

Anssi Heikkinen

Tärinävaimennetun koteloratkaisun kehittäminen kuvauskooperiin

Insinööri (AMK),

kone- ja tuotantotek-
niikka

Kevät 2016



KAJAANIN
AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

TIIVISTELMÄ

Tekijä(t): Heikkinen Anssi

Työn nimi: Tärinävaimennetun koteloratkaisun kehittäminen kuvauskooperiin

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), kone- ja tuotantotekniikka

Asiasanat: Tärinätestaus, UAV, kuvanvakautin, 3D-mallinnus, 3D-tulostus, Raspberry Pi

Insinööriyön tilaajana oli Oulun yliopiston mittaustekniikan yksikkö CEMIS-Oulu. Työ liittyy liikkuvat laitealustat (LILA) -projektiin, jossa kehitetään maalla ja ilmassa liikkuvien laitealusten mittaustekniikkaa. Työn tavoitteena oli kehittää Raspberry Pi -pohjaiselle mittaus- ja kuvantamismoduulille tärinävaimennettu koteloratkaistu, joka mahdollistaa moduulin käyttämisen erityyppisissä ilmassa liikkuvissa laitealuksissa. Koteloratkaistu suunnitellaan ensisijaisesti DJI Phantom 2 -kuvauskooperille.

Tärinävaimennuksen ratkaisuksi hankittiin DJI Phantom 2 -kooperille suunniteltu Quantum Q-2D gimbaali. Quantum Q-2D sisältää kaksi hiiliharjatonta sähkömoottoria kahden akselin tasapainotukseen pitäen kameran vaaka-asennossa kooperin asennosta välittämättä. Kotelointi Raspberry Pi -pohjaiselle mittaus- ja kuvantamismoduulille suunniteltiin Autodesk Inventor 3D-CAD -mekaniikkasuunnitteluohjelmistolla ja tulostettiin Kajaanin ammattikorkeakoulussa 3D-tulostimella. Gimbaali muokattiin ja 3d-tulostettu kotelointi kiinnitettiin gimbaaliin. Koteloinnin tärinätestaus suoritettiin Kajaanin ammattikorkeakoulussa tärinätestauslaitteistolla. Vaimennuskäytettä vertailtiin neljällä erilaisella vaimennuskumilla.

Työn lopputuloksena saatiin tärinävaimennettu kotelointiratkaistu, jonka toimivuus varmistettiin tärinätestauksilla.

ABSTRACT

Author(s): Heikkinen Anssi

Title of the Publication: Development of a vibration proof housing solution for imaging helicopter

Degree Title: Bachelor of Engineering, Mechanical and Production Engineering

Keywords: Vibration testing, UAV, gimbal, 3D modeling, 3D printing, Raspberry Pi

The commissioner of the thesis was Oulu University's unit CEMIS-Oulu. The thesis is related to a mobile device platforms (LILA) project, which is developing measurement technology of vessels moving on land and in the air. The aim of this Bachelor's thesis was to develop a vibration proof housing solution for Raspberry Pi -based imaging and measurement system which enables the use of the module for different types of air moving vessels. The housing solution is designed primarily for DJI Phantom 2 imaging helicopter.

Quantum Q-2D gimbal, designed for DJI Phantom 2 helicopter, was purchased for the vibration reduction solution. Quantum Q-2D contains two brushless electric motors to balance two axes keeping the camera in a horizontal position regardless of the position of the helicopter. The housing for Raspberry Pi -based imaging and measurement module was designed with Autodesk Inventor 3D-CAD -mechanical design software and was printed at Kajaani University of Applied Sciences by a 3D-printer. The gimbal was modified and 3D-printed housing was attached to gimbal. The vibration testing of housing was performed with vibration testing equipment at Kajaani University of Applied Sciences. Damping capacity was compared with four different damping rubbers.

The result was a vibration proof housing solution whose operation was verified with vibration tests.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	1
2 ILMASSA LIIKKUVAT LAITEALUKSET	2
2.1 Käyttötarkoitus ja historia	2
2.2 UAV-laitteet ammattikäytössä	3
2.2.1 VideoDrone	3
2.2.2 DJI Inspire 1	4
2.2.3 Gryphon Dynamics 1200F.....	4
2.2.4 Camflight X8.....	5
2.3 UAV-laitteet harrastelijakäytössä.....	5
2.3.1 DJI Phantom 2	6
2.3.2 Yuneec Typhoon Q500	7
2.4 UAV-laitteiden kamerat ja kuvanlaatu	9
2.4.1 Digitaalikamerat	9
2.4.2 Infrapunakamerat	9
2.4.3 Spektrikamerat	10
2.4.4 Digitaalikameran valinnasta	10
3 KUVANLAATUA PARANTAVAT LAITTEET.....	11
3.1 Yleiset kuvanlaatuun vaikuttavat tekijät.....	11
3.2 Kuvanvakautus ja värinävaimennus.....	11
3.2.1 Kuvanvakautin eli kameragimbaali.....	11
3.2.2 Quatum Q-2D kameragimbaali.....	12
4 3D-TULOSTIMET JA TÄRINÄTESTAUSLAITTEISTO.....	13
4.1 3D-tulostimet	13
4.1.1 Dimension SST-768	13
4.1.2 ProJet 3510 HDPlus.....	14
4.2 Tärinätestauslaitteisto	14
4.2.1 Kiihtyvyyssanturi Kistler 8702B50M1	15
4.2.2 Kiihtyvyyssanturi Kistler 8778A500	16
5 KOTELORATKAISUN SUUNNITTELU JA VALMISTUS.....	17

5.1 Raspberry Pi Model A+	17
5.2 IVPort Raspberry Pi Camera Module Multiplexer	17
5.3 Raspberry Pi -kameramoduulit	18
5.4 MiniMU-9 v3	19
5.5 Koteloinnin mallinnus	19
5.6 Koteloinnin 3D-tulostus	21
5.7 Koteloinnin toisen version 3D-tulostus	21
5.8 Quanam Q-2D -kuvanvakauttimen muokkaaminen.....	23
5.9 Phantom 2 -kopterin muokkaaminen.....	24
6 KOTELOINTIRATKAISUN TESTAUS JA MITTAUSTULOKSET	25
6.1 Valmistelut tärinämittauksia varten.....	25
6.2 Tärinämittaukset ensimmäisellä koteloversiolla.....	26
6.3 Tärinämittaukset toisella koteloversiolla	31
7 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	32
8 YHTEENVETO	35
LÄHTEET	36
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä suunnitellaan ja toteutetaan kotelointi Raspberry Pi - pohjaiselle kuvantamis- ja mittausjärjestelmälle, joka on tärinävaimennettu ja siirrettävissä erityyppisiin ilmassa liikkuviin laitealuksiin. Kuvantamis- ja mittausjärjestelmän on kehittänyt Oulun yliopiston mittaustekniikan yksikkö CEMIS-Oulu. Insinööriyö liittyy yksikön liikkuvat laitealustat (LILA) -projektiin, jossa kehitetään ilmassa liikkuviin laitealuksiin liittyvää mittaustekniikkaa. Kotelointi järjestelmää varten suunnitellaan ja mitoitetaan Autodesk Inventor 3D-CAD -mekaniikkasuunniteluohjelmistolla. Suunniteltu kotelointi 3D-tulostetaan. Koteloitu kuvantamis- ja mittausjärjestelmä kiinnitetään koteloinnille sopivaksi muokattuun Quanum Q-2d kuvanvakauttimeen ja tärinävaimennetun laitteiston toimivuus testataan tärinätestauksilla Kajaanin ammattikorkeakoulun tärinätestauslaitteistolla.

2 ILMASSA LIIKKUVAT LAITEALUKSET

2.1 Käyttötarkoitus ja historia

Ilmassa liikkuvilla laitealuksilla tarkoitetaan yleensä miehittämättömiä ilma-aluksia (UAV), kuten pyöriväsiipisiä koptereita tai kiinteäsiipisiä lennokkeja, joita on tarkoitettu käytettäväksi ilman mukana kulkevaa ohjaajaa. Yleensä miehittämättömät ilma-alukset on suunniteltu jotain tehtävää, esimerkiksi valo- ja videokuvausta tai mittaamista varten. UAV-laitetta pystytään ohjaamaan maasta käsin kauko-ohjaimella, tai se lentää automaattisesti ohjelmoitua reittiä pitkin GPS-koordinaattien avulla. Myös termiä UAS (Unmanned Aerial System) käytetään. Se käsittää lennokin lisäksi kaiken koneeseen liitetyn, kuten tietokoneen, sensorit, kameran ja radiolinkin. [1.]

UAV-laitteiden historia on sotilaskäytössä. Siviilikäyttöisten UAV-lennokkien kehitys voimistui 2000-luvulla. 2010-luvulla Suomessa on siirrytty kasvamassa määrin käyttämään miehittämättömiä ilma-aluksia mittaus- ja kartoitustarkoituksissa yrityskäytössä ja harrastuskäyttö on myös lisääntynyt. Lennokkeja ja koptereita on saatavissa verkkokaupoista eri valmistajien tekeminä helposti ja edullisesti. [1.]

UAV-laitteita käytetään ammattilaiskäytössä moniin eri tarkoituksiin, kuten maisemakuvauksiin, TV- ja elokuvatuotannon kuvauksiin, maasto- ja karttakuviin, luonnonvarojen kunnon seurantaan, ihmisten ja eläinten etsintään, sähkölinjojen tarkastuksiin, sekä erilaisiin mittauksiin ja tilavuuksien ja pinta-alojen laskentoihin. Harrastelijakäytössä laitteita käytetään mm. eri urheilusuoritusten kuvaamiseen ja omien elokuvien tekemisiin. [1.]

2.2 UAV-laitteet ammattikäytössä

Ammattikäyttöön on saatavilla useita erimallisia laitteita lennokkityyppisistä laitteista moniroottoriin koptereihin. Valmiiden kaupallisten järjestelmien hinta alkaa muutamasta tuhannesta eurosta ulottuen kymmeneen tuhansiin euroihin. Vastineeksi saa testatun ja lentovalmiin laitteiston, jota pääsee välittömästi käyttämään. Joidenkin laitteiden valmistajat järjestävät kurssin joka kuuluu laitteen hintaan, kurssi voi olla myös maksullinen. Kursseilla käydään lävitse laitteiden toiminta, lentäminen ja mahdollisesti jopa kuvien käsittely. [1.]

2.2.1 VideoDrone

VideoDrone® Finland Oy on suomalainen ilmakuvaukseen tarkoitettuja kuvauskoptereita valmistava yritys. Yritys on kehittänyt ensimmäisen suomalaisen hiilikuiturakenteisen kuvauskäyttöön suunnitellun multikopterin. Hiilikuiturakenteen ansiosta runko on kevyt ja jäykkä, runko painaa alle 500 g. Kopteri kantaa hyötykuormaa 2500 g. Kopterilla on erityisen hyvä tuulensietokyky, lentäminen onnistuu jopa 8 m/s puhaltavassa tuulessa. Kopteri pystytään varustamaan erilaisilla kuvauslaitteilla asiakkaan toiveen mukaan. Kopteriin voidaan asentaa still-kamera, videokamera, lämpökamera tai jokin muu vastaava laite. Kopterissa on myös yrityksen omaa valmistetta oleva kamerateline, mahdollistaen vakaan ja laadukkaan kuvaamisen. [2.] Kuvassa 1 VideoDrone -kuvauskopteri.



Kuva 1. VideoDrone -kuvauskopteri

2.2.2 DJI Inspire 1

DJI Inspire 1 (kuva 2) on kiinalaisen pienoisilma-aluksia ja niissä käytettävää teknikkaa valmistavan DJI-yhtiön ammattilaistason neliroottorinen ilmakehuvauskopteri. Kopterissa on 3-akselinen Zenmuse X3 kameravakautin ja kamera, jotka ovat varta vasten tätä kopteria varten suunniteltuja. Kamera kykenee nauhoittamaan videota 4K resoluutiolla, still-kuvien tarkkuus on 12,4 megapikseliä. [3.] [4.]



Kuva 2. DJI Inspire 1 -kuvauskopteri

2.2.3 Gryphon Dynamics 1200F

Gryphon 1200F (kuva 3) on hiilikuiturunkoinen 8-roottorinen kuvauskopteri. Ylösnostettavat laskutelineet mahdollistavat kamerasuuntaamisen. [4.]



Kuva 3. Gryphon 1200F -kuvauskopteri

2.2.4 Camflight X8

Camflight X8 (kuva 4) on ilmakartoitusrobotti, jossa on kahdeksan roottoria. Sitä käytetään ortokuvaan- ja maastomallinnuksiin, videokuvauksiin, arkeologiaan, maatalouteen, lumivyöry- ja katastrofitilanteisiin jne. Laitetta seurataan ja käytetään tietokoneen kautta. Robotti osaa tasapainottaa käytettävän kameran automaattisesti ja kompensoi tuulen vaihtelut. [5.]



Kuva 4. Camflight X8 ilmakartoitusrobotti

2.3 UAV-laitteet harrastelijakäytössä

Harrastekäyttöön suunnitellut UAV-laitteet ovat pääsääntöisesti kopterimallisia ja ovat suunniteltuja erityisesti video- ja still-kuvauksia varten. Monet kopterit myydään kameravakauttimen kanssa, tai niihin on mahdollista jälkeinpäin asentaa sellainen.

2.3.1 DJI Phantom 2

Tässä työssä kehitettävä tärinävaimennettu kotelointi kehitetään Phantom 2 UAV -kopterille (kuva 5). Phantom 2 on kiinalaisen pienoasilma-aluksia ja niissä käytettävää teknikkaa valmistavan DJI-yhtiön UAV-kopteri. Phantom 2 on suunniteltu erityisesti videokuvaukseen, ja siihen on mahdollista asentaa kuvanvakautin eli kameragimbaali tasaista videokuvasta varten. Monet kuvanvakauttimet ovat suunniteltuja yhdysvaltalaisen GoPro:n valmistamille actionkameroille. Phantom 2 on akkukäyttöinen, ja valmistaja lupaa 25 minuuttia lentoaikaa yhdellä latauksella. Kopteri on varustettu neljällä moottorilla ja potkurit ovat itsekiristyvät. [6.]



Kuva 5. Phantom 2 UAV -kopteri

Kotelointia suunnitellessa tulee ottaa huomioon Phantom 2:n lentoonlähtöpainon rajallisuus sekä rajallinen kiinnitystila kameravakauttimeen niiden ollessa suunniteltuja lähinnä pieniä actionkameroita varten. Taulukko 1 esittelee Phantom 2:n tekniset tiedot.

Taulukko 1. Phantom 2 -kopterin tekniset tiedot

Paino	1000 g
Leijuntatarkkuus	Vertikaalinen: 0.8 m Horisontaalinen: 2.5 m
Kulmat	Max Yaw kiihtyvyys 200°/s Max Tilt kulma 35°
Nousu- / laskunopeus	Max Nousu 6 m/s Max Lasku 2 m/s
Lentonopeus	Max 15 m/s
Lentoaika	25 min
Lentoonlähtöpaino	≤1300 g
Yhteysetäisyys	1000 m
Toimintalämpötila	-10°C ~ 50°C

2.3.2 Yuneec Typhoon Q500

Yuneec Typhoon Q500 (kuva 6) kuvauskopteri on varustettu 3-akselisella kuvanvakauttimella, johon on integroitu kamera. Kamera kykenee kuvaamaan 4K-resoluutiolla 30 kuvaa sekunnissa tai Full HD -videokuva 120 kuvaa sekunnissa. Kameralla saa kuvattua 12,4 megapikselin still-kuvia. [7.]



Kuva 6. Yuneec Typhoon Q500 kuvauskooperi

2.4 UAV-laitteiden kamerat ja kuvanlaatu

2.4.1 Digitaalikamerat

Digitaalikamerat ovat käytössä melkein kaikissa UAS-sovelluksissa. Kameroissa käytetään CCD- tai CMOS-ilmaisimia. CMOS-ilmaisimet ovat enemmän yleiskäyttöön suunniteltuja, ja niitä käytetään monipuolisesti erilaisissa kameroissa. CCD-ilmaisimet ovat yleensä suunniteltuja tiettyä käyttötarkoitusta varten. Kuvanlaadullisia eroja ei yleiskäytössä juuri huomaa, mutta vaativammassa käytössä tiettyä käyttötarkoitusta varten suunnitellulla CCD-ilmaisimella varustetulla kameralla voi saavuttaa paremman kuvanlaadun. Digitaalikamerat voidaan jakaa järjestelmä- ja kompaktikameroihin, UAS-sovelluksissa käytetään molempia kameratyyppejä. Kompaktikamerat ovat pienempiä ja kevyempiä kuin järjestelmäkamerat, jolloin ne soveltuvat yleensä paremmin ilmakehuvauskäyttöön. Järjestelmäkamera sisältää rungon ja siihen hankitaan erikseen optiikka ja muu varustus. Järjestelmäkameroilla saavutetaan yleensä parempi tarkkuus ja kuvanlaatu kuin kompaktikameroilla. [8.] [9.]

2.4.2 Infrapunakamerat

Infrapunakamera saattaa ihmiselle näkymättömän infrapunasihtälin havaittavaan muotoon. Kaikki ympäristöään kuumemmat kohteet lähettävät lämpösäteilyä ympäristöönsä. Infrapunakamerat ovat hyödyllisiä ilmakehuvauskäytössä, niitä voidaan käyttää esimerkiksi kadonneiden henkilöiden tai eläinten etsintään. Infrapunailmaisimet voidaan jakaa lämpöilmaisimiin ja fotoni-ilmaisimiin. Lämpöilmaisimen toiminta perustuu lämmön osumisen ilmaisimeen, joka nostaa ilmaisen lämpötilaa ja aiheuttaa lämpötilasta riippuvaisen sähköisen vasteen. Lämpöilmaisimella on leveä infrapunataajuuskaista, eikä se tarvitse erillistä jäähdytystä, mutta sillä on hidas vasteaika. Fotoni-ilmaisimen toiminta perustuu puolijohdetekniikkaa, joka absorboi fotonin tietyllä kapealla taajuuskaistalla. Fotoni-ilmaisimen etuna on nopea vasteaika, mutta se toimii tehokkaasti vain kapealla taajuuskaistalla. [8.]

2.4.3 Spektrikamerat

Spektrikameroita käytetään hyödyksi esimerkiksi ympäristön tilan monitoroinnissa, lannoitus suunnitelmien teossa ja metsien puulajitunnistuksessa. Niillä seurataan myös kasvillisuuden kehitystä. Spektrikamerat jaetaan multispektrikameroihin ja hyperspektrikameroihin. Multispektrikameroissa aallonpituuskaistoja on yleensä tyypillisesti alle 10. Hyperspektrikameroissa säteilyä voidaan mitata jopa sadoilla aallonpituuskaistoilla. [10.]

2.4.4 Digitaalikameran valinnasta

Ilmakuvauksessa kameralta vaaditaan useita ominaisuuksia. Kameran tulee olla kevyt ja lujarakenteinen, linssin täytyy olla valovoimainen, jotta valotusaika olisi lyhyt, kuvakennon koon tulee olla mahdollisimman iso, etäisyyden ja valotuksen mittaukset pitää onnistua mahdollisimman nopeasti ja kamera pitää pystyä laukaisemaan kauko-ohjauksella. Kamerassa pitää olla mahdollisuus asettaa tarkennus manuaalisesti äärettömään. Myös kameran virransäästö ja sammutus täytyy pystyä kytkemään pois päältä tai asettaa aika mahdollisimman pitkäksi kameran sammumisen estämiseksi lentämisen aikana. [1]

Kameraa valittaessa tulee kiinnittää huomiota linssistön polttoväliin, parhaat ilmasta otetut maisemakuvat saadaan yleisesti 24 - 50 millillä vastaavilla polttoväleillä. Jos polttoväli on pienempi, ongelmaksi tulee kuvan vääristyminen. Polttovälin ollessa suurempi, ongelmaksi tulee kuvan tärähtäminen. Monissa urheilu- ja actionkameroissa, kuten esim. GoPro, on laajakulmainen linssi. GoPro:n laajakulmainen linssi soveltuu videokuvaukseen, mutta tarkkojen valokuvien ottaminen on vaikeaa. Kuvanlaadun kannalta kuvakennon fyysinen koko ja linssistön laatu on tärkeämpää kuin pikseleiden määrä.

Kamerassa on hyvä olla mahdollisuus tallentaa kuvat RAW-muodossa. RAW-kuva on kopio kuvakennolle tulleista pisteistä, sisältäen kaiken informaation kuvasta. Suurin hyöty RAW-kuvaamisesta saadaan ääriolosuhteissa, esim. kirkaassa säässä. [11.]

3 KUVANLAATUA PARANTAVAT LAITTEET

3.1 Yleiset kuvanlaatuun vaikuttavat tekijät

Ilmakuvausten laatuun vaikuttavat eniten kuvattaessa vallitsevat keliolosuhteet. Mitä tasaisempi tuuli, sitä paremmin lennokki pysyy halutussa suunnassa. Tuulensuunnalla on myös merkitystä, esimerkiksi kova sivutuuli lentosuuntaan nähden hankaloittaa lentosuunnan ylläpitämistä. Liian voimakas tuuli vaikeuttaa lentämistä ja aiheuttaa tärinää ja heiluntaa, joka näkyy suoraan kuvanlaadun heikkenemisenä. UAV-lennokeille on ilmoitettu yleensä maksimituuli, jossa ne pystyvät lentämään. Helikoptereilla lentäminen onnistuu yleensä hieman kovemmassa tuulessa kuin lennokeilla. [1.]

3.2 Kuvanvakautus ja tärinävaimennus

3.2.1 Kuvanvakautin eli kameragimbaali

Termiä gimbaali käytetään yleisesti kuvaamaan mitä tahansa säädettävää kamera- tai kompassitelinettä, joka on suunniteltu pitämään laite vaakatasossa. Parempi kuvaus gimbaalista olisi kameran vakautus- ja tärinävaimennuslaite. Nykyaikainen gimbaali käyttää hiiliharjattomia sähkömoottoreita kameran asennon säätämiseen. Yleensä gimbaalit ovat 2- tai 3-akselisia. 2-akselinen gimbaali säätelee kääntymisen pituusakselin suhteen (roll) ja kääntymisen poikkiakselin suhteen (pitch). 3-akselinen gimbaali säätelee näiden lisäksi kääntymisen pystyakselin suhteen (yaw).

Nykyaikaisen gimbaalin asennonohjauksen toiminta perustuu liikeantureihin. Liikeanturissa samaan koteloon on rakennettu kiihtyysanturi ja gyroskooppi. Nämä liikeanturit on valmistettu MEMS-teknologiaa käyttäen (Micro Electro Mechanical Systems), joka perustuu puolijohdetekniikkaan. Kiihtyvyysanturi mittaa kiihtyvyyden aiheuttamia anturiin kohdistuvia voimia ja gyroskooppi mittaa

siihen kohdistuvaa kulmanopeutta eri akselien suhteen. Gimbaalissa on myös säädin, joka sisältää mikrokontrollerin. Säädin lähettää liikeanturin tietojen perusteella käskyjä sähkömoottoreille useita kertoja sekunnissa. Gimbaali on yleensä eristetty kiinnityskohteestaan värinänvaimennuskumien avulla. [12.]

3.2.2 Quatum Q-2D kameragimbaali

Tässä työssä käytettiin kuvanvakautukseen Quatum Q-2D kameragimbaalia. Quatum Q-2D (kuva 7) on varustettu kahdella hiiliharjattomalla sähkömoottorilla kahden akselin vakautukseen, ja se on suunniteltu käytettäväksi GoPro Hero 3 -kameran kanssa DJI Phantom -kopterin kokoisella helikopterilla. Kameragimbaali on valmistettu alumiinista ja se painaa 120 g,

Quatum Q-2d on varustettu liikeanturilla, joka sisältää 3-akselisen MEMS-kiihtyvyyssanturin ja 3-akselisen MEMS-gyroskoopin. Liikeanturin lisäksi gimbaalista löytyy moottoreita ohjaava säädinyksikkö.

Gimbaalin ylälevy kiinnitetään kopterin pohjaan. Ylälevyn ja gimbaalin välissä on neljä värinänvaimennuskumia, jotka vaimentavat kopterin rungosta johtuvat värinät. [13.]



Kuva 7. Quatum Q-2D kameragimbaali

4 3D-TULOSTIMET JA TÄRINÄTESTAUSLAITTEISTO

4.1 3D-tulostimet

Kotelointien valmistuksessa käytettiin 3D-tulostimia. 3D-tulostukset suoritettiin Kajaanin ammattikorkeakoulun tiloissa ja laitteilla.

4.1.1 Dimension SST-768

Dimension SST-768 (kuva 8) tulostaa 3D-mallit pursottamalla ABS-muovista. ABS-muoveja on saatavilla eri värisinä. Tulostuksen tukimateriaali on liukenevaa. Tukimateriaali liuotetaan pois tulostuksen jälkeen upottamalla tulosteet natriumhydroksidialtaaseen (NaOH). Tulostimen työtilan koko on 203x203x305 mm ja tulostuksen tarkkuus on 0,2540 mm tai 0,3302 mm. Ennen tulostusta 3D-mallit joudutaan tallentamaan tulostimen ymmärtämään STL-formaattiin (Stereolithography). [14.] [15.]



Kuva 8. Dimension SST-768 3D-tulostin

4.1.2 ProJet 3510 HDPlus

ProJet 3510 HDPlus (kuva 9) 3D-tulostin tarjoaa kolme eri tulostustarkkuutta erilaisiin tulostustarpeisiin. HD-tilassa (High Definition) tulostin kykenee tulostamaan 32 μm kerroksia, UHD-tilassa (Ultra High Definition) 29 μm kerroksia ja XHD-tilassa (Xtreme High Definition) 16 μm kerroksia. Tarkkuus on tyypillisesti 0,025–0,05 mm / 25,4 mm suuntaansa. Tulostimen tulostusmateriaalit ovat kovia ABS-muovin kaltaisia UV-valolla kovetettavia muoveja. Saatavilla on muoveja erilaisilla vetolujuuksilla ja väreillä. Tulostuksen tukimateriaali on vahamaista materiaalia, joka voidaan liuottaa pois kappaleesta esimerkiksi natriumhydroksidilla (NaOH). Tulostusta varten 3D-mallit täytyy muuttaa STL-formaattiin. [16.]



Kuva 9. ProJet 3510 HDPlus 3D-tulostin

4.2 Tärinätestauslaitteisto

Täristinlaitteistona toimi LDS V850-440 (kuva 10), elektrodynaaminen ilmajäähdytetty tärustin. Sen maksimikuorma on 350 kg, ja sitä käytetään yleisesti keskikokoisten kuormien tärinätestauksiin lähinnä ajoneuvoteollisuuden komponenteille ja elektronisille laitteistoille. Laitteella pystytään testaamaan armatuurin eli tärustin kiinnitysosan päässä vertikaalisesti tai liukupöydällä horisontaalisesti. Laitteistoon kuuluvat tärustin, vahvistin, ohjain (Dactron Laser USB), öljypumppu ja tuuletin. Ohjelmistona toimii Dactron Shaker Control, jota käytetään tietokoneella. Anturivalikoimaan kuuluu ruuvi- ja mehiläisvahakiinnitteisiä kiihtyvyyssantureita. Mittauksia varten on varattu yksi kontrollikanava, jolla kontrolloidaan lait-

teiston toimintaa, sekä kolme mittauskanavaa, joilla voidaan mitata mitattavissa kohteissa esiintyviä resonansseja ja kiihtyvyyksiä. [17.] [18.]



Kuva 10. LDS V850-400 -tärstinlaitteisto

Tärinäkokeena käytettiin standardin EN 60068-2-6 mukaista sinimuotoista tärinää. Sinimuotoinen tärinätestaus voi sisältää tietyn taajuusalueen kattavan pyyhkäisyn, testauksen kiinteillä taajuuksilla tai resonanssitaajuuksien tutkimisen tietyllä taajuudella. Yleisin menetelmä on ennalta määrättyjen taajuuksien välillä tapahtuva logaritminen pyyhkäisy, jossa pyyhkäisy nopeus ja aika tai jaksojen lukumäärä ovat määrättyjä. Suositeltavat rasiustasot löytyvät standardista EN 60068-2-6. [19.]

4.2.1 Kiihtyvyyssanturi Kistler 8702B50M1

Kistler 8702B50M1 kiihtyvyyssanturia käytettiin kontrollianturina. Anturin kiihtyvyyssmittausalue on ± 50 g, herkkyys 100 mV / g, resonanssitaajuus 54,0 kHz ja taajuusvaste 0,5 Hz– 10 kHz. [20.]

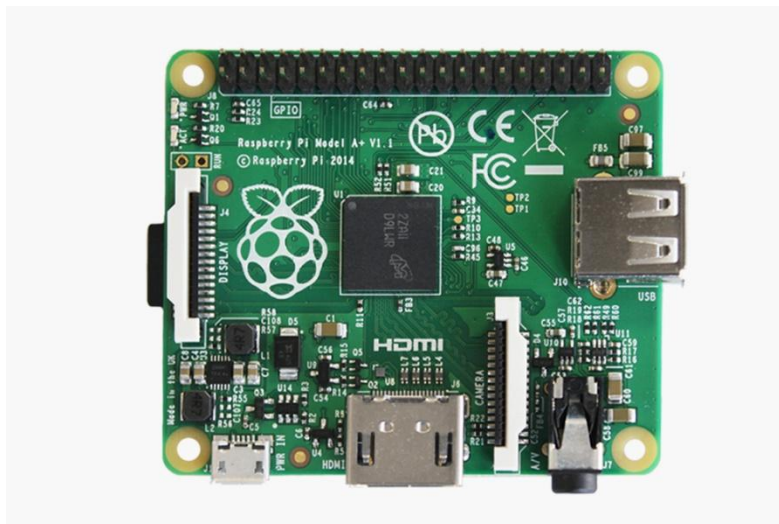
4.2.2 Kiihtyvyyssanturi Kistler 8778A500

Kistler 8778A500 kiihtyvyyssanturia käytettiin mittausanturina. Anturin kiihtyvyyttämittausalue on ± 500 g, herkkyys 10 mV / g, resonanssitaajuus 60,0 kHz ja taajuusvaste 2 Hz – 9 kHz. [20.]

5 KOTELORATKAISUN SUUNNITTELU JA VALMISTUS

5.1 Raspberry Pi Model A+

Raspberry Pi -pohjainen kuvantamis- ja mittausjärjestelmä on kehitetty ja rakennettu Oulun yliopiston mittaustekniikan yksikössä CEMIS-Oulussa. Koteloitava laitteisto pitää sisällään Raspberry Pi Model A+ -tietokoneen (kuva 11), joka julkaistiin marraskuussa 2014 ja oli työn tekohetkellä pienin saatavilla oleva Raspberry Pi -tietokone. Pienimpään malliin päädyttiin, jotta koteloinnista saataisiin mahdollisimman pienikokoinen tila- ja painorajoituksen vuoksi. Raspberry Pi Model A+ -tietokoneessa on 40 GPIO-pinniä, jotka mahdollistavat erilaisten ohjelmoitavien oheislaitteiden liittämisen tietokoneeseen. [21.]



Kuva 11. Raspberry Pi Model A+

5.2 IVPort Raspberry Pi Camera Module Multiplexer

Raspberry Pi -tietokoneeseen saa normaalisti liitettyä yhden Raspberry Pi -kameramoduulin kerrallaan. Kuvantamis- ja mittausjärjestelmässä käytetään kahta kameraa, joten järjestelmässä on myös lisäkortti, joka mahdollistaa tarvit-

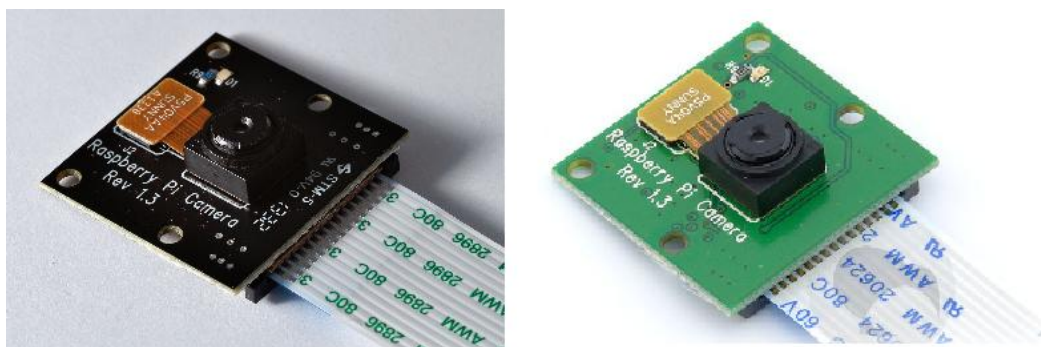
taessa neljän Raspberry Pi -kameramoduulin liittämisen (kuva 12). Lisäkortti asennetaan Raspberry Pi -tietokoneen GPIO-pinneihin. [22.]



Kuva 12. IVPort Raspberry Pi Camera Module Multiplexer

5.3 Raspberry Pi -kameramoduulit

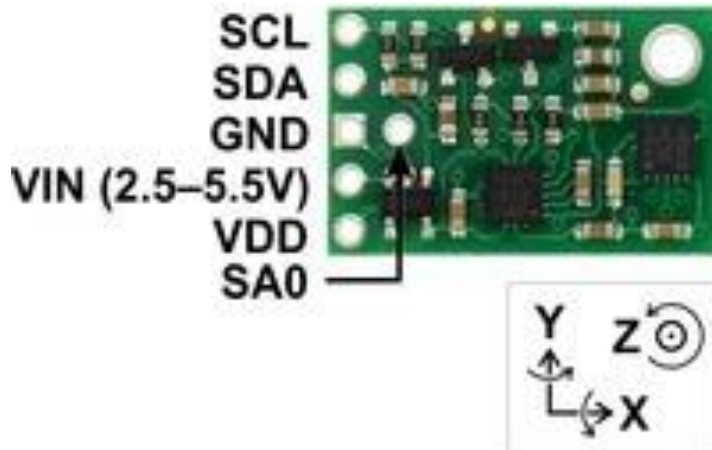
Järjestelmä pitää sisällään kaksi Raspberry Pi -kameramoduulia, tavallisen kameramoduulin ja NOIR -kameramoduulin (kuva 13). NOIR -kameramoduulissa ei ole infrapunasuodatinta, joten sillä pystytään kuvantamaan mm. lehtivihreää kasvillisuudesta käyttämällä linssin edessä erilaisia kalvoja, jotka suodattavat infrapuna-aallonpituuksia. Kameramoduuleissa on viisi megapikseliä ja kiinteä tarkennus. Kameran kykenevät 1920 x 1080, 1280 x 720 ja VGA90 resoluutioisiin videoihin, sekä still-kuviin. [23.] [24.]



Kuva 13. Raspberry Pi -kamerat. Vasemmalla NOIR-kameramoduuli ja oikealla tavallinen kameramoduuli.

5.4 MiniMU-9 v3

Järjestelmä sisältää myös MiniMU-9 v3 -digitaalisen mittausyksikön (kuva 14), joka pitää sisällään 3-akselisen gyroskoopin, 3-akselisen kiihtyvyyssanturin sekä 3-akselisen magnetometrin. [25.]

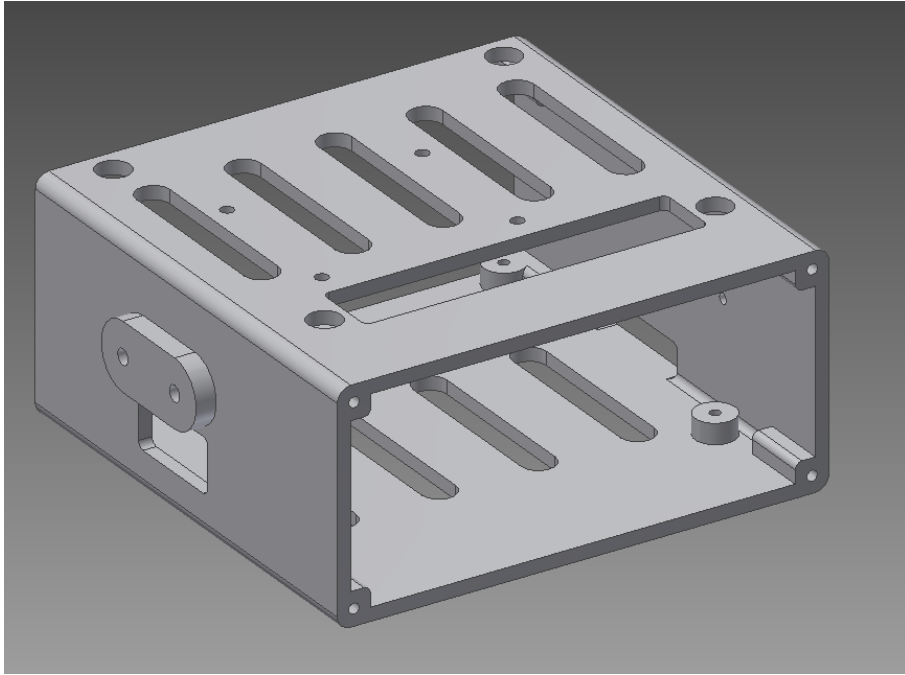


Kuva 14. MiniMU-9 v3 -digitaalinen mittausyksikkö

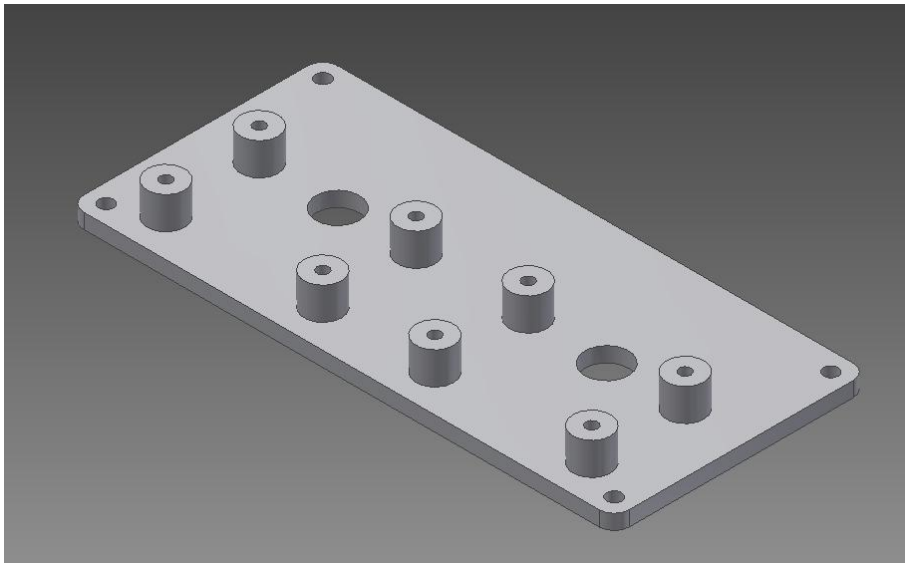
5.5 Koteloinnin mallinnus

Koteloinnin suunnittelun lähtökohtana oli, että kaikki komponentit mahtuisivat kotelointiin, kotelointi olisi kevyt ja mahdollisimman pienikokoinen sekä riittävän kestävä. Koteloinnin ei tarvitse olla vedenpitävä, sillä Phantom 2 -kopterilla, johon kotelointi kiinnitetään, ei saa lentää vesisateessa.

Koteloinnin mallinnus suoritettiin Autodesk Inventor 3D-CAD -mekaniikkasuunnitteluohjelmistolla. Tarvittavat mitat aukotuksille sekä liittimien paikoille saatiin joko komponenttien valmistajien internet-sivuilta, tai ne mitattiin käsin työntömitalla. Kotelointi suunniteltiin kahdessa osassa. Runko-osaan (kuva 15) kiinnitetään Raspberry Pi Model A+ -tietokone, lisäkortti kameramoduuleille, MiniMU-9 v3 -digitaalinen mittausyksikkö sekä Quanum Q-2d kameravakauttimen gyroskooppi ja kiihtyvyyssanturipaketti. Kameralevyyn (kuva 16) kiinnitetään molemmat kameramoduulit, NOIR-kameramoduuli ja tavallinen kameramoduuli. Osat kiinnitetään toisiinsa ruuveilla. Koteloinnin osien seinämävahvuus on 2 mm.



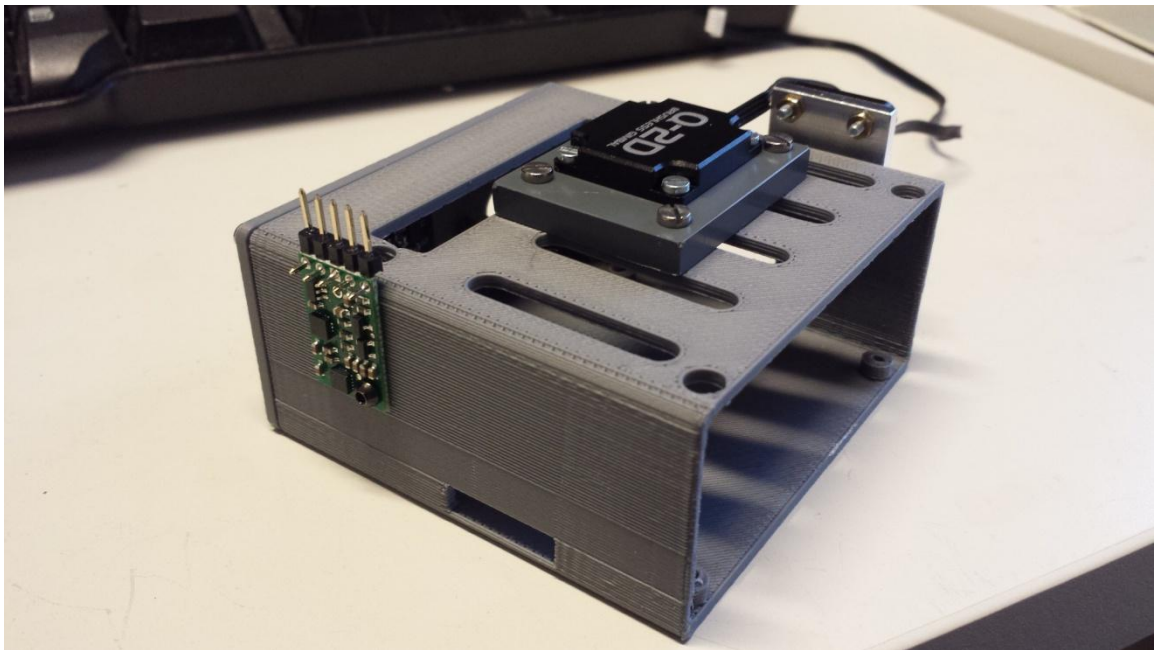
Kuva 15. Koteloinnin runko-osa



Kuva 16. Kameroiden kiinnityslevy

5.6 Koteloinnin 3D-tulostus

Koteloinnin osat päätettiin valmistaa 3D-tulostamalla Kajaanin ammattikorkeakoulun tiloissa ja laitteilla. 3D-tulostamiseen päädyttiin, koska sillä on helppo valmistaa kappaleita, joissa on vaikeita muotoja. 3D-mallit tallennettiin 3D-tulostimen ymmärtämään STL-formaattiin, ja tiedostot tallennettiin muistitikulle. Osat tulostettiin Dimension SST-768 3D-tulostimella. Kuvassa 17 tulostetut kotelon osat kasattuina.

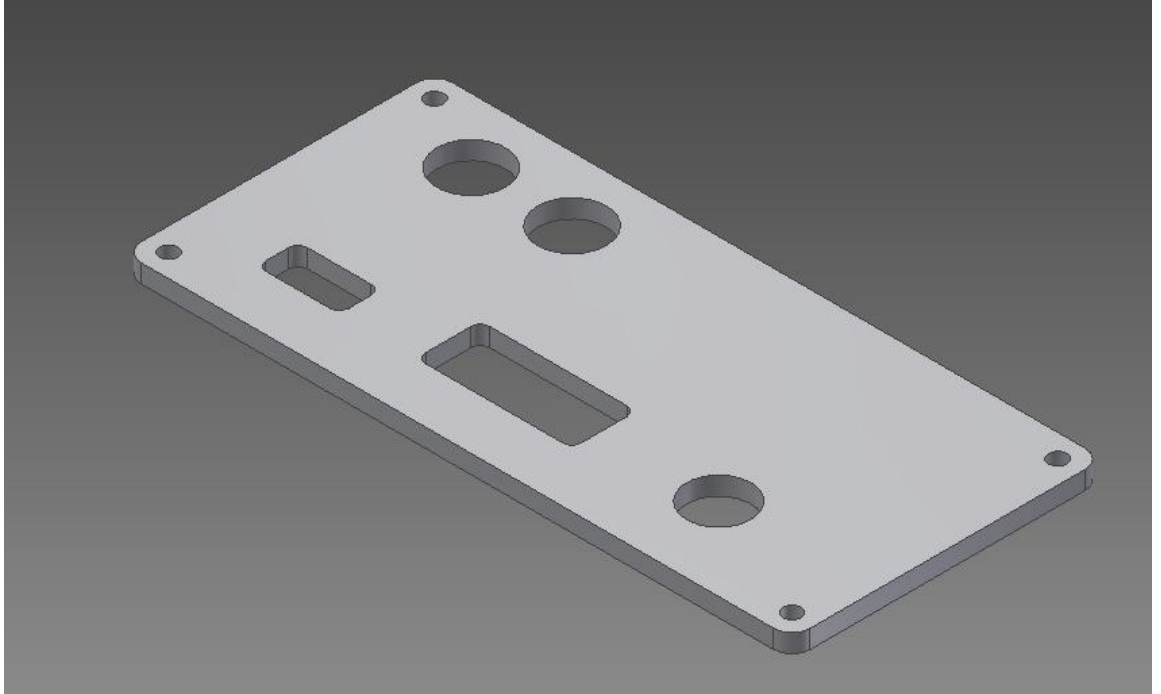


Kuva 17. Tulostetut kotelon osat kasattuina

5.7 Koteloinnin toisen version 3D-tulostus

Tulostuksen jälkeen komponentteja koteloon kasatessa huomattiin kotelon mallinnuksessa pieniä virheitä, jolloin kaikkia kiinnitysruuveja ei saanut asennettua paikoilleen. Myös liitinten paikat eivät olleet aivan kohdillaan, sekä tulostusjälkeen ei oltu riittävän tyytyväisiä. Sen takia päätettiin muokata hieman 3D-mallinnuksia uutta tulostusta varten. Samalla lisättiin toinen päätykansi lisäliitinten kiinnitystä varten (kuva 18). Tämä oli myös hyvä tilaisuus päästä kokeilemaan Kajaanin ammattikorkeakoululle hankittua täysin uutta 3D -tulostinta mallil-

taan ProJet 3510 HDPlus. Tulostuksen aikaan käytettävissä oli VisiJet M3 Prop-
last -materiaalia, joka on läpikuultavaa muovia. Kuvassa 19 uusi koteloINTI kasat-
tuna ja maalattuna mustaksi.



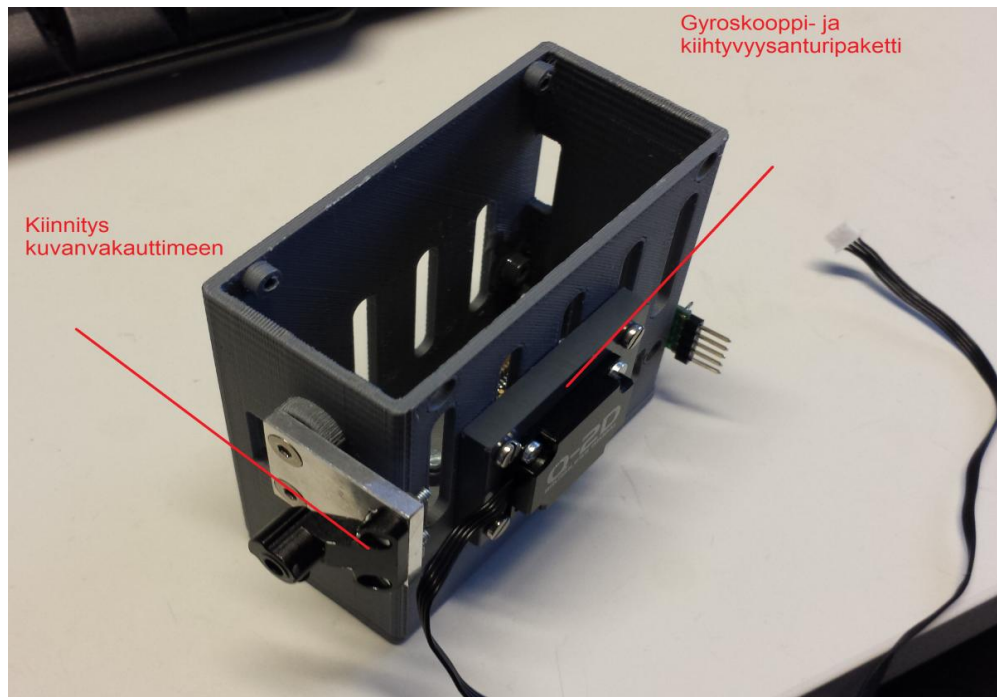
Kuva 18. Toisen koteloversion liitinkansi



Kuva 19. Toinen kotelointiversio kasattuna

5.8 Quanam Q-2D -kuvanvakauttimen muokkaaminen

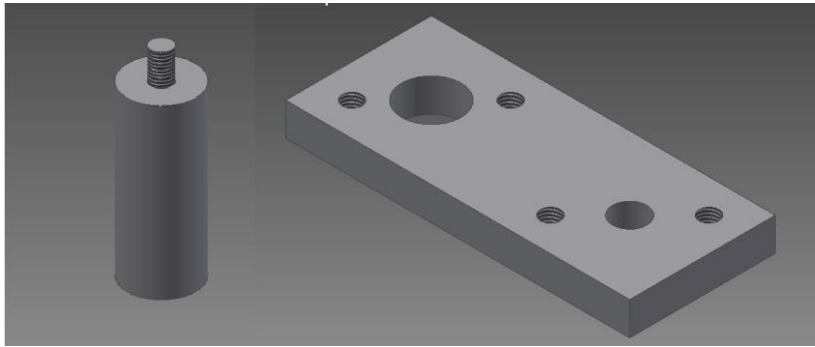
Quanam Q-2D -kuvanvakauttimen kamerakiinnitystelinettä ei pystynyt suoraan hyödyntämään, sillä se on suunniteltu tämän työn koteloitua huomattavasti pienemmille kameroille (esim. GoPro). Kameran kiinnitykseen käytetty taustalevy poistettiin kokonaan hyödyntäen vain pientä kiinnityspalaa, joka lukittuu ns. pitch-akselin moottorin akseliin. Tämä kiinnityspala kiinnitettiin alumiinista koneistettuun välikappaleeseen, ja nämä molemmat kiinnitettiin koteloituihin kiinteästi, siten koteloinnin saa irti helposti kuvanvakauttimesta pitch-akselin moottorin akselista löysäämällä kiinnityspalan pidätinruuvien. Kuvanvakauttimen gyroskooppi- ja kiihtyvyyssanturipaketti oli kiinnitetty alun perin taustalevyssä olleeseen upotukseen. Ratkaisuksi PVC-levystä koneistettiin syvennyksellä varustettu kiinnitysosa, johon gyroskooppi- ja kiihtyvyyssanturipaketin sai kiinnitettyä. PVC-levy puolestaan kiinnitettiin pulteilla koteloinnin takaosaan. Kuvassa 20 näkyvät muokattu kiinnitys kuvanvakauttimeen sekä gyroskooppi- ja kiihtyvyyssanturipaketin kiinnitys.



Kuva 20. Muokatut kiinnitykset kuvanvakauttimeen sekä gyroskooppi-kiihtyvyyssanturipakettiin.

5.9 Phantom 2 -kopterin muokkaaminen

Kotelointia ja kuvanvakautinta asennettaessa huomattiin kopterin jalkojen olevan liian lyhyet. Kotelointi ei mahtunut olemaan pystyssä kopterin ollessa maassa. Kopterin maavaraa päätettiin korottaa. Korotuksen takia jalkoja täytyi levittää enemmän sivuille paremman tasapainon aikaansaamiseksi ja kaatumisten ehkäisemiseksi. Kopteriin päätettiin koneistaa PVC-tangosta korotuspalat ja PVC-levystä levityspalat (kuva 21).



Kuva 21. Phantom 2 -kopterin korotus- ja levityspalat

Korotus- ja levityspalat asennettiin kopteriin ja todettiin korkeuden ja leveyden olevan sopivia (kuva 22).

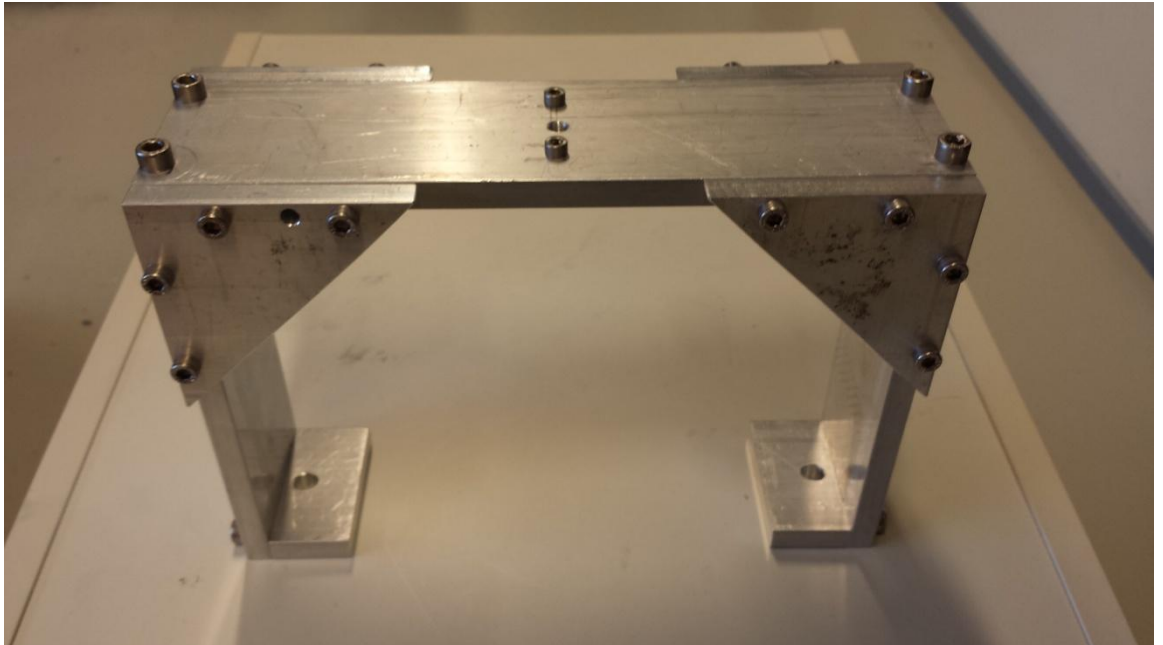


Kuva 22. Korotus- ja levityspalat asennettuina Phantom 2 -kopteriin

6 KOTELOINTIRATKAISUN TESTAUS JA MITTAUSTULOKSET

6.1 Valmistelut tärinämittauksia varten

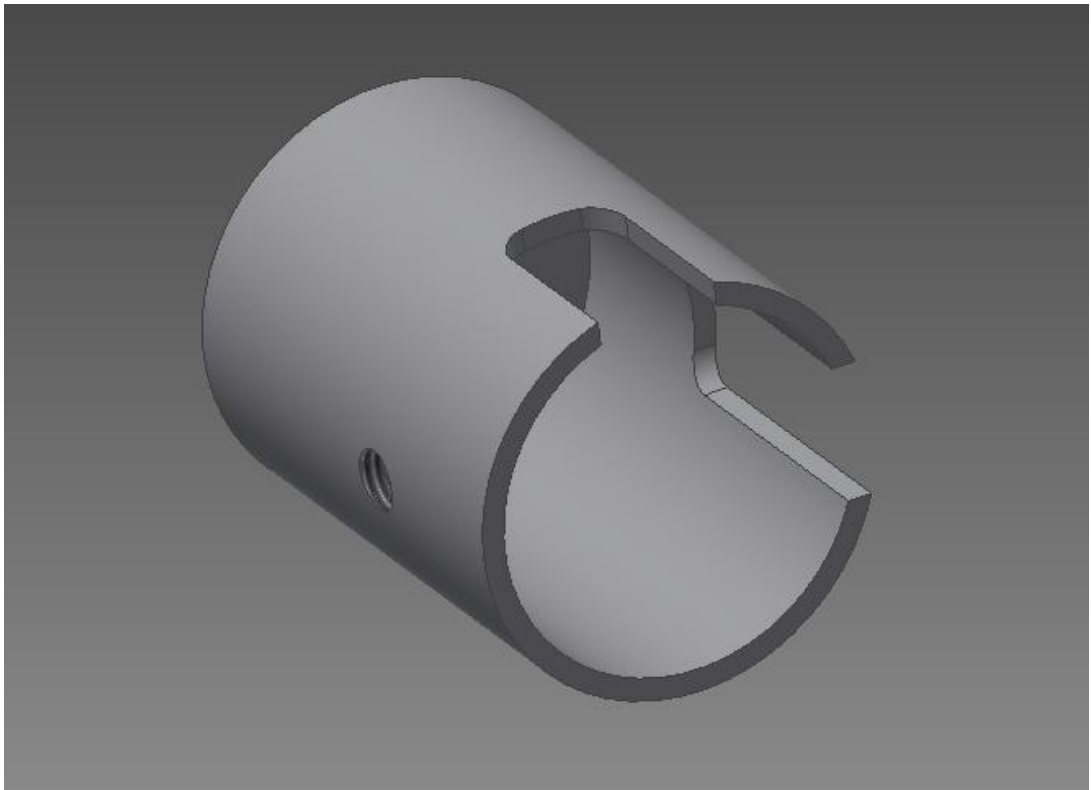
Tärinämittaukset tehtiin täristinlaitteistolla armatuurin päässä vertikaalisesti. Mittauksia varten täytyi rakentaa kiinnitysjiigi (kuva 23), johon kuvanvakautin kotelointineen asennetaan. Kajaanin ammattikorkeakoululta saatiin täristimen piirustukset, joista saatiin mitat armatuurin kiinnitysreikien paikoille. Jiigi mallinnettiin Autodesk Inventor 3D-CAD -mekaniikkasuunnitteluohjelmistolla ja jigin osat koneistettiin ja kasattiin CEMIS-Oulun mekaniikkapajan tiloissa. Jigin materiaalina käytettiin 10x60 mm alumiinilattatankoa. Tarkoituksena oli tehdä rakenteeltaan tukeva jiigi, joka ei värähtelisi mittausten aikana. Jiigi kiinnitetään armatuuriin kahdella M8 x 1,25 pultilla, kuvanvakautin jigiin kahdella M4 pultilla. Kiihtyvyyksanturia varten tehtiin M6-kierre keskelle jigiä.



Kuva 23. Kiinnitysjiigi tärinämittauksia varten

Mittauksia varten päätettiin lisäksi tehdä lukitusholkki kuvanvakauttimen akselien lukitsemiseksi paikoilleen, koska haluttiin tehdä vertailua lukitun ja lukitsemattoman kuvanvakauttimen tärinämittaustuloksista. Lukitusholkki (kuva 24) koneistet-

tiin halkaisijaltaan 30 mm:n alumiinipyörötangosta. Lukitusholkin kyljessä on M4-kierre pidätinruuville paikoilleen lukitsemista varten.



Kuva 24. Lukitusholkki tärinämittauksia varten

6.2 Tärinämittaukset ensimmäisellä koteloversiolla

Tärinämittauksissa oli tarkoitus tehdä vertailua neljän erivahvuisen kuvanvakauttimen vaimennuskumin välillä (musta, sininen, keltainen, punainen) ja selvittää niiden vaimennuskykyä. Vaimennuskumit (kuva 25) ovat samaa materiaalia, vaimennusero on niiden materiaalin paksuuseroissa. Mustan vaimennuskumin vaimennuskyky on 100 g / kumi, sinisen 150 g, keltaisen 200 g ja punaisen 300 g. [26.]

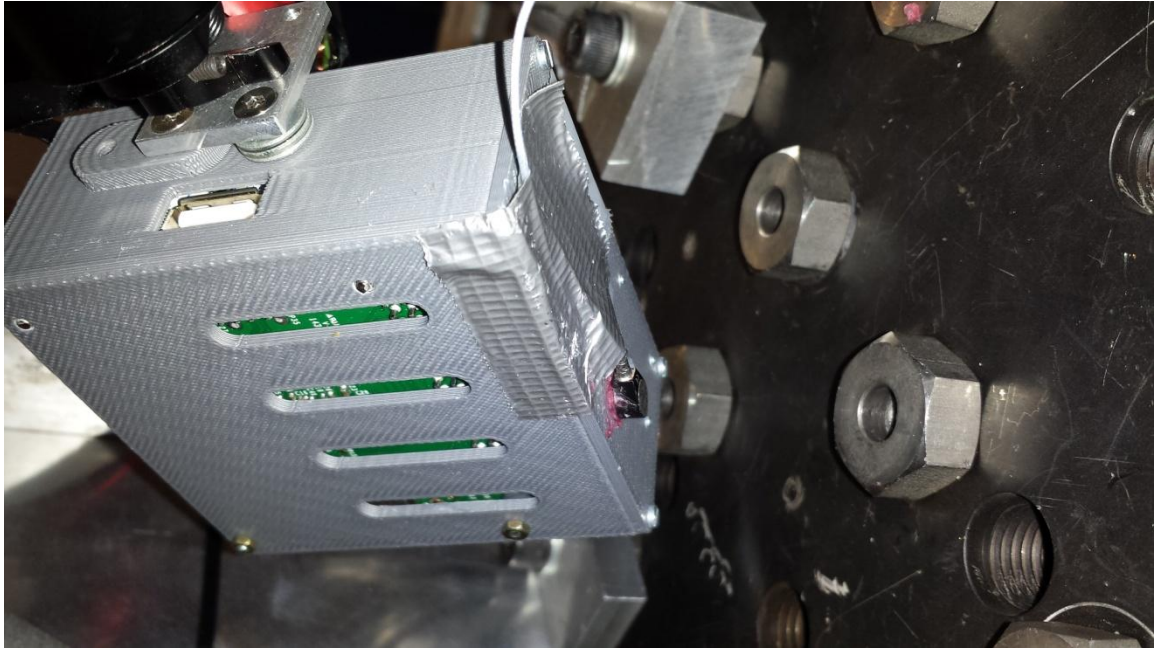


Kuva 25. Kuvanvakauttimen vaimennuskumit

Mittaukset suoritettiin kahdella kiihtyvyyssanturilla, kontrollianturilla, joka kiinnitettiin kierreliitoksella jigiin sille tehtyyn paikkaan (kuva 26), sekä varsinaisella mitausanturilla, joka kiinnitettiin mehiläisvahalla koteloinnin pohjaan tasaiselle pinnalle (kuva 27).



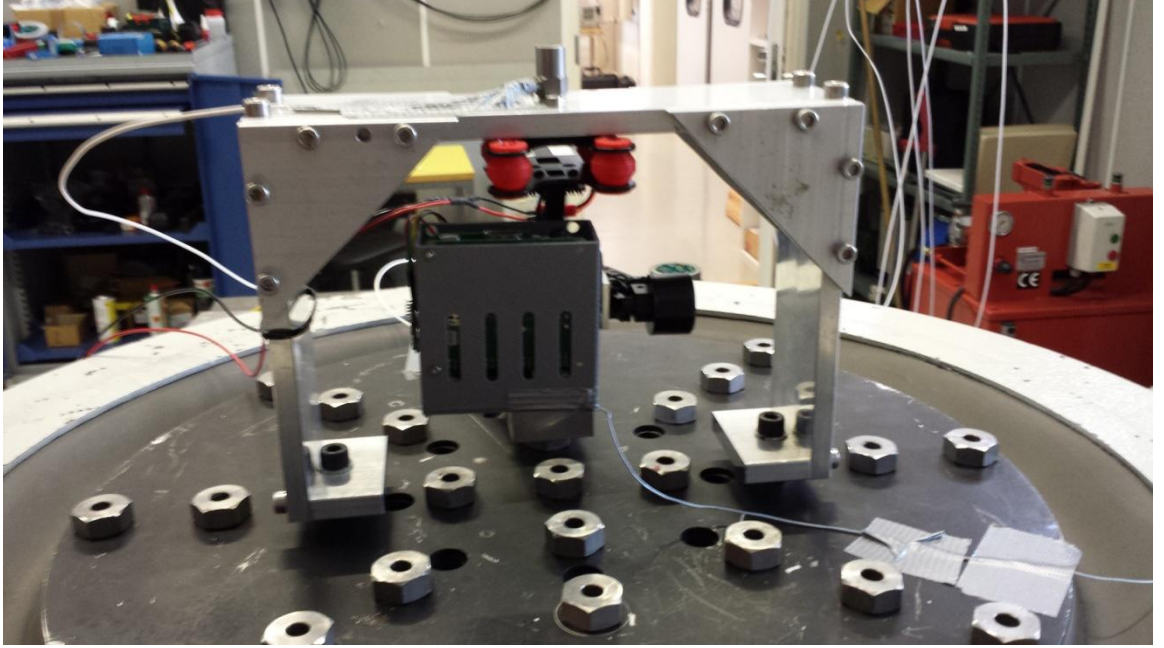
Kuva 26. Kontrollianturi Kistler 8702B50M1



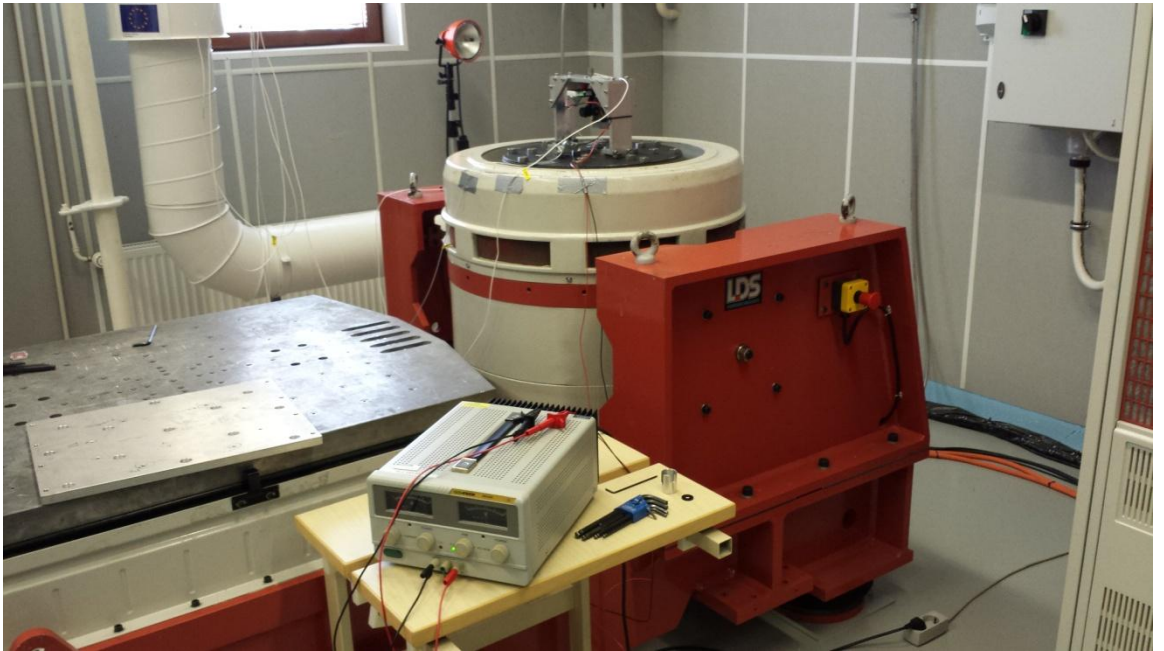
Kuva 27. Mittausanturi Kistler 8778A500

Mittauksissa värinämittaus tehtiin jokaisella vaimennuskumilla kuvanvakauttimen akselit lukittuina, sekä ilman lukitusta syöttäen tasajännitettä 12 V kuvanvakauttimelle ISO-TECH IPS1810H -laboratoriovirtalähteellä, jolloin kuvanvakautin hoitaa itse tasapainon pitämisen. Mittauksia tuli siis kaiken kaikkiaan kahdeksan kappaletta. Mittaustulokset ovat liitteessä 1. Kuvassa 28 näkyy värinätestaus punaisilla vaimennuskumeilla ja kuvassa 29 värinätestaus syöttäen tasajännitettä kuvanvakauttimelle.

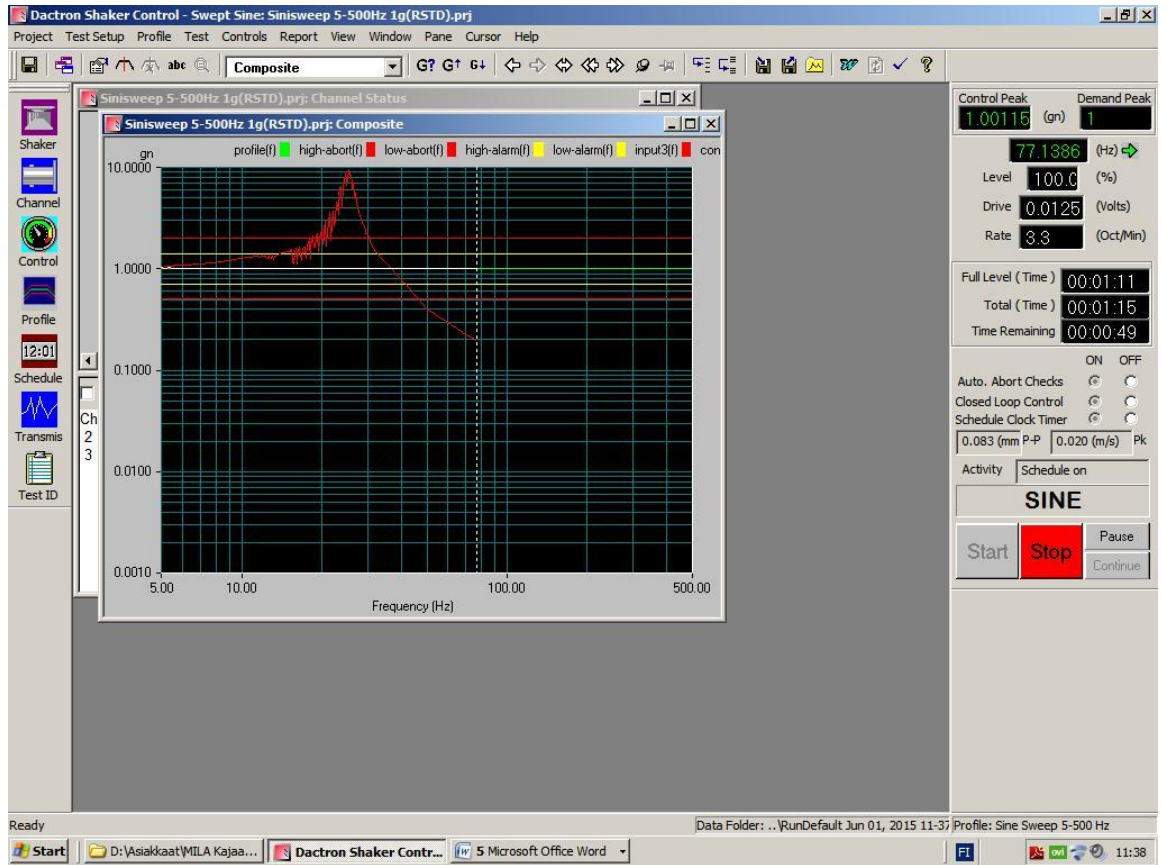
Värinätestaus tehtiin sinimuotoisena värinätestauksena. Mittauksessa käytettiin taajuusalueen 5–500 Hz logaritmista pyyhkäisyä, pyyhkäisynopeutena 3,3 oktaavia/min ja aikana kaksi minuuttia. Kuvassa 30 esimerkkipyhkyä värinätestausohjelmiston näytöltä.



Kuva 28. Tärinätestaus punaisilla vaimennuskumeilla



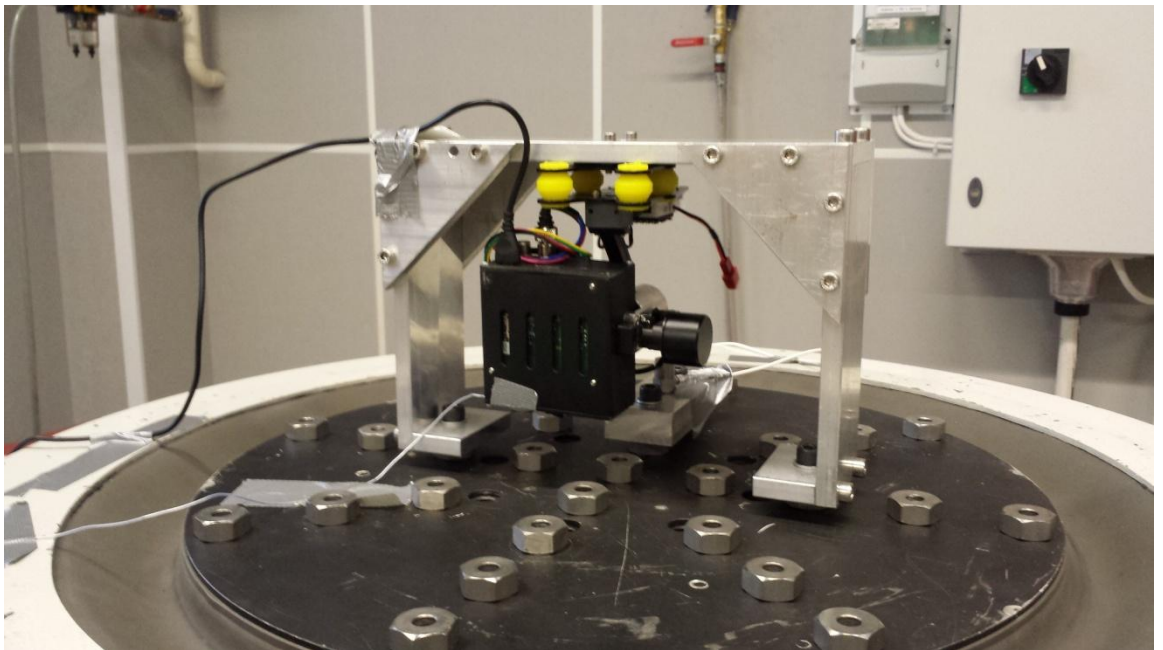
Kuva 29. Tärinätestaus syöttäen tasajännitettä kuvanvakauttimelle



Kuva 30. Esimerkki sinimuotoisesta tärinätestauksesta

6.3 Tärinämittaukset toisella koteloversiolla

Toisen kotelointiversioiden testaus jouduttiin suorittamaan pelkästään kuvanvakauttimen akselit lukittuina ilman kuvanvakauttimen omaa vakautusta, koska ennen tärinätestauksia kuvanvakautin vioittui sähköisesti luultavasti oikosulun takia. Kuvanvakautinta ei saatu enää toimintakuntoon ja tähän ratkaisuun jouduttiin tyytymään. Muutoin mittaukset suoritettiin samoilla antureilla ja mittauservoilla kuin ensimmäisen koteloversioiden mittauksissa. Mittauksia tuli yhteensä neljä kappaletta. Mittaustulokset ovat liitteessä 2. Kuvassa 31 näkyy tärinätestaus keltaisilla vaimennuskumeilla.



Kuva 31. Toisen kotelointiversioiden tärinätestaus keltaisilla vaimennuskumeilla

7 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELO

Insinööriyön tuloksena suunniteltiin ja valmistettiin tärinävaimennettu kotelointiratkaisu Oulun yliopiston mittaustekniikan yksikössä CEMIS-Oulussa kehitetylle Raspberry Pi -pohjaiselle kuvantamis- ja mittausjärjestelmälle. Ensimmäisen kotelointiversion puutteet liittimien ja kiinnitysreikien paikoissa, sekä tulostusjäljessä korjattiin muuttamalla koteloinnin 3D-malleja. Tulostus Kajaanin ammattikorkeakoulun uudella ProJet 3510 HDPlus -tulostimella onnistui hyvin ja tulostusjälkeen ja -tarkkuuteen oltiin tyytyväisiä. Molempiin kotelointiversioihin tehtiin tärinätestaukset Kajaanin ammattikorkeakoulun tärinätestauslaitteistolla.

Ensimmäisen kotelointiversion tärinätestauskuvaajista (liite 1) huomataan, että kuvanvakauttimen akselit lukittuina suurin tärinäpiikki saavutettiin sinisillä vaimennuskumeilla, tärinäpiikin taajuus on 20,03 Hz ja tärinän kiihtyvyyssarvo 7,24 g. Pienin tärinäpiikki saavutettiin mustilla vaimennuskumeilla, taajuudella 19,67 Hz ja kiihtyvyyssarvolla 6,45 g. Kuvanvakautin toiminnassa suurin tärinäpiikki saavutettiin punaisilla vaimennuskumeilla, taajuudella 26,01 Hz ja kiihtyvyyssarvolla 9,87 g. Pienin tärinäpiikki saavutettiin mustilla vaimennuskumeilla, taajuudella 22,93 Hz ja kiihtyvyyssarvolla 7,16g.

Toisen kotelointiversion tärinätestaukset (liite 2) tehtiin pelkästään kuvanvakauttimen akselit lukittuina kuvanvakauttimen vikaantumisen takia. Suurin tärinäpiikki saavutettiin mustilla vaimennuskumeilla, taajuudella 18,61 Hz ja kiihtyvyyssarvolla 4,19 g. Pienin tärinäpiikki saavutettiin keltaisilla vaimennuskumeilla, taajuudella 18,45 Hz ja kiihtyvyyssarvolla 3,03 g.

Tärinätestausien tuloksista huomataan se, että toisella kotelointiversiolla testattaessa tärinäpiikit syntyvät hieman matalammalla taajuudella ja kiihtyvyyssarvot ovat selkeästi pienemmät. Ensimmäisen kotelointiversion testauksista huomataan, että kuvanvakautin toiminnassa tärinäpiikit ovat arvoiltaan selkeästi suuremmat ja ne syntyvät hieman korkeammilla taajuuksilla. Kuvanvakautin toiminnassa käyrät ovat tasaisemmat, eli vakautin vaikuttaa vaimennukseen positiivisesti. Kaikilla vaimennuskumeilla molemmissa kotelointiversioissa tärinävaimennus toimii hyvin, eikä suuria eroja synny.

Phantom 2 UAV -kopterilla tehtiin testilento ulkona, jossa testattiin kaiken olevan mekaanisesti kunnossa, ja katsottiin silmämääräisesti kuvanvakauttimen ja tärinvaimennuksen toimintaa. Testikuvien ottamista tai muuta testausta ei kuvantamis- ja mittauslaitteistolla tehty, koska järjestelmässä oli vielä puutteita niiden suorittamisen suhteen. Testilennolla ei muutoin havaittu mitään ongelmia tai puutteita toiminnassa. Kuvassa 32 Phantom 2 UAV -kopteri testilennolla tärinvaimennetulla kuvantamis- ja mittauslaitteistolla varustettuna.



Kuva 32. Phantom 2 UAV -kopteri testilennolla

Kopterin paino järjestelmineen punnittiin, ja tulokseksi saatiin 1474,82 g (kuva 33), eli kopterin valmistajan suosittama suurin lentoonlähtöpaino ylittyi melkein kahdellasadalla grammalla. Tämän vaikutusta lentämiseen ja akkukeston ei selvitetty.



Kuva 33. Phantom 2 UAV -kopteri järjestelmineen punnittuna

Tärinätestauksien perusteella tärinävaimennus oli vaimennuskumeilla ja kameravakauttimella lupaava. Jatkokehityksenä kuvanvakautin pitäisi joko korjata, tai hankkia uusi vastaava, täytyisi tehdä lisää käytännön testejä lentämällä ilmassa, sekä ottaa testikuvia ja analysoida kuvien tarkkuutta ja laatua.

8 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa Oulun yliopiston mittaustekniikan yksikkö CEMIS-Oulussa kehitetylle Raspberry Pi -pohjaiselle mittaus- ja kuvantamismoduulille tärinävaimennettu kotelointiratkaisu. Työn aikana perehdyttiin erilaisiin kuvauskoptereihin, koptereissa käytettyihin tärinävaimennus- ja kuvanvakautusmenetelmiin, kuvauskoptereiden kameroihin ja kuvaamiseen liittyviin asioihin.

Kotelointi mallinnettiin 3D-CAD mekaniikkasuunnitteluohjelmistolla mittaus- ja kuvantamismoduulin mittojen ja vaatimusten perusteella, sekä tulostettiin 3D-tulostimella. Koteloinnin toinen versio mallinnettiin ja tulostettiin mitoitusvirheiden ja tulostuksen laadun vuoksi. Kopteria ja kuvanvakautinta muokattiin koteloinnille sopiviksi, muokkauksiin liittyvät koneistukset suoritettiin CEMIS-Oulun mekaniikkapajan tiloissa.

Tärinätestauslaitteistoon tutustuttiin Kajaanin ammattikorkeakoululla ja valmistettiin kiinnitysajuri koteloinnille tärinämittauksia varten. Tärinätestaukset suoritettiin molemmilla kotelointiversioilla. Testilento suoritettiin kuvantamis- ja mittausjärjestelmän kanssa.

Tärinävaimennettu kotelointiratkaisu saatiin valmiiksi, ja tärinämittaukset vaikuttivat lupaavilta. Jatkokehityksenä tarvitaan kuvanvakauttimen korjaus tai uuden kuvanvakauttimen hankkiminen, käytännön testilentoja ja testikuvien ottamista, jolloin saadaan selville järjestelmän soveltuvuus käytännön työtehtäviin.

LÄHTEET

- [1] Hassinen A. 2013. UAV-lennokit. Itä-Suomen yliopisto. Mekrijärven tutkimusasema, luettu 07.03.2016, <http://mekri.uef.fi/uav/UAV-lennokit.pdf>
- [2] VideoDrone kuvauskopterit, luettu 17.04.2016, <http://www.videodrone.fi/kopterit>
- [3] DJI Inspire 1, luettu 17.04.2016 <http://www.dji.com/product/inspire-1>
- [4] MultiCopter Service MCS, luettu 17.04.2016 <http://helikopteriliimakuvauus.fi/ilmakuvauksia/inspire-1/>
- [5] Camflight, luettu 17.04.2016, <http://www.camflight.no/en/solutions/drone-en>
- [6] Phantom 2, luettu 17.04.2016, <http://www.dji.com/product/phantom-2>
- [7] Yuneec Typhoon 4K, luettu 17.04.2016, http://www.yuneec.com/products/aerialuav/q500_4k
- [8] Hyttinen T. 2012. Miehitettävissä oleviin ilma-alusjärjestelmiin perustuvat palvelukonseptit. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Sovelletun mekaniikan laitos.
- [9] Raakakuva, ostajan opas 2014-2015, luettu 17.04.2016 <http://raakakuva.fi/2014/11/ostajan-opas-2014-15/>
- [10] Paikkatietoikkuna, luettu 17.04.2016, http://www.paikkatietoikkuna.fi/web/fi/positio_1_2013_maailman_pienin_h_yper-spektrikamera_suomesta
- [11] Hassinen A, 2014. Ilmakuvien käsittely: maisemakuvat julkaisukuntoon. Itä-Suomen yliopisto. Mekrijärven tutkimusasema. Luettu 18.04.2016, <http://mekri.uef.fi/uav/ilmakuvienkasittely.pdf>

- [12] Drone Flyers, Understanding Brushless Camera Gimbals, luettu 18.04.2016, <http://www.droneflyers.com/2015/06/understanding-brushless-camera-gimbals/>
- [13] Quanam Q-2D Brushless GoPro 3 Gimbal, luettu 18.04.2016, http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__55238__Quanam_Q_2D_Brushless_GoPro_3_Gimbal_suitable_for_Nova_Phantom_QR_X350_and_others_.html
- [14] Kajaanin ammattikorkeakoulu 3D-tulostus. luettu 14.03.2016, <http://www.kamk.fi/fi/Palvelut-tyoelamalle/Teknologiapalvelut/Kone--ja-laitesuunnittelu/3D-tulostus>
- [15] Dimension 768 User Guide, luettu 14.03.2016 <http://fab.cba.mit.edu/content/tools/dimension/Dimension%20768%20Elite%20User%20Guide.pdf>
- [16] Projet 3500 SD & HD Professional 3D Printers, luettu 14.03.2016 http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/projet_3500_plastic_0115_usen_web.pdf
- [17] Kajaanin ammattikorkeakoulu Tärstinlaitteisto LDS V850-440, luettu 15.03.2016 <https://www.kamk.fi/loader.aspx?id=b971e2be-e119-4e2b-a8e0-e511e6b9e5cc>
- [18] Medium Force Shaker - LDS V850, luettu 15.03.2016 <http://www.bksv.com/Products/shakers-exciter/lds-vibration-test/shakers/medium-force/V850ElectrodynamicShaker?tab=overview>
- [19] International Standard IEC 60068-2-6, luettu 16.03.2016 http://www.teias.gov.tr/IEC/iec60068-2-6%7Bed6.0%7Den_d.img.pdf
- [20] Kistler Catalogue, Accelerometers, luettu 16.03.2016, http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/kistler_czujniki-z-wyjsciemi-ladunkowym_nn201.pdf
- [21] Raspberry Pi 1 Model A+, luettu 14.03.2016, <https://www.raspberrypi.org/products/model-a-plus/>

- [22] IVPort Raspberry Pi Camera Module Multiplexer, luettu 14.03.2016,
<http://www.ivmech.com/magaza/en/development-modules-c-4/ivport-raspberry-pi-camera-module-multiplexer-p-90>
- [23] Raspberry Pi Camera Module, luettu 14.03.2016,
<https://www.raspberrypi.org/products/camera-module/>
- [24] Raspberry Pi NoIR Camera, luettu 14.03.2016,
<https://www.raspberrypi.org/products/pi-noir-camera/>
- [25] Pololu MiniMU-9 v3, luettu 14.03.2016,
<https://www.pololu.com/product/2468>
- [26] Vibration Damping Balls, luettu 14.03.2016,
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__40617__Vibration_Damping_Balls_300g_61_RED_8_PCS_.html

LIITTEET

Liite 1: Ensimmäisen koteloversion värinämittaukset

Liite 2: Toisen koteloversion värinämittaukset

DUT: Raspberry Pi A+ kotelo + gimbal

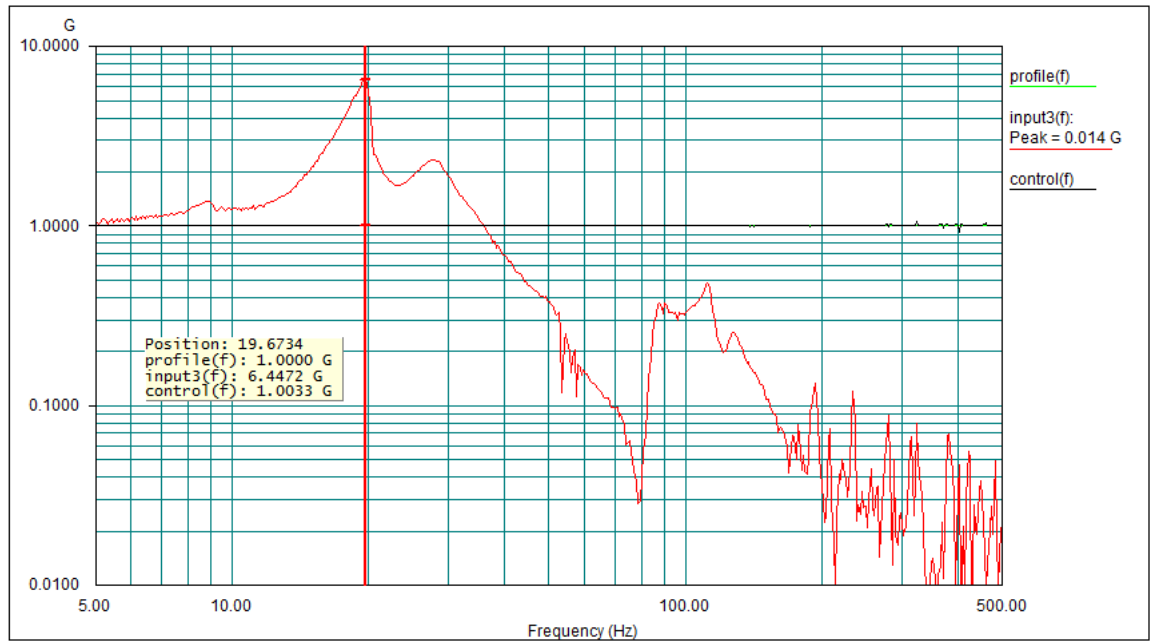
Notes: Lukittu, musta

Project File Name: Sinisweep 5-500Hz 1g.pj

Profile Name: Sinisweep 5-500Hz 1G
 \RunFolder Jun 01, 2015 10-28-28

Test Type: Resonance Search Track And Dwell

Run Folder:



Level: 0 dB Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type: Logarithmic

Frequency: 498.565704 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

DUT: Raspberry Pi A+ kotelo + gimbal

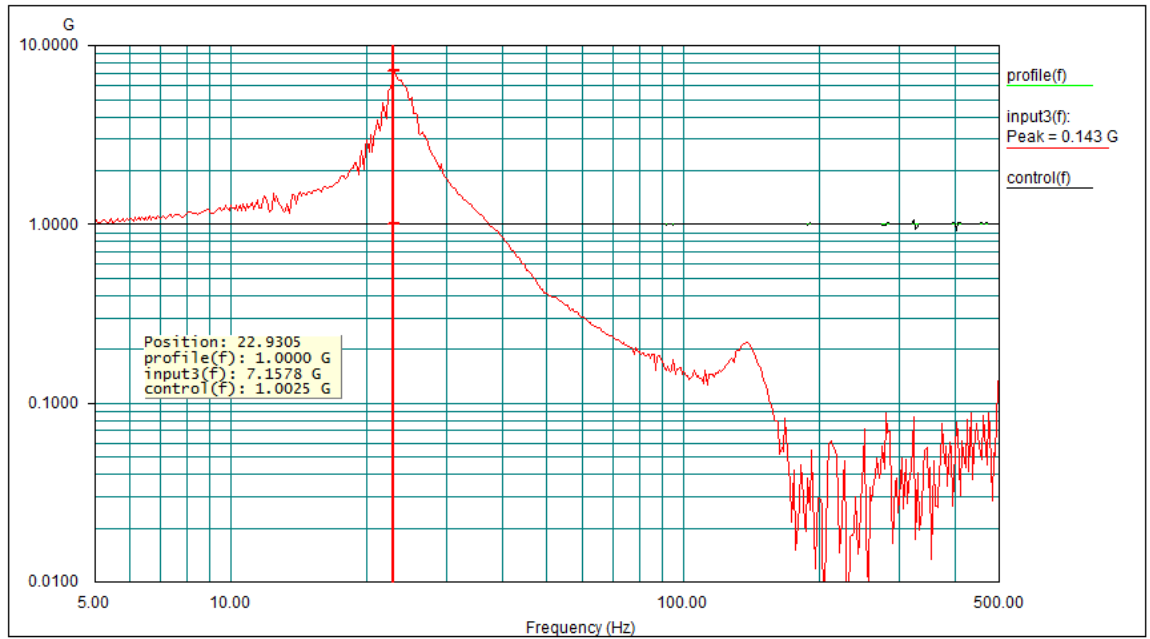
Notes: Säkköt, musta

Project File Name: Sinisweep 5-500Hz 1g.prj

Profile Name: Sinisweep 5-500Hz 1G
RunFolder Jun 01, 2015 10-38-13

Test Type: Resonance Search Track And Dwell

Run Folder:



Level: 0 dB
 Logarithmic
 Full Level Time: 00:02:00
 Sweep Type:

Frequency: 498.157776 Hz Time Remaining: 00:00:00
 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

DUT: Raspberry Pi A+ kotelo + gumbal

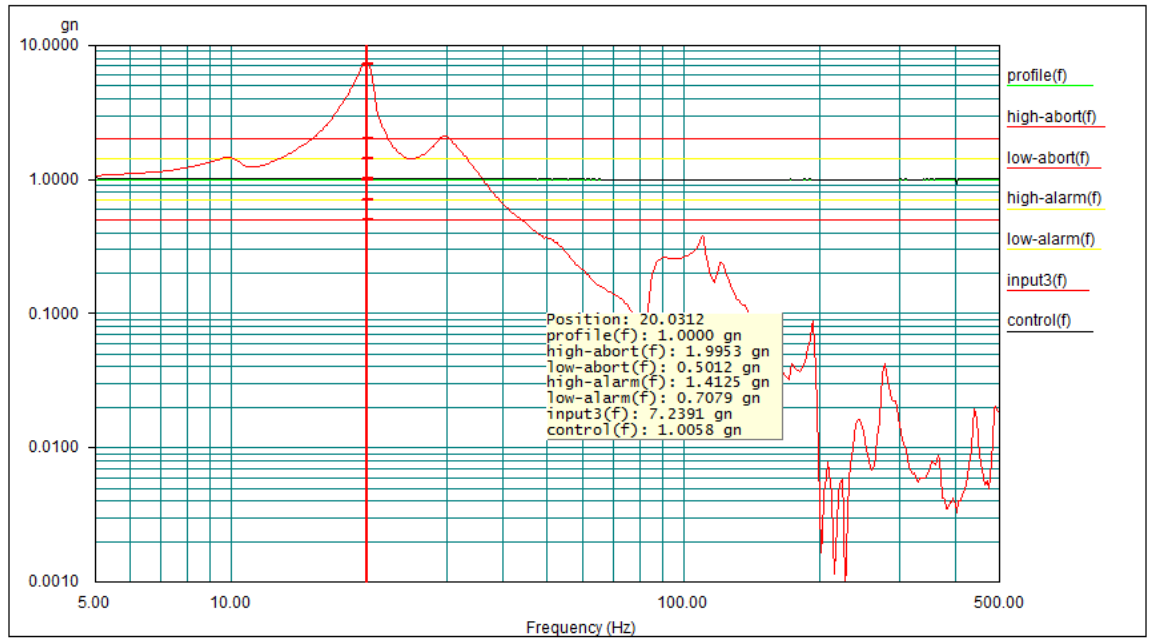
Notes: Lukittu, Siminen

Project File Name: Sinisweep 5-500Hz 1g(RSTD).pj

Profile Name: Sine Sweep 5-500 Hz
15-13

Test Type: Swept Sine

Run Folder: \RunDefault Jun 01, 2015 11-



Level: Logarithmic 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type:

Frequency: 498.361694 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

DUT: Raspberry Pi A+ kotelo + gimbal

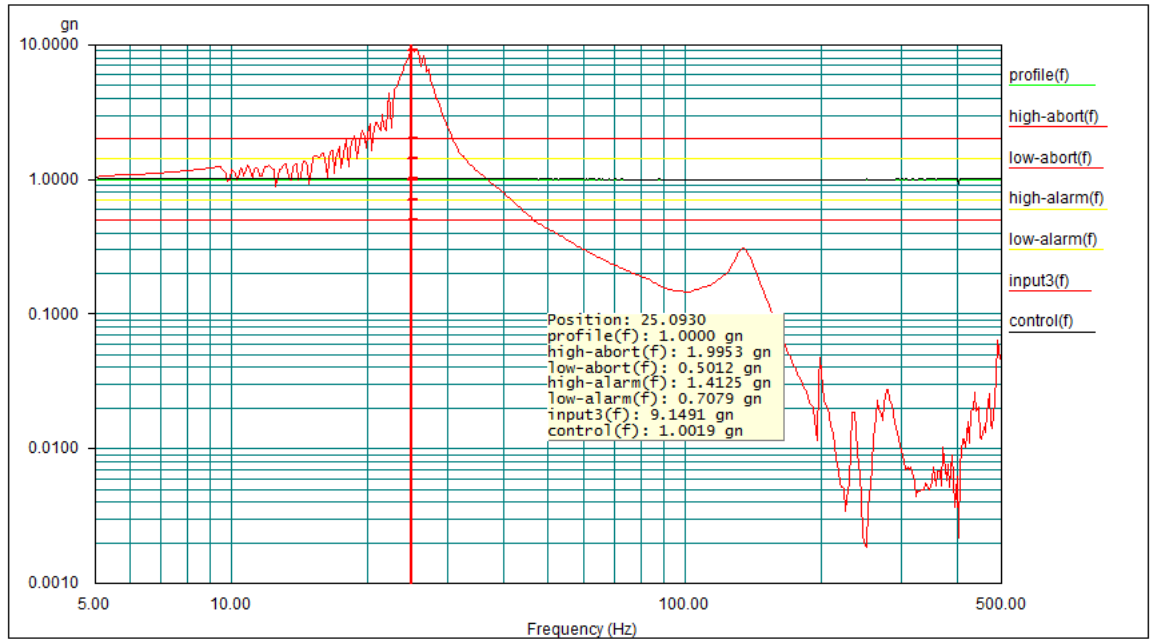
Notes: Säkköt, Sininen

Project File Name: Sinisweep 5-500Hz 1g(RSTD).pj

Profile Name: Sine Sweep 5-500 Hz

Test Type: Swept Sine

Run Folder: \RunDefault Jun01, 2015 11-03-54



Level: 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type: Logarithmic

Frequency: 498.565704 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

DUT: Raspberry Pi A+ kotelo + gimbal

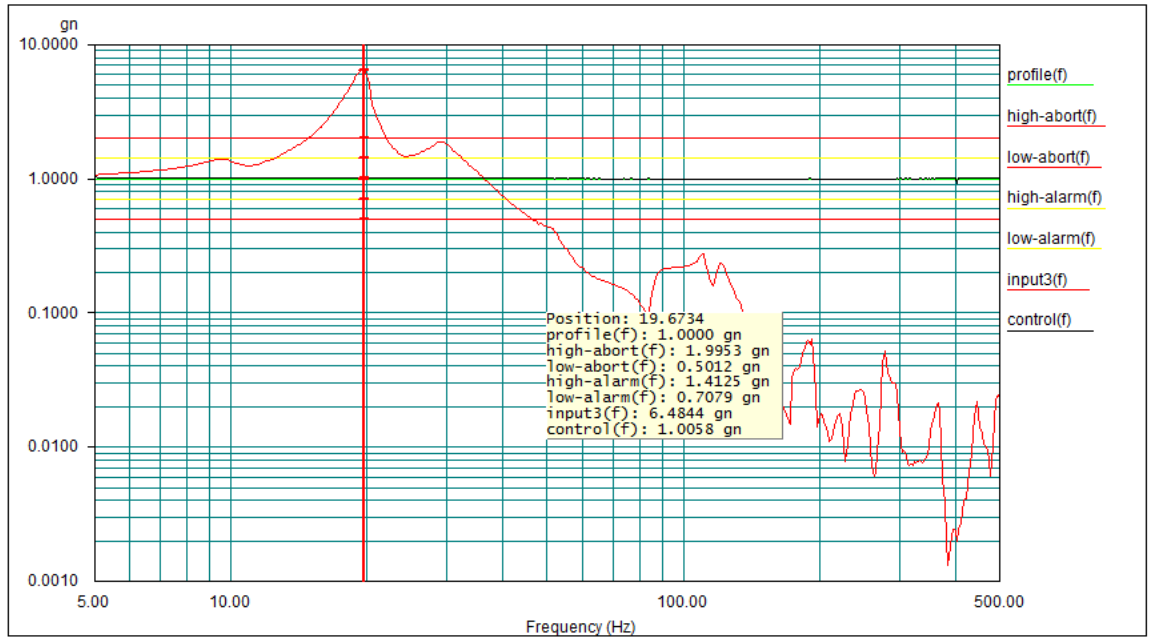
Notes: Lukittu, Keltainen

Project File Name: Sinisweep 5-500Hz 1g(RSTD).pj

Profile Name: Sine Sweep 5-500 Hz
29-27

Test Type: Swept Sine

Run Folder: \RunDefault Jun 01, 2015 11-



Level: Logarithmic 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type:

Frequency: 498.565704 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

DUT: Raspberry Pi A+ kotelo + gimbal

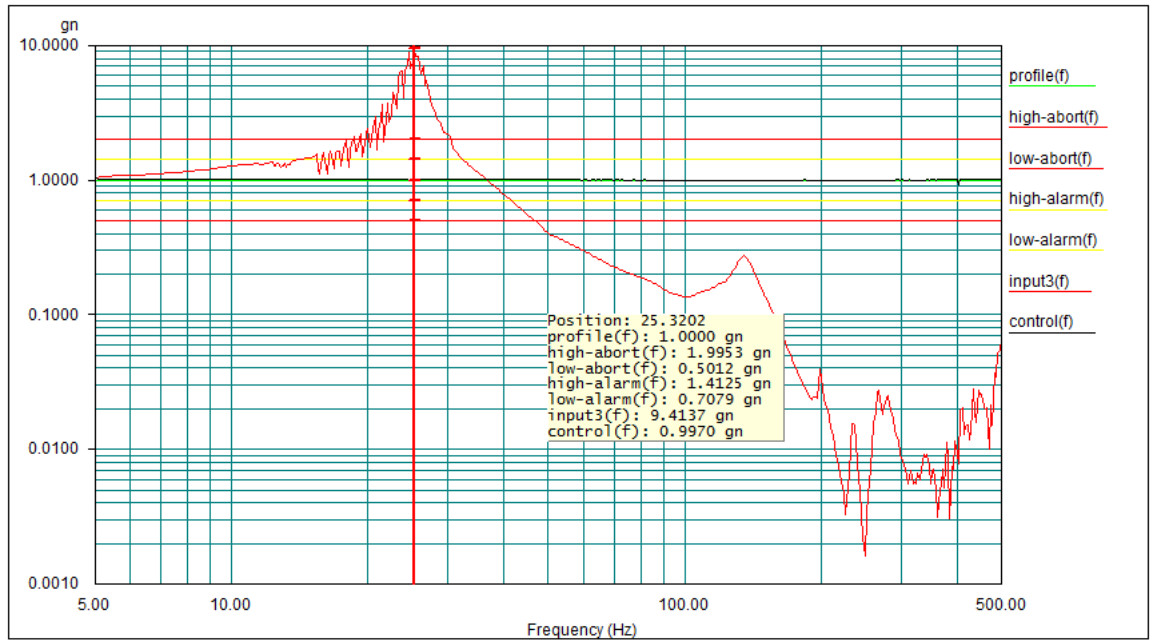
Notes: Sähkö, Keltainen

Project File Name: Sinsweep 5-500Hz 1g(RSTD).pj

Profile Name: Sine Sweep 5-500 Hz
37-25

Test Type: Swept Sine

Run Folder: \RunDefault Jun 01, 2015 11-



Level: 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type:

Logarithmic

Frequency: 498.565704 Hz Time Remaining:

00:00:00

Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

DUT: Raspberry Pi A+ kotelo + gimbal

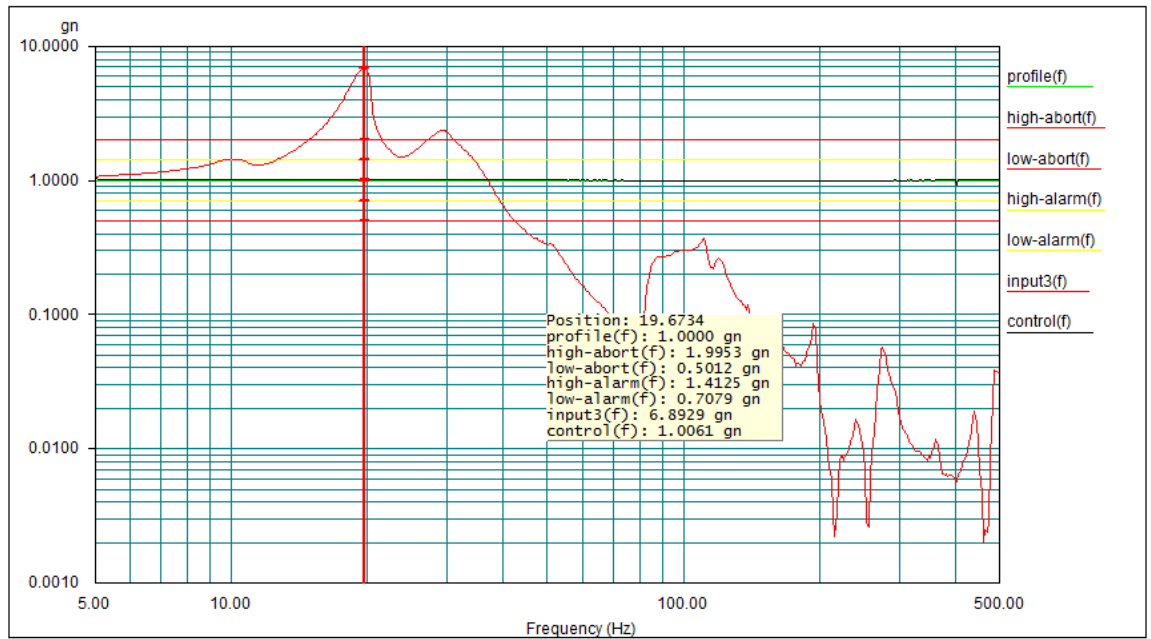
Notes: Lukittu Punainen

Project File Name: Sinisweep 5-500Hz 1g(RSTD).pj

Profile Name: Sine Sweep 5-500 Hz
02-11

Test Type: Swept Sine

Run Folder: \RunDefault Jun01,2015 12-



Level: 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type: Logarithmic

Frequency: 498.157776 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

DUT: Raspberry Pi A+ kotelo + gimbal

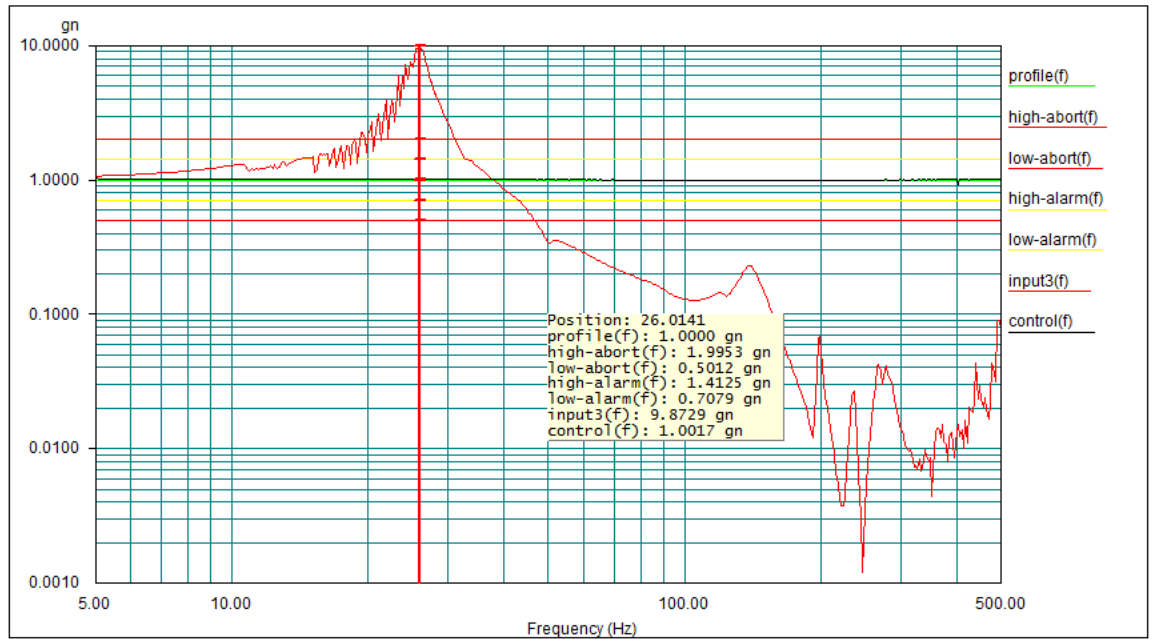
Notes: Sähkö Puhainen

Project File Name: Sinsweep 5-500Hz 1g(RSTD).pj

Profile Name: Sine Sweep 5-500 Hz
54-20

Test Type: Swept Sine

Run Folder: \RunDefault Jun 01, 2015 11-



Level: 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type:

Logarithmic

Frequency: 498.157776 Hz Time Remaining:

00:00:00

Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

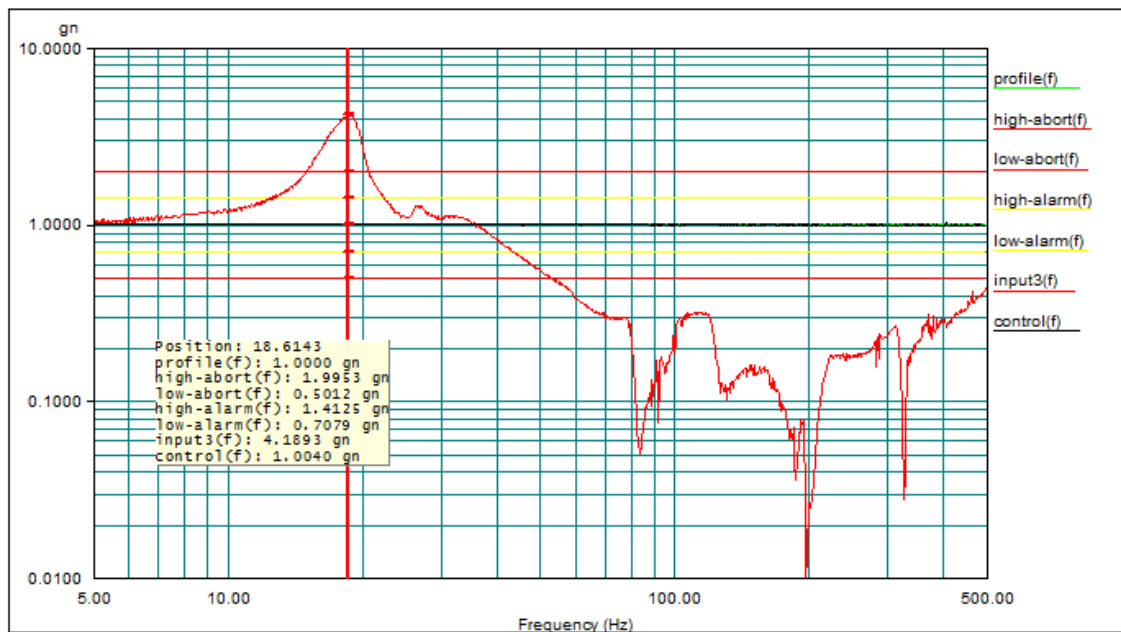
PUT: Gyrokopteri

Notes: Lukittu Musta

Project File Name: Gyro Sinisweep.pj

Profile Name: Sinisweep 5-500Hz 1g Test Type: Swept Sine

Run Folder: \RunDefault Sep 22, 2015 13-14-14



Level: 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type: Logarithmic
 Frequency: 498.157776 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

Data saved at 01:17:08 PM, Tuesday, September 22, 2015 Report created at 01:17:12, tiistai, syyskuu 22, 2015

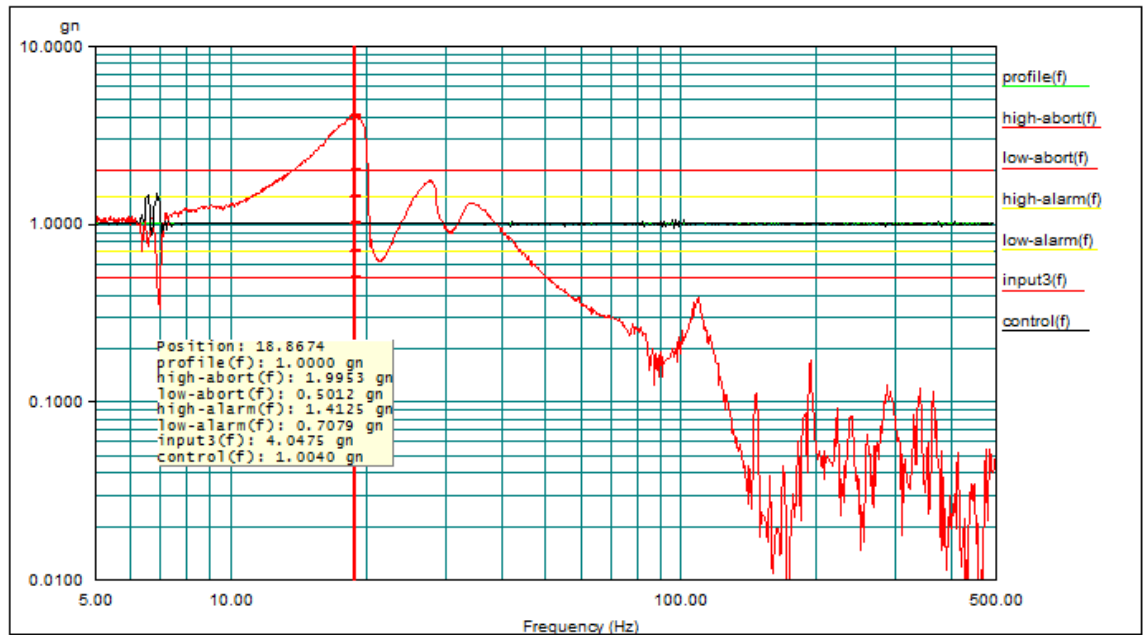
DUT: Gyrokortti

Notes: Lukittu, Sininen

Project File Name: Gyro Sinisweep.pj

Profile Name: Sinisweep 5-500Hz 1g Test Type: Swept Sine

Run Folder: RunDefault Sep 22, 2015 13-29-44



Level: 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type: Logarithmic
 Frequency: 498.157776 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

Data saved at 01:32:35 PM, Tuesday, September 22, 2015 Report created at 01:32:37, tiistai, syyskuu 22, 2015

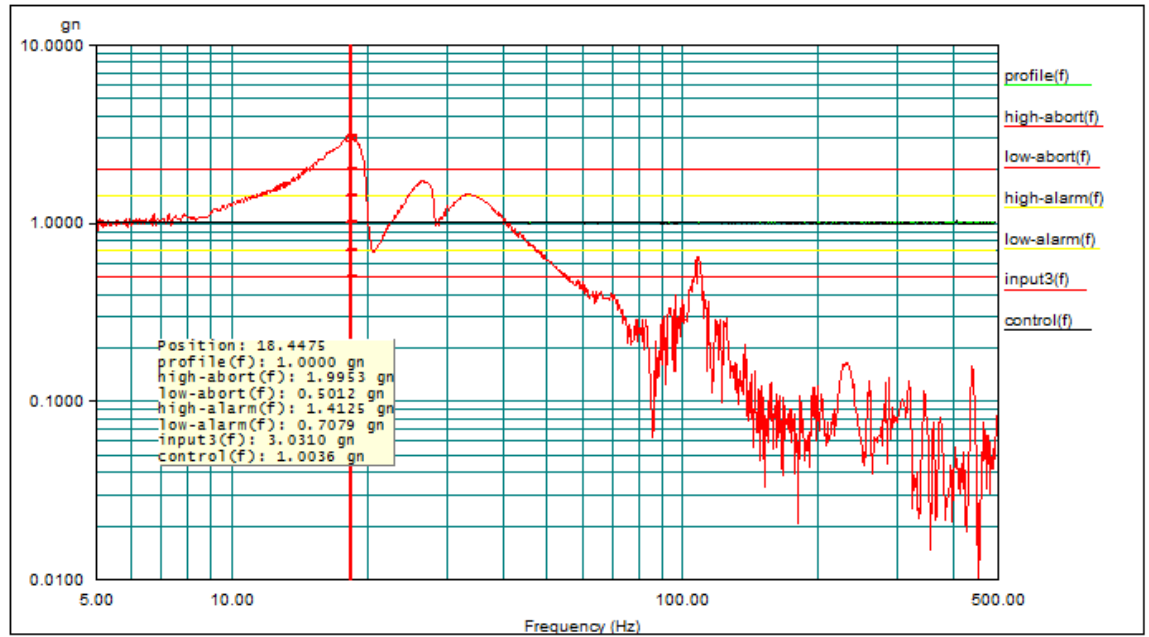
DUT: Gyrokoptari

Notes: Lukittu, Keltainen

Project File Name: Gyro Sinisweep.pj

Profile Name: Sinisweep 5-500Hz 1g Test Type: Swept Sine

Run Folder: RunDefault Sep 22, 2015 13-39-26



Level: 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type: Logarithmic
 Frequency: 498.565704 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

Data saved at 01:41:48 PM, Tuesday, September 22, 2015 Report created at 01:41:50, tiistai, syyskuun 22, 2015

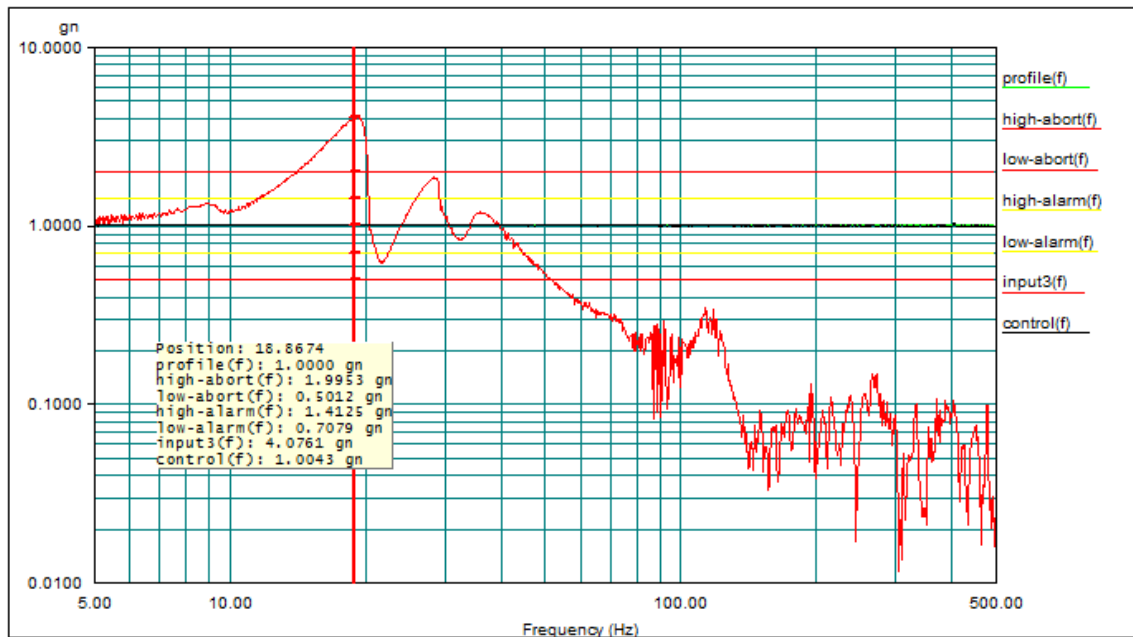
DUT: Gyrokopteri

Notes: Lukittu, Punainen

Project File Name: Gyro Sinisweep.pj

Profile Name: Sinisweep 5-500Hz 1g Test Type: Swept Sine

Run Folder: RunDefault Sep 22, 2015 13:48:11



Level: 100 % Full Level Time: 00:02:00 Sweep Type: Logarithmic
 Frequency: 497.953949 Hz Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 3.32 Oct/Min

Data saved at 01:50:43 PM, Tuesday, September 22, 2015 Report created at 01:50:44, tiistai, syyskuu 22, 2015