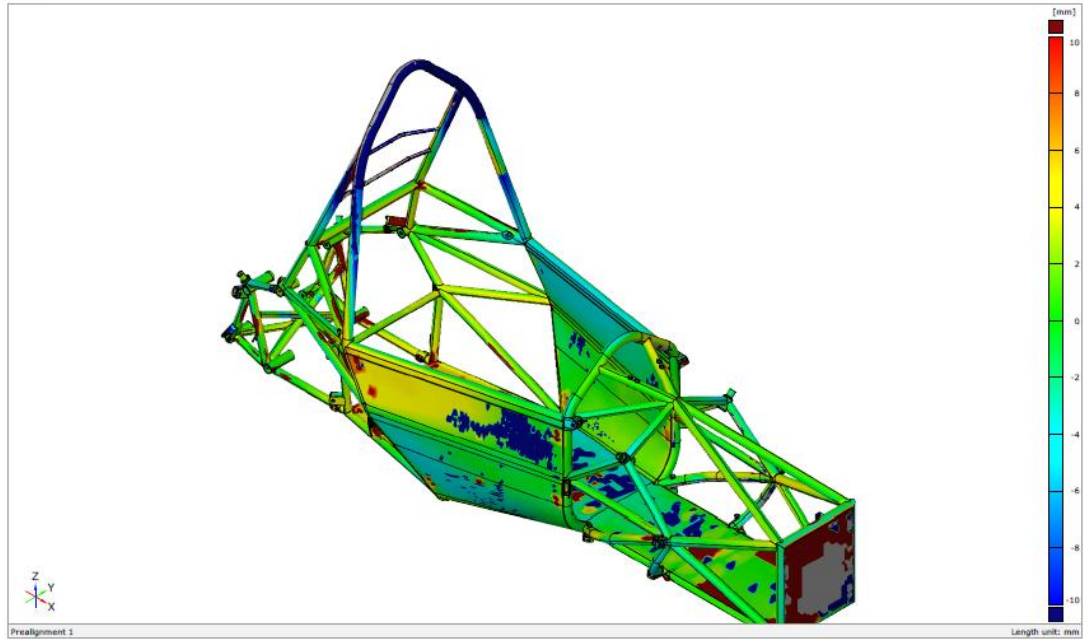


Inspector: Antti Kokko
Company: Cascade Computing
Department:
Location: Helsinki
Date: 4/29/12
Project: Formula Student HPP011
Part: HPP011 Frame
Part no.:
Version:
Charge no.:
System: Atos Triplescan II + trilop

Generated with ATOS Professional V7.5



Comparison



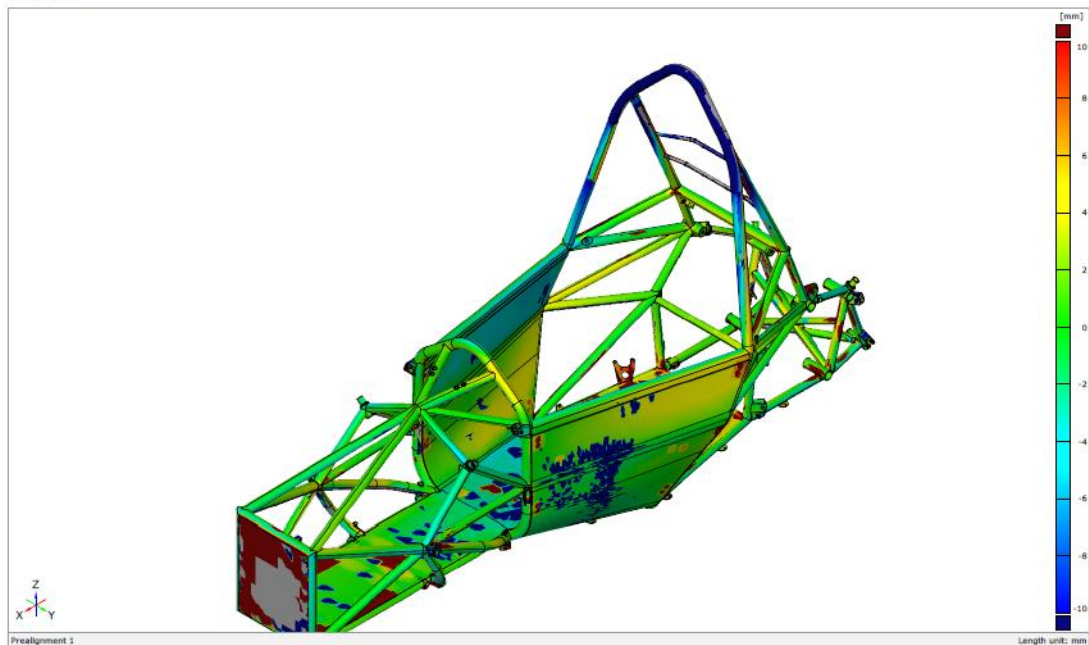
Formula Student HPP011 HPP011 Frame

2/12

Generated with ATOS Professional V7.5



Comparison



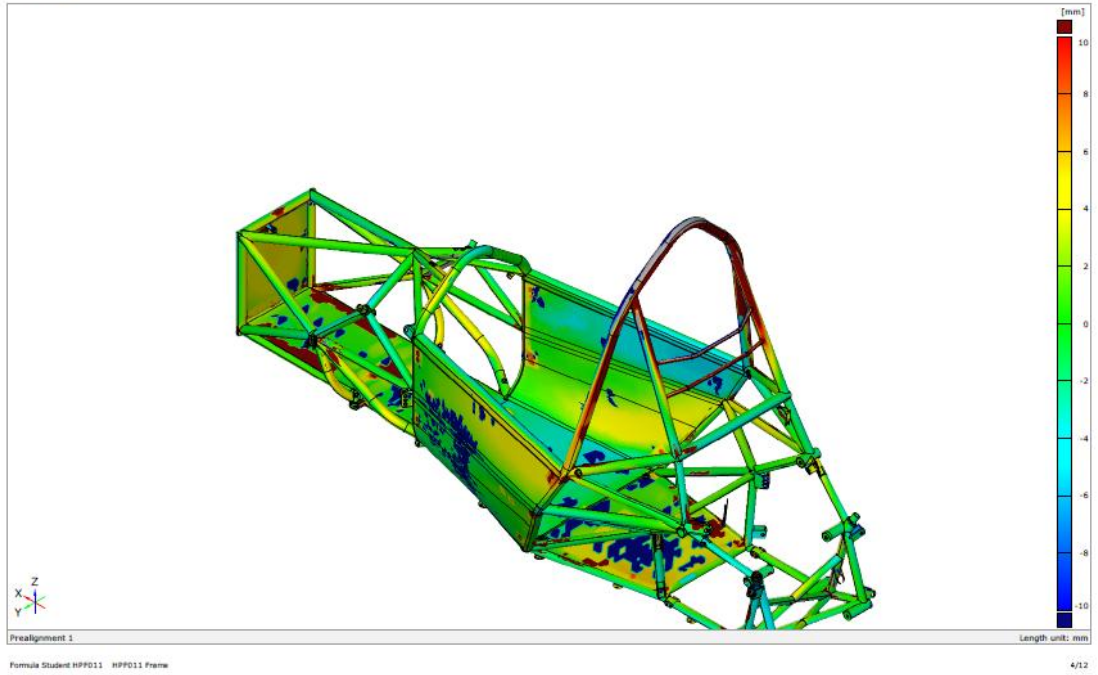
Formula Student HPP011 HPP011 Frame

3/12

Generated with ATOS Professional V7.5



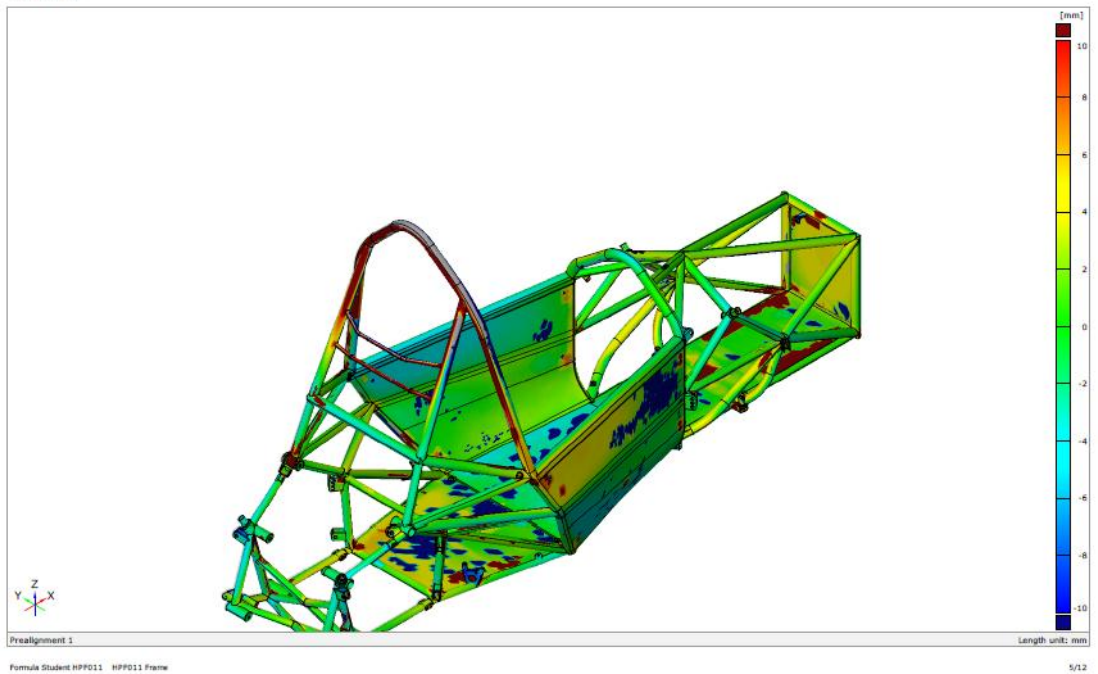
Comparison

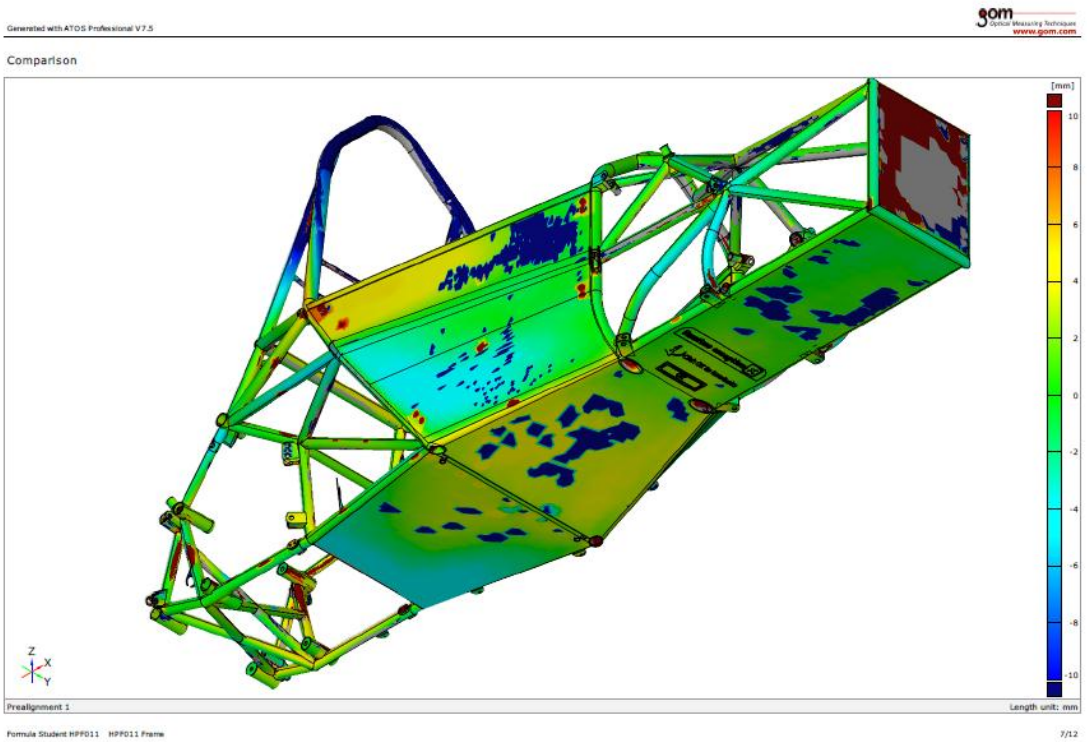
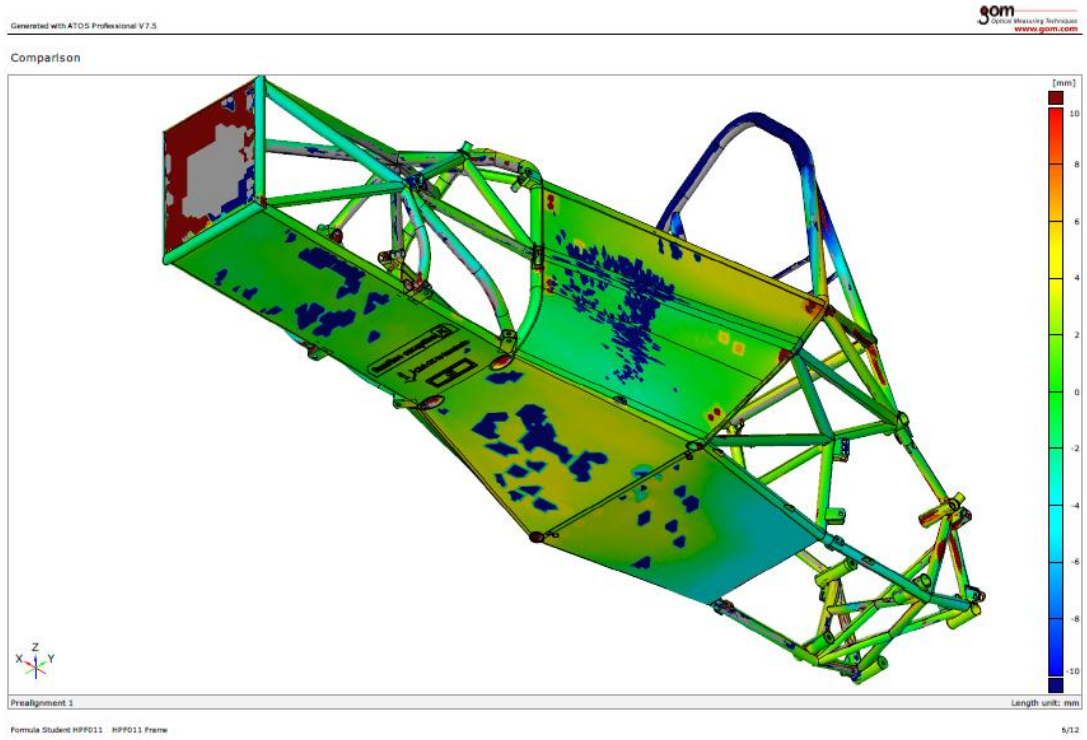


Generated with ATOS Professional V7.5

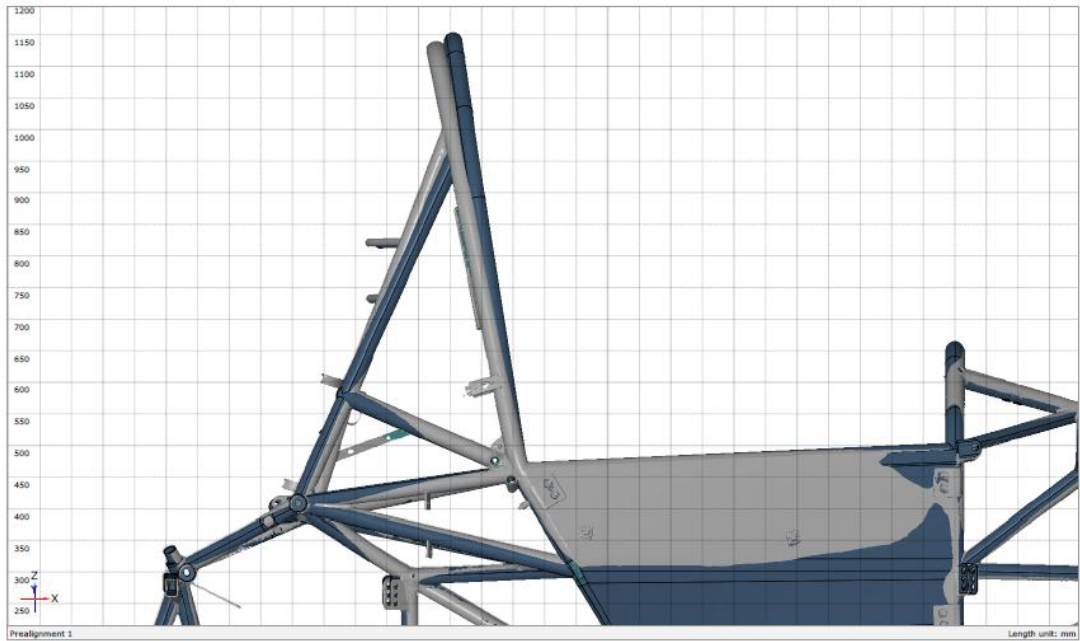


Comparison





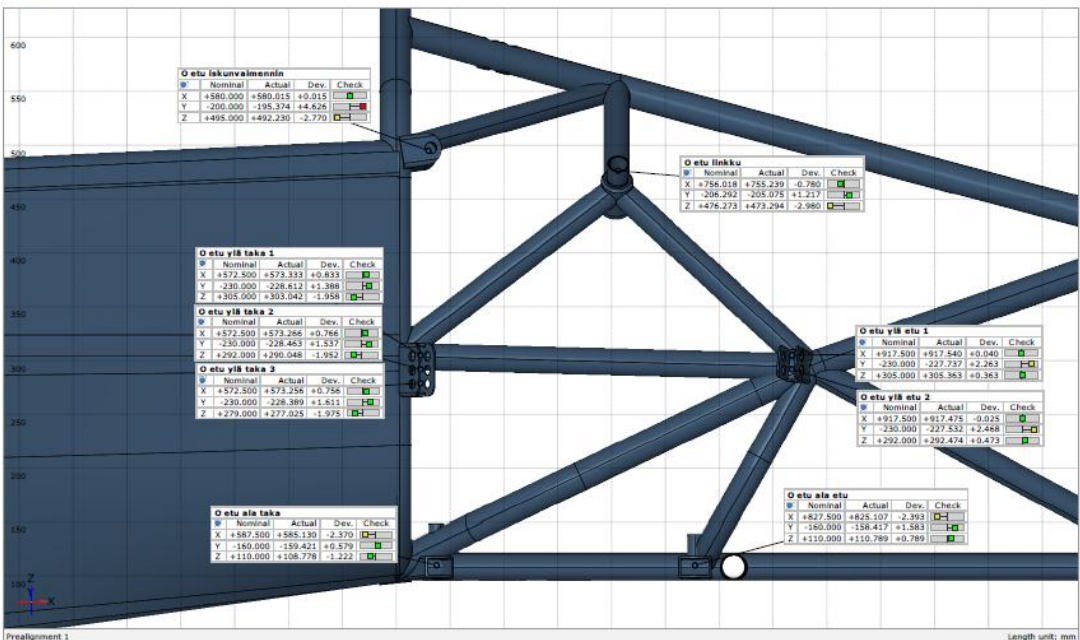
Comparison



Formula Student HPP011 HPP011 Frame

8/12

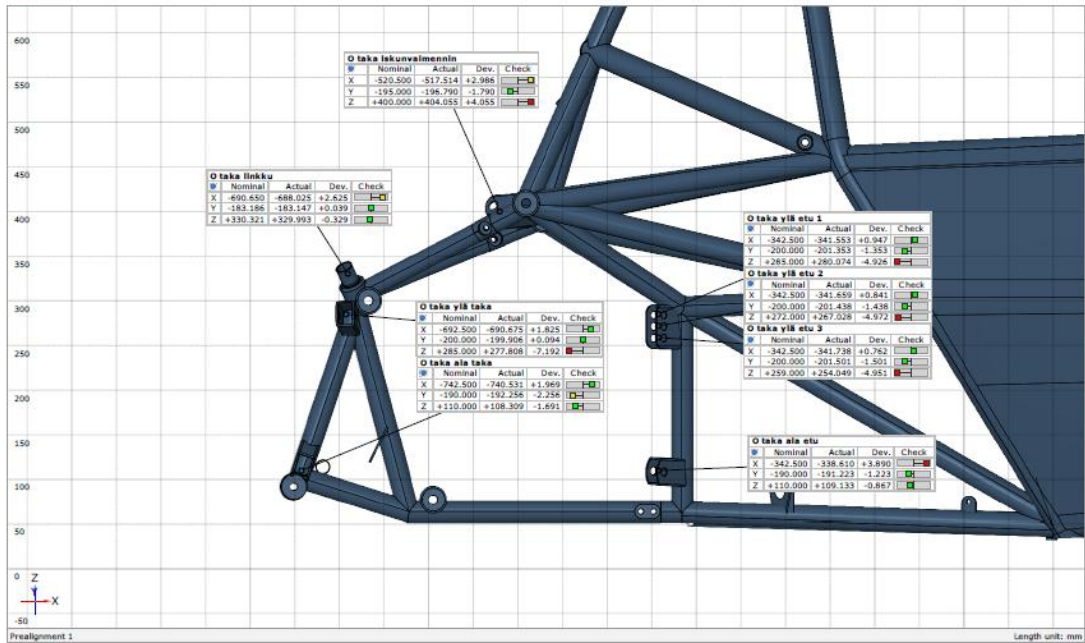
Oikea etu



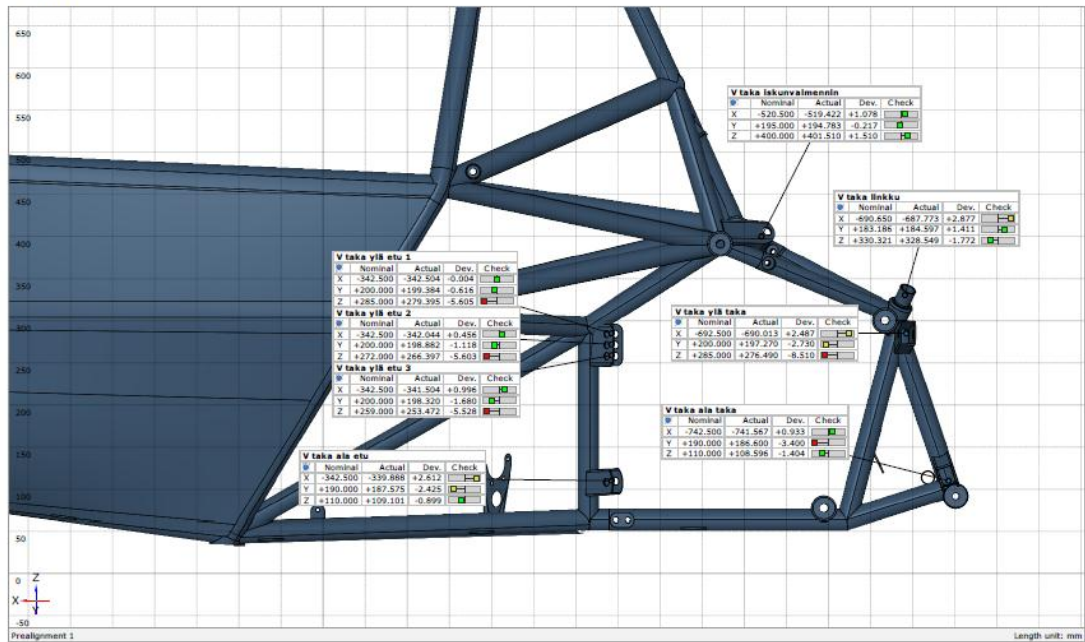
Formula Student HPP011 HPP011 Frame

9/12

Oikea taka

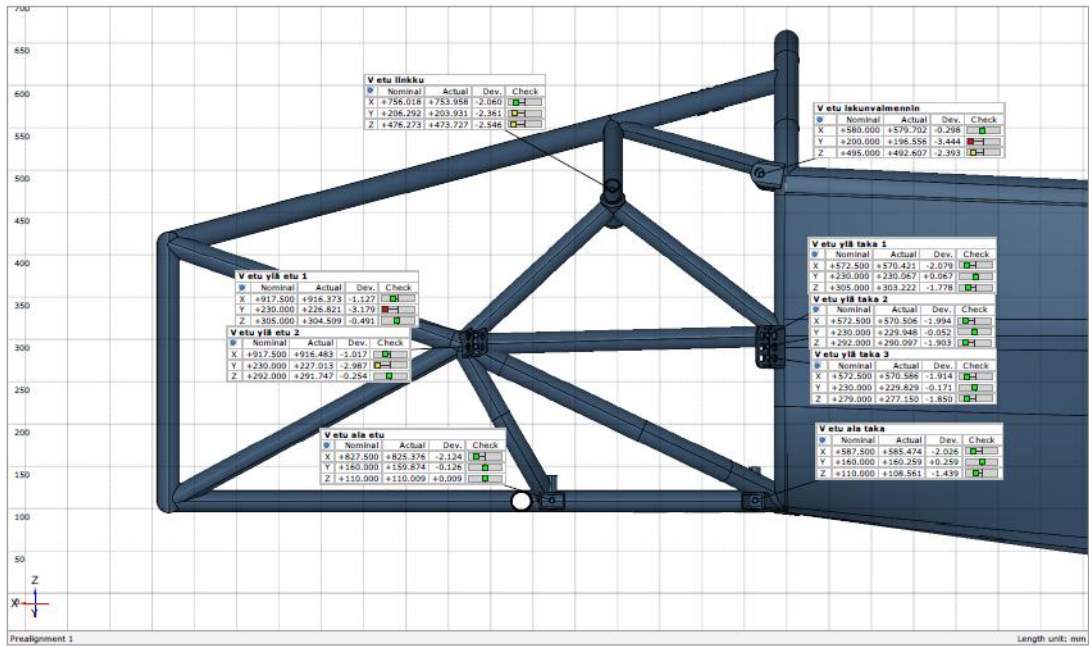


Vasen taka



Generated with ATOS Professional V7.5

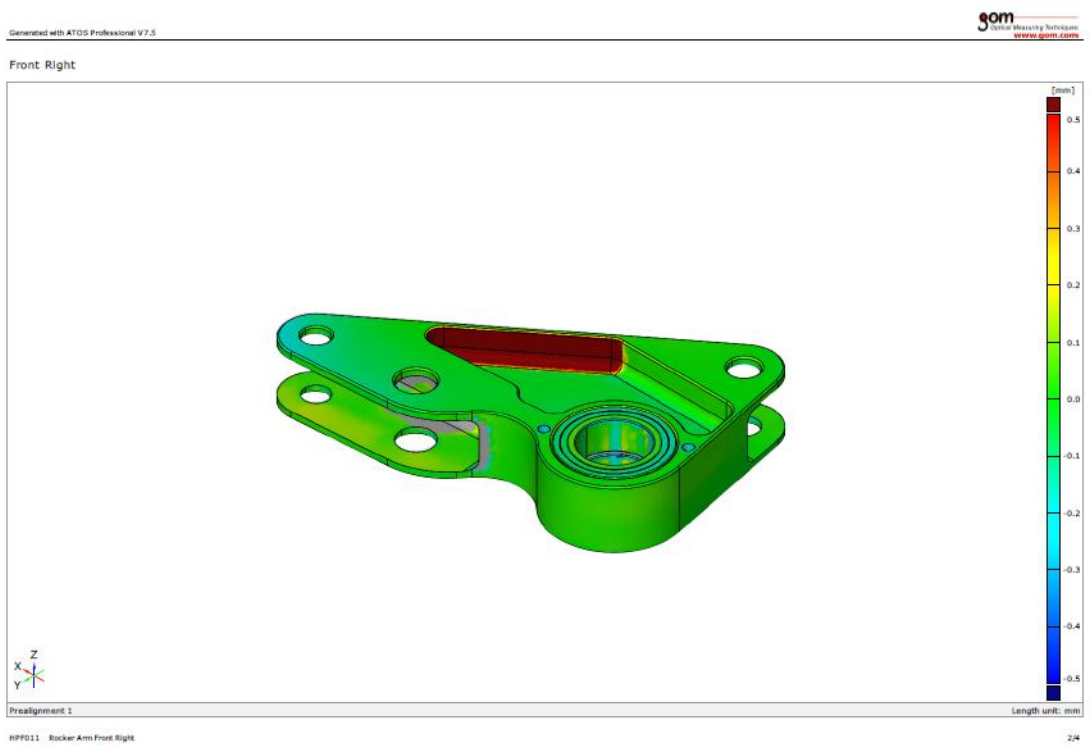
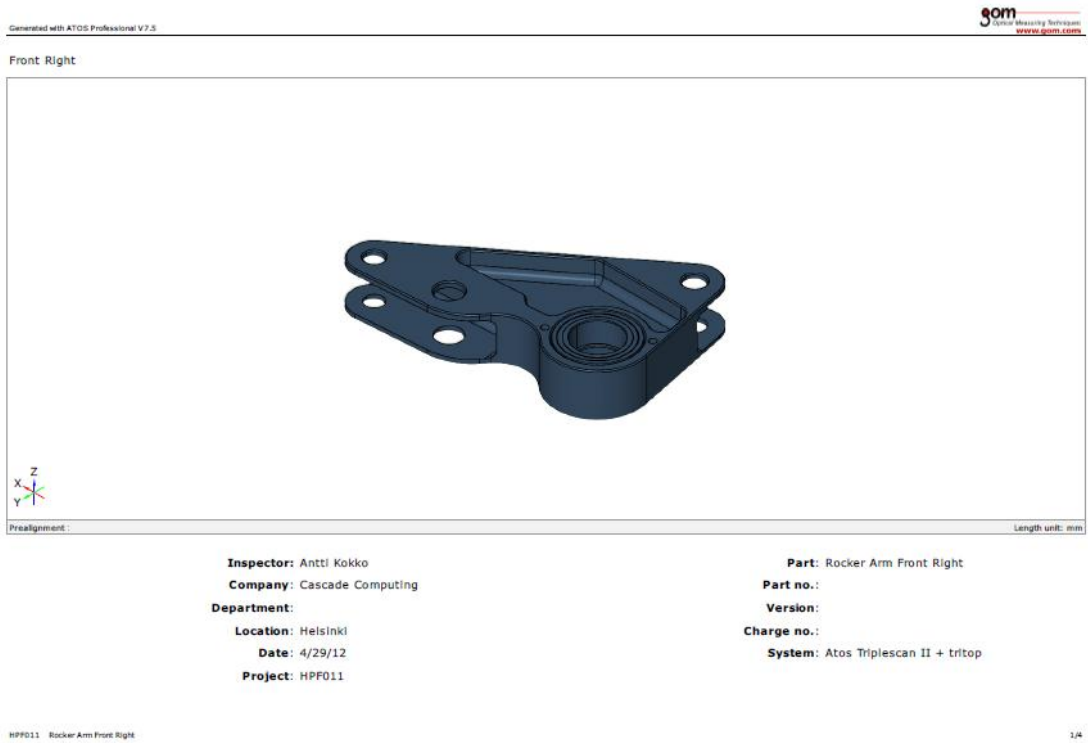
Vasen etu



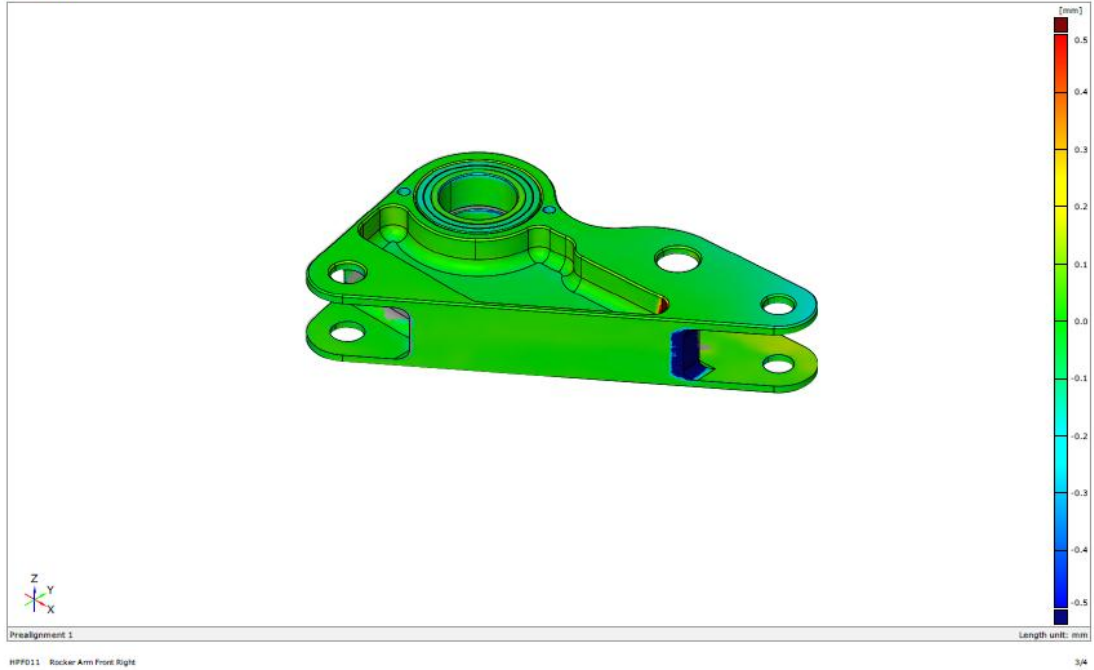
Formula Student HPP011 HPP011 Frame

2/12

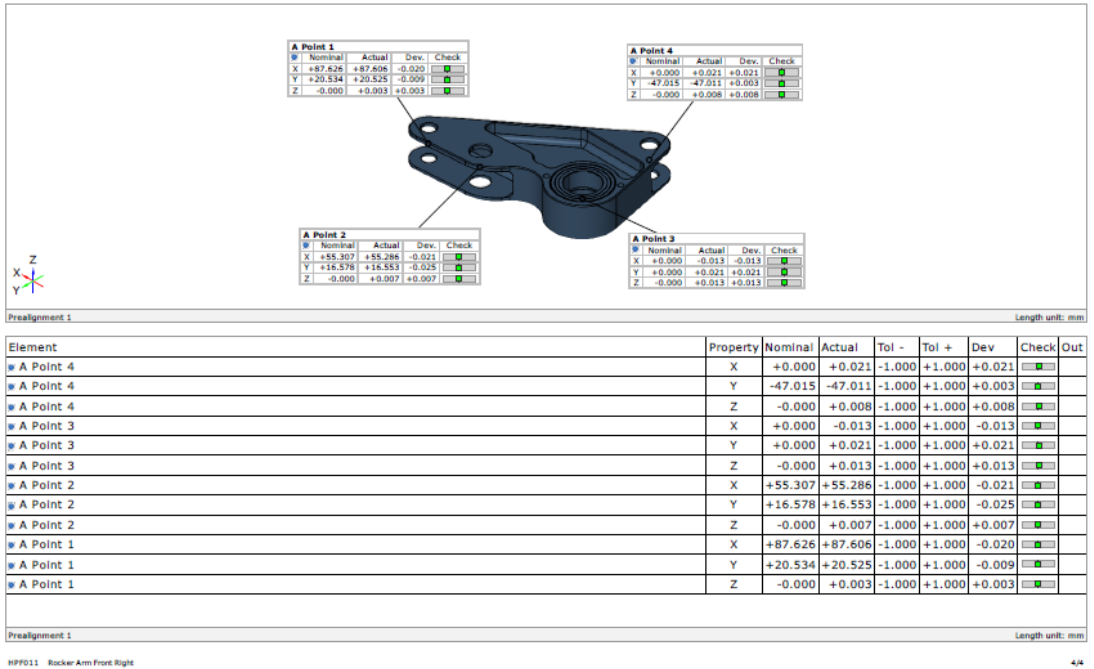
Linkkujen mittaraportit



Front Right



Front Right



Front Left



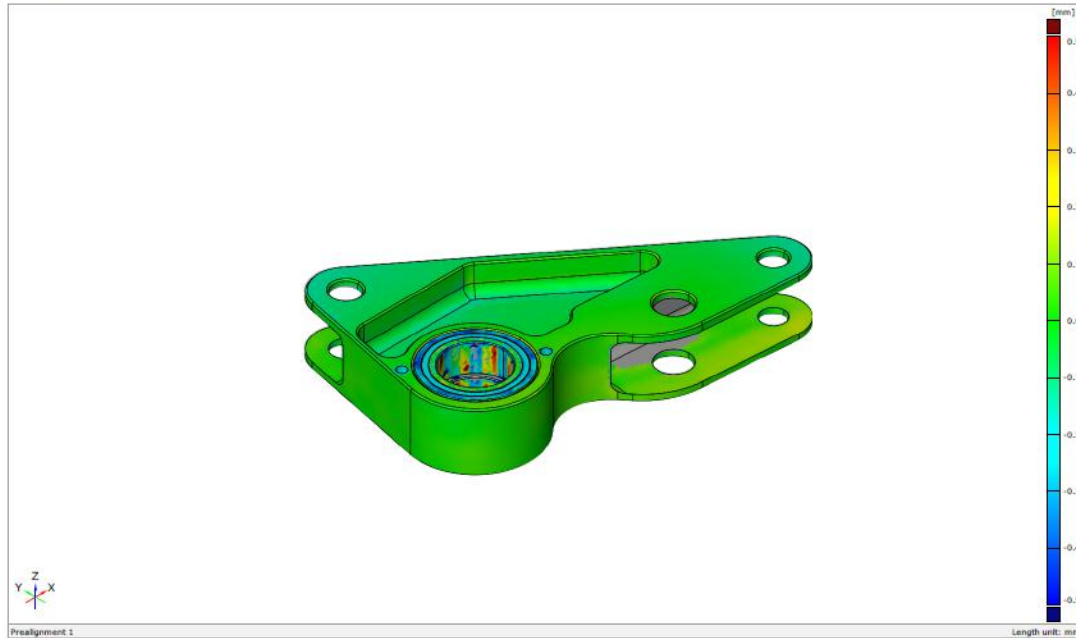
Prealignment :

Length unit: mm

Inspector: Antti Kokko
Company: Cascade Computing
Department:
Location: Helsinki
Date: 4/29/12
Project: HPP011

Part: Rocker Arm Front Left
Part no.:
Version:
Charge no.:
System: Atos Triplescan II + tritop

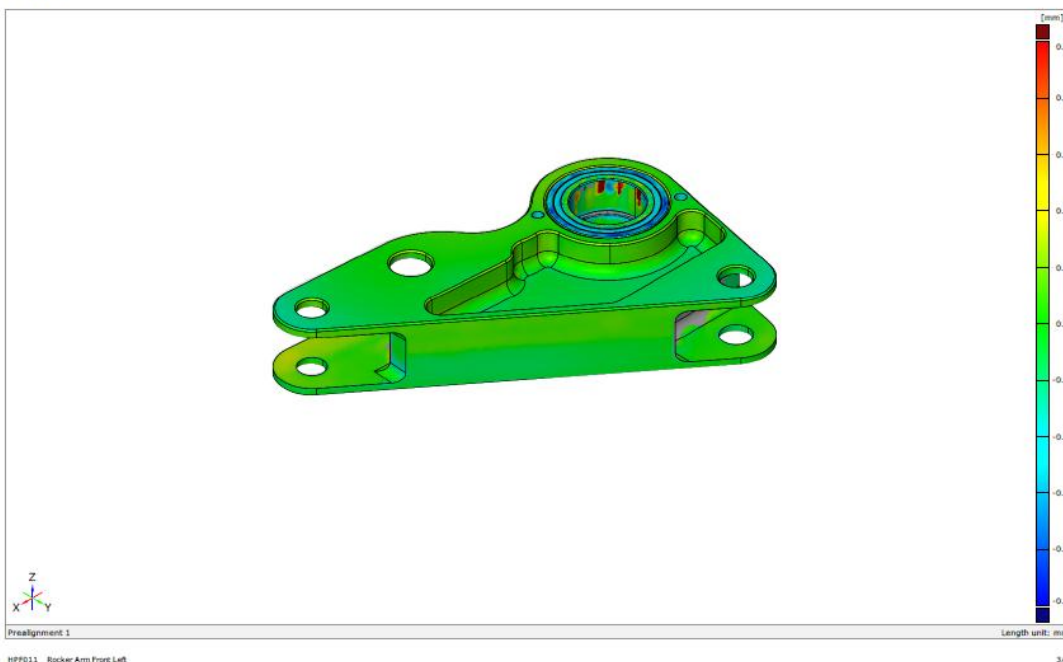
Front Left



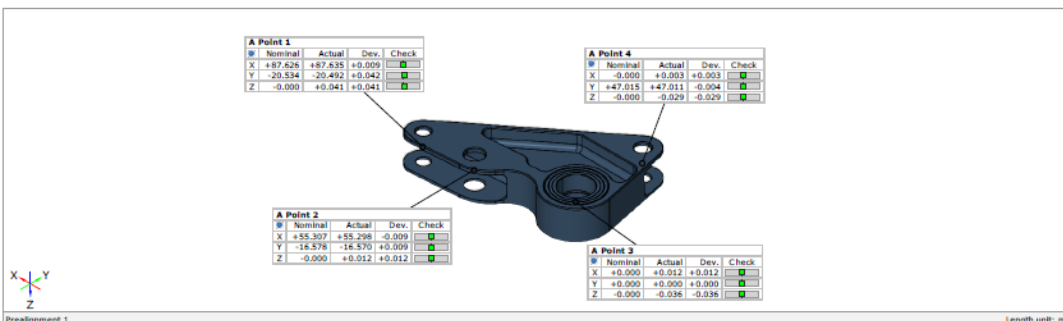
Prealignment 1

Length unit: mm

Front Left



Front Left



A Point 1				
	Nominal	Actual	Dev.	Check
X	+87.626	+87.635	+0.009	<input type="checkbox"/>
Y	-20.534	-20.492	+0.042	<input type="checkbox"/>
Z	-0.000	+0.041	+0.041	<input type="checkbox"/>

A Point 4				
	Nominal	Actual	Dev.	Check
X	-0.000	+0.003	+0.003	<input type="checkbox"/>
Y	+47.015	+47.011	-0.004	<input type="checkbox"/>
Z	-0.000	-0.029	-0.029	<input type="checkbox"/>

A Point 2				
	Nominal	Actual	Dev.	Check
X	+55.307	+55.298	-0.009	<input type="checkbox"/>
Y	-16.578	-16.570	+0.009	<input type="checkbox"/>
Z	-0.000	+0.012	+0.012	<input type="checkbox"/>

A Point 3				
	Nominal	Actual	Dev.	Check
X	+0.000	+0.012	+0.012	<input type="checkbox"/>
Y	+0.000	+0.000	+0.000	<input type="checkbox"/>
Z	-0.000	-0.036	-0.036	<input type="checkbox"/>

Element	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
A Point 4	X	-0.000	+0.003	-1.000	+1.000	+0.003	<input type="checkbox"/>	
A Point 4	Y	+47.015	+47.011	-1.000	+1.000	-0.004	<input type="checkbox"/>	
A Point 4	Z	-0.000	-0.029	-1.000	+1.000	-0.029	<input type="checkbox"/>	
A Point 3	X	+0.000	+0.012	-1.000	+1.000	+0.012	<input type="checkbox"/>	
A Point 3	Y	+0.000	+0.000	-1.000	+1.000	+0.000	<input type="checkbox"/>	
A Point 3	Z	-0.000	-0.036	-1.000	+1.000	-0.036	<input type="checkbox"/>	
A Point 2	X	+55.307	+55.298	-1.000	+1.000	-0.009	<input type="checkbox"/>	
A Point 2	Y	-16.578	-16.570	-1.000	+1.000	+0.009	<input type="checkbox"/>	
A Point 2	Z	-0.000	+0.012	-1.000	+1.000	+0.012	<input type="checkbox"/>	
A Point 1	X	+87.626	+87.635	-1.000	+1.000	+0.009	<input type="checkbox"/>	
A Point 1	Y	-20.534	-20.492	-1.000	+1.000	+0.042	<input type="checkbox"/>	
A Point 1	Z	-0.000	+0.041	-1.000	+1.000	+0.041	<input type="checkbox"/>	

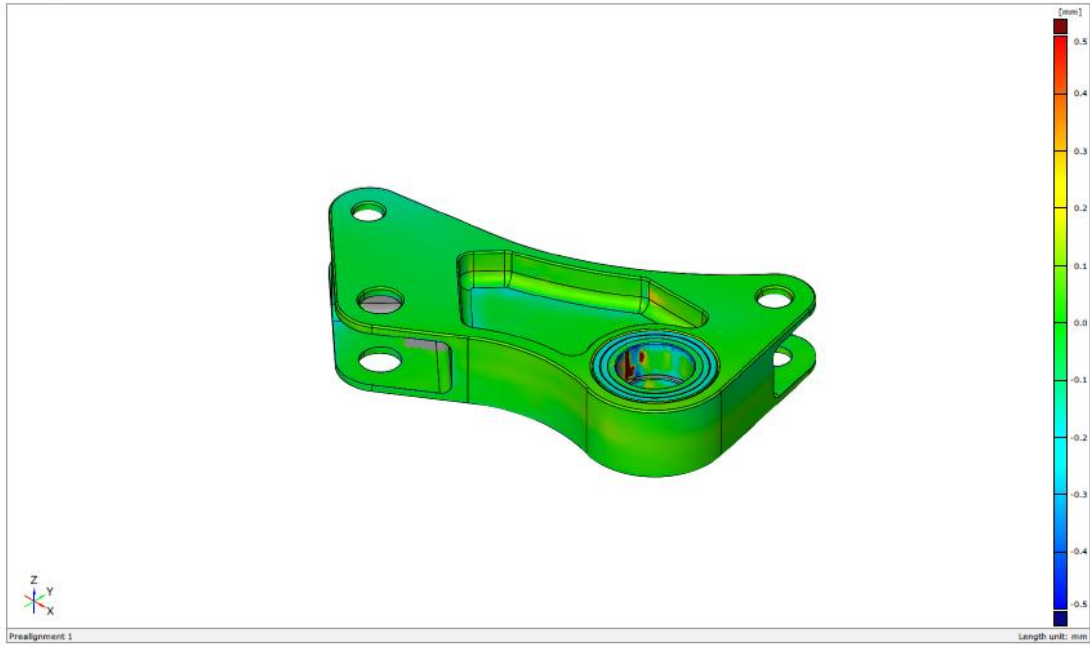
Rear Right



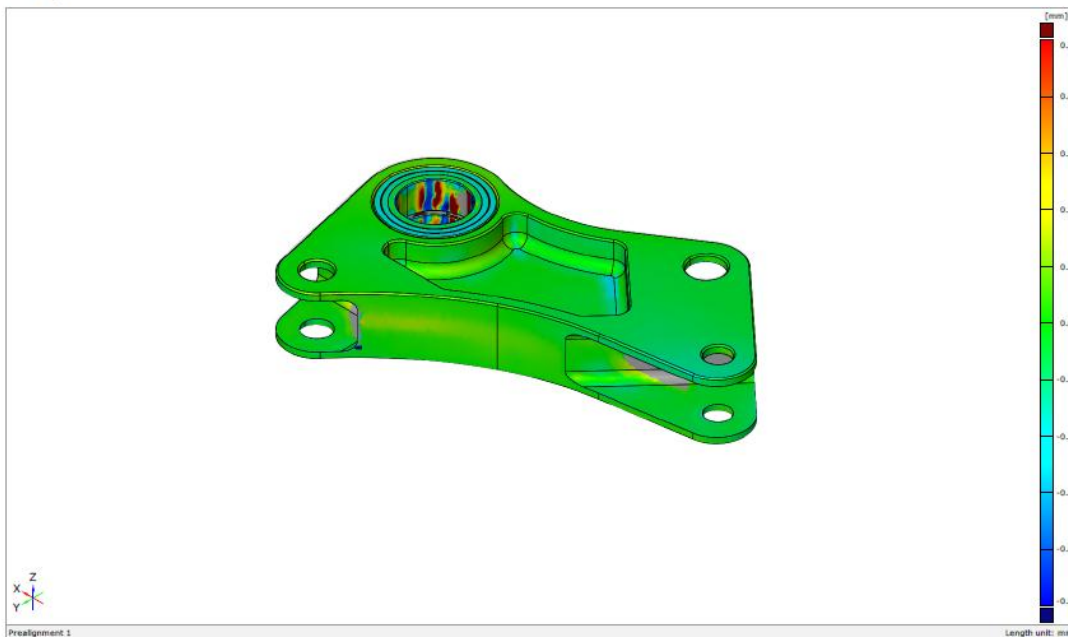
Inspector: Antti Kokko
Company: Cascade Computing
Department:
Location: Helsinki
Date: 4/29/12
Project: HPP011

Part no.: Rocker Arm Rear Right
Version:
Charge no.:
System: Atos Triplescan II + tritop

Rear Right



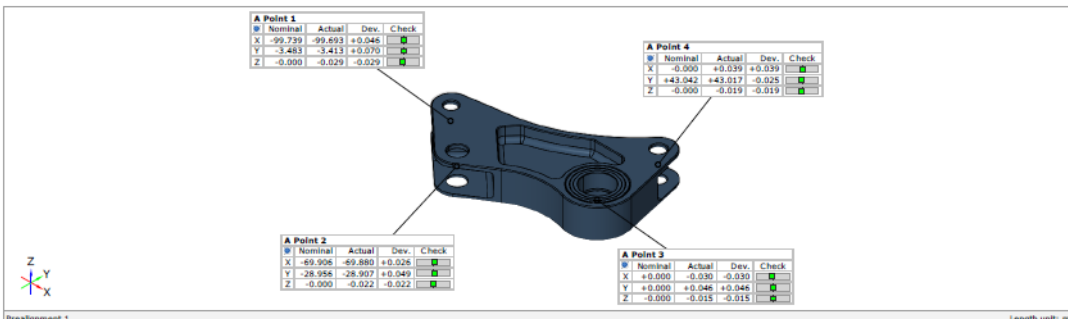
Rear Right



HPFD11: Rocker Arm Rear Right

3/4

Rear Right



Element	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
A Point 4	X	-0.000	+0.039	-1.000	+1.000	+0.039	<input type="checkbox"/>	
A Point 4	Y	+43.042	+43.017	-1.000	+1.000	-0.025	<input type="checkbox"/>	
A Point 4	Z	-0.000	-0.019	-1.000	+1.000	-0.019	<input type="checkbox"/>	
A Point 3	X	+0.000	-0.030	-1.000	+1.000	-0.030	<input type="checkbox"/>	
A Point 3	Y	+0.000	+0.046	-1.000	+1.000	+0.046	<input type="checkbox"/>	
A Point 3	Z	-0.000	-0.015	-1.000	+1.000	-0.015	<input type="checkbox"/>	
A Point 2	X	-69.906	-69.880	-1.000	+1.000	+0.026	<input type="checkbox"/>	
A Point 2	Y	-28.956	-28.907	-1.000	+1.000	+0.049	<input type="checkbox"/>	
A Point 2	Z	-0.000	-0.022	-1.000	+1.000	-0.022	<input type="checkbox"/>	
A Point 1	X	-99.739	-99.693	-1.000	+1.000	+0.046	<input type="checkbox"/>	
A Point 1	Y	-3.483	-3.413	-1.000	+1.000	+0.070	<input type="checkbox"/>	
A Point 1	Z	-0.000	-0.029	-1.000	+1.000	-0.029	<input type="checkbox"/>	

HPFD11: Rocker Arm Rear Right

4/4

Rear Left



Prealignment:

Length unit: mm

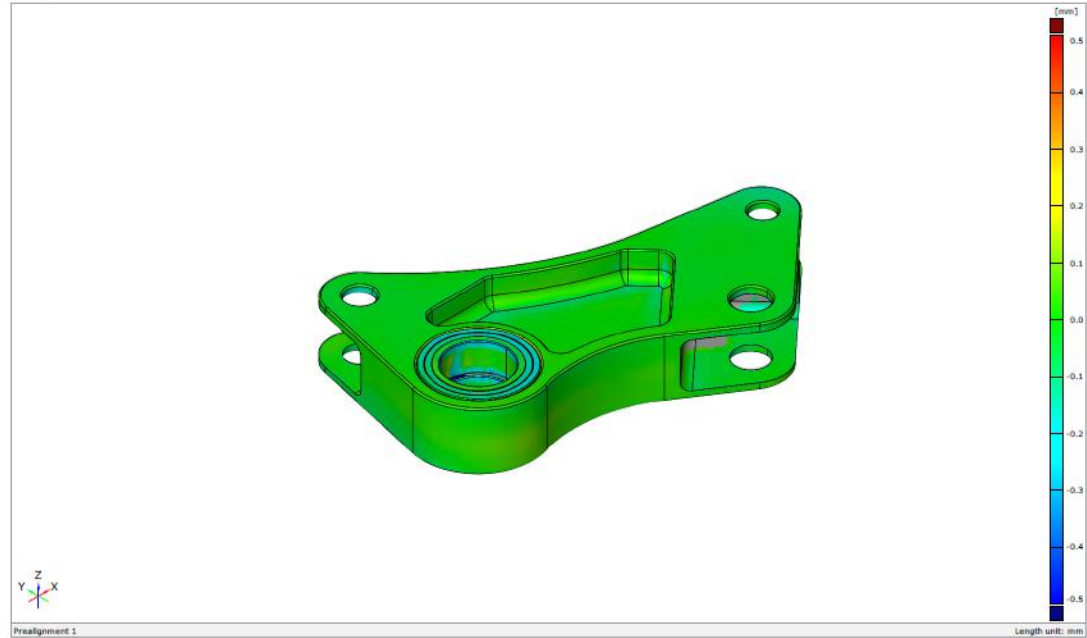
Inspector: Antti Kokko
Company: Cascade Computing
Department:
Location: Helsinki
Date: 4/29/12
Project: HPF011

Part: Rocker Arm Rear Left
Part no.:
Version:
Charge no.:
System: Atos Triplscan II + tritop

HPF011 Rocker Arm Rear Left

1/4

Rear Left



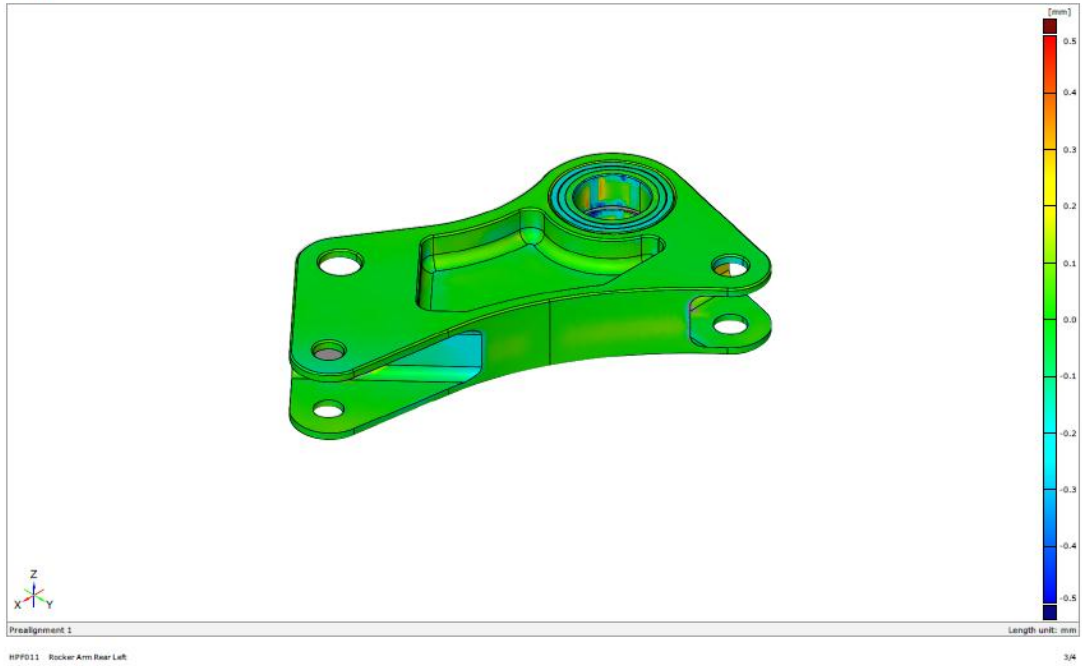
Prealignment 1

Length unit: mm

HPF011 Rocker Arm Rear Left

2/4

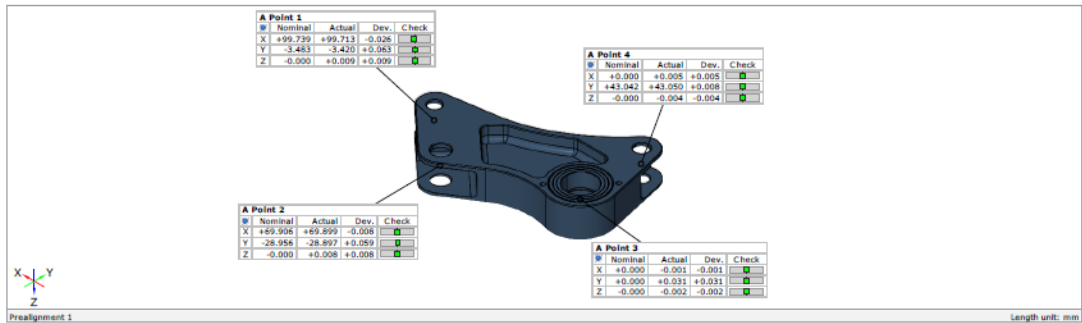
Rear Left



HPFD11 Rocker Arm Rear Left

3/4

Rear Left



Prealignment 1

Length unit: mm

Element	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
A Point 4	X	+0.000	+0.005	-1.000	+1.000	+0.005	OK	
A Point 4	Y	+43.042	+43.050	-1.000	+1.000	+0.008	OK	
A Point 4	Z	-0.000	-0.004	-1.000	+1.000	-0.004	OK	
A Point 3	X	+0.000	-0.001	-1.000	+1.000	-0.001	OK	
A Point 3	Y	+0.000	+0.031	-1.000	+1.000	+0.031	OK	
A Point 3	Z	-0.000	-0.002	-1.000	+1.000	-0.002	OK	
A Point 2	X	+69.906	+69.899	-1.000	+1.000	-0.008	OK	
A Point 2	Y	-28.956	-28.897	-1.000	+1.000	+0.059	OK	
A Point 2	Z	-0.000	+0.008	-1.000	+1.000	+0.008	OK	
A Point 1	X	+99.739	+99.713	-1.000	+1.000	-0.026	OK	
A Point 1	Y	-3.483	-3.420	-1.000	+1.000	+0.063	OK	
A Point 1	Z	-0.000	+0.009	-1.000	+1.000	+0.009	OK	

HPFD11 Rocker Arm Rear Left

4/4