

TARTU ÜLIKOOL
Füüsika Instituut
Füüsikalise optika labor

FÜÜSIKA ERIALA - BAKALAUREUSETÖÖ 6 EAP

**Meetod SPAD kaamera lahutuse
arvutuslikuks suurendamiseks**

Autor:
Robert Kuks

Juhendaja:
Andreas Valdmann, PhD

Meetod SPAD kaamera lahutuse arvutuslikuks suurendamiseks

SPAD kaamera on üksiku footoni tundlikusega ajalast lahutust omav kaamera, millel on suurest vajalikust lisaelektronikast tulenevalt madal lahutus ja piiratud täitetegur. Täiteteguriks nimetatakse sensori tundliku ala ja kogupindala suhet. Antud töös töötati välja meetod, mille abil suurendada kaamera lahutust ning säilitada pikslite pimedatele aladele jäävat informatsiooni. Samuti uuriti erineva kujuga objektide mõju lõpptulemusele.

Märksõnad: SPAD kaamera, arvutuslik kummituskuva, multipleksimine
CERCS: P200 – Elektromagnetism, optika, akustika

Method for increasing the resolution of SPAD camera

SPAD camera is a camera that is able to register a single photon and thus has a small time resolution. Because of the large extra electronics needed to detect a single photon, SPAD camera has small resolution and filling factor. The aim of the thesis was to construct a method to increase camera resolution and capture the information in the blind sections of the pixels. Experiments were carried out to detect possible distortions in the picture caused by different shapes of objects.

Keywords: SPAD camera, computational ghost imaging, multiplexing
CERCS: P200 – Electromagnetism, optics, acoustics

Sisukord

Sissejuhatus	1
1 Kirjanduse ülevaade	3
1.1 Kummitusküva	3
1.2 Kolmemõõtmeline küva	6
2 Meetodid	8
2.1 Multipleksimine	8
2.2 Eksperiment	10
3 Tulemused ja analüüs	13
3.1 Teravustamisastme valimine	13
3.2 Kahemõõtmeline objekt	18
3.3 Kolmemõõtmelised objektid	18
Kokkuvõte	23
Kirjandus	25
Lihtlitsents	27

Sissejuhatus

Järjest suurenev huvi autonoomsete sõidukite ja tööstuste vastu on suurendanud kolmemõõtmelise kuva tehnoloogiatele esitatavaid nõudeid. Kolmemõõtmeliseks kuvaks on üks viis kasutada lennuaja kaamerat. Lennuaja kaamera mõõdab objektilt tagasi peegeldunud lühikese laserimpulsi lennuaega, arvutades selle põhjal objekti kauguse kaamerast. Mida tundlikum on lennuaja kaamera sensor, seda kaugemaid objekte on võimalik mõõta. Suure tundlikkuse poolest paistavad silma nn SPAD kaamerad (*Single photon avalanche diode*). SPAD kaamera sisaldab üksikfootoni tundlikkusega laviinfotodioode, mille ajaline lahutus on suurusjärguliselt 100 pikosekundit.

Nii tundlike sensorite tööks on vaja palju elektroonikat valgustundliku ala lähedal, mis ei ole valgusele tundlikud ning see tekitab probleemi. Piksli tundlik osa on paju väiksem piksli kogupindalast ja see osa informatsioonist, mis langeb tundlike alade vahele läheb kaduma. Samuti raskendab mahukas elektroonika väiksele alale rohkete sensorite paigutamist, seega on SPAD kaamerate lahutusvõime keskmiselt suurusjärguliselt tuhat korda väiksem nutitelefoni kaamera lahutusvõimest.

Üheks võimaluseks kaamera pildi lahutusvõime suurendamiseks on kummitusküva. Kummitusküva on arvutusliku küva meetod, mis võimaldab ühepikslilise detektoriga jäädvustada uuritava objekti mitmemõõtmelise kujutise. Selleks projitseeritakse objektile erinevaid valgusmusterid ning mõõdetakse ühepikslilise detektoriga objektilt peegeldunud valgussignaali. Objekti kujutis saadakse arvutuslikult, võttes arvesse kuvatud valgusmusterid ning nendele vastavad signaalid. Kummitusküva võimaldab iga pikslile kuvatud musteriga edasi anda ühe piksli jagu informatsiooni.

Mitme pikslilise detektori korral on võimalik kummitusküva meetodit rakendada igale detektoripikslile paralleelselt, mitmekordistades seeläbi mõõtesüsteemi efektiivsete pikslite arvu ning seda meetodit nimetatakse pikslite multipleksimiseks valgusmustritega. Piiratud täitetegurist tulenevaid kadusid saab vältida defokuseerides kujutist sensoril nii, et pimedatele aladele jääv informatsioon salvestatakse ümberkaudsetel pikslitel. Hiljem on võimalik arvutuslikult eraldada informatsioon, mis kuulus pimedatatele sensori aladele ja mis tundlikele aladele. SPAD kaamera puudusi on võimalik arvutuslikult parandada kasutades arvutuslikku kummitusküva multipleksimist ja kujutise defokuseerimist.

Bakalaureusetöö eesmärk on simuleerida SPAD kaamerat ning parandada selle pildi kvaliteeti, kasutades arvutuslikku kummitusküva ja kujutise defokuseerimist detektori tasandil. Piiratud täiteteguriga SPAD kaamera simuleerimiseks kasutatakse CMOS kaamerasensorit, millega saadud pildil võetakse andmetöötluses arvesse vaid SPAD sensori valgustundlikele aladele vastavad pikslid. Kummitusküva aitab parandada SPAD kaamera

sensori madalat lahutusvõimet ning defokuseerimisega saab kompenseerida pikslite aktiivsete alade vahele jäävat pimedat ala. Autorile teadaolevat on multipleksimist varem kombineeritud kompressiivse kuvaga, kuid täpselt samasugust katset ei ole varem tehtud.

Kirjanduse ülevaate peatükis antakse ülevaade kummituskuva ajaloost ning arvutuslikust kummituskuvast. Samuti kirjutatakse ka kolmemõõtmelisest kuvast ja selle erinevatest võimalustest. Meetodite osas selgitatakse lugejale multipleksimise tööpõhimõtet ja matemaatikat, mis on vajalik andmete töötlemiseks. Samuti tutvustatakse katseskeeme ning -seadmeid. Töö kolmandas peatükis on esitatud katsete tulemused ning nende analüüs. Töö viimases osas on töö lühike kokkuvõte.

1 Kirjanduse ülevaade

1.1 Kummituskuva

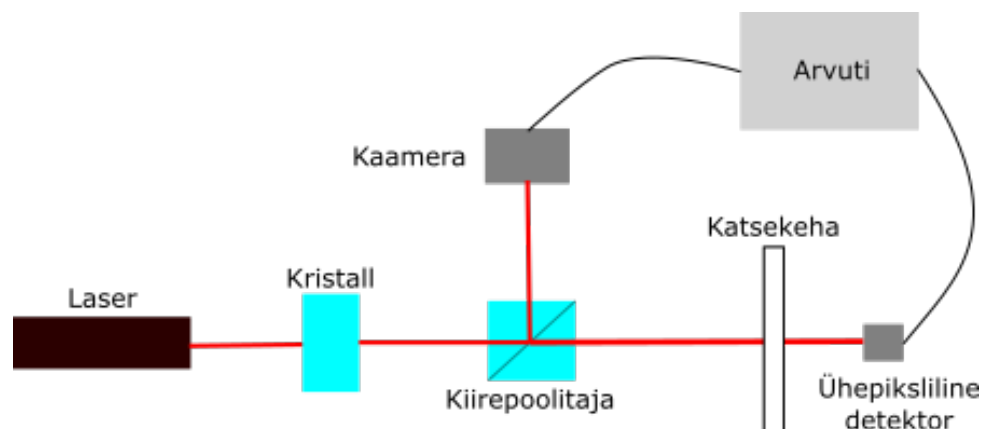
Kummituskuva on objekti kujutamise viis, kus kujutis saadakse kasutades struktureeritud valgust ning detektorit valguse intensiivsuse mõõtmiseks. Mõõtmiste sooritamiseks sobib üheksiksililine detektor või intensiivsuse andur. Esimesed artiklid antud meetoditega pärinevad 20. sajandi lõpust ja peale seda on hakanud antud meetod leidma laiemat kasutust erinevates valdkondades [1].

Ajalugu

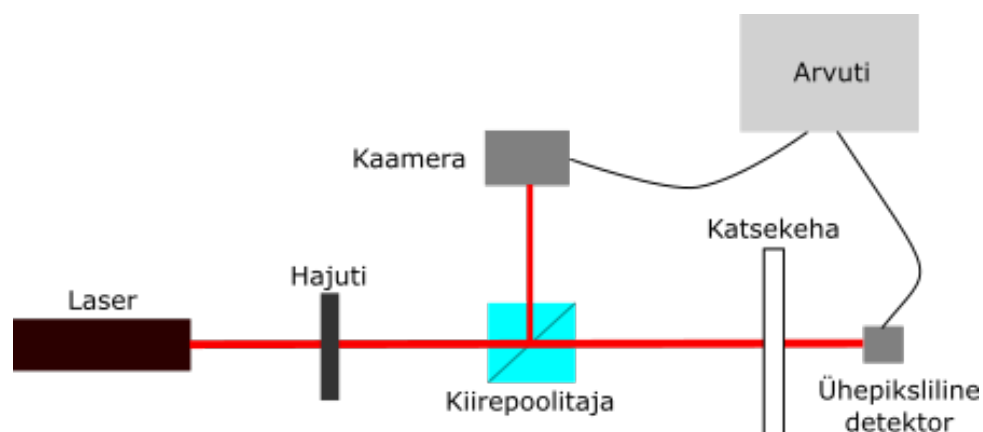
Kõige esimene meetod, mida kummituskuva puhul kasutati oli kvantkummituskuva. Antud meetodis kasutati kujutise saamiseks põimitud footonite paare. Laserkiire footonid poolitati mittelineaarse kristalliga kaheks madalama energiaga footoniks, mis olid omavahel põimitud. Põimitud footoniteks nimetatakse korreleeritud lainefunktsioonidega footoneid. Järgmisena jagati põimfootonite paarid polariseeritud kiirejagaja abil kaheks, kuna põimitud footonid on erinevte polarisatsioonidega siis sellega tagati, et põimitud footonid lähevad alati erinevatesse õlgadesse. Üks footon suunati läbi katsekeha, milleks oli amplituudimask, üksikpiksliline detektorile ja teine ruumilise lahutusega detektorile (joonis 1.1). Footonid langesid juhuslikult erinevatele objekti punktidele ja tulemuse saamiseks võrreldi detektorite signaale. Signaal tuvastati ainult siis kui mõlemale detektorile langes footon samaaegselt ja teades palju footoneid kuhu langes saab koostada objekti läbilaskvuse funktsiooni. Saadud tulemust sai kasutada objektist kujutise tekitamiseks [1].

Vähem kui kümne aastaga avastati, et sama katset saab ka läbi viia ilma põimfootoneid kasutamata. Antud meetodis kasutati põimfootonite paaride asemel struktureeritud valgust (joonis 1.2). Valgusvihk jagati kiirepoolitaja abil kaheks ühesuguse valguse intensiivsusaotusega kimbuks, millest üks osa suunati referentsmõõtmiseks CCD kaamerale ning teine osa objektile. Objekti taga oleva üksikpiksliline detektoriga mõõdeti objekti läbinud valguse intensiivsus ning nende põhjal arvutati objekti läbilaskvuse funktsioon. Valguse struktureerimiseks kasutati alguses pöörlevat hajutit, mida läbinud valgusviht tekitas juhusliku mustri. Saadavat mustrit nimetatakse speklimumstriks, mis on sarnane soojusliku valgusallika kiirgusele [2]. Kui kvantkummituskuval oli sobivate objektide hulk piiratud siis antud meetodi korral katsekehadele piiranguid ei ole [3].

Järgmise edasiarendusena leiti, et kasutades katse jaoks teadaolevaid mustreid siis ei ole vaja kasutada CCD kaamerat referentsmõõtmise jaoks ning katse saab läbi viia kasutades vaid üksikpiksliline detektorit. Antud meetodit kutsutakse arvutuslikuks kummituskuvaks. Arvutuslikus kummituskuva katses kuvatakse objektile teadaolevad valgusmustrid ning



JOONIS 1.1: Kvantkummituskuva skeem. Laserkiir lastakse mittelineaarsele kristallile, peale mida läbib see polariseeritud kiirepoolitajat. Üks foton põimfootonite paarist saadetakse ruumilise lahutusega kaamerale ning teine objektile. Ühepikslilise detektoriga mõõdetakse objekti läbiva valguse intensiivsust.

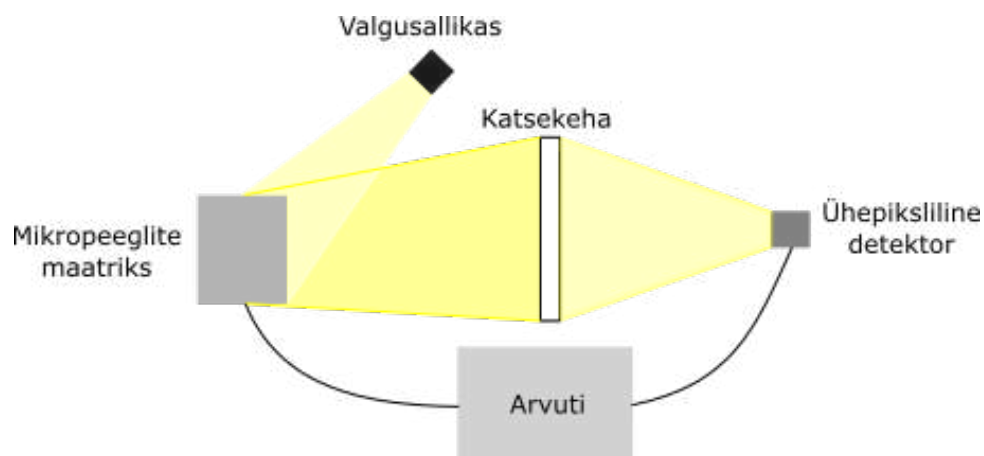


JOONIS 1.2: Klassikalise kummituskuva skeem. Laserkiir suunatakse läbi pöörleva hajuti kiirepoolitajale. Üks pool valgusvihust suunati ruumilise lahutusega kaamerale ning teine objektile. Ühepikslilise detektoriga mõõdetakse objekti läbiva valguse intensiivsust.

mõõdetakse kas objekti läbiva valguse või tagasipeegeldunud valguse intensiivsust (joonis 1.3). Valgusmustreid tekitatakse enamasti valgusallika ja mikropeegli maatriksi (DMD) või LED maatriksi abil [4].

Arvutuslikust kummituskuvast on edasi arenenud ka diferentsiaalne kummituskuva, kus objektile kuvatakse ka iga mustri vastandmuster. Mõlema mustri mõõtmine võimaldab vähendada müra taset mõõtmises, kuid pikendab mõõtmise aega kaks korda. Arvutusliku ja diferentsiaalse kummituskuva matemaatilist tausta avatakse järgnevas alapeatükis.

Esimene arvutusliku kummituskuvaga kolmemõõtmeline kuva sooritati 2013. aastal. Siis kasutati kolmemõõtmelise tulemuse saamiseks nelja, ruumi erinevates osades paiknevat üksikpiksli detektorit [5]. Mõned aastad hiljem sooritati esimesed arvutusliku kummituskuva eksperimendid ajalast lahutust omava ühepikslilise detektoriga [6].



JOONIS 1.3: Arvutusliku kummituskuva skeem. Valgusvihk suunatakse mikropeeglite maatriksile, millelt suunatakse valgus mustritena edasi objektile. Ühepikslilise detektoriga mõõdetakse objekti läbiva valguse intensiivsust.

Arvutuslik kummituskuva

Arvutusliku kummituskuva eksperimendis kasutatakse tulemuste arvutamiseks peamiselt kahte meetodit, milleks on iteratiivne meetod ja võrrandisüsteemi lahendamine. Iteratiivse meetodi korral arvestatakse mõõdetud valguse intensiivsust kui mustri kaalu ning tulemuse saamiseks liidetakse kaalutud mustrid kokku. Antud meetodi üldkuju on

$$O = \langle (S - \langle S \rangle)(M - \langle M \rangle) \rangle, \quad (1.1)$$

kus O on saadav pildi lõpptulemus, S on mõõdetud valguse intensiivsus ja M on mõõtmise ajal kuvatav muster. Võrrandisüsteemiga tulemuse leidmiseks tuleb lahendada lineaarvõrrandisüsteem

$$M \cdot O = S, \quad (1.2)$$

kus O on lõpptulemus, S mõõtmistulemusi sisaldav vektor ja M mustreid sisaldav maatriks, muutuja O suhtes [7].

Mõlema lahendamiseviisi korral on N mustri mõõtmisel võimalik lõpptulemuseks arvutada N piksliline pilt. Teisalt väheneb lõpptulemuse signaali-müra suhe mõõtmiste arvu kasvuga - signaali-müra suhe on pöördvõrdeline ruutjuurega mustrite arvust. Parema signaali-müra suhte saavutamiseks suure arvuliste mõõtmiste korral kasutatakse diferentsiaalset arvutuslikku kummituskuvat [8].

Diferentsiaalses kummituskavas kasutatakse kaks korda rohkem mustreid, kuvades igale mustrile lisaks ka tema vastandmuster. Vastandmuster on muster, millel on esialgse mustri-ga valged ja mustad alad omavahel ära vahetatud. Vastandmusteriga mõõtmisi arvesse võttes on võimalik vähendada mõõtmise müra ning lihtsustada lõpptulemuse saamiseks

vajalikke arvutusi. Diferentsiaalse arvutusliku kummituskuva korral avaldub mõõdetud signaal kujul

$$M_{+ij}O^{ij} - M_{-ij}O^{ij} = S_+ - S_- = M_{\pm ij}O^{ij} = S_{\pm}, \quad (1.3)$$

kus M_+ ja M_- on kasutatud muster ja tema vastandmuster, S_+ ja S_- vastavate mustritega mõõtmisel saadud tulemus ja M_{\pm} on muster, mille väärtused on kas -1 või 1 [9]. Sellest tulenevalt kasutatakse tihti diferentsiaalses kummituskavas mustrite moodustamiseks Hadamard'i maatriksit, mis on ruutmaatriks, mille elementide väärtusteks on -1 ja 1 . Igast Hadamard'i maatriksi reast tekitatakse üks valgusmuster ning kuvamiseks saadakse mustrid eeskirjaga

$$M_+ = \frac{M_{\pm} + 1}{2}, M_- = \frac{-M_{\pm} + 1}{2}, \quad (1.4)$$

kus M_{\pm} on Hadamard'i maatriksi reast saadud muster, mille väärtused on 1 ja -1 ning M_+ ja M_- on mustrid väärtustega 1 ja 0 . Üldistades valemit (1.3) üle mõõtmiste siis saame selle viia kujule

$$HO = S_{\pm}, \quad (1.5)$$

kus H on mustrite moodustamiseks kasutatud Hadamard'i maatriks, O on objekti kujutisvektorina ning S on mõõtmistulemuste vektor.

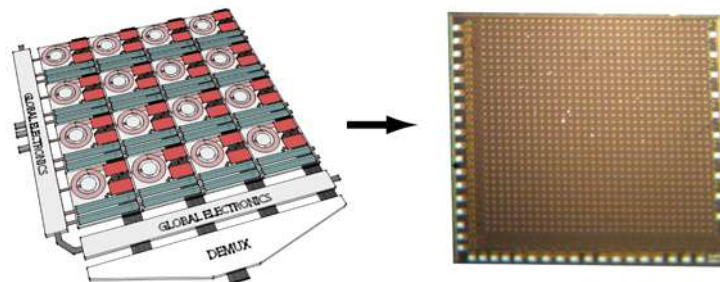
1.2 Kolmemõõtmeline kuva

Täna on autonoomsetel sõidukitel enim levinud kolmemõõtmelise kuva tehnoloogiaks LiDAR. LiDAR-id mõõdavad ümbritsevat keskkonda punkttaaval ning nendest saab kokku panna punktipilve. See tehnoloogia on küllaltki aeglane ning sisaldab enamasti hulganisti liikuvaid osi, mille tõttu vajavad süsteemid pidevat ja korralikku hooldust. Pidevalt otsitakse lahendusi, mis oleksid LiDARist töökindlamad ja efektiivsemad. Üheks lootustandvamaks tehnoloogiaks LiDARite asendamisele on SPAD kaamera.

SPAD kaamera

SPAD (ehk üksiku footoni tundlikkusega laviinfotodiod) kaamera on kõrge ajalise lahutusega kaamera, mille abiga on võimalik konstrueerida kolmemõõtmelisi kujutisi lühikese laserimpulsi lennuaege mõõtes. Antud detektor on küll väga tundlik ja hea ajalise lahutusega, kuid samas ka piiratud täiteteguri ja madala ruumilise lahutusega (joonis 1.4) [10]. Detektori täiteteguriks nimetatakse detektori tundliku ala ja kogupindala suhet.

SPAD kaamera iga piksel on laviinfotodiod. Footoni langemisel tekib teatud tõenäosusega pikslis elektronide laviin, mis registreeritakse väljundis vooluimpulsina. Footoni detekteerimise tõenäosus sõltub nii laviinfotodiodi ehitusest, sellele rakendatud pingest kui ka valguse lainepikkusest [11]. Uuemates sensorites võib see tõenäosus olla üle 50 % ning sensorite täitegurid võib ulatada mõnest protsendist 75 %-ni [12, 13].



JOONIS 1.4: SPAD detektor. Vasakul on SPAD detektori ehitus, kus piksli tundlik ala on kujutatud ringidega, ja paremal pilt reaalsest 32 x 32 lahutusega detektorist.

2 Meetodid

Meetodite peatükis seletatakse täpsemalt lahti multipleksimise teooria ning antakse ülevaade eksperimendi riistvarast ning andmetööstlusest. Samuti tutvustatakse lühidalt tekkinud probleeme ning neile leitud lahendusi.

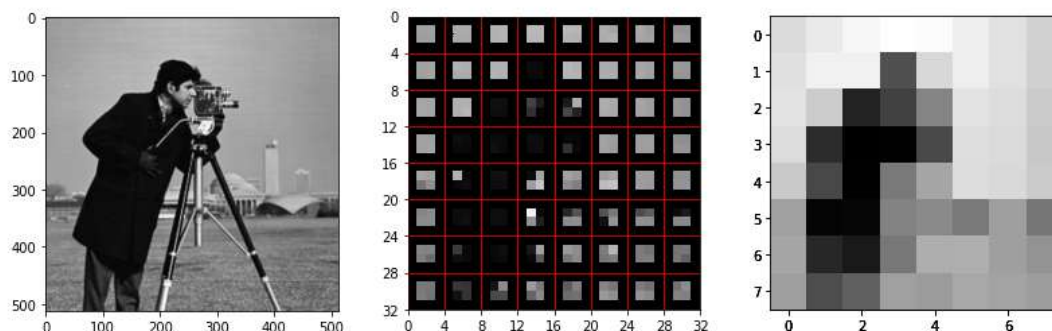
2.1 Multipleksimine

Multipleksimine, inglise keeles *multiplexing*, tähendab antud kontekstis, et igale kaamera pikslile rakendatakse samaaegselt kummituskuva ning selle abil saab hiljem pilditööstlust tehes pildi lahutust suurendada [14]. Piiratud täiteteguri korral jääb osa pildi informatsioonist pikslite pimedatele aladele ning seda teadmata pilti tehes on lõpptulemusest suur hulk informatsiooni puudu (joonis 2.1). Kui piiratud täiteteguriga kaamera objektiiv fookusest välja viia, siis salvestub ühele kaamera pikslile mitme pildipikslilise informatsioon. Selle abil kogutakse infot objekti osade kohta, mis teravustamise korral langeks pikslil ümber olevale pimedale alale.

Igale multipleksitud mõõtmisele vastab võrrand

$$y_t = A_t \cdot x, \quad (2.1)$$

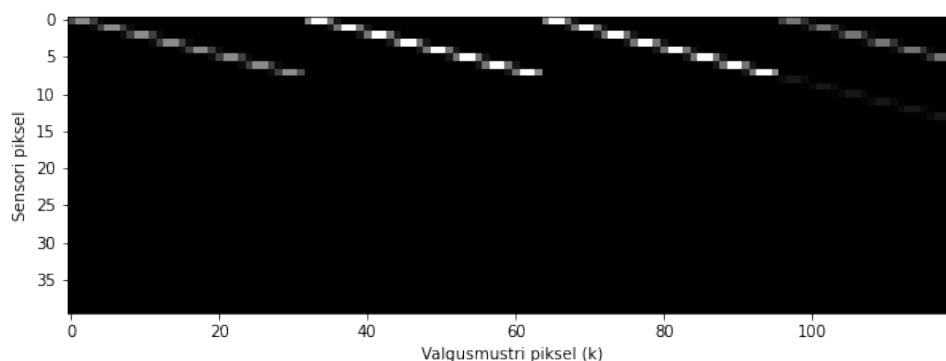
kus y_t on ühemõõtmeline vektor, mille elemendid on pikslite lugemid mustriaga t , x on ühemõõtmeline vektor, mis on saadud kahemõõtmelise objekti kujutise veergude üksteise alla paigutamise ja A_t on maatriks, mis sõltub nii kuvatavast valgusmustrist (D_t) kui ka süsteemi kostest (C) [14, 15]



JOONIS 2.1: Madala täiteteguriga kaamera pilt ilma andmetööstluseta. Vasakul on näha objekt, millest pilti tehakse, keskel on kujutatud sensoripikslite vaateväli ja paremal on kaamerast välja tulev pilt.

$$A_t = C \cdot D_t. \quad (2.2)$$

D_t on maatriks, mille peadiagonaalil on kuvatava mustri pikslid ja ülejäänud väärtused on nullid. C on süsteemi koste maatriks, kus ridadele vastavad kaamera senori pikslid ja veergudele vastavad valgusmusteri pikslid. Kostemaatriksi veeruks on kaamera pikslite väärtused hetkel kui kuvatakse mustrit, milles korraga valgustatud üks mustripiksel (joonis 2.2). Musteri piksleid valgustati järjest veergude kaupa.



JOONIS 2.2: Väljavõte koste mõõtmise tulemusena saadud maatriksist C .

Kui objekt katse jooksul ei muutu ehk $x_1 = x_2 = \dots = x_t$ ning kui koostada maatriksid y ja A , mis saadakse y_1, \dots, y_t ja A_1, \dots, A_t üksteise alla asetamisega siis saame viia valemi 2.1 kujule

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 x_1 \\ A_2 x_2 \\ \vdots \\ A_T x_T \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_T \end{bmatrix} x \Rightarrow y = Ax. \quad (2.3)$$

Teades mõõtmistulemusi, süsteemi kostet ja kasutatud mustreid saame antud valemi järgi arvutada objekti kujutise x . Selleks viiakse valem 2.3 kujule

$$x = \frac{y}{A}. \quad (2.4)$$

Teades, et maatriksiga jagamine on võrdne pöördmaatriksiga korrutamisega siis saab valemi (2.4) viia kujule

$$x = y \cdot A^{-1}. \quad (2.5)$$

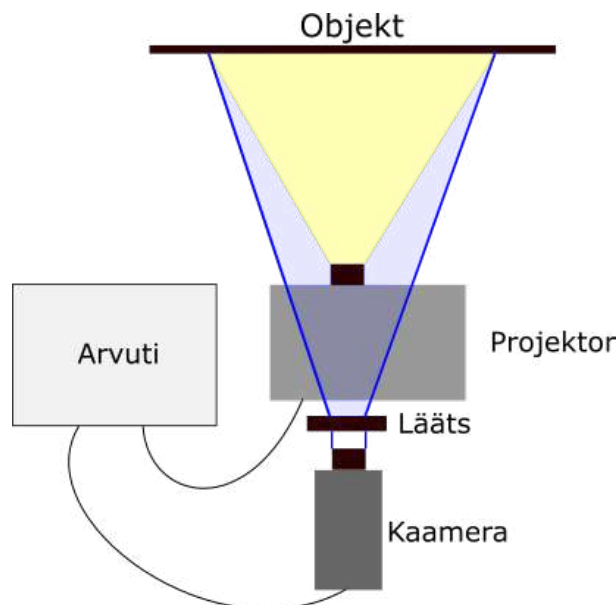
Arvutades objekti kujutise x maatriksi väärtuse ning viies selle tagasi kahemõõtmelise vektori kujule saamegi kahemõõtmelise objekti kujutise.

2.2 Eksperiment

Eksperimendi eesmärk oli suurendada silmuleeritava SPAD kaamera pildi lahutust ning sooritada mõõtmine nii, et madala piksli täiteteguri tõttu ei läheks informatsiooni kaduma. Esimeses katses kasutati objektina kahemõõtmelist pilti ja teises katses kolmemõõtmelisi kehasid.

Eksperimendi riistvara

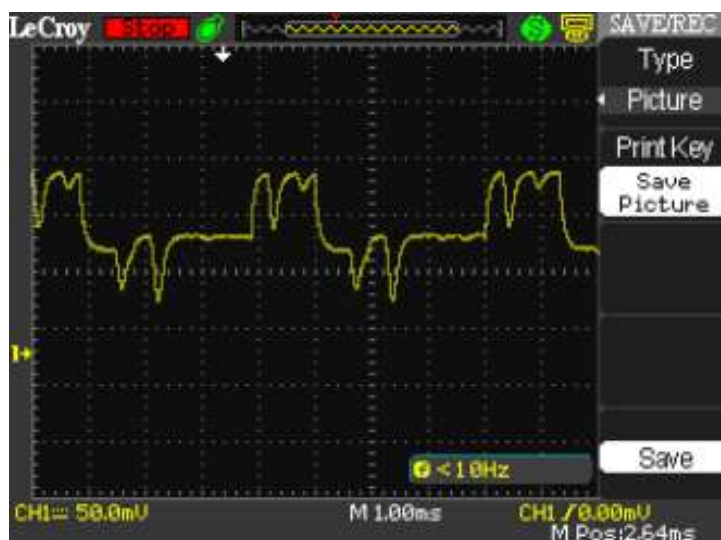
Katseteks kasutati arvutusliku kummituskuva skeemi, kus oli üksikpikslidetektor asetatud CMOS kaameraga ning mustreid kuvatakse projektoriga. Mõõtmisi teostati FLIR Grasshopper 3 kaameraga, mille ees oli objektiiv fookuskaugusega 20 mm ja suhtelise avaga $f/2$. Mustreid kuvati Texas Instruments LightCrafter Display 3010 EVM videoprojektoriga. Kaamera asetati projektorile võimalikult lähedale, objektist umbes poole meetri kaugusele nii, et kaamera sensor ning projektori mikropeeglite maatriks oleksid paralleelsed objektiga. Pildi täiendavaks udustamiseks oli kaamera ette lisatud lääts fookuskaugusega 300 mm (joonis 2.3).



JOONIS 2.3: Eksperimendi skeem. Projektoriga kuvatakse objektile valgusmustrid ning tagasi peegeldunud valgust mõõdetakse kaameraga, mille ette on täiendavaks udustamiseks lisatud lääts.

Esimeses katses asetati kahemõõtmeline objekt ekraanile ning teises katses asetati kolmemõõtmeline objekt ekraani ette. Esimese katse sooritati, et teada saada kui hästi ja palju on võimalik antud meetodi abiga pildi lahutust parandada ning teine katse näitas kui hästi saab sama meetodit rakendada kolmemõõtmeliste objektide korral. Mõlema katse korral teostati kordusmõõtmisi erinevate pildi tegemise kiiruste, pildi lahutuste ja erinevate teravustamisastmetega.

Kaadri säritamise kiiruse juures tuli jälgida peamiselt kaht aspekti. Esimesena seda, et ajavahemik mustri kuvamise ja säri alguse vahel oleks piisavalt suur, et pilti tehtaks õigest mustrist ning teiseks, et säriaeg oleks piisavalt pikk, et tehtavad pildid oleksid alati ühtlaselt intensiivsusega. Projektoris on värvilise pildi kuvamiseks 3 erinevat värvi LED-i, mis süttivad üksteise järel. Kui kaamera kaadrite säritamine ei ole LED-ide perioodiga sünkroonis siis on näha kaamerapildi vilkumist. Perioodi ja säritamise sünkroniseerimiseks mõõdeti projektori LED-i vilkumise sagedust jälgides fotodiodi pingesignaali (joonis 2.4) ning kaamera säriaeg pandi võrdseks ühe projektori LED-ide vilkumise tsükliga [16]. LED-ide perioodi pikkuseks saadi ligikaudu 4,166 millisekundit ning lähim võimalik kaamera säriaeg oli 4,16 millisekundit. Sellega tagati, et kaader on alati ühtlaselt valgustatud.

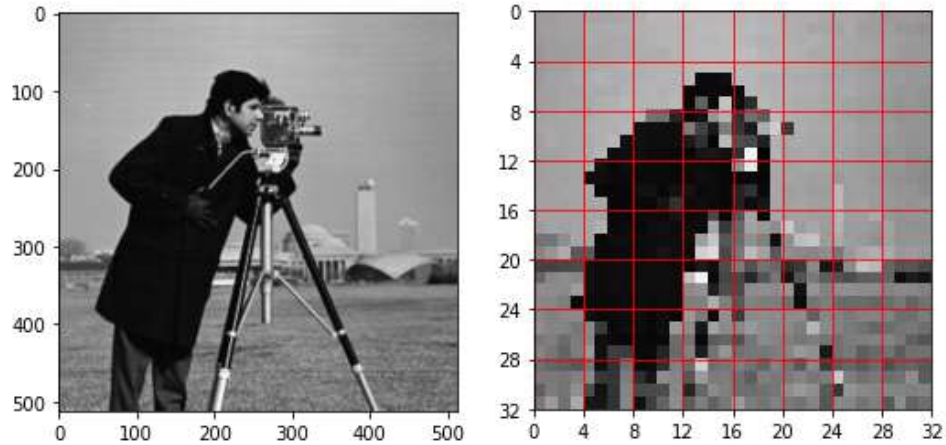


JOONIS 2.4: Projektori LED-ide sageduse mõõtmiseks kasutatud fotodiodi väljundpin-ge kõikumine valge pildi kuvamisel.

Pildi lahutuse valimisel tuli jälgida, et simuleeritava kaamera lahusus oleks piisavalt suur, et tulemus oleks selgesti nähtav, kuid piisavalt väike, et arvuti suudaks andmeid mõõtmise jooksul salvestada ning neid kiiresti töödelda. Viimaks tuli fookuseerimise juures jälgida, et kujutis kaamera sensoril oleks piisavalt udune, et osa piksli informatsioonist talletataks ka simuleeritava kaamera kõrval pikslitele. Kõigil parameetritel oli eksperimendi lõpptulemusele märgatav mõju ning korduskatsetega leiti antud skeemi jaoks sobivaimad parameetrid.

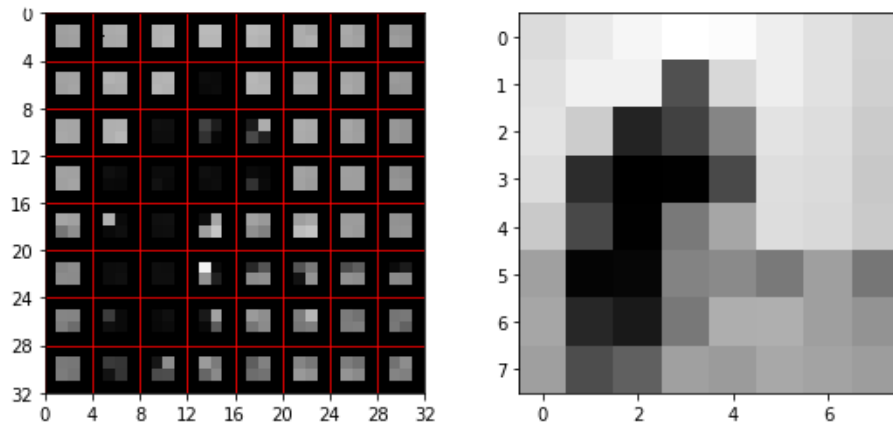
Andmetöötlus

Töö eesmärk oli antud mõõtmistega simuleerida madala lahutuse ja täiteteguriga kaamerat. Selleks tuli saadud mõõtmistulemusi töödelda mitmes erinevas etapis. Esimesena tuli esialgse pildi lahutust madaldada nii, et jääks alles piisavalt piksleid pimedate alade simuleerimiseks ja oleks võimalik vahetulemusi salvestada (joonis 2.5).



JOONIS 2.5: Kaamera pildi lahutuse vähendamine. Parempoolsel pildil on kujutatud testobjekt ja vasakpoolsel vähendatud lahutusega kujutis.

Seejärel tuli simuleerida SPAD kaamera piksleid. Pikslite täiteteguri simuleerimiseks otsustati jagada pilt 4×4 lauhutusega tükkideks. Saadud tükkide välimiste pikslite informatsioon kustutati ning alles jäänud pikslite väärtused keskmistati. Nii saadi igast 4×4 tükist ühe simuleeritava kaamera piksel, mille täitetegur on 0,25 (joonis 2.6).



JOONIS 2.6: Piiratud täiteteguriga kaamera pikslite simuleerimine. Parempoolsel pildil on kujutatud kujutis simuleeritava kaamera sensoril ja vasakpoolsel sensori signaal ilma pikslite multipleksimiseta.

Peale kõikide mustrite mõõtmist ja eelnevate andmetöötluse sammude läbimist rekonstrueeritakse kujutis kasutades multipleksimise alapeatükis toodud meetodit. Saadava tulemuse lahusus sõltub kasutatavate mustrite arvust ning kasutatava kummituskuva meetodist.

3 Tulemused ja analüüs

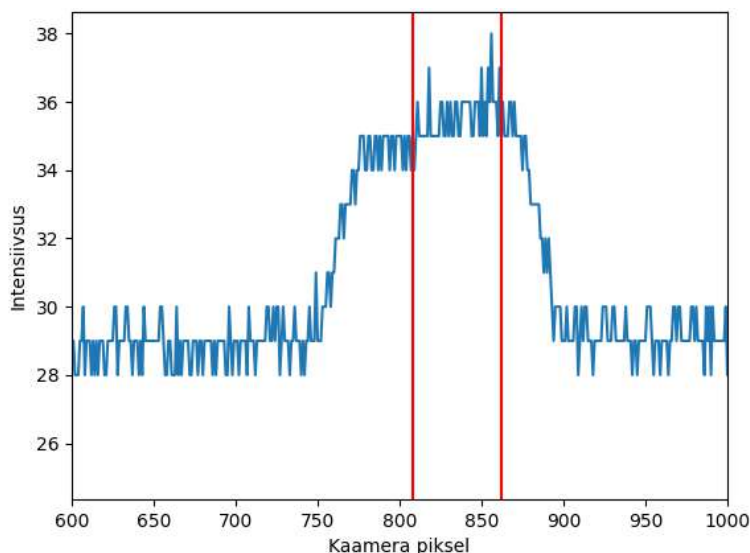
Antud peatükis tehakse ülevaade eksperimendi käigus tehtud mõõtmistest ning saadud tulemustest. Esmalt sooritati mõõtmisi erinevate kaamera objektiivi teravustamisastmetega. Olles valinud neist parima valiku antud katse ülesehituse jaoks sooritati mõõtmisi kahe- ja kolmemõõtmeliste objektidega.

3.1 Teravustamisastme valimine

Edasisteks katseteks parima teravustamisastme valimiseks sooritati mõõtmisi viie erineva objektiivi teravustamiskaugusega, mis olid valitud nii, et oleks kaetud kogu võimalike teravustamiskauguste vahemik. Kasutatud teravustamiskaugused olid 0,4, 0,8, 1,5 ja 8 m ja objektiivile oli ette lisatud lääts fookuskaugusega $f = 300$ mm täiendavaks defokuseerimiseks. Kõigi erinevate seadete korral mõõdeti mustri üksiku piksli kuvamisel tekkiv koste, pilt valgest paberist ning katseobjektist (joonis 3.1).

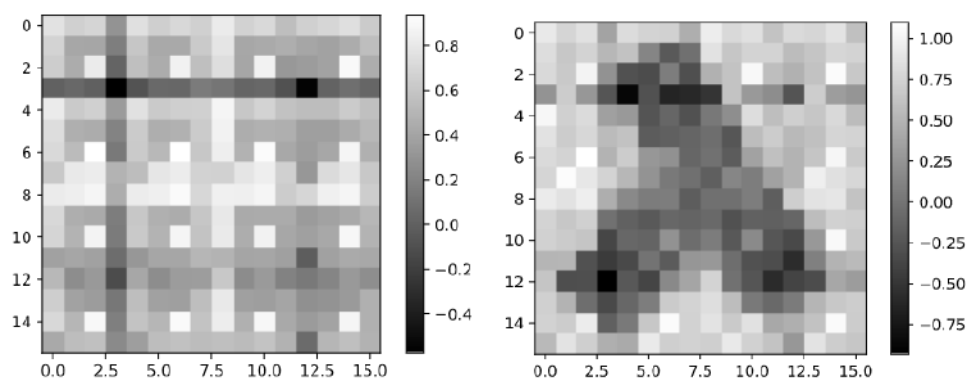


JOONIS 3.1: Katseobjekt teravustamisastme valimisel.



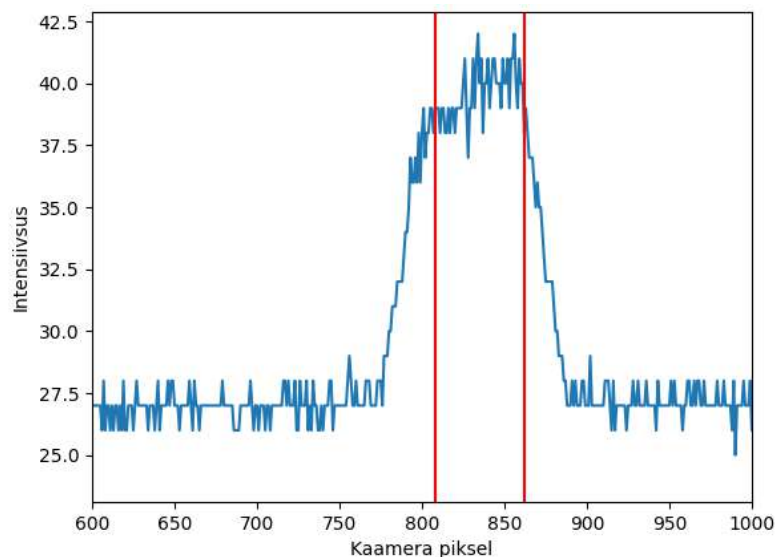
JOONIS 3.2: Punkti koste objektiivi teravustamiskaugusega 0,4 m. Punased jooned tähistavad kahe piksli aktiivsete alade vahelist kaugust.

Kõige väiksema teravustamiskauguse korral tuli pilt kõige udusem ning punkti koste mõõtmisel on näha, kuidas ühe punkti informatsioon jõuab alati vähemalt kahele kõrvuti asetseva simuleeritud kaamera pikslile (joonis 3.2). Selle tulemusena oli mõlema mõõtmisel näha palju müra ning moonutusi (joonis 3.3). Madala lahutuse korral sai ka antud teravustamisastmega katseobjektist täitsa arvestatava tulemuse, kuid lahutuse suurenedes oleksid mõõtmistulemused märgatavalt halvenenud, kuna müra kõrval pikslitele oleks järjest suurenenud.



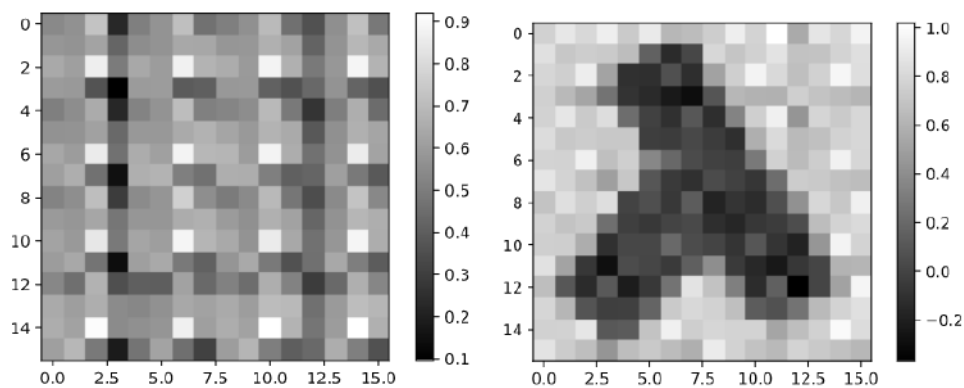
JOONIS 3.3: Mõõtmistulemused objektiivi teravustamiskaugusega 0,4 m. Vasakpoolsel pildil on valge lehe mõõtmistulemus ja paremal pildil katseobjektiga mõõtmise tulemus.

Teravustamiskaugusel 0,8 m on punktallika koste mõõtmisel näha, et teravustamisaste on piisav, st kui valgustatud osa langeb kahe piksli vahelisele pimedale alale siis osa informatsioonist jaotub kõrvalolevate pikslite vahel ära (joonis 3.4). Samas ei ole valguslaik



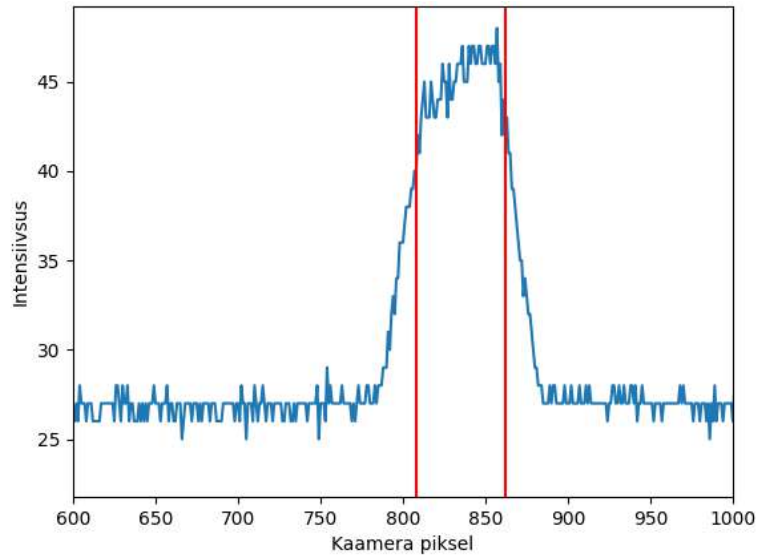
JOONIS 3.4: Punkti koste objektiivi teravustamiskaugusega 0,8 m. Punased jooned tähistavad kahe piksli aktiivsete alade vahelist kaugust.

liiga lai, et tekitada teistele pikslitele müra. Antud olukord võimaldab andmetöötleses päris täpselt välja arvutada pimedatele aladele jäävad osad. Valge paberilehe mõõtmisel on näha, et antud katses pole kaamera ja projektori pikslite joondamine olnud kõige täpsem, kuid sellest olenemata tuleb katseobjektiga mõõtmine märgatavalt parema kvaliteediga kui 0,4 m teravustamiskauguse korral (joonis 3.5).



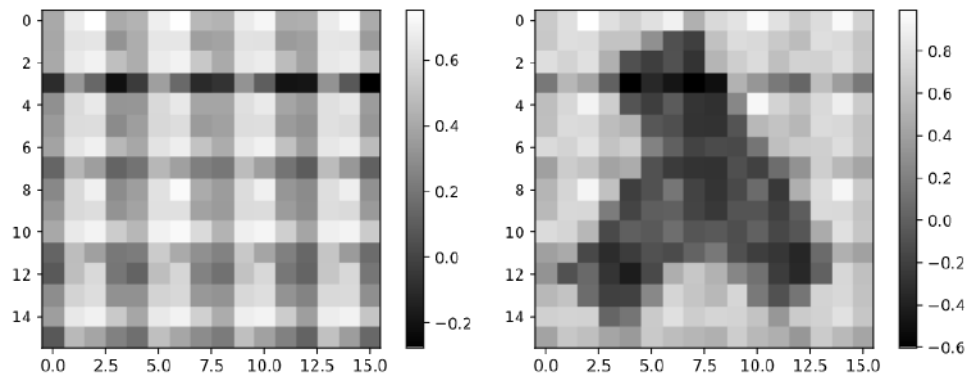
JOONIS 3.5: Mõõtmistulemused objektiivi teravustamiskaugusega 0,8 m. Vasakpoolsel pildil on valge lehe mõõtmistulemus ja paremal pildil katseobjektiga mõõtmise tulemus.

Pilti rohkem teravustades ning viies teravustamiskauguse 1,5 m peale muutub punktallika koste jätkuvalt kitsamaks. Antud juhul on koste veel piisavalt lai, et kahe piksli tundliku ala vahele sattudes salvestatakse osa informatsioonist kõrval asuvatel pikslitel (joonis 3.6). Selle teravustamisastmega on kindalsti võimalik saavutada veel häid tulemusi, kuid süsteem on märksa tunlikum kui 0,8 m teravustamiskauguse korral. Valge paberi mõõtmisest on hästi näha, et katses oli raskusi täpse joondamisega, kuid sellest hoolimata on



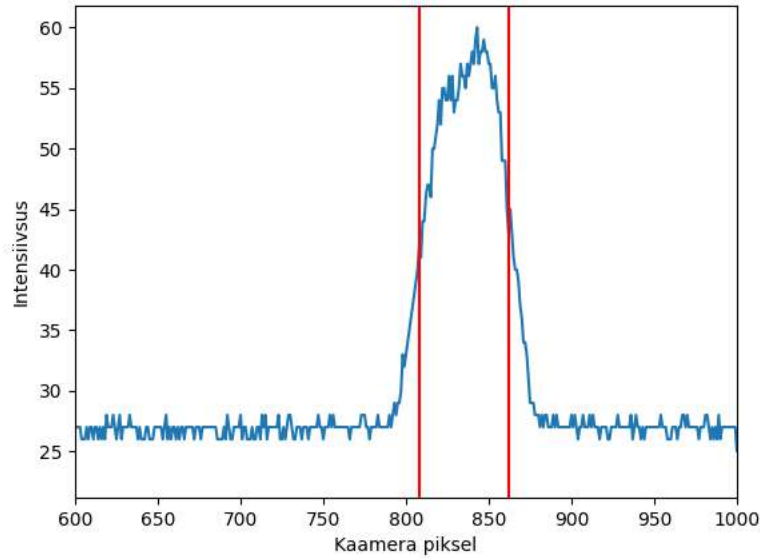
JOONIS 3.6: Punkti koste objektiivi teravustamiskaugusega 1,5 m. Punased jooned tähistavad kahe piksli aktiivsete alade vahelist kaugust.

pilt katseobjektist arusaadav (joonis 3.7). Kvaliteet on saadud tulemusel parem kui 0,4 m teravustamiskauguse korral kuid veidi kehvem kui 0,8 m teravustamiskauguse korral.

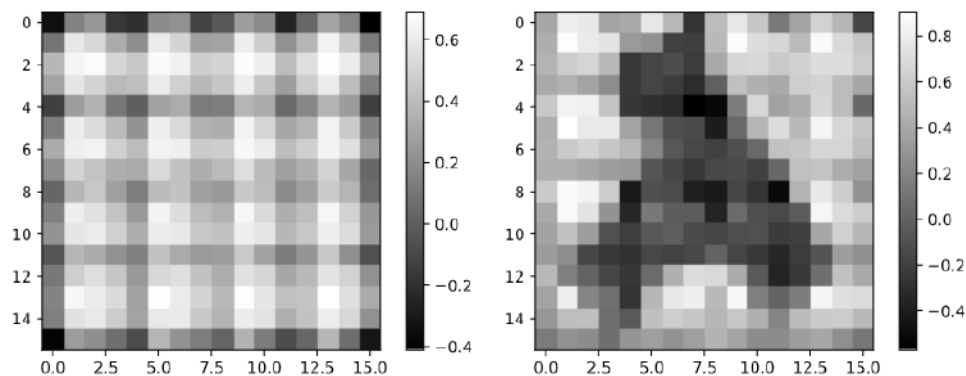


JOONIS 3.7: Mõõtmistulemused objektiivi teravustamiskaugusega 1,5 m. Vasakpoolsel pildil on valge lehe mõõtmistulemus ja paremal pildil katseobjektiga mõõtmise tulemus.

Viimase teravustamisastme katsetusena tehti mõõtmised 8 m teravustamiskaugusega. Antud teravustamisastme punktallika koste mõõtmisest on näha, et objektilt peegeldunud valguse sattumisel täpselt kahe piksli tundlikute alade vahele ei satu piisavalt informatsiooni pikslitele ning oluline informatsioon võib seetõttu mõõtmisel kaduma minna (joonis 3.8). Informatsiooni kaduma minek tuleb ka välja valge paberiga mõõtmise tegemisel. Pildilt tulevad välja tumedad piksliribad, kuhu ei ole sattunud väga informatsiooni ja samad jooned on näha ka katseobjektiga pildil (joonis 3.9). 8 m teravustamiskaugusega saadud pilt katseobjektist on kõigist tehtud katsetest vaieldamatult halvima kvaliteediga. Lõpptulemuses on tugevaid moonutusi ning piirjooned ei ole enam selgelt eristatavad.



JOONIS 3.8: Punkti koste objektiivi teravustamiskaugusega 8 m. Punased jooned tähistavad kahe piksli aktiivsete alade vahelist kaugust.

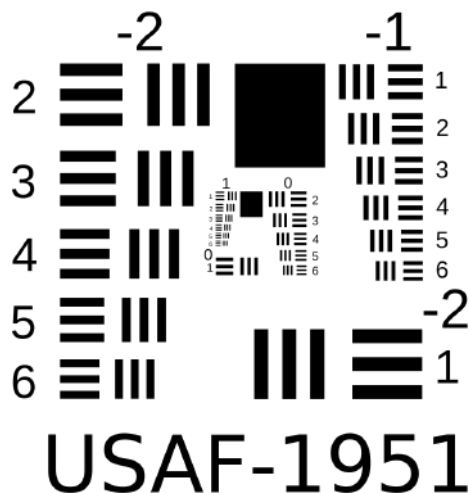


JOONIS 3.9: Mõõtmistulemused objektiivi teravustamiskaugusega 8 m. Vasakpoolsel pildil on valge lehe mõõtmistulemus ja paremal pildil katseobjektiga mõõtmise tulemus.

Kõikidest teravustamisastme mõõtmistest andsid parimad tulemused objektiivi teravustamiskaugused 0,8 m ja 1,5 m. Antud juhutdel oli mõõtmistel kõige vähem moonutusi ning lõpptulemused olid piisavalt head, et katseobjekt ja selle piirjooned olid selgesti eristatavad. Edasiste mõõtmiste korral kasutati objektiivi teravustamiskaugust 0,8 m, kuna antud teravustamisastmega saadud tulemused olid veidi paremad kui 1,5 m korral ja oli mõne piksli jagu vähem tundlik joondamise suhtes.

3.2 Kahemõõtmeline objekt

Kahemõõtmelise objektina kasutati mõõtmistel USAF-i (*United States Air Force*) 1951. aasta eraldusvõime testdiagrammi (joonis 3.10) [17]. Mõõtmistel simuleeriti 8x8 lahutusvõimega madala täiteteguriga kaamerat ning mustrite konstrueerimiseks kasutati 16. järku Hadamard'i maatriksit.



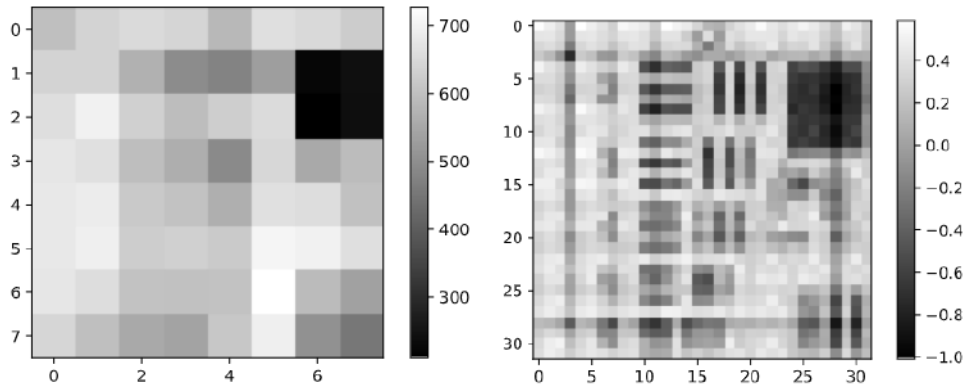
JOONIS 3.10: USAF 1951 eraldusvõime testdiagramm.

Kaamera vaatevälja ei mahtunud kogu testdiagramm seega keskenduti -2 grupi mõõtmisele. Töötlemita simuleeritud kaamera pildid on eristatav ainult suur must ruut kaadri ülaseravas (joonis 3.11). Andmetöötluse tulemusena olid nähtavad kõik -2 grupi ruudud, kuid jooned olid täielikult eristatavad kuni 3. joonte komplektini. Mõõtmiste jaoks suurendati eraldusvõime diagrammi nii, et -2 grupi 3. joonte vahe oli 4,3 mm. Saadud mõõtmise tulemus oli hea, kuna eraldatud joonte vaheline kaugus oli lõpptulemusel vaid üks piksel. Antud tulemus saavutati vaid 32 mustri kuvamisega objektile. Rohkemate mustrite kuvamisega oleks saanud lõpptulemuse lahutust veel kindlasti suurendada.

Mõõtmistulemust saaks parandada joondamise parandamisega. Lõpptulemusel on selgelt näha joondamisest tulenevad mustad jooned pildi välisservades nagu oli näha ka fokuseerimise katsetes. Selle mõõtmise jaoks kasutati diferentsiaalset kummituskuva, kuid kindlasti saaks leida veel viise kuidas signaali ja müra suhet suurendada. Üheks võimaluseks on mõõta kasutusel olnud elektroonikast tulev müra ning see andmetöötluses arvesse võtta.

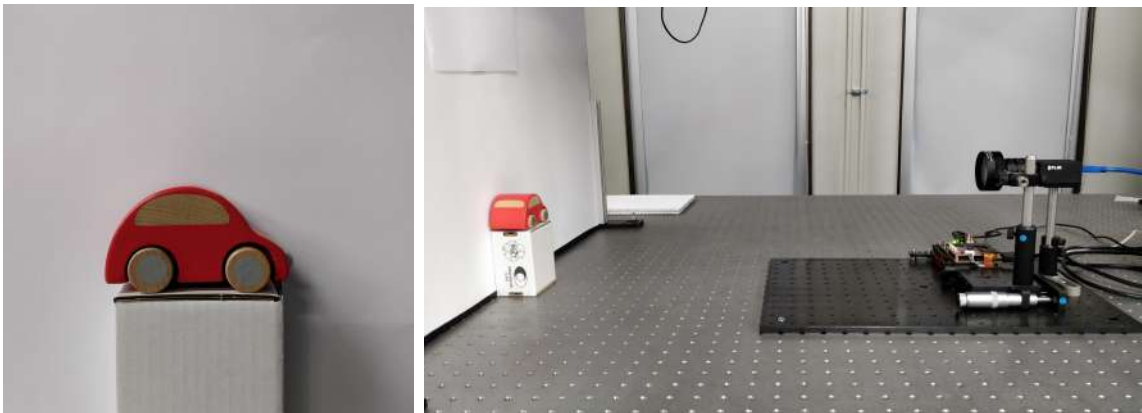
3.3 Kolmemõõtmelised objektid

Viimaste katsetena sooritati mõõtmised erinevate kolmemõõtmeliste objektidega. Mõõtmiste eesmärk oli veenduda, et antud meetodit saab kasutada ka kolmemõõtmeliste objektide puhul ja välja selgitada, kas nendel mõõtmistel tekib süstemaatilisi moonutusi.



JOONIS 3.11: USAF 1951 eraldusvõime testdiagrammi mõõtmise tulemused. Vasakul on simuleeritud kaamera pilt ilma andmetötluseta ja paremal on mõõtmistulemas peale multipleksimist.

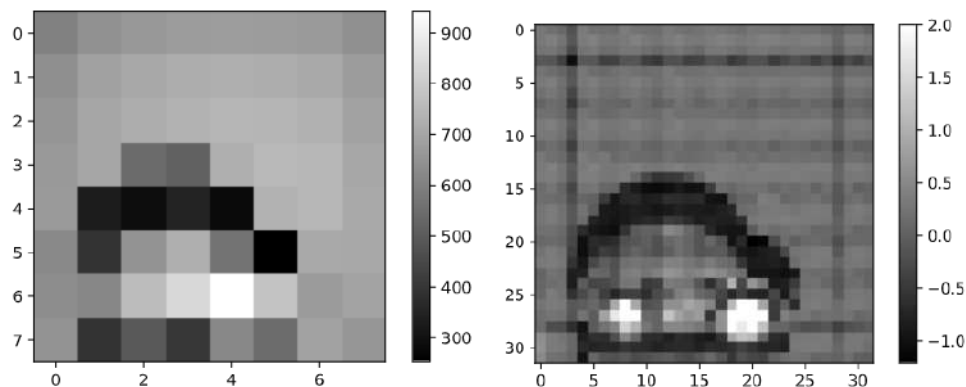
Moonutused võivad antud katses tekkida parallaksiefekti tõttu, kuna projektori ja detektori objektiivid on teineteisest ruumiliselt eraldatud.



JOONIS 3.12: Kolmemõõtmeline katsekeha – mänguauto.

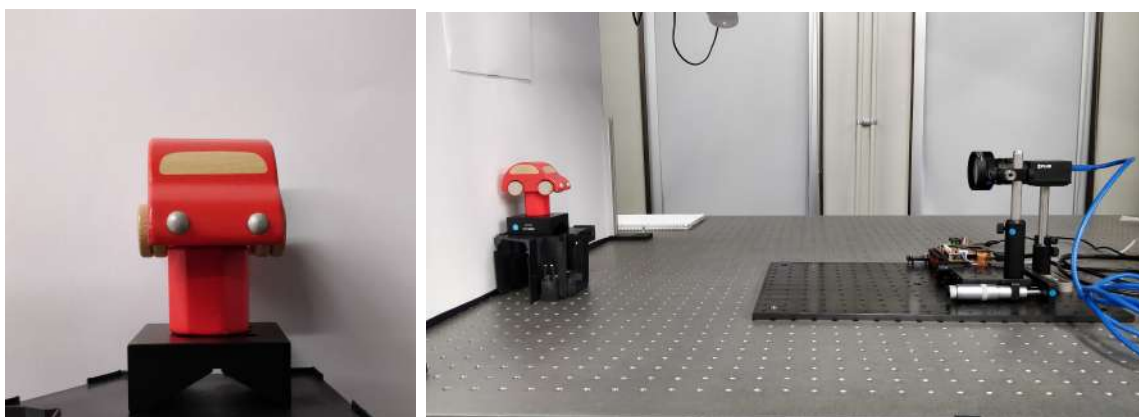
Esimese objektina mõõdeti mänguautot külgsuunas (joonis 3.12). Esimese mõõtmise eesmärk oli teada saada kui palju mõjutab tulemust kui mõõdetav pind tuua taustast lähemale. Kõik katse mõõtmise parameetrid olid samad mis eelnevate mõõtmiste puhul.

Esiatsel simuleeritud kaamera pildil on aru saada, et ekraani ees asub objekt, kuid keeruline on eristada mis objektiga tegu on (joonis 3.13). Pärast andmetötlust on auto kuju ja vari täiesti eristatavad. Lõpptulemuses on auto ja taust sarnase intensiivsusega ning see paistab nii, kuna autor rattad olid kaetud helkiva materjaliga ning sealt peegeldus tagasi rohkem valgust kui teistelt pindadelt. Andmete põhjal olid taust ja auto kere siiski eristatavad, kuid nende intensiivsused olid märgatavalt väiksemad kui auto ratastel.



JOONIS 3.13: Külgvaates mänguauto mõõtmistulemus. Vasakul on simuleeritava kaamera pilt enne andmetöötlust ja paremal on lõpptulemus peale andmetöötlust.

Antud mõõtmine näitas, et suure ühtlase pinnaga kolmemõõtmelise objektiga katset tehes on tulemus võrreldav kahemõõtmelise objektiga. Kasutatava meetodi korral on katseobjekt juba algusest peale defokuseeritud ning objekti asetamine mõjutab küll veidi fokuseerituse taset, kuid mitte nii suurel määral, et see mõjutaks lõpptulemust märgatavalt nagu tuli välja ka teravustamisastmete mõõtmistel.

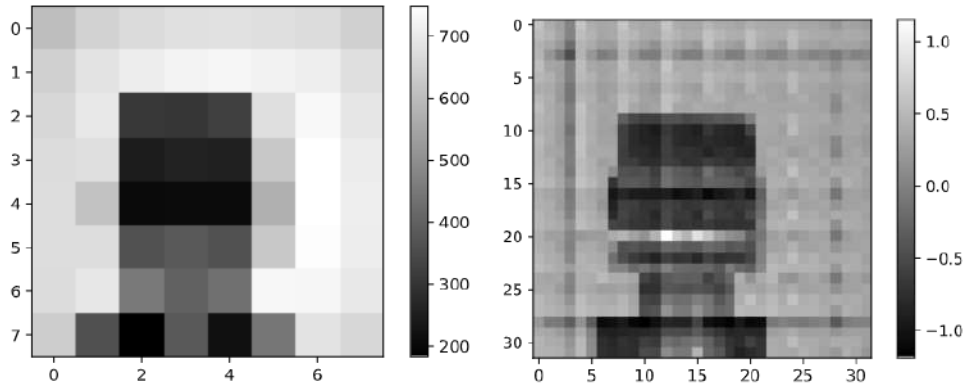


JOONIS 3.14: Kolmemõõtmeline katsekeha – torn erinevatest objektidest.

Teise katse jaoks kasutati mitut erineva kujuga objekti üksteise otsa laotuna (joonis 3.14). Selle mõõtmise eesmärk oli näha kui hästi on eristatavad eri kaugusel ja eri kujuga olevad objektid. Samuti sai aimu kui hästi töötab antud meetod kumeratel pindadel nagu mänguauto esiots.

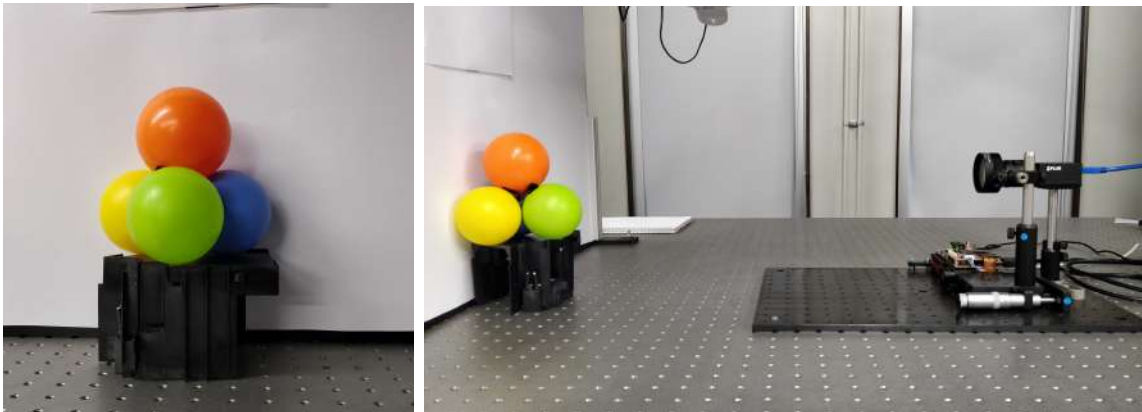
Simuleeritud kaamera pildil on selgesti eristatav umbkaudne mänguauto ja aluse kuju, kuid kitsam posti osa ei ole eristatav (joonis 3.15). Pärast andmetöötlust on kõik objekti osad ilusti eristatavad. Selgelt on näha kitsamat keskmist osa tornist ja koht, kus auto rattad on laiemad kui auto kere. Taaskord on auto helkivad esituled märgatavalt suurema intensiivsusega, kuid antud lõpptulemusel on sellest hoolimata eristatavad kõik torni osad

ja auto erinevatel kaugustel paiknevad osad. Antud mõõtmine tõestas, et valitud meetod on tõhus ka erinevate objekti kujude korral.



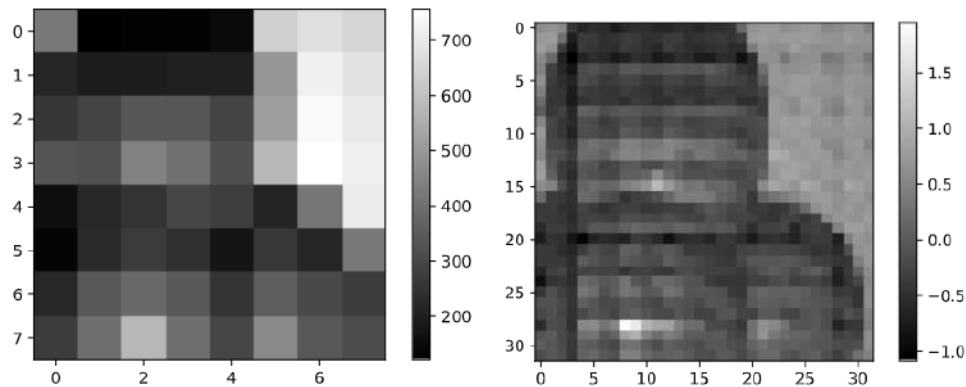
JOONIS 3.15: Külgvaates märguauto mõõtmistulemus. Vasakul on simuleeritava kaamera pilt enne andmetöötlust ja paremal on lõpptulemus peale andmetöötlust.

Viimase kolmemõõtmelise objektina mõõdeti üksteise peale laotud palle (joonis 3.16). Selle mõõtmise eesmärk oli uurida rohkem kumerate objektide mõju mõõtmistulemusele. Pallid olid kõige suuremad mõõdetud objektid, mis andis võimaluse jälgida rohkem erinevate objektide kauguste mõju mõõtmisele.



JOONIS 3.16: Kolmemõõtmeline katsekeha – pallid.

Simuleeritud kaamera töötlemata pildilt saab aimata mis objektiga tegu on, kuid pallide servad on sirged ning hägused (joonis 3.17). Töödeldud pildil on pallide kuju ja servad selged ja taustast kergesti eristatavad. Intensiivsuste erinevuste abil joonistuvad välja ka pallide kumerused. Lõpptulemusel on näha korduvaid moonutusi pallidel, kuid samad moonutused esinevad ka taustal seega on eeldatavasti tegemist joondamise ebatäpsusest tekkinud moonutustega. Mõõtmise põhjal ei saa väita, et pallide kumerused ning kaugus ekraanist oleks mõjutanud mõõtmistulemust silmnähtavalt.



JOONIS 3.17: Pallide mõõtmistulemus. Vasakul on simuleeritava kaamera pilt enne andmetöötlust ja paremal on lõpptulemus peale andmetöötlust.

Kolmemõõtmelisi objekte mõõtes ei tulnud välja ühtegi süstemaatilist viga, mida ei olnud kahemõõtmeliste objektide mõõtmistes. Mõõdetud objektid paiknesid kalibreerimistasandile suhteliselt lähedal ja on võimalik, et teistel kaugustel tekib moonutusi rohkem. See on kindlasti üks osa, mida saaks tulevikus edasi uurida. Kõikidel pildidel tekkinud moonutused olid enamasti seotud kaamera ja projektori pikslite joondamisega. Mõõtmised olid väga tundlikud joondamise suhtes ning ka mõnepikslilise nihke korral pildi väljalõikamisel ei olnud objekt enam eristatav. Korrektse joonduse korral oli kolmemõõtmelistest objektidest tehtud piltide andmetöötluse tulemus võrreldav kahemõõtmeliste objektide mõõtmisel saadud tulemustega. Kahe piksli tundliku ala vahele jäänud informatsioon jäi lõpptulemuses alles ning pikslite koguarv oli kuusteist korda suurem kui esialgsel simuleeritud kaamera pildil. Antud meetod on edukalt kasutatav ka kolmemõõtmeliste objektide mõõtmiseks.

Kokkuvõte

Antud töö eesmärk oli katsetada meetodit SPAD kaamera madala lahutuse ja piiratud täiteteguri kompenseerimiseks. See võimaldab kasutada SPAD kaamerat lahendustes, kus on seda siiani tema puuduste pärast välditud.

Kaamera lahutuse suurendamiseks kasutati diferentsiaalset arvutuslikku kummituskuva ning selle multipleksimist. Piiratud täiteteguri kompenseerimiseks udustati kujutist ja muidu pimedatele aladele jääv informatsioon salvestati kõrvalasuvatel pikslitel. Informatsiooni algne asukoht taastati kasutades mõõdetud süsteemi kostemaatriksit. Töö käigus uuriti, milline on optimaalne teravustamise aste pikslite pimedate alade informatsiooni salvestamiseks. Selleks mõõdeti erinevate teravustamisastmetega punktallika kostet, valget paberit ning objekti. Saadud tulemuste põhjal valiti optimaalseim teravustamisaste ning sooritati mõõtmised kahemõõtmelise ja kolmemõõtmeliste objektidega. Mõõtmiste eesmärk oli teada saada erinevate kujudega objektide mõju mõõtmistulemustele.

Mõõtmistulemustes oli näha mõningaid moonutusi, mis tulenesid ebatäpsustest simuleeritud kaamera ja kuvatavate mustrite vahelisel joondusel. Erinevate objektide mõõtmisel objektidest tulenevaid ootamatuid moonutusi ei esinenud. Kõikide töös sooritatud mõõtmiste korral suurendati lõpptulemuses pildi lahutust kuusteist korda ning seejuures ei täheldatud informatsiooni kadu kaamera pikslite pimedatele aladele. Edasi tuleks antud meetodi katsetada SPAD kaamera peal ning korrigeerida meetodit vastavalt vajadusele. Samuti saaks katsetada kolmemõõtmeliste objektide mõõtmisel kuidas mõjutab kalibreerimistasandi ja objekti vaheline kaugus lõpptulemust.

Töö autor soovib tänada oma juhendajat Andreas Valdmanni, kes vastas kannatlikkusega kõigile tekkinud küsimustele ning aitas hoida motivatsiooni rasketel aegadel. Samuti sooviks tänada Anette Kuuseorgu, kes aitas seada eesmärke ning motiveeris autorit rohkem parema tulemuse nimel pingutama.

Kirjandus

- [1] T. B. Pittman, Y. H. Shih, D. V. Strekalov, and A. V. Sergienko. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement. *Physical Review, A* 52, R3429(R), 1995. URL https://www.researchgate.net/publication/13375899_Optical_imaging_by_means_of_two-photon_quantum_entanglement.
- [2] R. Bennink, S. Bentley, and R. Boyd. “two-photon” coincidence imaging with a classical source. *Physical review letters*, 89:113601, 10 2002. doi: 10.1103/PhysRevLett.89.113601.
- [3] S. Welsh. Applications of single-pixel imaging, University of Glasgow, School of Physics and Astronomy, 2017.
- [4] J. H. Shapiro. Computational ghost imaging. *Physical Review A*, 78(6), Dec 2008. ISSN 1094-1622. doi: 10.1103/physreva.78.061802. URL <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.78.061802>.
- [5] B. Sun, M. P. Edgar, R. Bowman, L. E. Vittert, S. Welsh, A. Bowman, and M. J. Padgett. 3d computational imaging with single-pixel detectors. *Science*, 340(6134):844–847, 2013. ISSN 0036-8075. doi: 10.1126/science.1234454. URL <https://science.sciencemag.org/content/340/6134/844>.
- [6] M.-J. Sun, M. P. Edgar, G. M. Gibson, B. Sun, N. Radwell, R. Lamb, and M. J. Padgett. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution. *Nature Communications*, 7(1), Jul 2016. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/ncomms12010. URL <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms12010>.
- [7] S. Welsh, M. P. Edgar, R. Bowman, P. Jonathan, B. Sun, and M. J. Padgett. Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors. *Optics express*, 21(20): 23068–23074, 2013.
- [8] M.-J. Sun, M. P. Edgar, D. B. Phillips, G. M. Gibson, and M. J. Padgett. Improving the signal-to-noise ratio of single-pixel imaging using digital microscanning. *Optics express*, 24(10):10476–10485, 2016.
- [9] B. Sun, M. P. Edgar, R. Bowman, L. E. Vittert, S. Welsh, A. Bowman, and M. J. Padgett. Differential computational ghost imaging. In *Imaging and Applied Optics*, page CTu1C.4. Optical Society of America, 2013. doi: 10.1364/COSI.2013.CTu1C.4. URL <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=COSI-2013-CTu1C.4>.
- [10] SPAD lab Milano Politecnico. Spad-camera. <http://www.everyphotoncounts.com/instr-imager2d.php>.

-
- [11] F. Guerrieri, S. Tisa, A. Tosi, and F. Zappa. Single-photon camera for high-sensitivity high-speed applications. In Erik Bodegom and Valérie Nguyen, editors, *Sensors, Cameras, and Systems for Industrial/Scientific Applications XI*, volume 7536, pages 38 – 47. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2010. doi: 10.1117/12.838958. URL <https://doi.org/10.1117/12.838958>.
- [12] H. Xu, L. Pancheri, L. Braga, G.-F. Dalla Betta, and D. Stoppa. Crosstalk characterization of single-photon avalanche diode (spad) arrays in cmos 150nm technology. *Procedia Engineering*, 87:1270–1273, 12 2014. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.417.
- [13] I. Vornicu, R. Carmona-Galan, and A. Rodriguez-Vazquez. Live demonstration: Photon counting and direct tof camera prototype based on cmos spads. In *2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pages 1–1, 2017. doi: 10.1109/ISCAS.2017.8050392.
- [14] F. Li, H. Chen, A. Pediredla, C. Yeh, K. He, A. Veeraraghavan, and O. Cossairt. Cstof: High-resolution compressive time-of-flight imaging. *Opt. Express*, 25(25):31096–31110, Dec 2017. doi: 10.1364/OE.25.031096. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-25-25-31096>.
- [15] H. Chen, M. Salman Asif, A. C. Sankaranarayanan, and A. Veeraraghavan. Fpa-cs: Focal plane array-based compressive imaging in short-wave infrared. In *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 2358–2366, 2015. doi: 10.1109/CVPR.2015.7298849.
- [16] J. Ariva. Arvutuslik kummituskuva videoprojektori kuvasuhtega, bakalaureusetöö, Tartu ülikool, 2019.
- [17] U.S. Air Force. Mil-std-150a standard, 1951.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Robert Kuks,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Meetod SPAD kaamera lahutuse arvutuslikuks suurendamiseks,

mille juhendaja on Andreas Valdmann, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Robert Kuks,
31.05.2021