

Tatu Kangas-Heiska

FRINGEEN PERUSTUVA 3D-KUVAUSJÄRJESTELMÄ

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

2016

## FRINGEEN PERUSTUVA 3D-KUVAUSJÄRJESTELMÄ

Kangas-Heiska, Tatu  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2016  
Ohjaaja: Leino, Mirka  
Sivumäärä: 50

Asiasanat: rakenteellinen valaisu, 3D-kuvaus, fringe

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa rakenteelliseen valaisuun perustuva 3D-kuvausjärjestelmä Satakunnan ammattikorkeakoulun TKI-laboratoriolle. Järjestelmän tarkoituksena on nopeuttaa ja helpottaa esineiden 3D-kuvausta.

Työ aloitettiin tutustumalla 3D-kuvaukseen sekä DAVID3-ohjelman käyttöön. Tämä piti sisällään kameran ja projektorin etäisyyden määrittämistä sekä toisistaan että kuvattavasta kohteesta parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Myös kuvausympäristön valaisulla havaittiin olevan merkitystä skannauksen onnistumiseen.

Kun järjestelmään tutustuminen oli tehty alettiin suunnitella itse järjestelmää, jonka tulee olla modulaarinen ja yksinkertainen käyttää. Järjestelmään kuuluu teline kameraa ja projektoria varten sekä automaattinen kääntöpöytä, jonka päälle kuvattava esine laitetaan kuvaustapahtuman ajaksi. Muutaman eri suunnitelman jälkeen päädyttiin lopullisiin ratkaisuihin, joiden pohjalta teline ja kääntöpöytä rakennettiin.

Kun järjestelmä saatiin valmiiksi, suoritettiin testikuvaukset, joiden perusteella selvitettiin täytyisikö järjestelmään tehdä muutoksia. Testikuvausten perusteella järjestelmä todettiin toimivaksi ja luovutuskelpoiseksi.

## SETUP FOR FRINGE BASED 3D IMAGING SYSTEM

Kangas-Heiska, Tatu

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Automation technology

May 2016

Supervisor: Leino, Mirka

Number of pages: 50

Keywords: structured light, 3D imaging, fringe

---

The meaning of this thesis was to design and build a structured light based 3D imaging system for the RDI laboratory at Satakunta University of Applied Sciences. The main purpose of this thesis was to make the 3D imaging of objects faster and more easily repeatable.

Work started by getting familiar with 3D imaging and how the DAVID3 program was operating. This consisted of defining the distance between the camera, projector and the object to be imaged so that the best final result could be achieved. Also the surrounding lighting was found to have significant effect to the success of the final result.

After getting familiar with the program and the requirements for a successful scan, began the planning of the system which was required to be modular and easy to use. The system consists of a stand on to which the camera and the projector are mounted as well as an automated turntable on which the object is placed for the duration of the imaging. After a couple of different design versions the final model with the stand and the turntable was ready.

After the setup was built a set of test scans were performed to determine if the setup needed to be somehow improved. Based on the imaging tests the system was found to work properly and is ready to be handed out.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	MITÄ ON KONENÄKÖ?.....	7
2.1	Yleistä .....	7
2.2	Kamera .....	7
2.2.1	Pikseli ja resoluutio .....	7
2.2.2	Analogiset ja digitaaliset kamerat.....	8
2.2.3	Kameratyypit .....	9
2.2.4	Optiikka .....	12
2.2.5	Kenno .....	13
2.2.6	Kuvan analysointi .....	14
2.3	Valaisu .....	14
2.3.1	Taustavalaisu .....	15
2.3.2	Diffuusivalaisimet .....	15
2.3.3	Kohtisuora valaisu .....	16
2.3.4	Sivuvalaisu .....	17
2.3.5	Strobovalaisu .....	17
2.3.6	Rakenteellinen valaisu .....	17
3	3D-KUVAUS .....	19
3.1	Yleistä .....	19
3.2	3D-kuvausmenetelmät .....	19
3.2.1	Stereokuvaus .....	19
3.2.2	Time of flight .....	20
3.2.3	Depth from focus .....	21
3.2.4	Kinect .....	21
3.2.5	Laserviiwaprojektio .....	22
3.2.6	Fringe .....	22
4	FRINGEEN PERUSTUVAN 3D-KUVAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA KOKOONPANO .....	25
4.1	DAVID3.....	25
4.2	Järjestelmän suunnittelu ja kokoonpano .....	25
4.3	Telineen suunnittelu kameralle ja projektorille .....	25
4.3.1	Ensimmäinen luonnos.....	25
4.3.2	Toinen luonnos .....	27
4.3.3	Valmis teline .....	28
4.4	Kääntöpöydän suunnittelu .....	28
4.4.1	Kääntöpöydän luonnos .....	29

4.4.2	Valmis kääntöpöytä .....	29
5	JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖ.....	31
5.1	Telineen kameran ja projektorin valmistelu .....	31
5.1.1	Teline .....	31
5.1.2	Kamera .....	33
5.1.3	Projektori .....	33
5.2	Kääntöpöytä ja DAVID3-ohjelma .....	34
5.2.1	Kääntöpöytä .....	34
5.2.2	DAVID3-ohjelma .....	35
5.2.3	Kalibrointi .....	39
5.3	Skannaus .....	42
5.3.1	Skannausten yhdistäminen .....	43
6	POHDINTA.....	49
	LÄHTEET.....	50

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella ja rakentaa Satakunnan ammattikorkeakoulun TKI-laboratoriolle 3D-kuvausjärjestelmä, joka perustuu rakenteellista valaisua käyttävään fringe-analyysiin. Järjestelmän tarkoituksena on nopeuttaa 3D-kuvausten tekemistä. Sen tulisi olla modulaarinen sekä yksinkertainen kasata ja käyttää.

3D-kuvauksia on aiemmin tehty asettamalla sekä kamera, projektori että kuvattava esine erillisinä pöydälle. Kuvattavaa esinettä on jokaisen yksittäisen skannauksen välissä käännetty käsin seuraavaan asentoon, mikä on saattanut johtaa kuvausetäisyyden ja sitä kautta tarkkuuden muuttumiseen. Skannausten välillä esineen kääntämisen jälkeen on uusi skannaus aloitettava käsin DAVID-ohjelmasta.

Työn tuloksena syntyi kolmijalkaan kiinnitettävä teline, johon kamera ja projektori kiinnitetään sekä automaattinen kääntöpöytä, joka kääntää kuvattavaa kohdetta skannausten välillä. Kääntöpöydän ohjelma myös keskustelee DAVID3-ohjelman kanssa, minkä ansiosta jokaista skannausta ei tarvitse erikseen käynnistää tietokoneelta.

## 2 MITÄ ON KONENÄKÖ?

### 2.1 Yleistä

Konenäkö on kuvaamiseen ja automaatiiseen analysointiin perustuvaa hyödyllisen informaation keräämistä esimerkiksi teollisuusympäristössä. Sitä voidaan soveltaa muun muassa nestetason pinnankorkeuden tarkistamisessa, luotaessa kolmiulotteisia digitaalisia malleja esineistä, noukittavan esineen orientaation määrittelemiseksi robottia varten tai esimerkiksi koneella luettavien koodien kuten viivakoodien tai QR-koodien tunnistamiseen ja lukemiseen. Valmistajat käyttävät automatisoituja konenäkösovelluksia ihmisten sijaan, koska se on nopeampaa, tulokset ovat tarkempia, ne pystyvät toimimaan tauotta pidempään ja myös kustannukset ovat pienemmät. Konenäköjärjestelmään kuuluu kuvan muodostus eli yksi tai useampi kamera, optiikka, valaisuelementti, kuvankaappaus, kuvan käsittely eli ohjelmisto, jolla käsitellään kaapattu kuva ja etsitään siitä tarvittavat piirteet sekä ominaisuudet ja ohjausjärjestelmä, jolla ohjataan kuva-analyysin perusteella koko järjestelmää. (Microscan [www-sivut 2015](#), Aalto-yliopisto [www-sivut 2015](#))

### 2.2 Kamera

Konenäkösovelluksessa kamera ottaa digitaalisia kuvia esimerkiksi kappaleista, joita tietokoneohjelma tai älykamera analysoi ja vertaa niitä ennalta määriteltyihin parametreihin. Kameran osat ovat optiikka, kenno ja kuvan analysointi joka voi olla integroituna kameraan tai tapahtua erillisenä esimerkiksi tietokoneella. Kameratyyppejä on myös erilaisia, on matriisi- ja viivakameroita sekä harmaasävy- ja värikameroita. (Edmund Optics [www-sivut 2015](#))

#### 2.2.1 Pikseli ja resoluutio

Kaikki digitaaliset kuvat koostuvat kuva-elementeistä eli pikseleistä. Pikseli on kuvan pienin, neliön muotoinen osa, joka sisältää väri-informaatiota. Mitä enemmän pikseleitä kuvassa on, sitä tarkempi kuva on. Resoluutiolla tarkoitetaan pikselien määrää

tietyllä alueella ja se ilmaistaan vaaka- ja pystyakselin pikselimäärien tulona. Esimerkiksi VGA kameran resoluutio on 640x480, joka tarkoittaa sitä, että kameran kennolla on vaaka-akselilla 640 pikseliä ja pystyakselilla 480 pikseliä. (Ultimate photo tipswww-sivut 2014)

### 2.2.2 Analogiset ja digitaaliset kamerat

Konenäön kamerat jakautuvat kahteen lohkoon, analogisiin ja digitaalisiin kameroihin. Analogiset kamerat lähettävät jatkuvasti muuttuvaa elektronista signaalia reaaliajassa. Signaalin taajuus ja amplitudi tulkitaan AD-muuntimella videoinformaationa. Analogisen videosignaalin laatu ja se kuinka videosignaali tulkitaan vaikuttavat molemmat lopputulokseen. Tällaisella tiedonvälityksellä on hyvät ja huonot puolensa. Tyypillisesti analogiset kamerat ovat edullisempia ja yksinkertaisempia kuin digitaaliset kamerat, minkä ansiosta ne ovat kustannustehokkaita ja yksinkertaisia ratkaisuja yleisiin videosovelluksiin. Toisaalta analogisilla kameroilla on ylärajat sekä pystysuunnan resoluutiolle, että kuvataajuudelle johtuen analogisen signaalin kaistanleveydestä. Analogiset kamerat ovat myös alttiita elektroniselle häiriölle, joka voi johtua esimerkiksi kaapelin pituudesta tai liittimen tyypistä.

Digitaaliset kamerat lähettävät binääridataa, joka koostuu ykkösiä ja nollija sisältävästä lukujonosta ja ovat viimeisen kymmenen vuoden aikana vakiinnuttaneet paikkansa ensisijaisena kamerana konenäkösovelluksissa. Digitaalisten kameroiden pikselimäärät ja resoluutio ovat huomattavasti paljon suuremmat kuin analogisella kameralla, sillä kaistanleveydellä ei ole rajaa. Tällä saavutetaan korkea resoluutio ja parempi kuvan laatu. Lähtösignaali on digitaalinen ja tästä syystä se kärsii vähemmän häiriöstä ja signaalin vääristymisestä. Digitaalisissa kameroissa on myös korkeampi kuvataajuus ja nopeampi suljin. Nämä edut eivät kuitenkaan tule ilmaiseksi, digitaaliset kamerat ovat nimittäin analogisia vastineitaan paljon kalliimpia. Lisäksi ominaisuuksia täyteen pakatun digitaalikameran liittäminen konenäkösovellukseen saattaa vaatia monimutkaisempia järjestelyitä, vaikka kyseessä olisi vain yksinkertaisia ominaisuuksia vaativa videosovellus. Digitaalisen kameran käyttöä rajoittaa myös joissain tapauksissa lyhyt kaapelinpituus. Nykyään digitaalisia kameroita saa myös esim. Ethernet-liitännällä eli edes kaapelin pituus ei ole enää rajoittava tekijä. (Edmund Optics www-sivut 2015)



### 2.2.3 Kameratyypit

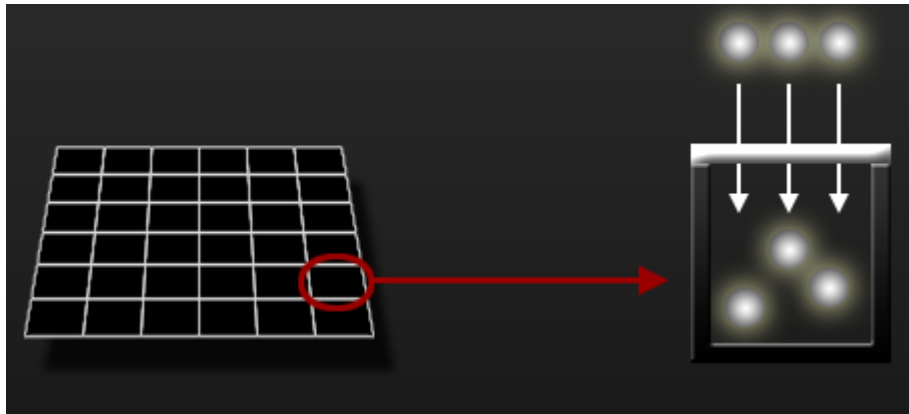
Kameran valitseminen riippuu konenäkösovelluksen tarpeista. Liikkuuko kuvattava kohde? Tarvitseeko kuvan olla tarkka vai riittääkö epätarkempi kuva? Minkä muotoisia kuvattavat kohteet ovat? Onko tarvetta värikuvalle vai halutaanko mustavalkoinen kuva? Erilaisia kameratyyppejä ovat esimerkiksi viiva- ja matriisikamerat sekä harmaasävy- ja värikamerat. Matriisikameran kennossa on pikseleitä sekä vaaka- että pystysuunnassa esimerkiksi 640x480. Se ottaa kuvan koko kuvausalueesta ja kuvattava esine saadaan kuvatuksi yhdellä kuvauksella. Matriisikamerat ovat yleiskäyttöisempiä kuin viivakamerat. Viivakameran kennossa pikseleitä on tyypillisesti vain vaakasuunnassa esimerkiksi 6000x1. Viivakamera ottaa nimensä mukaan viivamaisia kuvia, jotka yhdistetään yhdeksi kokonaiseksi kuvaksi tietokoneella. Tällainen kuvaustapa sopii esimerkiksi erilaisten leveiden ja pitkulaisten esineiden kuvaukseen. Tällä tavalla saavutetaan myös suurempi resoluutio kuin matriisikameralla. Hintaluokaltaan matriisikamerat ovat edullisempia ja matriisikameraa käyttävä konenäköjärjestelmä on helpommin asennettavissa. (Edmund Opticswww-sivut 2015)



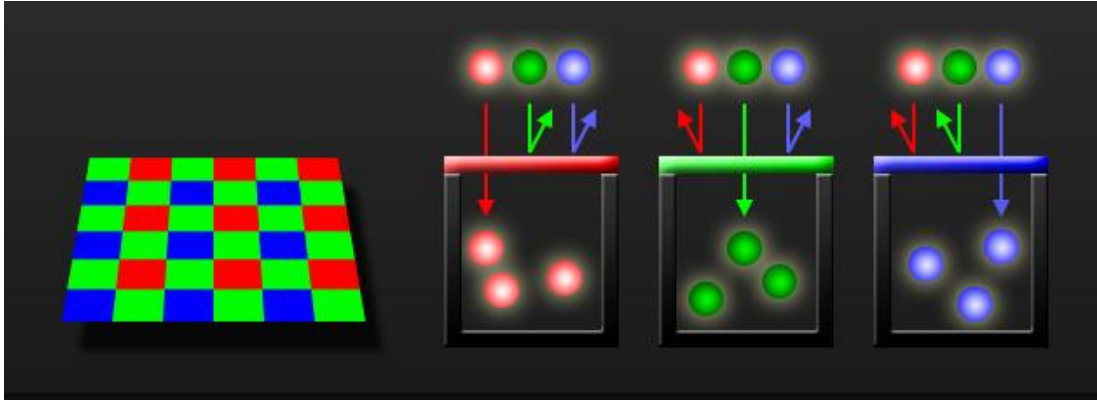
KUVA 1. Vas. Matriisikamera, oik. viivakamera (WWW-sivu SAMK Automaation tutkimusryhmä)

Toinen kameran valintaan vaikuttava seikka on värin erottamisen tarpeellisuus. Tässä vaihtoehtoina ovat harmaasävy- ja värikamera. Kameran kennossa olevat pikselit

(KUVA 2) ovat valodiodeja ja keräävät kohteesta heijastuvaa valoa samalla tavalla kuin esimerkiksi sateella ämpäri kerää vesipisaroita. Sulkimen avautuessa ja valotuksen alkaessa pikselit altistuvat valolle ja alkavat kerätä fotoneja. Valotuksen päätyttyä luetaan jokaisen valodiodin varauksen muutos numeerisena arvona. Nämä arvot muodostavat sähköisen signaalin, joka siirretään tietokoneelle. Tietokoneella jokaisen valodiodin varauksen muutoksen mukaan määrytyy yhden pikselin harmaasävy. Pikseli on sitä vaaleampi mitä enemmän vastaavan valodiodin varaus on muuttunut. Kun käytetään värikameraa, joka käyttää kuvan kaappaamiseen yhtä kennoa ovat kennon pikselit järjestetty niin sanottuun Bayermatriisiin (KUVA 3). Jokaisen pikselin päällä on tietyn väristä valoa läpi päästävä suodatin, jonka seurauksena yksittäinen pikseli kerää vain yhden väristä joko punaista, vihreätä tai sinistä valoa. Muut värit approksimoidaan yksittäistä pikseliä ympäröiville pikseleille tulleen valon arvosta. Tämän haittapuolena on se, että jokainen pikseli kerää tehokkaasti vain kolmasosan tulevasta valosta, esimerkiksi mikään sininen tai vihreä valo ei pääse punaiselle varatulle pikselille, jolloin tarkkuus heikkenee. (KUVA 3). (Red Digital Cinema www-sivut 2015)

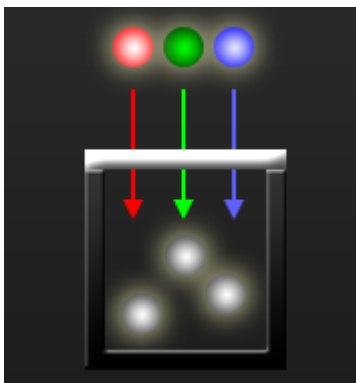


KUVA 2. Pikselit keräävät kohteesta heijastuvaa valoa (Red Digital Cinema www-sivut 2015)

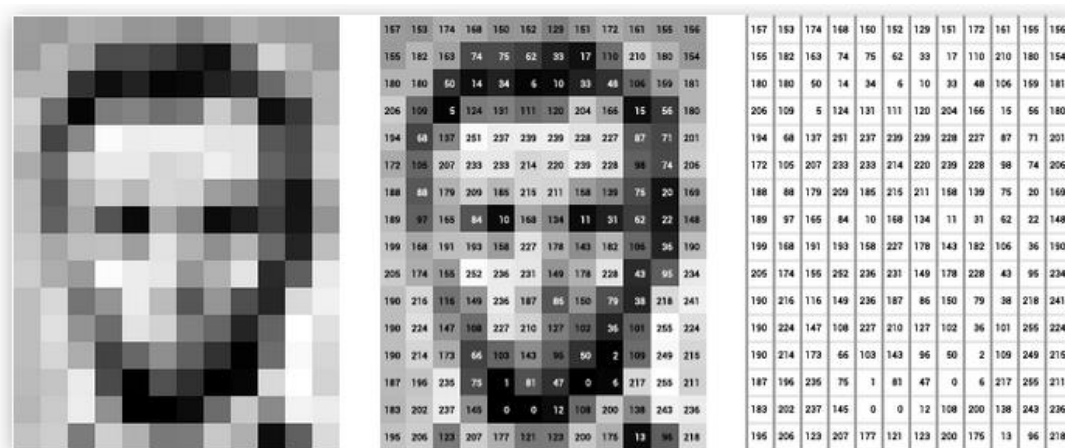


KUVA 3. Bayermatriisi ja värin suodatus (Red Digital Cinemawww-sivut 2015)

Harmaasävykameran kennon valoilmaisin vangitsee kaiken kohteesta heijastuvan valon. Tämä tarkoittaa sitä, että harmaasävykameran valoilmaisin vangitsee jopa kolme kertaa enemmän valoa kuin värikameran valoilmaisin (KUVA 4). 8-bittisessä harmaasävykamerassa valoilmaisimelle tulevan valon numeerinen arvo määritellään välille 0-255, missä arvolla 0 pikseli on täysin musta ja 255 pikseli on täysin valkoinen. Muut arvot tällä välillä ovat harmaan eri sävyjä (KUVA 5). (Red Digital Cinemawww-sivut 2015, openFrameworkswww-sivut 2015)



KUVA 4. Harmaasävykameran pikselille tuleva valo (Red Digital Cinemawww-sivut 2015)

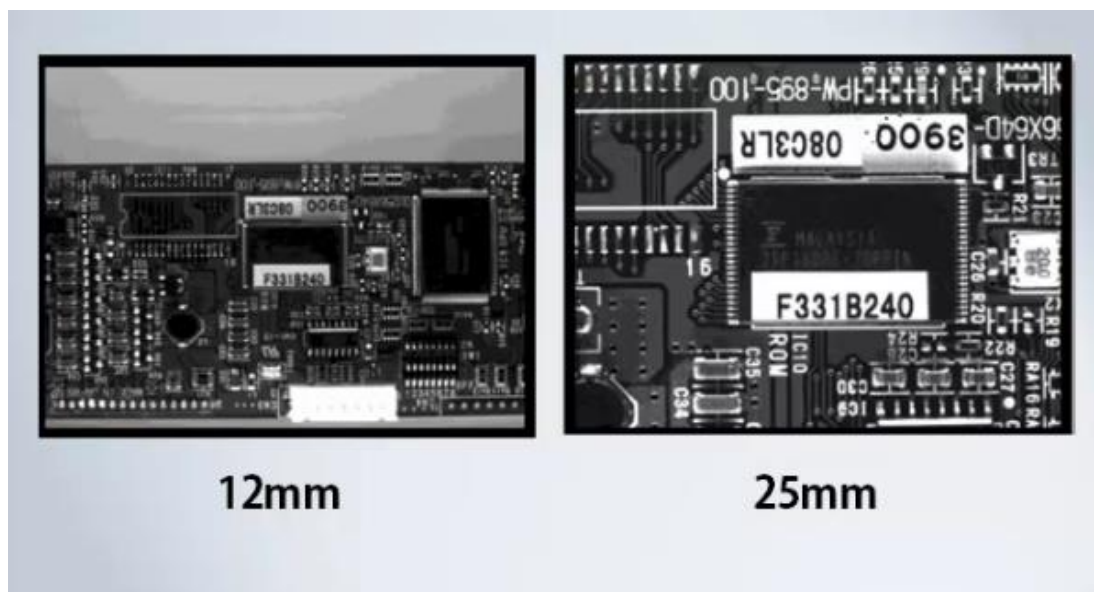


KUVA 5. Esimerkki karkeasta harmaasävykuvasta (openFrameworks [www-sivut](http://www.sivut) 2015)

Konenäössä käytetään aina harmaasävykameraa, jos värejä ei tarvitse tunnistaa, koska edellä mainitun värientunnistustekniikan vuoksi värikameran tarkkuus on aina 1/3 vastaavan harmaasävykameran tarkkuudesta.

## 2.2.4 Optiikka

Optiikan tarkoituksena on kerätä kuvattavasta kohteesta heijastuvat valonsäteet ja toimittaa ne kameran kennolle. Optiikka määrittelee kameran näkökentän, terävyysalueen, tarkennusvaran ja polttopisteen. Tyypillisesti kamerassa on joko kiinteä tai vaihdettavissa oleva optiikka. Kiinteälinssinen kamera käyttää tyypillisesti automaattista tarkennusta. Se voi olla mekaanisesti säätävä tai elektronisesti säädettävä nestemäinen linssi ja sen näkökenttä on kiinteä. Optiikan valinta vaikuttaa suuresti siihen miltä kuva näyttää. Seuraavassa on esimerkki siitä, miltä näyttää kuva, joka on otettu samalla kameralla, mutta eri polttovälin omaavilla optiikoilla. Kuvassa 6 vasemmanpuoleinen kuva on otettu käyttämällä 12mm:n laajakulmaobjektiiä. Tällä linssillä saavutetaan laajempi kuvausalue ja pienempi suurennus kuin oikeanpuoleisessa kuvassa, joka on otettu 25mm:n objektivilla. Kun käytetään linssiä, jossa on pidempi polttoväli, saadaan kuva pienemmällä kuvausalueella, jossa yksityiskohdat näkyvät luonnollisesti paremmin. Mitä kauempaa pitää kuvata määrättyä kuva-alueita sitä pidempi polttoväli optiikalla pitää olla. (Microscan [www-sivut](http://www.sivut) 2015)



KUVA 6. Piirilevystä eri optiikoilla otettu valokuva (Microscan www-sivut 2015)

### 2.2.5 Kenno

Linssi siirtää kuvan kennolle valon muodossa. Konenäkö käyttää tyypillisesti joko CCD (Charge-Coupled Device) -kennoa, jossa kuva muodostuu analogisena kennolle ja se luetaan kennolta digitaalisena. Uudemmallalla CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) -kennolla analoginen signaali muutetaan digitaalseksi jo kennolla. CCD-kenno on piistä valmistettu mikrosiru, joka sisältää valolle herkkiä alueita matriisin muodossa. CCD-kenno on itsessään analoginen laite, jonka ulostulo muutetaan digitaaliseen muotoon AD-muuntimella. Analogisissa kameroissa jokaisen pikselin jännite luetaan tietyssä järjestyksessä ja välillä väliin lisätään synkronointipulseja, joiden avulla kuva rakennetaan uudelleen. CMOS-kennossa jokaisen pikselin varaus muutetaan jännitteeksi jo pikselin sijainnissa ja signaali limitetään riveittäin ja sarakkeittain monille kennolla sijaitseville AD-muuntimille. CMOS-kennolla jokainen valoilmaisin on alue, johon kuuluu valodiodi ja kolme transistoria, jotka resetoivat ja aktivoivat pikselin ja suorittavat osan limityksestä. Tämän ansiosta CMOS-kennot ovat todella nopeita. Kennon resoluutiolla on suuri merkitys, kun valitaan kameraa konenäkösovellukseen. Pienemmällä resoluutiolla eli kennon pikselimäärällä saadaan epätarkempi kuva, kun taas suuremmalla pikselimäärällä saadaan tarkempi kuva. Kennon pikselimäärällä on myös vaikutus kameran suorituskykyyn, suurella pikselimää-

rällä kamera ei kykene ottamaan kuvia yhtä nopeasti kuin pienempiresoluutioinen kamera. Myös kuvien analysoimiseen kuluu sitä enemmän aikaa, mitä enemmän pikseleitä täytyy analysoida. Kuvattavien kappaleiden koko, yksityiskohtien merkitys sekä se, liikkuuko kuvattava kappale vai ei vaikuttavat kennon resoluutioon kameraa valittaessa. Resoluutio kannattaa valita riittävän isoksi, muttei yhtään liian isoksi. (Microscan www-sivut 2015, Edmund Opticswww-sivut 2015)

### 2.2.6 Kuvan analysointi

Konenäkösovelluksessa kuvan analysointi tapahtuu joko sisäisesti integroituna älykameraan tai ulkoisesti kameraan kytketyllä tietokoneella. Kuvan analysointi tapahtuu sitä varten suunnitellulla ohjelmistolla, josta löytyy laaja valikoima erilaisia työkaluja kuten tunnista, laske ja mittaa. Kuvaa voidaan myös analysoida matriisialgebran operaatioilla ja koodia kirjoittamalla. Kuvan analysointi koostuu useista toiminnoista ja algoritmeista. Näitä käytetään usein sekvenssissä, jotta saavutetaan haluttu tulos, joka teollisessa käytössä on joko tuotteen hyväksyminen tai hylkääminen. (Microscan www-sivut 2015)

## 2.3 Valaisu

Valaisu on oleellinen osa konenäköjärjestelmää ja voi joko pelastaa tai pilata sen. Oikean tyyppinen ja värinen valaisu tulee valita kuvattavan kohteen värin, muodon ja kohteessa olevien tärkeiden yksityiskohtien mukaan. Valaistuksen ollessa oikeanlainen saadaan halutut yksityiskohdat esiin ja analysoitua. Valaisua valittaessa tulee myös ottaa huomioon kuvattavan kohteen kuvausympäristö, ympäristöstä tuleva ja heijastuva valo, kuvattavan kohteen materiaali ja väri. Erilaisia valaisumenetelmiä ovat muun muassa taustavalaisu, diffuusivalaisimet diffuusikupolivalaisu ja aksiaalinen diffuusivalaisu, kohtisuora (Bright Field) valaisu, sivuvalaisu (Dark Field), strobovalaisu sekä rakenteellinen valaisu. Valaisussa käytetään usein yksiväristä kuten punaista, vihreätä, sinistä tai valkoista valoa riippuen siitä mitä yksityiskohtia kuvasta halutaan tarkkailla. (National Instruments www-sivut 2010, Batchelor 2012, 284-287)

### 2.3.1 Taustavalaisu

Taustavalaisu (KUVA 7) tuo kuvaan välittömästi kontrastin, kun se luo tumman siluetin kirkasta taustaa vasten. Yleisimpiä käyttötarkoituksia tälle valaisumenetelmälle ovat esineiden tunnistus, orientaation ja paikan määrittely, reikien löytäminen ja laskeminen sekä reunojen tunnistaminen ja mittojen ottaminen. (Hornberg 2006, 158)

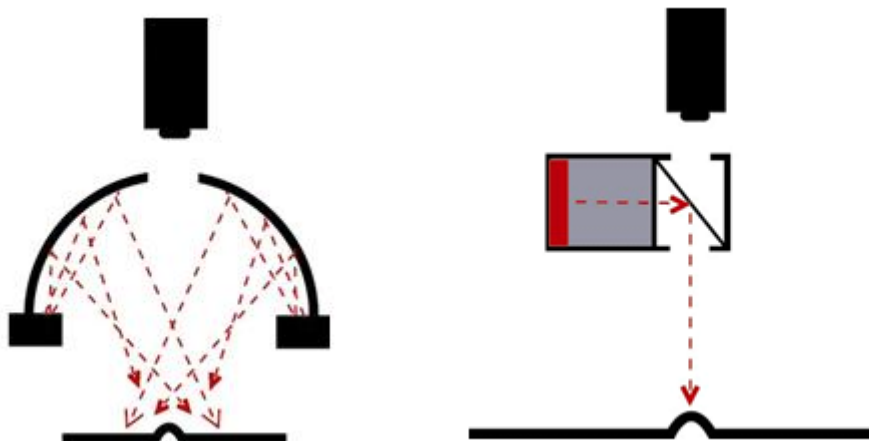


KUVA 7. Taustavalaisu (National Instrumentswww-sivut 2010)

### 2.3.2 Diffuusivalaisimet

Diffuusivalaisussa valo ei tule vain yhdestä pisteestä vaan se tulee kuvattavan kohteen pinnalle tasaisesti. Diffuusivalaisimia on kahden tyyppisiä, diffuusikupolivalaisimia sekä aksiaalisia diffuusivalaisimia. Diffuusikupolivalaisin (KUVA 8 vas.) toimii siten, että kupolin sisäreunan sisäpuolelle on tehty renkaan mallinen LED-valaisin. LEDit osoittavat ylöspäin kupolin valkoiseksi maalattuun sisäpintaan, josta valo heijastuu tasaisesti kuvattavan kohteen pinnalle eikä esineen pinnalle synny varjoja tai heijastuksia. (Hornberg 2006, 160, Leino 2014, 28)

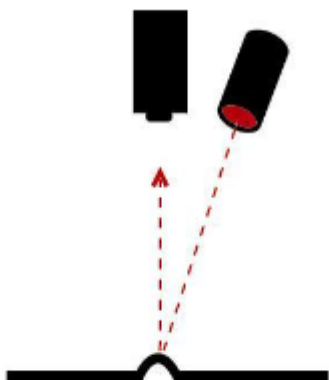
Aksiaalisessa diffuusivalaisussa (KUVA 8 oik.) valo ohjataan puoliläpäisevän peilin läpi kuvattavaan kohteeseen kohtisuorasti sen yläpuolelta. Tällä tavalla kohteeseen saadaan valoa tasaisesti ja heijastuksilta vältytään. (Leino 2014, 29, Advanced Illumination www-sivut 2015)



KUVA 8. Vasemmalla diffuusikupolivalaisin, Oikealla aksiaalinen diffuusivalaisin (National Instrumentswww-sivut 2010)

### 2.3.3 Kohtisuora valaisu

Kohtisuorassa (Bright Field) valaisussa (KUVA 9) valo suunnataan suoraan kohteeseen lähes samasta suunnasta kameran kanssa. Tällä tavalla saadaan aikaan suhteellisen hyvä yleisvalaistus, mutta ongelmaksi muodostuu usein kuvattavan kohteen kiiltävästä tai heijastavasta materiaalista johtuvat heijastukset, jotka estävät kohteen analysoinnin ns. peiliheijastuksen alueella. (Leino 2014, 26, Advanced Illumination www-sivut 2015)

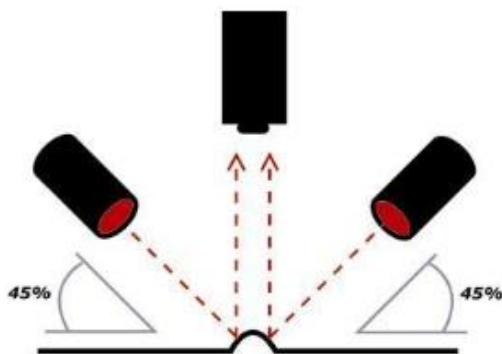


KUVA 9. Kohtisuora valaisu (National Instrumentswww-sivut 2010)



### 2.3.4 Sivuväläisy

Sivuväläisy (Dark Field, KUVA 10) toteutetaan siten, että valo suunnataan kohteen pinnalle joko lähes suoraan sivultapäin tai pienessä kulmassa. Tällä tavalla valo heijastuu tasaisilta pinnoilta poispäin kamerasta ja epätasaisista pinnan muodoista kameraan päin tuoden ne paremmin näkyville. (Leino 2014, 26, Advanced Illumination-[www-sivut 2015](#))



KUVA 10. Sivuväläisy (National Instruments [www-sivut 2010](#))

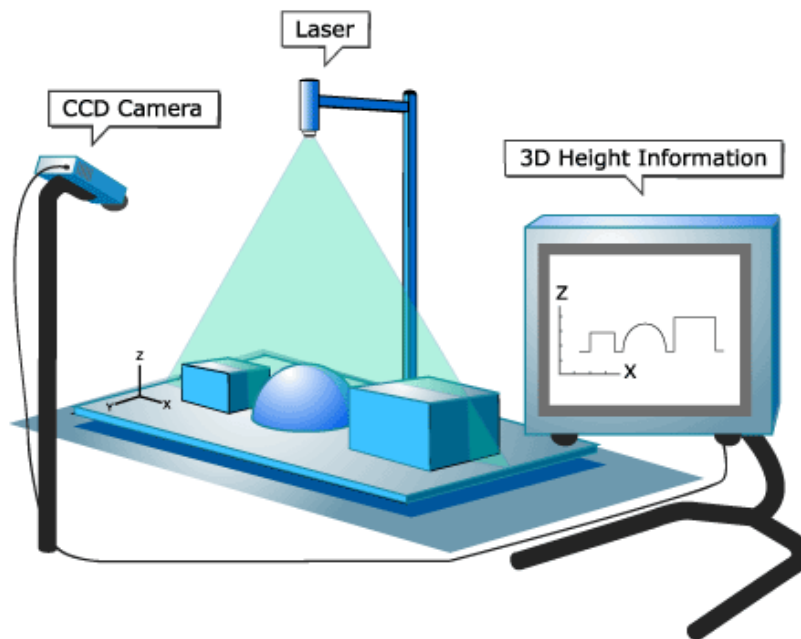
### 2.3.5 Strobovaläisy

Strobovaläisyä käytetään, kun kuvattavan kohteen liikkeestä aiheutuu häiriötä kuvan ottamiselle. Tämän tyyppisessä valaisussa valonlähteenä käytetään salamavaloa eli ns. stroboa, jolla saadaan aikaan hetkellinen kirkas valaisu kohteeseen. Kuvan valotus tapahtuu nopeasti eikä kohde ehdi juurikaan liikkua valotuksen aikana. Myös ympäristöstä tulevan valon merkitys kumotaan lähes kokonaan eikä sillä ole suurta vaikutusta kuvaan. (Leino 2014, 31)

### 2.3.6 Rakenteellinen valäisy

Rakenteellisessa valaisussa (Kuva 11) kuvattavaan kohteeseen heijastetaan tunnettu valokuviotunnetusta suunnasta. Kamera kuvaa esinettä ja siihen osoitettavaa valoa, lähettää kuvat tietokoneelle, joka muodostaa kuvista 2- tai 3-ulotteisen mallin. Rakenteelliseen valaisuun perustuvia menetelmiä ovat esimerkiksi Fringe, jossa kuvattavaan

kohteeseen heijastetaan videoprojektorilla sarja erilaisia mustavalkoisia geometrisia kuvioita tai viivaprojektio, jossa valonlähteenä käytetään laseria. (Coherent www-sivut 2015)



KUVA 11. Esimerkki rakenteellisesta valaisusta (Coherentwww-sivut 2015)

## 3 3D-KUVAUS

### 3.1 Yleistä

3D-kuvaus avaa uusia mahdollisuuksia niin yrityksille kuin yksityisillekin tahoille. Minuuttien sisällä kuvaamisesta käyttäjällä voi olla kolmiulotteinen malli lähes minikälaisestä esineestä tahansa. 3D-kuvauksella yritykset voivat esimerkiksi luoda CAD-malleja osista, joiden piirustukset ovat kadonneet, verrata valmistettuja osia 3D-malleihin tai jopa luoda tarkkoja kolmiulotteisia malleja kokonaisista rakennuksista. 3D-kuvausta voidaan käyttää myös teollisessa ympäristössä muun muassa tuotteiden koon, muodon ja tilavuuden mittaukseen. Tärkeimpiä 3D-kuvauksen sovelluksia ovat takaisinmallinnus (reverse engineering), tarkastus, ja digitaaliarkistointi (digital archiving) sekä 3D-tulostus. (3D Systems www-sivu 2015)

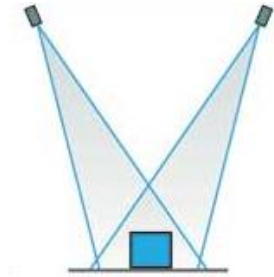
### 3.2 3D-kuvausmenetelmät

Kolmiulotteisen mallin aikaansaamiseksi on kuvaajan käytössä joukko erilaisia menetelmiä. Kuvattavan kohteen koko, materiaali ja etäisyys sekä 3D-mallin tarkkuusvaatimukset vaikuttavat siihen, mitä menetelmää on järkevää käyttää. Kuvattaessa kohdetta kolmiulotteiseksi tulisi kohteen pysyä paikallaan kuvan analysoinnin helpottamiseksi. Tunnettuja 3D-kuvausmenetelmiä ovat stereokuvaus, time of flight, depth from focus ja rakenteelliseen valaisuun perustuvat menetelmät kuten laserviivaprojektio, kinect ja fringe. (3D Systems www-sivu 2015, Vision Systems www-sivu 2013, Leino 2014, 39)

#### 3.2.1 Stereokuvaus

Stereokuvauksella pyritään matkimaan tapaa, jolla ihmisen silmät toimivat. Stereokuvauksessa kolmiulotteinen informaatio kerätään kahdella tai useammalla kameralla, jotka on sijoitettu vierekkäin samalle akselille (KUVA 12). Tästä johtuen kummankin kameran ottama kuva on hieman erilainen verrattuna toiseen johtuen eri kuvauspisteestä ja sitä kautta kuvakulmasta. Kun kuvat on otettu, etsitään molemmista kuvista

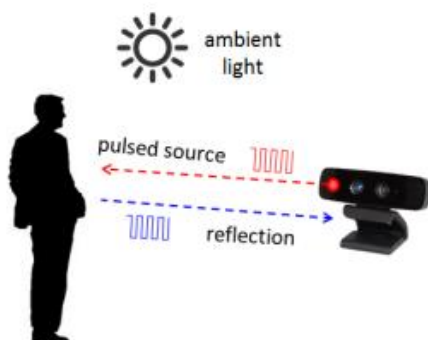
yhteiset pisteet, jotka näkyvät kummassakin kuvassa. Näitä pisteitä analysoidaan tietokoneohjelmalla, jolla suhteellinen syvyysinformaatio voidaan laskea ja esittää eroavaisuudet kartalla. Tästä saadaan aikaiseksi kohteen 3D-kuva. (3D Systems www-sivu 2015, Leino 2014, 39)



KUVA 12. Esimerkki stereokuvauksesta (Vision Systems www-sivu 2012)

### 3.2.2 Time of flight

Time of flight-menetelmä toimii siten, että kuvattavaa kohdetta valaistetaan valon lähteellä ja tarkkaillaan kuinka kauan valon säteillä kestää heijastua kohteen pinnalta kamerasen kennolle (KUVA 13). Kun tiedetään tarkalleen valopulssin lähtöaika ja heijastuksen paluuaika saadaan niiden vaihe-erosta laskettua heijastuneiden valonsäteiden etäisyyksiä ja näin muodostetaan kolmiulotteinen kuva. Tyypillisesti valonlähteenä käytetään ihmisilmälle näkymätöntä lähi-infrapuna valoa, jonka aallonpituus on noin 850nm. Kameran kenno on suunniteltu reagoimaan valonlähteen aallonpituuteen, mistä johtuen ympäristön valolla ei ole suurta merkitystä, sillä syvyysinformaatio on vain heijastuvassa valossa. Tämä tekniikka on vielä suhteellisen uutta, mistä johtuen se on myös todella kallis verrattuna muihin 3D-kuvausmenetelmiin. (Texas Instruments 2014, Leino 2014, 41)



KUVA 13. Time of flight (Texas Instruments 2014)

### 3.2.3 Depth from focus

Depth from focus 3D-kuvausmenetelmässä kameralla otetaan useita kuvia kohteesta eri terävyysalueilla (focal length), jonka jälkeen tietokoneohjelma arvioi kuvassa olevien pikselien tarkkuuksia ja luo niiden avulla niin sanotun syvyyskartan (KUVA 14). Kuvattavan kohteen tulee olla paikallaan ja siinä tulee olla erilaisia pinnan muotoja, jotta tämä menetelmä toimisi. Valmiista 3D-mallista tulee sitä tarkempi mitä useampi kuva otetaan eriasteisilla tarkennuksilla, tarkennus voidaan suorittaa esimerkiksi motorisoidulla linssillä tai siirtämällä kameraa manuaalisesti lähemmäs tai kauemmas kohteesta. (3ders www-sivu 2013, PetaPixel www-sivu 2013, Leino 2014, 41)



KUVA 14. Depth from focus (PetaPixel www-sivu 2013)

### 3.2.4 Kinect

Kinect on Microsoftin markkinoille tuoma alun perin pelaamiseen tarkoitettu laite, joka tunnistaa sen edessä seisovan henkilön liikkeen ja ohjaa sen perusteella peliä. Laite koostuu RGB-kamerasta ja syvyyden tunnistuksesta. Laitteen syvyyden tunnistus koostuu infrapunaserprojektorista, joka luo eteensä pistepilven, jota kolmiulotteisen datan kaappaamiseen käytetään ja infrapunavaloa vastaanottavasta kennosta, joka pystyy kaappaamaan kolmiulotteista liikettä ympäristön valaisusta riippumatta. Microsoft tarjoaa yksityisille kehittäjille ohjelmiston kehityspakettia (software deve-

lopment kit, SDK), jotta he voisivat luoda ohjelmia ja sovelluksia hyödyntäen Kinect:in teknologiaa. Vuonna 2010 PrimeSense, jonka syvydentunnistusteknologiaan Kinect perustuu, julkaisi avoimesti omat lähdekoodinsa yleiseen käyttöön. (Seattlepi www-sivu 2009, Engadget www-sivu 2010, Vision Systems www-sivu 2012)

### 3.2.5 Laserviivaprojektio

Laserviivaprojektioon rakenteelliseen valaisuun perustuva 3D-kuvausmenetelmä, joka käyttää yhtä kameraa ja viivamaista laservalonlähdettä. Järjestelmän laser ja kamera voivat olla erillisinä (KUVA 15 vas.) tai samaan laitteeseen integroituna (KUVA 15 oik.). Kuvattavasta kohteesta riippuen laser ja kamera voivat kuvata esimerkiksi liukuhihnalla ohimeneviä esineitä tai kuvattava esine voi olla paikallaan, jolloin esinettä ja laseria kuvaavaa kameraa liikutetaan esineen yli hitaasti ja tasaista vauhtia ylhäältä alas. Kamera kuvaa kohdetta seuraamalla laserviivaa jaksen muodon vaihteluita. Tietokoneohjelma tulkitsee viivan pistejonona, jolla on äärellinen leveys. Se tutkii viivan muodon vaihteluita esineen pinnalla ja muuttaa saamansa datan 3D-kuvaksi. (Vision Systems www-sivu 2013)

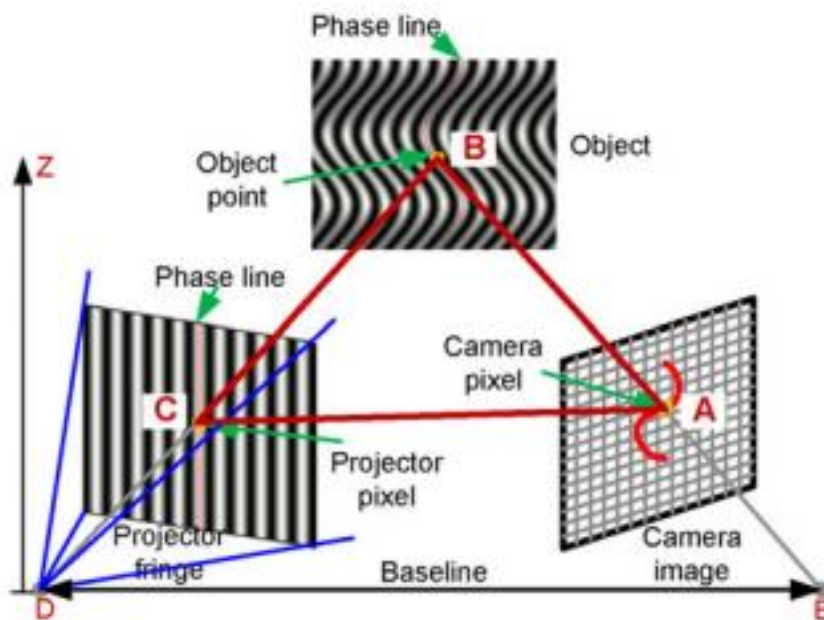


KUVA 15. Vasemmalla viivalaserskannaus, jossa laseria liikutetaan kädellä (David Vision Systems www-sivu 2014), oikealla viivalaser ja kamera integroituna (Vision Systems 2013)

### 3.2.6 Fringe

Fringe on rakenteelliseen valaisuun perustuva 3D-kuvausmenetelmä, jossa kuvattavan kohteen päälle heijastetaan videoprojektorilla erilaisia suorista viivoista ja palkeista

koostuvia mustavalkoisia niin kutsuttuja fringe-kuvioita. Mikäli 3D-mallista halutaan värillinen, valaisee projektori vielä lopuksi kohteen punaisella, vihreällä ja sinisellä valolla. Jo yhdellä fringe-kuviolla saadaan aikaan yksinkertainen kolmiulotteinen malli, mutta kuvattaessa kohteita, joissa on paljon yksityiskohtia, tarvitaan enemmän fringe-kuvia. Mitä enemmän kuvia sitä tarkempi 3D-malli saadaan luotua tietokoneella. Projektorin vieressä oleva kamera ottaa kuvan jokaisen kuvion kohdalla. Tietokoneohjelma analysoi kuvat käyttämällä kolmiomittausta ja vertaamalla kalibroitu- jen pisteiden vastaavuutta kuvattavan kohteen päälle heijastetun fringe-kuvion muutuneisiin muotoihin. Ohjelma tunnistaa fringe-kuviossa esiintyvät "häiriöt", jotka johtuvat kuvattavan kohteen pinnanmuodoista sekä yksityiskohdista ja muodostaa niiden perusteella 3D-mallin (KUVA 16).



KUVA 16. Tyypillinen fringe-järjestelmä (Karpinsky & Zhang 2010)

Jos yksi fringe-kuvio on riittävä suorittamaan kolmiulotteisen muodon mittaamisen, voi 3D-kuvantaminen silloin olla yhtä nopeaa kuin kuvan kaappaaminen. Tämä on optimaalisin tilanne reaaliaikaiselle 3D-kuvantamiselle, koska 3D-rekonstruktio voi vastata kameran kuvausnopeutta.

Menetelmää, jossa käytetään yhtä fringe-kuviota, kutsutaan Fourier- metodiksi. Tyypillinen fringe-kuvio voidaan kirjoittaa muotoon

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)].$$

Tässä  $I'(x, y)$  on joko intensiteetin keskiarvo tai tasavirtakomponentti,  $I''(x, y)$  on intensiteettimodulointia ja  $\phi(x, y)$  on vaihe, joka ratkaistaan.

Edellinen yhtälö voidaan kirjoittaa uudelleen muotoon

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)[e^{j\phi(x, y)} + e^{-j\phi(x, y)}].$$

Tässä yhtälössä,  $e^{-j\phi(x, y)}$  on  $e^{j\phi(x, y)}$ :n konjugaatti. Jos sovelletaan Fourier-muunnosta ja tasavirta- sekä konjugaatti-komponentit suodatetaan, saadaan palautettu signaali käänteisellä Fourier muunnoksella muotoon

$$\tilde{I}(x, y) = I''(x, y) e^{j\phi(x, y)} / 2.$$

Tästä kolmannelta yhtälöstä saadaan vaihe,  $\phi(x, y)$ , ratkaistua seuraavasti

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[\tilde{I}(x, y)]}{\text{Re}[\tilde{I}(x, y)]} \right\}.$$

Vaihekarttaa kutsutaan myös kääriytyksi vaihekartaksi (wrapped phase map). Jotta saadaan esille jatkuva vaihekartta, täytyy suorittaa vielä yksi toimenpide, jota kutsutaan avaamiseksi (unwrapping). 3D-koordinaatit saadaan rekonstruoitua käyttämällä avattua vaihetta olettaen, että järjestelmä on oikein kalibroitu. Prosessi monimutkaistuu ja hidastuu mitä enemmän fringe-kuvioita käytetään, mutta sen ansiosta saadaan tarkempia 3D-malleja. (Karpinsky & Zhang 2010)



## 4 FRINGEEN PERUSTUVAN 3D-KUVAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA KOKOONPANO

### 4.1 DAVID3

DAVID3 on rakenteelliseen valaisuun perustuva 3D-kuvaus ohjelma, jonka käyttöä helpottamaan kyseinen järjestelmä suunnitellaan. Ohjelmasta löytyy toiminnot järjestelmän kalibrointiin, kuvien ottamiseen sekä skannausten kohdistamiseen, että skannausten yhdeksi kolmiulotteiseksi kuvaksi yhdistämiseen. Ohjelma on yksinkertainen käyttää ja skannausten laatu on hyvä.

### 4.2 Järjestelmän suunnittelu ja kokoonpano

Fringe-kuvausta varten suunniteltiin modulaarinen järjestelmä, joka tarkoituksena on helpottaa esineiden 3D-kuvaamista ja nopeuttaa järjestelmän kuvauskuntoon laittamista. Järjestelmään kuuluu kolmijalkaan kiinnitettävä teline kameraa ja projektorilla varten sekä kuvattavaa esinettä automaattisesti jokaisen skannauksen jälkeen pyörittävä kääntöpöytä. Tällä tavalla saadaan DAVID3-ohjelmalle ilmoitettua jokaisen erillisen skannauksen välinen asteluku ja näin helpotetaan erillisten skannausten yhteen liittämistä kokonaisen 3D-mallin aikaansaamiseksi.

### 4.3 Telineen suunnittelu kameralle ja projektorille

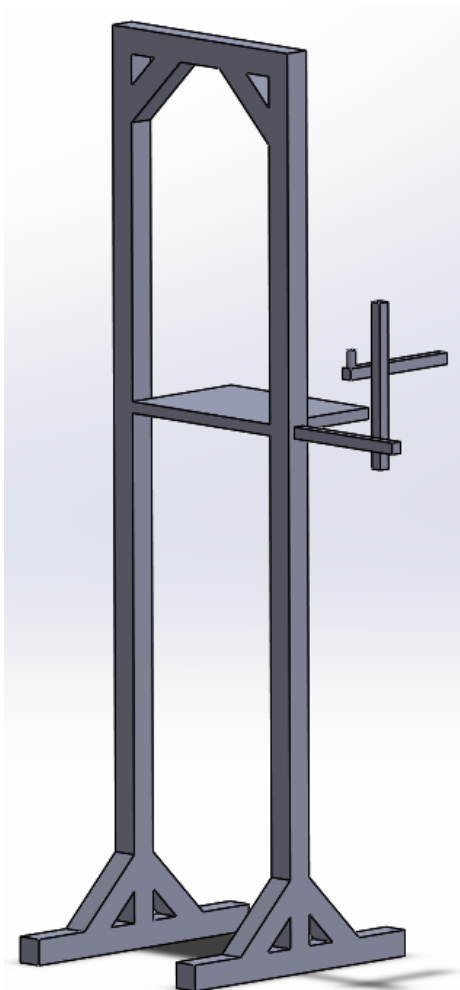
3D-kuvauksia tehdessä on ehdottoman tärkeää, etteivät kamera ja projektori pääse liikumaan laitteiston kalibroinnin jälkeen. Mikäli näin tapahtuu ei erillisiä skannauksia voida liittää toisiinsa ja kalibrointi sekä kuvien ottaminen joudutaan aloittamaan alusta. Tämä oli ensimmäinen vaatimus, minkä pohjalta telineen suunnittelu alkoi.

#### 4.3.1 Ensimmäinen luonnos

Kuvassa 17 on telineen ensimmäinen luonnos, joka oli malliltaan pystyssä omilla jaloillaan seisova noin 150cm korkea kehikko, jossa oli korkeussuunnassa liikuteltava

taso projektorin varten sekä kameraa varten projektoritason vieressä oleva pidike. Kamerapidike pystyy liikkumaan korkeus- ja syvyysuunnissa mahdollistaen järjestelmän tarkemman kalibroinnin kuvaustilannetta varten. Materiaaliksi telineelle oli suunniteltu 45mm x 45mm kokoista alumiiniprofiilia, joka on kestävä ja suhteellisen kevyt valinta.

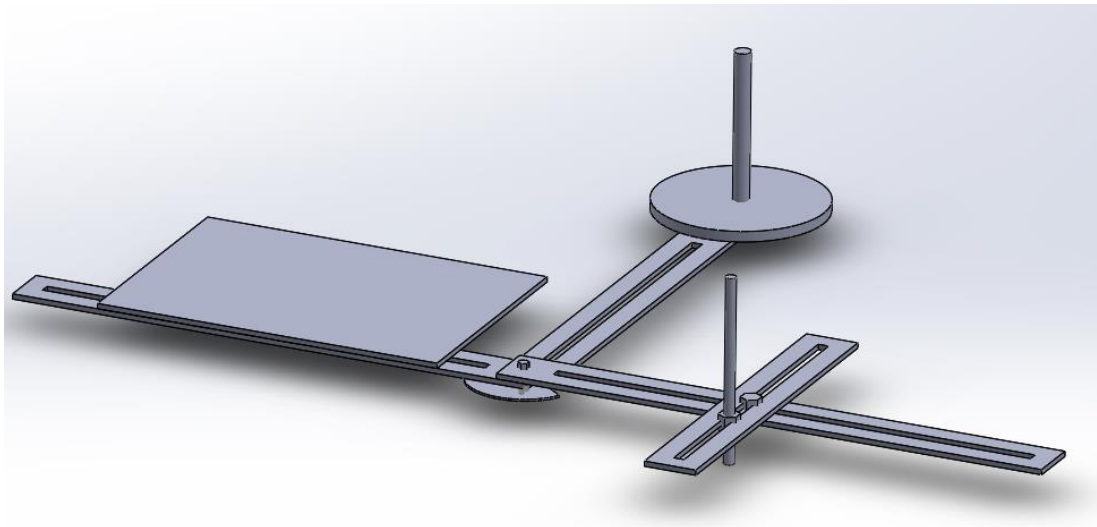
Tämä ensimmäinen luonnos todettiin kuitenkin kokonsa puolesta liian suureksi ja hankalasti liikuteltavaksi, myös projektorin vähäinen säätömahdollisuus olisi voinut koki-  
tua haitaksi erikoisempia kohteita kuvattaessa.



KUVA 17. Ensimmäinen luonnos telineestä kameralle ja projektorille

#### 4.3.2 Toinen luonnos

Kuvassa 18 on telineen toinen luonnos, joka on suunniteltu huomattavasti helpommin liikuteltavaksi. Tämä telineen versio on tarkoitettu kiinnittämään lukittavalla saranalla kolmijalkaan, joka helpottaisi telineen liikuttamista kuvauspaikalle. Tässä luonnoksessa on liikuteltavien projektoritason ja kamerapidikkeen lisäksi telineen takaosassa paikka vastapainoille, jotta telinettä on mahdollista siirtää lähemmäs kuvattavaa kohdetta, mikäli kolmijalan siirtäminen kuvauspaikalla ei ole mahdollista.



KUVA 18. Toinen luonnos telineestä kameralle ja projektorille

Materiaaliksi telineelle suunniteltiin 5mm paksu ja 50mm leveä lattarauta, mutta sen keskelle koneistetun uran takia rakennelma olisi todennäköisesti joutunut liiallisen rasituksen alaiseksi ja tämän johdosta vääntynyt käytön yhteydessä. Lisäksi materiaalin paino olisi tehnyt telineestä liian raskaan, mikä olisi edesauttanut telineen mahdollista vääntymistä. Lisäksi, mikäli telinettä olisi kallistettu niin, että kamera ja projektori olisivat osoittaneet maata kohti, ei horisontaaliselle säädölle ollut mahdollisuutta.

### 4.3.3 Valmis teline



KUVA 19. Valmis teline asennettuna kolmijalkaan

Kuvassa 19 teline on lopullisessa muodossaan ja asennettuna kolmijalan päälle. Lopulliseen telineeseen valittiin materiaaleiksi 2kpl 45mm x 45mm x 1000mm alumiiniprofiilia, joka on keveytensä ja kestävyytensä puolesta hyvä materiaali käyttötarkoitukseen. Projektorialusta on helposti säädeltävissä vaakasuunnassa. Se on valmistettu vanerista ja on kiinnitetty alumiiniprofiilissa olevaan uraan pulteilla ja profiilimutteilla. Tämä mahdollistaa alustan helpon säätämisen. Kamerapidike on valmistettu kahdesta 30mm x 30mm x 400mm kokoisesta alumiiniprofiilista sekä pallonivelestä, jolla mahdollistetaan kameran parempi suuntaus järjestelmää kalibroitaessa. Kamera ja projektori on kiinnitetty alumiiniprofiiliin, jonka asentoa voidaan säätää saranan avulla. Tämä mahdollistaa kameran ja projektorin säätämisen vaakasuunnassa, jolloin voidaan kuvata myös suoraan kuvattavan kohteen yläpuolelta. Tukivarsi on niin ikään kiinnitetty kolmijalkaan säädettävällä saranalla, jonka ansiosta kuvauskorkeutta voidaan säätää.

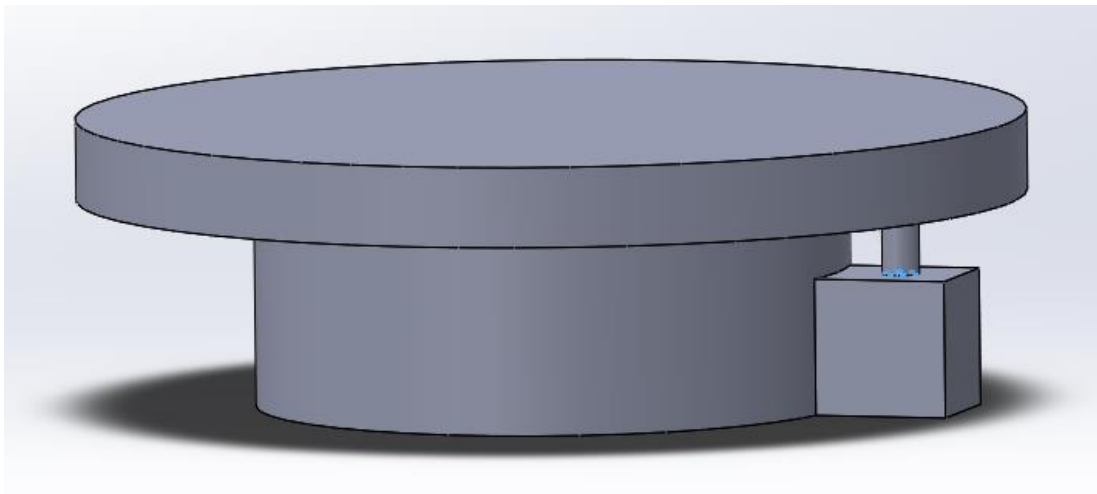
### 4.4 Kääntöpöydän suunnittelu

Kuvaustapahtumaa helpottamaan suunniteltiin myös automatisoitu kääntöpöytä, joka kääntää kuvattavaa kohdetta akselinsa ympäri. Tällä tavalla kuvattavaan kohteeseen ei

tarvitse koskea kuvauksen aikana ja välttyään järjestelmän mahdolliselta uudelleen kalibroinnilta.

#### 4.4.1 Kääntöpöydän luonnos

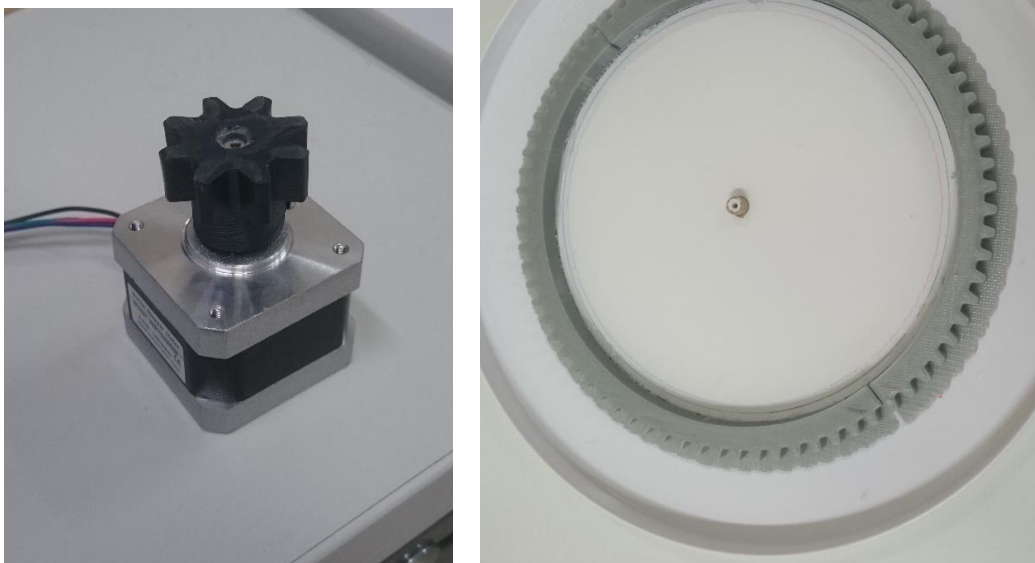
Kuvassa 20 on luonnosteltu kääntöpöytä, joka pyörittää kuvattavia esineitä. Kääntöpöytää ohjataan Arduino UNO:lla ja se on liitetty tietokoneeseen USB-kaapelilla. DAVID3-ohjelmasta laitetaan skannaus päälle ja ensimmäisen skannauksen jälkeen DAVID3 lähettää tiedon skannauksen päättymisestä Arduinolle, joka ohjaa askelmoottorin päälle. Askelmoottori pyörittää kääntöpöytää eteenpäin, minkä jälkeen Arduino käskää DAVID3:a aloittamaan seuraavan skannauksen. Skannausten lukumäärä ilmoitetaan Arduinolle, joka skannausten päätyttyä käskää DAVID3:n lopettamaan skannaukset.



KUVA 20. Luonnos kääntöpöydästä

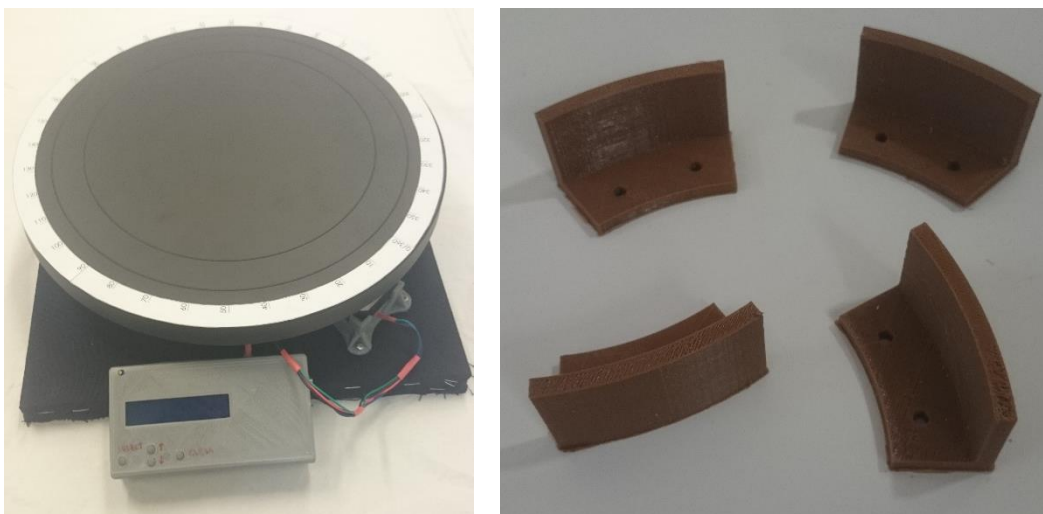
#### 4.4.2 Valmis kääntöpöytä

Kääntöpöydäksi valittiin pyörivä kakkualusta, jonka halkaisija on 31cm ja korkeus 5cm. Alustaa pyörittäväksi askelmoottoriksi valittiin Wantai:n Stepper Motor 42BYGHW208 sen pienen koon vuoksi. Sekä alustaa että askelmoottoria varten tulostettiin 3D-tulostimella hammasrattaat, joiden avulla voimansiirto saatiin toteutettua (KUVA 21).



KUVA 21. Moottoria ja alusta varten 3D-tulostetut rattaat

Askelmoottoria ja DAVID3:a ohjaamaan valittiin Arduino UNO, johon lisättiin näppäimistöllinen LCD keypad shield -näyttö. Näytöltä valitaan kuinka monen asteen välein halutaan kuvattavasta esineestä ottaa kuva. Tämän jälkeen laitetaan DAVID3:sta skannaus päälle ja järjestelmä ottaa tarvittavat kuvat, jotka voidaan kuvaustapahtuman jälkeen liittää toisiinsa 3D-mallin aikaansaamiseksi. Alustan kiinnitystä varten tulostettiin 3D-tulostimella 4 kappaletta ohjureita, jotka lukitsevat alustan paikoilleen (KUVA 22).



KUVA 22. Vasemmalla valmis kääntöpöytä. Oikealla 3D-tulostetut ohjurit.

## 5 JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖ

Tässä kappaleessa on kirjoitettu ohjeet 3D-kuvausjärjestelmän kokoamista ja käyttöä varten.

### 5.1 Telineen kameran ja projektorin valmistelu

Ennen 3D-kuvauksen aloittamista kootaan teline kolmijalan päälle ja kiinnitetään siihen sekä kamera, että projektori.

#### 5.1.1 Teline

Aloita kiinnittämällä tukivarren saranan toinen puoli kolmijalkaan (KUVA 23). Tämän jälkeen kiinnitä tukivarsi kolmijalassa kiinni olevaan saranaan (KUVA 24).

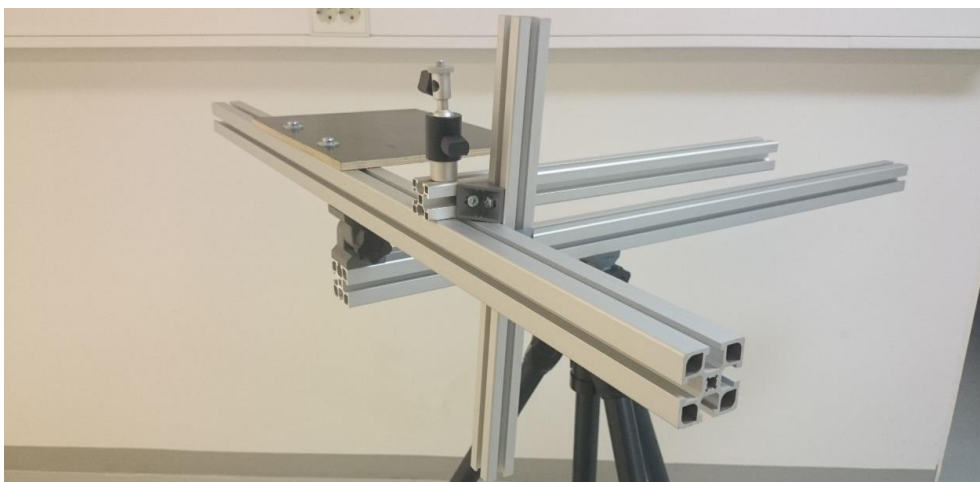
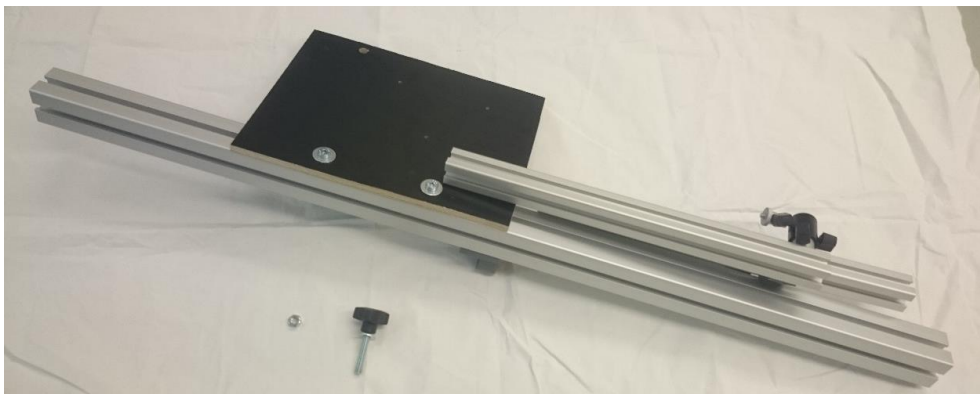


KUVA 23. Tukivarren saranan toinen puolisko kiinnitettynä kolmijalkaan



KUVA 24. Tukivarsi kiinnitettyä kolmijalkaan

Seuraavaksi kiinnitä tukivarren päällä olevaan saranaan kameraa ja projektorin varten horisontaalinen tukivarsi (KUVA 25). Saranoita säätämällä voidaan järjestelmä säätää oikealle korkeudelle ja kuvaamaan halutusta kulmasta.





KUVA 25. Ylhäällä horisontaalinen tukivarsi. Alla horisontaalinen tukivarsi kiinnitettyä tukivarren päähän

### 5.1.2 Kamera

Valitse sopiva objektiivi kuvattavan esineen koon mukaan, kiinnitä kamera tukivarressa olevaan palloniveleen ja suuntaa kamera kuvattavaa kohdetta päin (KUVA 26). Lopuksi kytke kamera tietokoneeseen siihen tarkoitettulla USB-johdolla.



KUVA 26. Kamera kiinnitettyä telineessä olevaan palloniveleen

### 5.1.3 Projektori

Kiinnitä projektori kolmella ruuvilla telineeseen sille tarkoitettuun alustaan (KUVA 27). Varo kiristämästä ruuveja liian tiukalle, sillä tämä voi vahingoittaa projektorin kotelo. Kytke projektoriin virta ja liitä projektori tietokoneeseen HDMI- tai VGA-johdolla. Seuraavaksi varmista, että tietokoneen asetuksissa on oikeat asetukset koskien useita näyttöjä. Tämä tapahtuu klikkaamalla tietokoneen työpöytä hiiren oikealla

painikkeella ja valitsemalla esiin tulevasta valikosta ”Näytön asetukset” / ”Display settings”. Avautuvasta ikkunasta löytyy kohta ”Useat näytöt” / ”Multiple displays” johon valitaan ”Jatkettu” / ”Extended”.



KUVA 27. Projektori kiinnitettyä alustaan

## 5.2 Kääntöpöytä ja DAVID3-ohjelma

### 5.2.1 Kääntöpöytä

Asettele musta kangas 90 asteen kulmaan siten, että se peittää pöydän ja sen takana olevan seinän (KUVA 28). Tämä auttaa kuvattavaa esinettä tulemaan näkyviin eikä esineen takana oleva seinä tai muut esineet tule skannaukseen mukaan.



KUVA 28. Kangas aseteltuna pöydälle ja seinää vasten

Aseta kääntöpöytä pöydälle kankaan päälle, kytke virta ohjainlaatikkoon ja yhdistä arduino tietokoneeseen siihen tarkoitettulla USB-johdolla (KUVA 29).

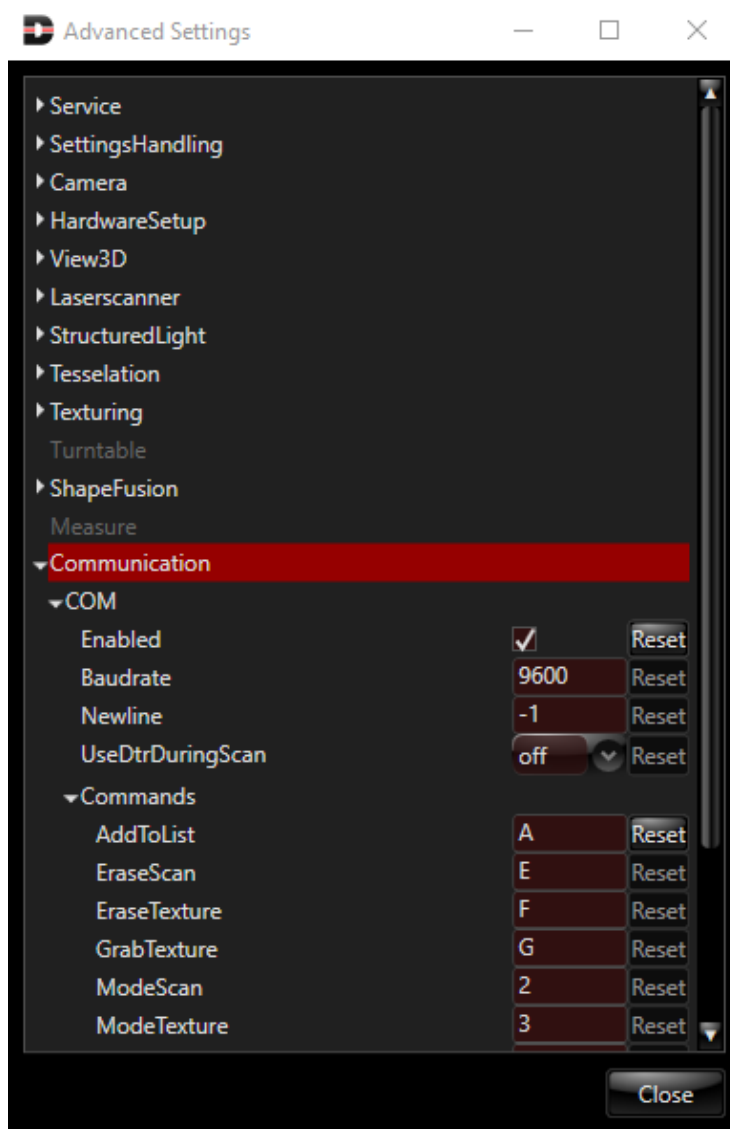


KUVA 29. Ohjainlaatikko ja siihen kuuluvat johdot

### 5.2.2 DAVID3-ohjelma

Kun kääntöpöytä, kamera ja projektori on kytketty tietokoneeseen voidaan DAVID3-ohjelma käynnistää ja järjestelmän kalibrointi alottaa.

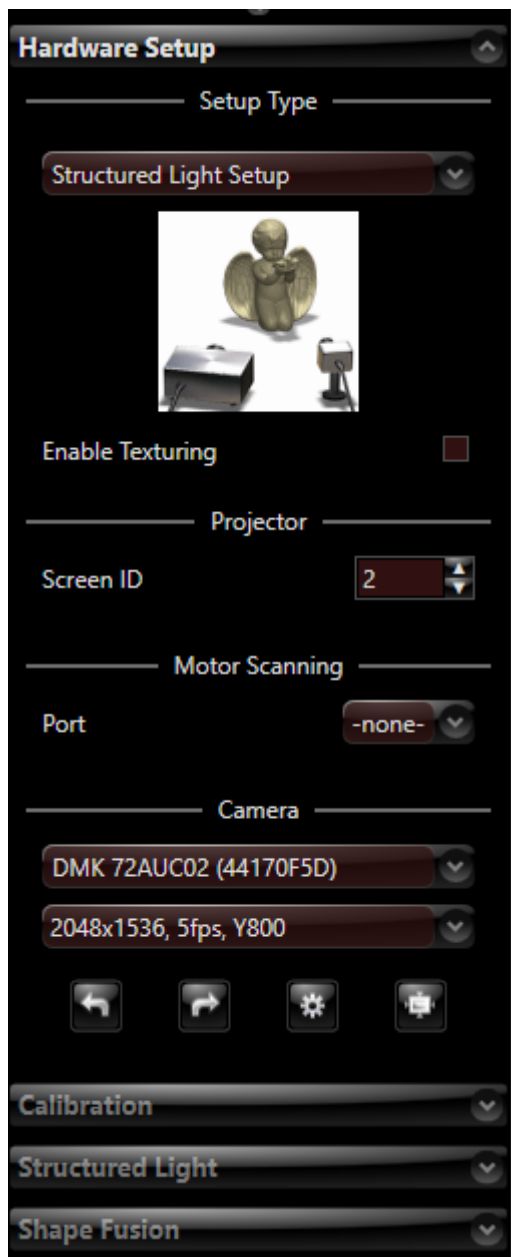
Ensin varmistetaan, että kääntöpöydän käyttöön tarvittava sarjaportti on auki ja, että asetuksista löytyvä ”AddToList” on asetettu ”A” kirjaimeksi (KUVA30). Tämä tapahtuu painamalla oikeasta yläkulmasta löytyvää rattaan kuvaa ja valitsemalla ”Advanced Settings”. Avautuvasta ikkunasta avataan seuraavat osiot tässä järjestyksessä ”Communication” -> ”COM” -> ”Commands”. ”COM” osiosta valitaan ”Enabled” ja varmistetaan että ”Baudrate” on asetettu 9600. ”Commands” osiosta määritetään ”AddToList” toiminnolle ”A” kirjain. Tämän jälkeen voidaan ”Advanced Settings”- ikkuna sulkea.



KUVA 30. DAVID3-ohjelman asetukset

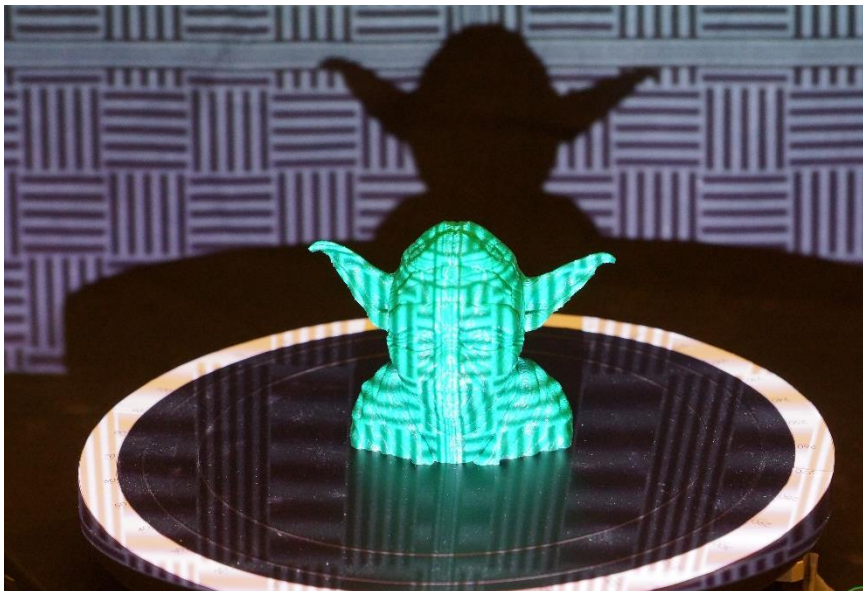
Käynnistä projektori ja valitse DAVID3-ohjelmasta vasemmasta reunasta ”Hardware Setup”. ”Setup Type” kohdasta valitaan ”Structured Light Setup”. Jos 3D-malliin halutaan kuvattavan esineen väri mukaan, aktivoidaan ”Enable Texturing”. ”Projector”

kohdasta valitaan ”Screen ID” kohdasta ”2”, jolloin projektori heijastaa fringe-kuvioita. Kääntöpöydän käyttöön tarvittava USB-portti valitaan ”Motor Scanning”kohdassa. COM-portin numero riippuu siitä, missä tietokoneen USB-portissa arduino on kiinni. Tässä esimerkissä portiksi valitaan COM4. Käytettävä kamera ja sen haluttu resoluutio valitaan ”Camera” kohdasta (KUVA 31). Mikäli kameraa ei löydy alasveivalikosta, tarkoittaa se todennäköisesti sitä, että kameran ajurit ovat vanhentuneet tai niitä ei ole, tällöin ne on ladattava ja asennettava tietokoneelle kameran valmistajan sivuilta.



KUVA 31. Hardware setup

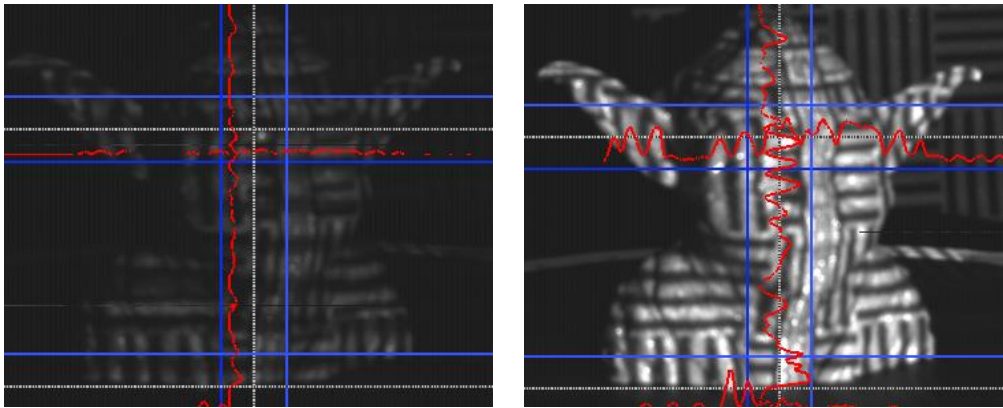
Seuraavaksi säädetään kameran valotusaika sopivaksi, skannaaminen tulisi suorittaa pimeässä tai hyvin hämärässä tilassa parhaan tuloksen saavuttamiseksi. Aloita asettamalla kuvattava esine (KUVA 32) kääntöpöydän päälle ja suuntaamalla projektori esinettä kohden siten, että fringe-kuvio peittää tarvittavan kokoisen alueen.



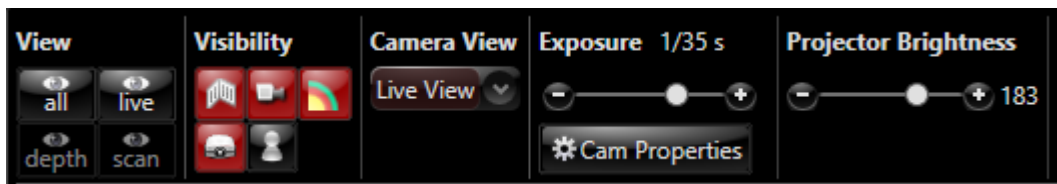
KUVA 32. Projektori suunnattuna kuvattavaan esineeseen.

Tämän jälkeen tarkennetaan fringe-kuvio käyttämällä projektorissa olevaa tarkennusrenkasta. Tarvittaessa siirrä kameraa siten, että kamera näkee hieman suuremman alueen kuin mitä kuvattavan kohteen koko on. Tässä yhteydessä on myös viisasta tarkentaa kuva, mikäli se on epätarkka. Tämä tapahtuu manuaalisesti kameran tarkennusrenkasta kääntämällä.

Seuraavaksi säädetään valotusaika käyttämällä ikkunan yläreunassa olevaa ”Exposure” kohdan ”+” ja ”-” -painikkeita tai manuaalisesti kamerasta kääntämällä sulkimen kokoa säätelevää rengasta. Tarkoituksena on saada kuvassa näkyvä sinisten viivojen välissä oleva punainen käyrä mahdollisimman suureksi kuitenkin siten, ettei se koske sinisiin viivoihin (KUVA 33).



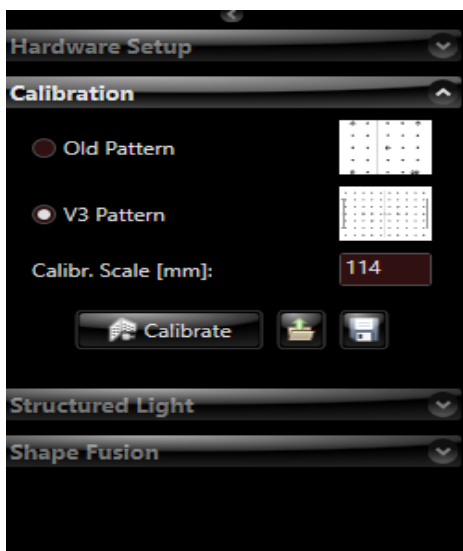
KUVA 33. Vasemmalla valotusaika on liian lyhyt. Oikealla valotusaika on sopiva. Tätä voi myös yrittää hienosäätää muuttamalla projektorin kirkkautta ikkunan yläreunasta löytyvästä työkalupalkin kohdasta ”Projector Brightness” (KUVA 34).



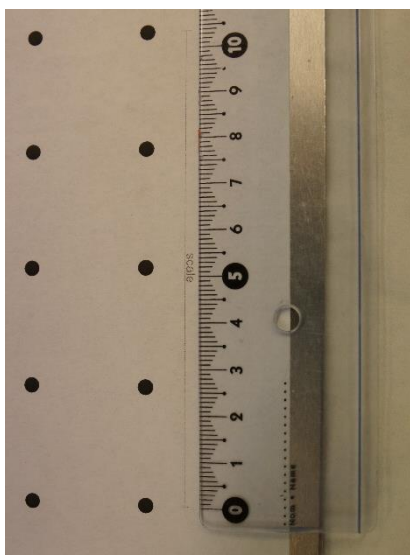
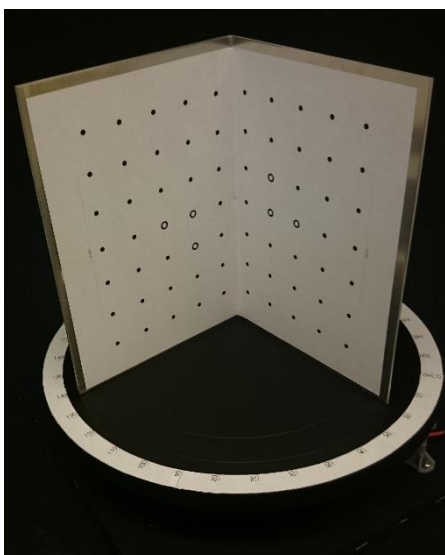
KUVA 34. Työkalupalkki

### 5.2.3 Kalibrointi

Aseta kalibrointilevy kuvattavan esineen paikalle ja varmista, että kamera näkee kalibrointilevyssä olevat kuusi onttoa palloa. Tämä vaaditaan kalibroinnin onnistumiseen. Mikäli kameran tarkennus ja projektorin kirkkaus on tehty pimeässä ja kuvattava kohde on tumma, näkyy tällöin kalibrointilevy ylivalottuneena. Säädä valotusaika kalibrointilevyyn sopivaksi samalla tavalla kuin aikaisemminkin. Kun valotusaika on säädetty sopivaksi, siirrytään vasemmassa reunasta löytyvään ”Calibration”-välilehteen (KUVA 35). Kalibrointikuvioksi valitaan uudempi ”V3 Pattern” ja kalibrointilevyn skaala ”Calibr. Scale [mm]” mitataan kalibrointilevyn reunassa olevasta janasta (KUVA 36).



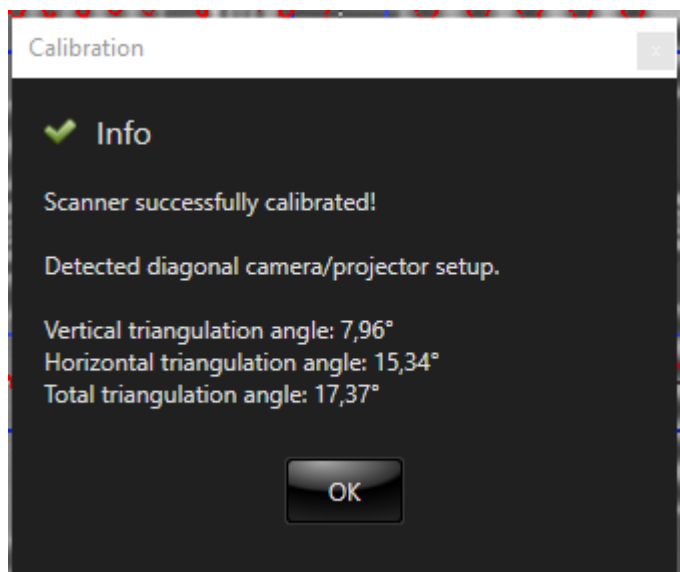
KUVA 35. Kalibrointi-välilehti



KUVA 36. Vasemmalla kalibrointilevy kääntöpöydän päällä. Oikealla kalibrointilevyn sivusta löytyvä skaala

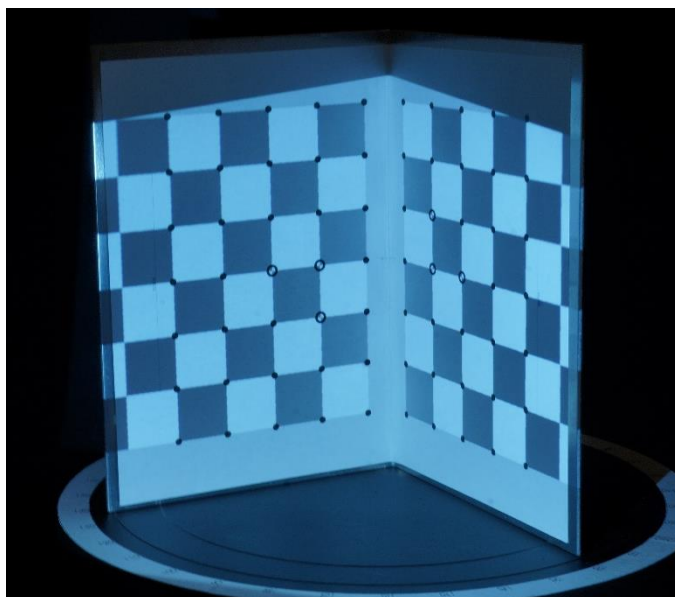
Tässä tapauksessa janan pituus on 114mm. Tämä luku syötetään kenttään ja painetaan ”Calibrate” -painiketta. Ohjelma kalibroi järjestelmän heijastamalla fringe-kuvioita kalibrointi levylle. Kun kalibrointi on päättynyt ilmoittaa DAVID3 kalibroinnin onnistumisesta tai tarvittavista muutoksista (KUVA 37).





KUVA 37. Onnistunut kalibrointi

Projektorin heijastama lopuksi mustavalkoisen ruudukon kalibrointilevyn pisteiden väliin mustien neliöiden kärkien tulisi olla mustien pisteiden keskellä (KUVA 38).

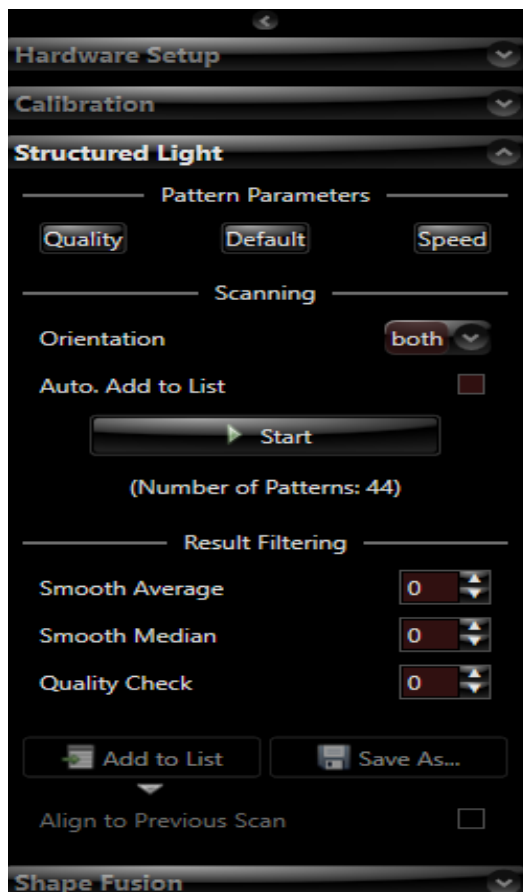


KUVA 38. Projektorin heijastama kuvaonnistuneen kalibroinnin jälkeen

Kun kalibrointi on suoritettu, vaihdetaan kalibrointilevy kuvattavaan esineeseen ja säädetään kameran valotusaika uudelleen kuvattavalle esineelle sopivaksi.

### 5.3 Skannaus

Siirry DAVID3-ohjelmassa vasemmalta löytyvään ”Structured Light” välilehteen (KUVA 39). Kohdasta ”Pattern Parameters” valitaan heijastettavien fringe-kuvien määrä sen mukaan, halutaanko skannauksesta hyvälaatuinen, nopea vai siltä väliltä, Tässä esimerkissä valitsemme vaihtoehdon ”Default”, jossa on 44 fringe-kuviota. ”Scanning” osion ”Orientation” -kohdasta valitaan, ovatko fringe-kuviot pystysuunnassa, vaakasuunnassa vai kumpaankin suuntaan, tämä vaikuttaa myös kuvioiden määrään ja sitä kautta skannausnopeuteen ja -laatuun. Kohta ”Auto. Grab Texture” valitaan jos halutaan tehdä värillinen skannaus ja ”Auto. Add to List” jätetään valitsematta, sillä kääntöpöydän ohjelma lisää skannaukset skannauslistaan automaattisesti.



KUVA 39. Structured Light -välilehti

Valitaan kääntöpöydän ohjainkotelosta, kuinka monen asteen välein skannaus halutaan suorittaa. Valinta tapahtuu kahdella kotelon keskimmaisella painikkeella (KUVA 40). Sopivan vaihtoehdon löydyttyä painetaan vasemmanpuoleista painiketta, jolloin

LCD-näyttöön tulee teksti ”Selected Opt X”. Ennen skannausta valitaan vielä sivun oikean reunan ”Working Directory” -kohdasta kuville oikea tallennuskansio. Tämän jälkeen painetaan ”Structured Light” -välilehden ”Scanning” -osiosta ”Start”-painiketta, minkä jälkeen skannauksen tulisi alkaa. Skannauksen päätyttyä resetoidaan kääntöpöytä sen ohjauskotelon oikeanpuoleisimmasta painikkeesta.



KUVA 40. Ohjauskotelo

### 5.3.1 Skannausten yhdistäminen

Skannausten yhdistäminen yhdeksi kolmeulotteiseksi kuvaksi tapahtuu ”Shape Fusion” välilehdellä, joka löytyy sivun vasemmasta reunasta. Tämä avaa näkyviin kaikki erilliset skannaukset sekä työkalupalkin sivun yläreunaan (KUVA 41).



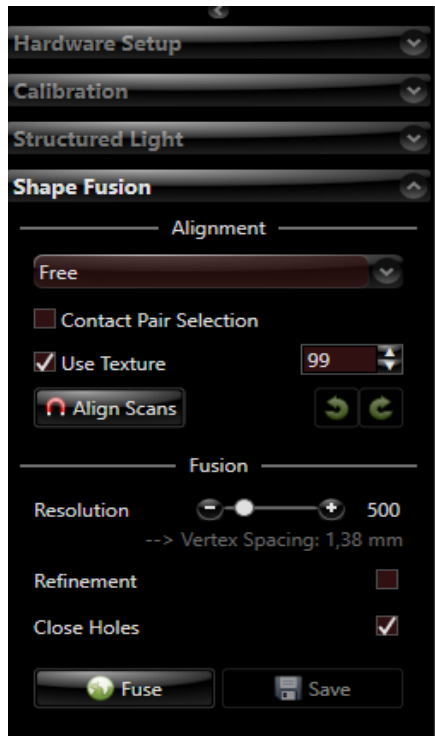
KUVA 41. Työkalupalkkikuvien yhdistämistä varten

Skannaukset saattavat sisältää ylimääräisiä osia esimerkiksi taustasta. Aloitetaan poistamalla suurin osa näistä. Työkalupalkista löytyy osio ”Cleaning”, josta valitaan ”Se-

lection of triangles by mouse”, jonka alavetovalikosta valitaan ”Connected Components Selection”. Tällä työkalulla vedetään laatikko poistettavien osien ympärille, jolloin ohjelma maalaa poistettavat osat punaisella. Mikäli valinta hyväksytään eikä skannauksen osia ole valittuna, painetaan ”Clean” -osiosta löytyvää punaista rastia.

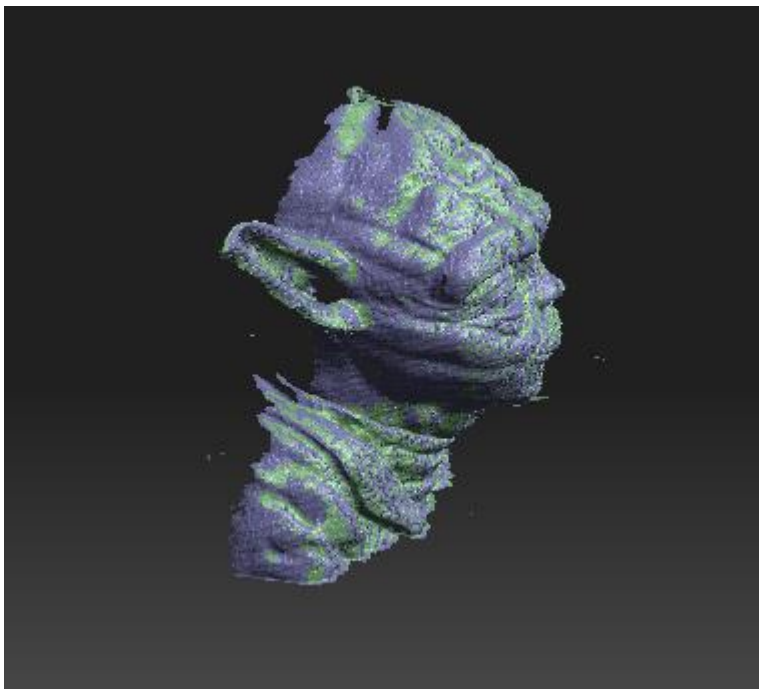
Kun suurin osa ylimääräisistä osista on poistettu, voidaan skannaukset keskittää ja tuoda lähemmäs. Liikutetaan kaikkia skannauksia samaan aikaan hiiren vasenta painiketta painamalla ja samaan aikaan hiirtä liikuttamalla. Kuvakulmaa säädetään samalla tavalla, mutta vasemman painikkeen sijasta käytetään oikeaa painiketta. Kuvaa voidaan lähentää ja loitontaa hiiren rullaa käyttämällä. Yksittäisen skannauksen liikuttaminen toimii muuten samalla tavalla kuin kaikkien skannausten liikuttaminen, mutta erona on se, että yksittäistä skannausta liikuttaessa valitaan skannaus sivun oikeasta reunasta ja painetaan näppäimistön ”Ctrl” näppäintä pohjassa samaan aikaan kun skannausta liikutetaan.

Siinä skannausten yhdistäminen aloitetaan piilottamalla kaikki muut skannaukset lukuun ottamatta ensimmäistä ja toista skannausta. Tämä tapahtuu sivun oikeasta reunasta löytyvästä ”List Of Scans” skannauslistasta painamalla jokaisen skannauksen vasemmalla puolella olevaa silmän kuvaa. Yhdistettävissä kuvissa tulisi olla mahdollisimman paljon samaa aluetta eri suunnista kuvattuna. Yhdistetään aina seuraava kuva edelliseen kuvaan. Näin taataan paras lopputulos. Sivun vasemmassa reunassa olevassa ”Shape Fusion” välilehdessä on kohta ”Alignment”, jonka alavetovalikosta valitaan aluksi ”Free” (KUVA 42).



KUVA 42. Shape Fusion-ikkuna

Tämän alapuolelta löytyy painike, jossa on magneetin kuva ja teksti ”Align Scans”. Kun sitä painetaan ja siirretään hiiri skannauslistan päälle, ilmestyy hiiren alakulmaan magneetti ja pieni ”A” -kirjain. Klikataan hiiren vasemmalla painikkeella toista skannausta jonka jälkeen ”A” kirjaimen tulisi vaihtua ”B” kirjaimeksi. Seuraavaksi klikataan hiiren oikealla ensimmäistä skannausta, minkä seurauksena ohjelman tulisi asettaa nämä kaksi skannausta päällekkäin (KUVA 43).



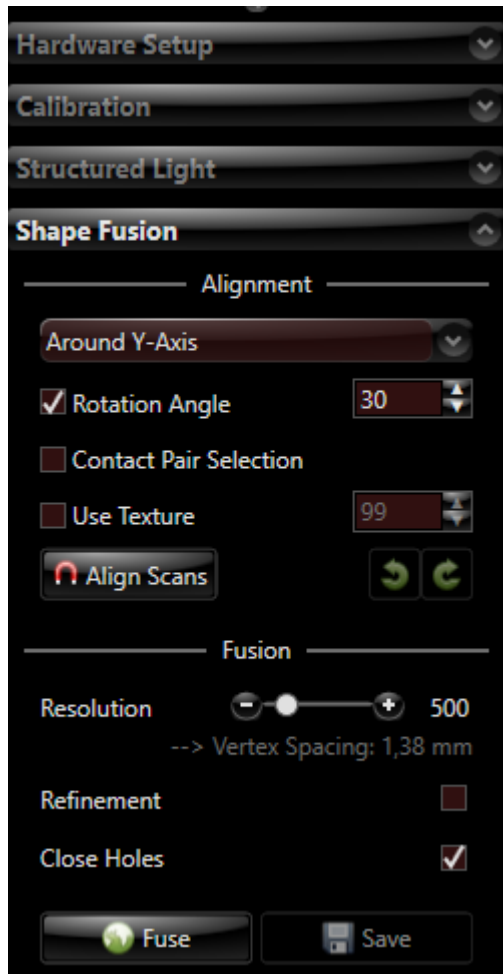
KUVA 43. Kaksi ensimmäistä skannausta päällekkäin asetettuina

Toistetaan tämä operaatio ja yhdistetään seuraavat skannaukset toisiinsa, kolmas skannaus toiseen skannaukseen, mutta tällä kertaa piilotetaan skannaus numero yksi ja tuodaan kolmas skannaus näkyviin. Kun kaikki skannaukset on liitetty toisiinsa, tuodaan kaikki skannaukset näkyviin ja valitaan sivun vasemmasta reunasta alavetovalikosta ”Free” -valinnan tilalle ”Global Fine Registration” ja painetaan alapuolella olevaa ”Align Scans” -painiketta. Tämä hienosäätää kaikkia päällekkäisiä skannauksia ja etsii niistä lisää päällekkäisyyksiä. Tämän vaiheen päätyttyä valitaan kaikki skannaukset sivun oikeasta reunasta painamalla niiden vasemmalla puolella olevaa tyhjää neliötä. Seuraavaksi painetaan sivun vasemmalta puolelta löytyvästä ”Fusion” -kohdasta ”Fuse” -painiketta, joka yhdistää päällekkäin laitettut skannaukset yhdeksi kokonaisuudeksi (KUVA 44).



KUVA 44. Valmis kolmiulotteinen kuva

Toinen tapa yhdistää skannaukset on käyttää ”Alignment” kohdasta löytyvää ”Around Y-Axis” -vaihtoehtoa (KUVA 45). Käytettäessä tätä tapaa ilmoitetaan DAVID3-ohjelmalle, kuinka monen asteen välein kuvat on otettu. Tämä tapahtuu aktivoimalla kohta ”Rotation Angle” ja laittamalla haluttu asteluku sen vierestä löytyvään kohtaan. Tällä kertaa aloitetaan tuomalla näkyviin kaksi viimeisintä skannausta ja painetaan ”Align Scans”-painiketta. Valitaan ”A”-skannaukseksi toiseksi viimeinen skannaus ja ”B”-skannaukseksi viimeinen skannaus. Ohjelma yhdistää skannaukset, jonka jälkeen tuodaan näkyviin kolmanneksi viimeinen skannaus ja yhdistetään se toiseksi viimeiseen skannaukseen. Näin jatketaan kunnes kaikki skannaukset on yhdistetty toisiinsa, jonka jälkeen skannaukset yhdistetään yhdeksi kuvaksi.



KUVA 45. Around Y-Axis

Lopuksi poistetaan vielä kuvasta ylimääräiset pienet partikkelit ”Cleaning” työkalulla. Tällä kertaa maalataan osa valmiista jo yhdistetystä kuvasta, minkä seurauksena se muuttuu punaiseksi. Seuraavaksi valitaan ”Cleaning” -valikosta keskeltä löytyvä painike, jossa on puoliksi musta ja puoliksi valkoinen pallo, puoliksi mustan ja puoliksi valkoisen neliön keskellä. kuva muuttuu valkoiseksi ja kaikki osat, jotka eivät koske siihen muuttuvat punaisiksi, nämä poistetaan punaista rastia painamalla.



## 6 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ja toteutettiin 3D-kuvausjärjestelmä esineiden automaattista 3D-kuvausta varten. Mielestäni järjestelmä on vaatimusten mukainen ja kykenee ottamaan kuvia lähes itsenäisesti.

Järjestelmää varten suunnittelin telineen, kääntöpöydän ja tein yksityiskohtaiset ohjeet järjestelmän kokoamista ja käyttöä varten. Muutamia osia kuten kääntöpöydän voimansiirron rattaita ja kääntöpöydän tukijalkoja ei ollut valmiina. Projektin toteuttamista helpotti suuresti se, että nämä osat pystyttiin tulostamaan koulun 3D-tulostimella. Työn aikana pääsin tutustumaan myös sekä 3D-mallintamiseen SolidWorks-ohjelmalla että Arduinon ohjelmointiin, jota käytettiin ohjaamaan kääntöpöytää ja keskustelemaan DAVID3-ohjelman kanssa. Mallintaminen osoittautui näistä kahdesta helpommaksi ja hetken harjoittelun jälkeen opin perusasiat ohjelmasta. Arduinon ohjelmointi oli huomattavasti hankalampaa, minkä johdosta kääntöpöydän ohjelman toimintakuntoon saaminen vei paljon enemmän aikaa. Projektin edetessä kiinnostukseni ja ymmärrykseni koskien 3D-kuvausta syventyi ja koen ymmärtäväni paremmin 3D-kuvausta ja siihen liittyviä asioita.

Parannuksina voisi lopulliseen järjestelmään muuttaa kääntöpöydän voimansiirtoa siten, että se toimisi hammasrattaiden sijaan joko hihnavetoisesti tai suoralla kosketuksella kääntöpöydän ulkoreunassa olevan lipan sisäpintaan. Tällä tavalla voitaisiin saavuttaa saumaton ja tasainen liike kääntöpöydän liikkuessa. Toinen mahdollinen muutosehdotus on lyhentää telineen tukivarsien pituutta. Tällä tavalla järjestelmästä saisi kompaktimman.

## LÄHTEET

- Aalto-yliopiston.d. Viitattu 8.12.2015.[http://automation.tkk.fi/attach/AS-0-2230/lab3c\\_teorja.pdf](http://automation.tkk.fi/attach/AS-0-2230/lab3c_teorja.pdf)
- Advanced Illumination 2015. Viitattu 20.12.2015. <http://www.advancedillumination.com/content.php?sid=common>
- Batchelor B.G. 2012. Illumination Sources. Teoksessa Batchelor B.G. (toim.) Machine Vision Handbook New York: Springer, 284-287
- Coherent 2015. Viitattu 2.1.2016.<https://www.coherent.com/products/?1826/What-is-Structured-Light>
- David vision systems 2014. DAVID 3.x User Manual Pages. Viitattu 7.3.2016. [http://wiki.david-3d.com/david3\\_user\\_manual/overview](http://wiki.david-3d.com/david3_user_manual/overview)
- Edmund Optics 2015. Imaging Electronics 101: Camera Types and Interfaces for Machine Vision Applications. Viitattu 15.2.2016 <http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/imaging/camera-types-and-interfaces-for-machine-vision-applications/>
- Edmund Optics 2015. Imaging Electronics 101: Understanding Camera Sensors for Machine Vision Applications. Viitattu 15.2.2016<http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications/>
- Engadget 2010. PrimeSense releases open source drivers, middleware that work with Kinect. Viitattu 24.2.2016. <http://www.engadget.com/2010/12/10/primesense-releases-open-source-drivers-middleware-for-kinect/>
- Jahr I. 2006. Lightning in Machine Vision. Teoksessa Hornberg A. (toim.) Handbook of Machine Vision Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 73-202 A
- Leino M., Kortelainen J., Valo P. 2014. Valaistus – ratkaiseva osa konenäköjärjestelmää. Teoksessa Leino M. (toim.) Teknologiatiedolla tuottavuutta. Ammattikorkeakoulut kansainvälisen teknologiatiedon tulkkeina pk-yrityksille –loppuraportti. Satakunnan ammattikorkeakoulu, Sarja B, Raportit 11/2014. Ulvila: AllOne Print Oy.
- Microscan 2015. What is machine vision? Viitattu 5.12.2015. <http://www.microscan.com/en-us/technology/machinevisionsystems/whatismachinevision.aspx>
- National Instruments, 2010. A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part II Viitattu 11.12.2015.<http://www.ni.com/white-paper/6902/en/>
- National Instruments, 2010 A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part III Viitattu 11.12.2015. <http://www.ni.com/white-paper/6903/en/>
- Karpinsky, M. & Zhang, S. 2010. High-resolution, real-time 3D imaging with fringe analysis. Journal of Real-Time Image Processing 7:55-66. <https://engineering.purdue.edu/ZhangLab/publications/papers/2012-rtip-fringe.pdf>

openFrameworks 2015. ofBook.Viitattu 7.12.2015 [http://openframeworks.cc/of-Book/chapters/image\\_processing\\_computer\\_vision.html](http://openframeworks.cc/of-Book/chapters/image_processing_computer_vision.html)

PetaPixel 2013. Using Focus Stacked Photos to Create 3D Reconstructions. Viitattu 1.2.2016. <http://petapixel.com/2013/06/22/using-focus-stacking-photography-to-create-a-3d-reconstruction/>

Red Digital Cinema 2015. Color vs. monochrome sensors. Viitattu 18.12.2015. <http://www.red.com/learn/red-101/color-monochrome-camera-sensors>

Seattlepi 2009. E3 2009 : Microsoft at E3 Several Metric Tons of Press Releaseapalloza. Viitattu 26.1.2016. <http://blog.seattlepi.com/digitaljoystick/2009/06/01/e3-2009-microsoft-at-e3-several-metric-tons-of-press-releaseapalloza/>

Texas Instruments 2014. Time-of-flight camera - an introduction. Viitattu 4.2.2016. <http://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>

Ultimate photo tips 2014. What is a pixel? Viitattu 20.1.2016. <http://www.ultimate-photo-tips.com/what-is-a-pixel.html>

Vision Systems 2013 3D imaging systems target multiple applications. Viitattu 13.2.2016. <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-18/issue-9/features/3d-imaging-systems-target-multiple-applications.html>

Vision Systems 2012. Kinect API makes low-cost 3-D imaging systems attainable. Viitattu 1.3.2016 <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-17/issue-9/features/kinect-api-makes-low-cost-3-d-imaging-systems-attainable.html>

Vision Systems 2012 LEADING EDGE VIEWS: 3-D Imaging Advances Capabilities of Machine Vision: Part III. Viitattu 13.2.2016. <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-17/issue-6/departments/leading-edge-views/3-d-imaging-advances-capabilities-of-machine-vision-part-iii.html>

3D Systems 2015. 3D Scanners A guide to 3D scanner technology Viitattu 4.1.2016. <http://www.rapidform.com/3d-scanners/>

3ders 2013. 3D scanning in full color using focus stacked photos. Viitattu 7.2.2016. <http://www.3ders.org/articles/20130628-3d-scanning-in-full-color-using-focus-stacked-photos.htm>