



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



Željko Santoši, mast. inž. maš.

3D DIGITALIZACIJA POVRŠI BEZ KARAKTERISTIČNIH OBELEŽJA PRIMENOM BLISKO-PREDMETNE FOTOGRAMetriJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentori:

dr Igor Budak, vanr. prof.

dr Vesna Stojaković, vanr. prof.

Novi Sad, 2020. godine



KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, RBR:		
Identifikacioni broj, IBR:		
Tip dokumentacije, TD:	Monografska dokumentacija	
Tip zapisa, TZ:	Tekstualni štampani materijal	
Vrsta rada, VR:	Doktorska disertacija	
Autor, AU:	Željko Santoši, master inženjer mašinstva	
Mentori, MN:	Dr Igor Budak, vanredni profesor Dr Vesna Stojaković, vanredni profesor	
Naslov rada, NR:	3D digitalizacija površi bez karakterističnih obeležja primenom blisko-predmetne fotogrametrije	
Jezik publikacije, JP:	Srpski	
Jezik izvoda, Jl:	Srpski/Engleski	
Zemlja publikovanja, ZP:	Republika Srbija	
Uže geografsko područje, UGP:	Autonomna Pokrajina Vojvodina	
Godina, GO:	2020.	
Izdavač, IZ:	Autorski reprint	
Mesto i adresa, MA:	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Fizički opis rada, FO: <small>(poglavljja/strana/ citata/tabela/slika/grafika/priloga)</small>	8/113/168/20/86/-/-	
Naučna oblast, NO:	Mašinsko inženjerstvo	
Naučna disciplina, ND:	3D digitalizacija	
Predmetna odrednica/Ključne reči, PO:	Blisko-predmetna fotogrametrija, sintetičke slike, svetlosne teksture,	
UDK		
Čuva se, ČU:	Biblioteka Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad	
Važna napomena, VN:		
Izvod, IZ:	Kreiranje 3D modela i njihova vizuelizacija postali su sastavni deo procesa razvoja novih ili redizajniranja postojećih proizvoda. U ovom istraživanju pažnja je posvećena rešavanju problema 3D digitalizacije kod blisko-predmetne fotogrametrije zasnovane na određivanju strukture iz kretanja, na površima bez karakterističnih obeležja primenom projektovanja sintetički generisanih slika u vidu svetlosnih tekstura. Akcenat je stavljen na generisanje novih sintetičkih slika koje imaju izraženu vizuelnu teksturu, njihovu evaluaciju i primenu na objektima sa monotonim vizuelnim površima sa ciljem podizanja ukupne tačnosti rekonstruisanih 3D modela. Verifikacija primene sintetičkih slika i njihovih svetlosnih tekstura sa aspekta geometrijske i dimenzione tačnosti je realizovana primenom računarom podržane inspekcije (CAD inspekcije).	
Datum prihvatanja teme, DP:	05.10.2017.	
Datum odbrane, DO:		
Članovi komisije, KO:	Predsednik:	Dr Miodrag Hadžistević, redovni profesor
	Član:	Dr Duško Pavletić, redovni profesor
	Član:	Dr Ratko Obradović, redovni profesor
	Član:	Dr Đorđe Vukelić, vanredni profesor
	Član:	Dr Aleksandar Ristić, redovni profesor
	Član, mentor 1	Dr Igor Budak, vanredni profesor
	Član, mentor 2	Dr Vesna Stojaković, vanredni profesor



KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph documentation
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Ph.D. Thesis
Author, AU :	Željko Santoši, M.Sc.
Mentors, MN :	dr Igor Budak, Associate professor dr Vesna Stojaković, Associate professor
Title, TI :	3D digitization of texture-less surfaces using close-range photogrammetry
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2020.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8/113/168/20/86/-/-
Scientific field, SF :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, SD :	3D digitization
Subject/Key words, S/KW :	Close Range Photogrammetry, synthetic images, light textures
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	The creation of 3D models and their visualization have become an integral part of the process of developing new or redesigning existing products. In this research, attention was paid to solving the problem of 3D digitization in close-range photogrammetry based on the structure from motion on surfaces without characteristic features by designing synthetically generated images in the form of light textures. An accent is placed on the generation of new synthetic images that have a pronounced visual texture, their evaluation, and application on objects with monotonous visual surfaces with the aim of raising the overall accuracy of reconstructed 3D models. The verification of the application of synthetic images and their light textures from the aspect of geometric and dimensional accuracy was realized through the use of computer-aided inspection (CAI inspection).
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	05.10.2017
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Dr Miodrag Hadžistević, Full professor
Member:	Dr Duško Pavletić, Full professor
Member:	Dr Ratko Obradović, Full professor
Member:	Dr Đorđe Vukelić, Associate professor
Member:	Dr Aleksandar Ristić, Full professor
Member, Mentor 1	Dr Igor Budak, Associate professor
Member, Mentor 2	Dr Vesna Stojaković, Associate professor
	Mentor's signs

Zahvalnica

Ova doktorska disertacija predstavlja sintezu višegodišnjeg rada na polju 3D digitalizacije i reverzibilnog inženjerstva u oblasti blisko-predmetne fotogrametrije.

Pre svega, želim da izrazim iskrenu zahvalnost svom prvom mentoru vanr. prof. dr Igoru Budaku na konstantnoj podršci tokom svih godina mojih studija, za njegovo strpljenje, motivaciju, savete i stručnost. Isto tako, želim da se zahvalim i svom drugom mentoru vanr. prof. dr Vesni Stojaković na razumevanju, sugestijama, efikasnosti, znanju i izuzetnoj saradnji. Njihovo zajedničko vođenje mi je pomoglo tokom istraživanja i pisanja ove doktorske disertacije. Nisam ni mogao zamisliti da imam bolje mentore za moje doktorske studije.

Pored mentora, zahvaljujem se svim članovima Komisije koji su doprineli da se ova doktorska disertacija podigne na jedan viši nivo. Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Miodragu Hadžisteviću na odmerenim komentarima i ohrabrenju koje me podstaklo da proširim svoja istraživanja, prof. dr Dušku Pavletiću na konstruktivnim savetima i sugestijama, prof. dr Đorđetu Vukeliću i prof. dr Ratku Obradoviću na stručnim savetima i tehničkoj podršci.

Takođe, zahvaljujem se svim svojim prijateljima, a posebno kolegama sa Katedre za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko inženjerske aspekte koji su uvek bili uz mene i imali razumevanja tokom svih ovih godina, koji su moja druga porodica.

Na kraju, hteo bih da se zahvalim svojoj porodici, gde su roditelji Ana i Đuro, sestra Monika, bili moji moralni pokretači i podrška tokom pisanja ove doktorske disertacije i mog života uopšte.

Iskreno Željko Santoši

SADRŽAJ

PREGLED SLIKA.....	I
PREGLED TABELA	IV
PREGLED KORIŠĆENIH AKRONIMA.....	V
1. UVOD.....	7
1.1 Predmet istraživanja	10
1.2 Cilj istraživanja i hipoteze	14
1.3 Struktura doktorske disertacije.....	15
2. ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U OBLASTI.....	17
2.1 Detektori i deskriptori kod 3D digitalizacije primenom SfM-a	21
2.1.1 SIFT - Scale Invariant Feature Transform	24
2.1.2 SURF - Speeded-Up Robust Features deskriptor	26
2.2 Analiza primene svetlosnih tekstura kod CRP zasnovanoj na SfM.....	26
2.3 Istraživanja u ovoj disertaciji	32
3. SINTETIČKE SLIKE I SVETLOSNE TEKSTURE	33
3.1 Generisanje sintetičkih slika na osnovu decimala iracionalnih brojeva	34
3.1.1 Klasa I	37
3.1.2 Klasa II	38
3.1.3 Klasa III A.....	39
3.1.4 Klasa III AEq	40
3.2 Generisanje sintetičkih slika na bazi determinističkih algoritama.....	40
3.2.1 Sintetičke slike uniformnog histograma	41
3.2.2 Sintetičke slike sa histogramom u obliku normalne raspodele	44
3.2.3 Sintetičke slike sa kombinovanim histogramom	45
3.3 Uređaji za projektovanje svetlosnih tekstura.....	46
3.3.1 DLP projektori	48
3.3.2 LCD projektori	49
3.4 Svetlosne teksture	50
4. KOMPARATIVNA ANALIZA SINTETIČKI GENERISANIH SLIKA I SVETLOSNIH TEKSTURA	54
4.1 Deskriptivni statistički pokazatelji kvaliteta sintetičke slike.....	54
4.2 Višekriterijumska analiza sintetičkih slika	56
4.3 Metoda planarne 3D digitalizacije	59

4.3.1 Realna planarna 3D digitalizacija	61
4.3.2 Virtualna planarna 3D digitalizacija	63
4.4 Rezultati komparativne analize sintetičkih slika i svetlosnih tekstura	64
4.4.1 Diskusija rezultata komparativne analize	67
5. ANALIZA UTICAJA KOORDINACIJE KOMPONENTI SISTEMA 3D DIGITALIZACIJE CRP ZASNOVANE NA ODREĐIVANJU SfM	68
5.1 Statičan projektor i objekat, pokretna kamera - sistem 1	71
5.2 Obrtni sto sa projektorom, statična kamera - sistem 2.....	72
5.3 Obrtni sto, fiksna kamera i projektor - sistem 3.....	73
6. VERIFIKACIJA SINTETIČKIH SLIKA I SVETLOSNIH TEKSTURA KOD CRP .	75
6.1 Studija slučaja 1 - Aluminijski test model	76
6.1.1 Akvizicija fotografija.....	77
6.1.2 Post procesiranje fotografija i generisanje 3D modela	80
6.1.3. Merenje aluminijumskog test modela na KMM.....	81
6.1.4 CAD inspekcija i provera geometrijske tačnosti	83
6.1.5 Diskusija rezultata	88
6.2 Studija slučaja 2 - Dentalni model.....	89
6.2.1 Akvizicija fotografija.....	90
6.2.2 Postprocesiranje fotografija i generisanje 3D modela	92
6.2.3 CAD inspekcija dentalnog modela	94
6.2.4 Diskusija rezultata	96
7. ZAKLJUČCI.....	98
7.1 Naučni i stručni doprinosi.....	100
7.2 Pravci budućih istraživanja	100
8. LITERATURA.....	102

PREGLED SLIKA

Slika 1.1. Proširena podela metoda 3D digitalizacije.....	8
Slika 1.2. Princip CRP zasnovane na SfM.	10
Slika 1.3. Epipolarna geometrija dve fotografije [22].	11
Slika 1.4. Nepovoljne vizuelne površi metalnih i polimernih objekata sa aspekta 3D digitalizacije CRP na bazi SfM:	12
Slika 2.1. Broj radova u proteklih 10 godina koji su u naslovu, ključnim rečima ili apstraktu sadržavali reč „Photogrammetry“ u bazama Science Direct i Scopus.	18
Slika 2.2. Broj radova u proteklih 10 godina koji su u naslovu, ključnim rečima ili apstraktu sadržavali reči „Structure from Motion“ u bazama Science Direct i Scopus.	18
Slika 2.3. Opcije obrade fotografija kod CRP prema stepenu automatizacije [65]....	19
Slika 2.4. Tok detekcije i deskripcije lokalnog obeležja [81].	21
Slika 2.5. Hronološki razvoj detektora i deskriptora lokalnih obeležja u poslednje dve decenije [88].	23
Slika 2.6. Piramidalna detekcija karakteristične tačke [81].	25
Slika 2.7. Šematski prikaz SIFT deskriptora za regiju 16 x 16 pix i veličinu polja deskriptora 4 x 4 [79].	25
Slika 2.8. Drugi izvod Gausove funkcije u različitim pravcima:	26
Slika 2.9. Šema toka snimanja fotografija, 3D rekonstrukcije i evaluacije rekonstruisanih površi objekata bez karakterističnih obeležja [98].	27
Slika 2.10. Svetlosne teksture:	27
Slika 2.11. Primeri korišćenih sintetičkih slika za projektovanje svetlosnih tekstura: 28	
Slika 2.12. Sintetičke slike generisane na osnovu determinističkih algoritama [60]. 28	
Slika 2.13. Sintetičke slike:	29
Slika 2.14. Poboljšanje vizuelnih karakteristika kodiranim i nekodiranim markerima:	30
Slika 2.15. 3D digitalizacija torza:	30
Slika 2.16. Sistem za fotogrametrijsku 3D digitalizaciju objekata bez izražene vizuelne teksture:	31
Slika 2.17. Sistem za fotogrametrijsku 3D digitalizaciju površi bez vizuelne teksture:	31
Slika 3.1. Digitalna slika:	33
Slika 3.2. Transformacija sintetičke slike u svetlosnu teksturu.	34
Slika 3.3. Grafički prikaz zlatnog preseka kod konstrukcije spirale.	35
Slika 3.4. Grafički prikaz odnosa stranice i dijagonale kvadrata.	36
Slika 3.5. Grafički prikaz odnosa stranice i dijagonale kocke.	36
Slika 3.6. Šematski prikaz kreiranja sintetičkih slika generisane na osnovu cifara iracionalnih brojeva [123].	37
Slika 3.7. Kod napisan u Matlab softverskom paketu za generisanje sintetičkih slika klase I na osnovu decimala iracionalnih brojeva [123].	38

Slika 3.8. Slika generisana na osnovu decimala broja π (π I):	38
Slika 3.9. Grafički prikaz sintetičke slike klase II:	39
Slika 3.10. Grafički prikaz sintetičke slike klase III A:	39
Slika 3.11. Sintetička slika klase III AEq:	40
Slika 3.12 Randi funkcija – Matlab.	41
Slika 3.13. Šema generisanja sintetičkih slika na osnovu generatora nasumičnih brojeva [123].	42
Slika 3.14. Kod napisan u Matlabu za kreiranje sintetičke slike klase I.	42
Slika 3.15. Randi I sintetička slika:	42
Slika 3.16. Randi II sintetička slika:	43
Slika 3.17. Rand III slika generisana funkcijom nasumičnog niza sa 256 nijansi sive: a) vizuelna interpretacija b) histogram [123].....	44
Slika 3.18. Gausova sintetička slika i histogram:.....	45
Slika 3.19. Grafički prikaz konstruisanja wavelet nasumičnog šuma:.....	45
Slika 3.20. Wavelet sintetička slika:	46
Slika 3.21. Osnovne vrste video projektora DLP i LCD [132].	47
Slika 3.22. Princip rada DLP projektora [134].....	49
Slika 3.23. Princip rada LCD projektora [135].	50
Slika 3.24. Svetlosne teksture u prirodi:	51
Slika 3.25. Veštačke svetlosne teksture:	52
Slika 3.26. Primeri vizuelne teksture koji se mogu naći u prirodi povoljnih za primenu SfM fotogrametrijske metode:	53
Slika 4.1. Princip akvizicije fotografija kod realne planarne 3D digitalizacije [123]. ...	62
Slika 4.2. Postavka virtualne planarne 3D digitalizacije u Blender-u za verifikaciju svetlosnih tekstura.....	63
Slika 4.3 Statxture funkcija Matlab.	64
Slika 4.4 Stats komanda – Matlab.....	64
Slika 4.5. TOPSIS rezultati rangiranja sintetičkih slika.	65
Slika 4.6. Rezultati virtualnog i realnog eksperimenta planarne 3D digitalizacije.	66
Slika 5.1. 3D vidno polje i bazna osnova stereo para kod ljudske stereovizije [156].	68
Slika 5.2. Prikaz strategije za fotografisanje primenom koncentrisanja fotografija sa 5 grupa fotografija:	70
Slika 5.3. Komponente sistema za 3D digitalizaciju CRP i projektovanom svetlosnom teksturom.	71
Slika 5.4. Relativni položaj komponenti u sistemu 1:.....	72
Slika 5.5. Relativni položaj komponenti u sistemu 2:.....	73
Slika 5.6. Relativni položaj komponenti u sistemu 3:.....	74
Slika 6.1. Algoritam toka verifikacije sintetičkih slika i njihovih svetlosnih tekstura...	75
Slika 6.2. Osnovni tok CAD inspekcije [163].	76
Slika 6.3. Aluminijski test model:	77
Slika 6.4. Canon 5D Mark III sa Canon EF 50 mm f / 1.2L USM objektivom.....	78
Slika 6.5. Poravnavanje fotografija:.....	79
Slika 6.6. Uspostavljanje razmere na poligonalnom 3D modelu preko kodiranih markera.....	81

Slika 6.7. Merenje geometrijskih oblika na KMM.	81
Slika 6.8. Primer merenja ravni na KMM.	82
Slika 6.9. Primer merenja cilindra na KMM.	82
Slika 6.10. CAD inspekcija aluminijumskog test modela bez svetlosne teksture.....	83
Slika 6.11. CAD inspekcija aluminijumskog test modela pi I svetlosna tekstura.....	83
Slika 6.12. CAD inspekcija aluminijumskog test modela randi II svetlosna tekstura.	84
Slika 6.13. CAD inspekcija aluminijumskog test modela randi III svetlosna tekstura.	84
Slika 6.14. Oznake kontrolisanih površi.....	86
Slika 6.15 Odstupanje izmerenih rastojanja na fotogrametrijskim modelima u odnosu na KMM.....	87
Slika 6.16. Odstupanje radijusa od KMM.	87
Slika 6.17. Odstupanje uglova od KMM.	87
Slika 6.18. Dentalni model:.....	90
Slika 6.19. Canon 1200D sa objektivom EFS 18 – 55 mm.....	91
Slika 6.20. Postavka komponenti sistema kamera, video projektor, objekat.	91
Slika 6.21. Akvizicija fotografija:	92
Slika 6.22. Oblaci tačkaka niske rezolucije dentalnog modela:	93
Slika 6.23. Uspostavljanje razmere dentalnog modela.....	94
Slika 6.24. Rezultati CAD inspekcije dentalnog modela bez svetlosne teksture	94
Slika 6.25 Rezultati CAD inspekcije dentalnog modela randi III	95
Slika 6.26 Rezultati CAD inspekcije dentalnog modela wavelet	95
Slika 6.27 Rezultati CAD inspekcije dentalnog modela pi I	96

PREGLED TABELA

Tabela 2.1. Pregled dostupnih fotogrametrijskih softvera u 2019 godini [78].	20
Tabela 2.2. Pregled postojećih prilaza u detektovanju i deskriptovanju lokalnih obeležja [88].	23
Tabela 4.1. Statistički pokazatelji prvog reda [112].	55
Tabela 4.2. Statistički pokazatelji drugog reda [141,143].	56
Tabela 4.3. Izračunate vrednosti statističkih pokazatelja za da te sintetičke slike.	65
Tabela 4.4. Rezultati realne i virtualne planarne 3D digitalizacije dobijeni pomoću Agisoft Metashape softvera.	66
Tabela 5.1. Zavisnost najbliže tačke 3D stereo polja u zavisnosti od žižne daljine objektiva i bazne osnove stereo para (podaci u tabeli prikazani su u metrima) [157].	69
Tabela 6.1. Podešavanje kamere za date uslove osvetljenja.	78
Tabela 6.2. Tehničke karakteristike EPSON EB-1761W video projektora.	79
Tabela 6.3. Rezultati 3D rekonstrukcije oblaka tačaka niske rezolucije.	80
Tabela 6.4. Rezultati CAD inspekcije za aluminijumski test model.	84
Tabela 6.5. Izmerena odstupanja ispitivanih tolerancija oblika u odnosu na CAD model.	85
Tabela 6.6. Pregled ispitivanih dimenzionih karakteristika i izmerene vrednosti odstupanja.	86
Tabela 6.7. Ocena svetlosnih tekstura.	89
Tabela 6.8. Podešavanje kamere za date uslove osvetljenja.	91
Tabela 6.9. Rezultati prve faze 3D digitalizacije dentalnog modela.	93
Tabela 6.10. Rezultati CAD inspekcije.	96
Tabela 6.11. Ocena svetlosnih tekstura.	97

PREGLED KORIŠĆENIH AKRONIMA

Akronim	Naziv na engleskom	Naziv na srpskom
2D	Two Dimension	Dvodimenzionalni
3D	Three Dimension	Trodimenzionalni
APS-C	Advanced Photo System type-C	Napredni foto sistem tip C
BRISK	Binary Robust Invariant Scalable Key points	/
CAD	Computer Aided Design	Računarom podržano projektovanje
CAGR	Compound Annual Growth Rate	Godišnja stopa rasta tržišta
CAI	Computer Aided Inspection	Računarom podržana inspekcija
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	Komplementarni metaloksidni poluprovodnik
CNC	Computer Numerical Control	Računarom podržano numeričko upravljanje
CRP	Close-Range Photogrammetry	Blisko-predmetna fotogrametrija
CT	Computer Tomography	Kompjuterizovana tomografija
DLP	Digital Light Processing	Digitalno procesiranje svetlosti
DMD	Digital Micro-mirror Device	Digitalno mikro-opto-elektromehanički uređaj
DoF	Depth of Field	Polje dubinske oštine
DoG	Difference of Gaussians	Razlika Gausovog zamućenja
DSLR	Digital Single Lens Reflex	Digitalni jednoobjektivna refleksna
EF-S	Electro-Focus - Small image circle	Elektro fokus – mali krug slike
ENE	Energy	Energija
ENT	Entropy	Entropija
FAST	Features from Accelerated Segment Test	/
GLCM	Gray Level Co-occurrence Matrix	Matrica ponovljivosti nijanse sive
GSD	Ground Sample Distance	Veličina pokrivenosti površi jednim pikselom
HOM	Homogeneity	Homogenost
IoT	Internet of Things	Internet stvari
ICP	Iterative Closest Points	Iterativna najbliža tačka
JPEG	Joint Photographic Experts Group	Format zapisa digitalne slike/fotografije
KMM	Coordinate measuring machine	Koordinatna merna mašina
KON	Contrast	Kontrast

KOR	Correlation	Korelacija
LCD	Liquid Crystal Display	Ekran sa tečnim kristalima
LED	Light-emitting diode	Dioda koja emituje svetlost
MG	Maximal error	Maksimalna greška
MPE	Maximum Permissible Error	Maksimalna dozvoljena greška
MRI	Magnetic Resonance Imaging	Magnetna rezonanca
MSER	Maximally Stable Extremal Regions	Maksimalno stabilni ekstremni regioni
MVS	Multi-View Stereovision	Više-pogledna stereovizija
MVSS	Multi View Sensor System	Više-pogledni senzorski sistem
NFP	Noise Function-based Pattern	Obrasci bazirani na determinističkim algoritmima
NRP	Non-Repeating Pattern	Ne ponavljajući obrasci
ORB	Oriented fast and Rotated Brief	/
RE	Reverse Engineering	Reverzibilno inženjerstvo
RT	Reconstructed points	Rekonstruisane tačke
SfM	Structure from Motion	Struktura iz kretanja
SIFT	Scale Invariant Feature Transform	/
SKG	Root mean square error	Srednja kvadratna greška
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	Simultana lokalizacija i mapiranje
STD	Standard deviation	Standardna devijacija
SURF	Speeded-Up Robust Feature	/
SV	Mean value	Srednja vrednost
TM	Third moment	Treći moment
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution	Tehnika za preferenciju reda po sličnosti sa idealnim rešenjem
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	bespilotna letelica
UJE	Smoothness	Ujednačenost
UNI	Uniformity	Uniformnost
USD	United State Dollar	Američki dolar
USM	Ultra Sonic Motor	Ultrazvučni motor
Win	Windows	Operativni sistem Windows

1. UVOD

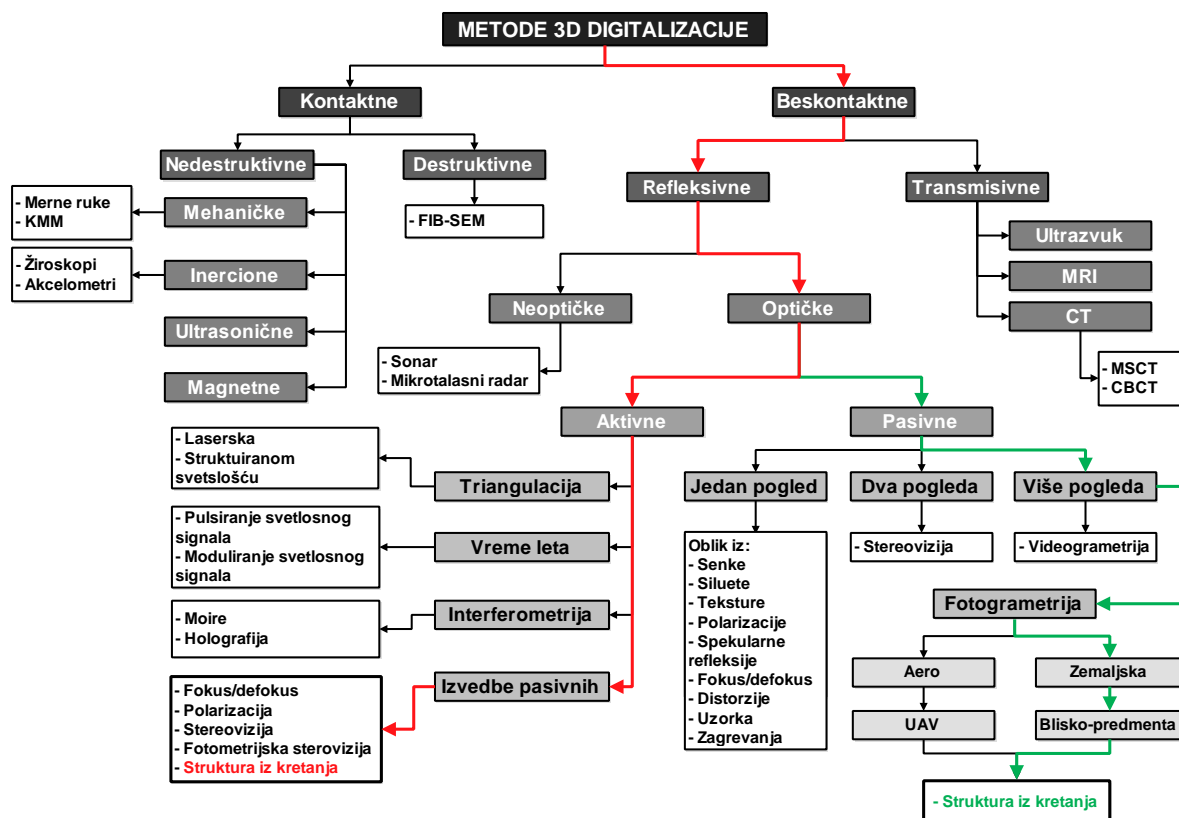
Popularnost trodimenzionalnih (3D) tehnologija u raznim oblastima industrije, učinila je da kreiranje 3D modela i njihova vizuelizacija postanu sastavni deo procesa razvoja novih ili redizajniranja postojećih proizvoda. Drugim rečima 3D modeli predstavljaju matematičku reprezentaciju trodimenzionalnog objekta. Jedan od načina kreiranja 3D modela je uz pomoć softverskih paketa baziranih na računaru podržanom dizajnu (engl. *Computer Aided Design - CAD*), a pored toga izdvaja se i način kreiranja 3D modela primenom tehnike reverzibilnog inženjerstva (engl. *Reverse Engineering - RE*) [1].

RE je tehnika koja se zasniva na merenju geometrijskih karakteristika fizičkog objekta, u vidu velikog broja tačaka i rekonstrukcije 3D modela. Merenje geometrijskih karakteristika fizičkog objekta može se vršiti konvencionalnim instrumentima za merenje (kljunasta pomična merila, visinomeri, dubinomeri itd.), ali se najčešće ovakvim načinom merenja ne može prikupiti dovoljan broj tačaka za rekonstrukciju složenih površi zadovoljavajućeg nivoa tačnosti u prihvatljivom vremenskom intervalu. Sa druge strane razvijen je veliki broj metoda 3D digitalizacije [2,3] koje omogućavaju merenje i akviziciju velikog broja tačaka na složenim površima u jedinici vremena. Shodno tome, 3D digitalizacija predstavlja proces prikupljanja podataka (tačaka), najčešće u formi Dekartovih koordinata, sa površi trodimenzionalnog fizičkog objekta i njihovog prevođenja u računarski razumljiv oblik. Oblici digitalizovanih površi mogu biti kako prostog tako i složenog geometrijskog oblika [3].

Osnovni pokretači razvoja metoda 3D digitalizacije su povećana potražnja za 3D modelima radi unapređenja industrijske proizvodnje i kontrole kvaliteta [4]. Rezultati 3D digitalizacije koriste se kao ulazne informacije za potrebe 3D štampe [5], u oblastima mašinskog i industrijskog inženjerstva, biomedicini [6,7] i drugim. Takođe, koriste se za razvoj virtuelne i proširene virtuelne realnosti, potrebi za dokumentovanjem i arhiviranjem geometrijskih i/ili atributivnih karakteristika objekata kulturnog i arhitektonskog nasleđa [8–11]. Ulaskom u novu industrijsku revoluciju (industrija 4.0) potreba za tačnim kreiranjem virtuelnih 3D modela je podignuta na još viši nivo [12].

Zbog velikog broja do danas razvijenih metoda 3D digitalizacije nastale su i razne podele [2,13–15]. Na osnovu prethodnih podela, razvijena je proširena podela, koja

takođe obuhvata kontaktne i beskontaktno, kao i dopunu aktivnih i pasivnih optičkih refleksivnih metoda (Slika 1.1). Kontaktne i beskontaktno metode 3D digitalizacije čine dve osnovne grupe metoda. Kontaktne metode zasnivaju se na ostvarivanju fizičkog kontakta između mernog senzora i površi objekta 3D digitalizacije, a razlikuju se destruktivne i nedestruktivne metode. Destruktivna metoda kao što i sam naziv kaže, prilikom 3D digitalizacije podrazumevaju razaranje objekta. Nedestruktivne metode su zbog svoje visoke tačnosti našle široku primenu u industriji, tačnije u kontroli kvaliteta proizvoda [16].



Slika 1.1. Proširena podela metoda 3D digitalizacije.

Beskontaktno metode mogu se podeliti prema vrsti elektromagnetnog zračenja i vrsti mehaničkih talasa koji se koriste u postupku 3D digitalizacije. U okviru ove podgrupe razlikuju se transmisivne i refleksivne metode. U beskontaktno metode, spadaju transmisivne metode (kompjuterizovana tomografija (engl. *Computer Tomography* - CT), magnetna rezonanca (engl. *Magnetic Resonance Imaging* - MRI) i ultrazvuk [17,18], dok su refleksivne podeljene na optičke i neoptičke. Neoptičke metode zasnivaju se na detekciji mikro i ultrazvučnih talasa (mikrotalasni radar, sonar) [19]. Refleksivne optičke metode bazirane na delu elektromagnetnog spektra koji odgovara vidljivoj svetlosti, a dalje se dele na aktivne i pasivne metode [20,21].

Kod pasivnih optičkih metoda 3D digitalizacije, na posmatrani objekat 3D digitalizacije se ne projektuje svetlost iz veštačkog izvora, već se pomoću pasivnih senzora

prikupljaju reflektovani zraci najčešće ambijentalne ili dnevne svetlosti. Pasivne optičke metode mogu biti izvedene sa jednim pogledom (engl. *monocular vision*), dva pogleda (engl. *binocular vision*) ili više pogleda (engl. *multi-vision*) na posmatrani objekat [22]. Reprezentativni predstavnici jednoglednih metoda su: 3D digitalizacija fokusiranjem-defokusiranjem (engl. *Shape from Focus/Defocus*) [23], metode generisanja 3D modela na bazi silueta (engl. *Shape from Silhouette*) [24], metode generisanja 3D modela na bazi senki (engl. *Shape from Shading*) [25], zatim metode generisanja 3D modela na bazi teksture (engl. *Shape from Texture*) [26]. Među jednoglednim metodama spadaju i metode na bazi spekularne refleksije (engl. *Shape from Specular Flow*) [27], polarizacije (engl. *Shape from Polarization*) [28], distorzije (engl. *Shape from Distorsion*) [29], zagrevanja (engl. *Shape from Heating*) [30] i uzorka (engl. *Shape from Template*) [31].

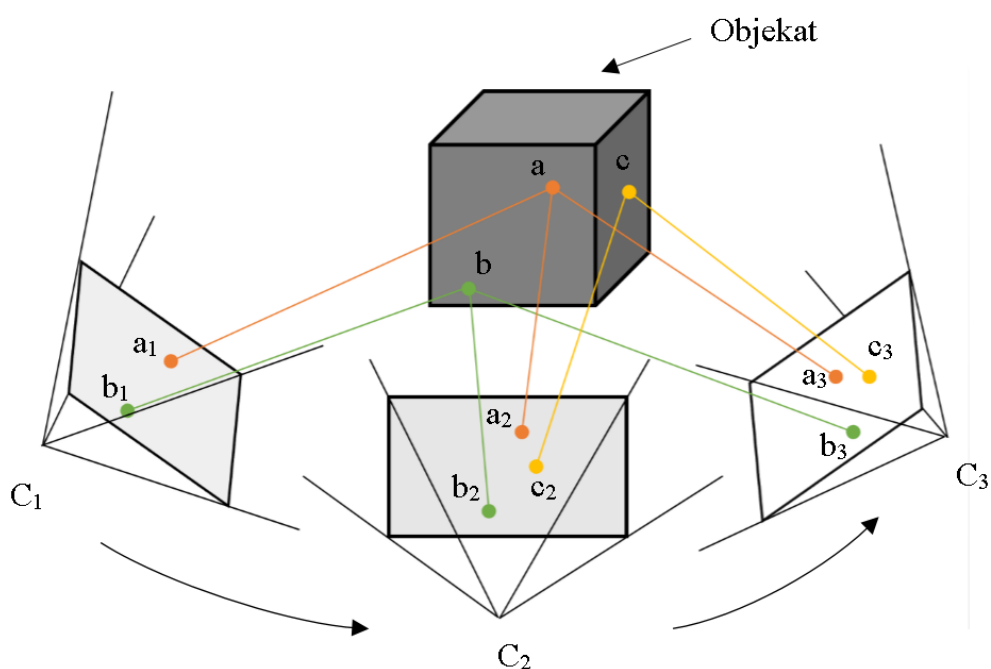
Od pasivnih metoda kod kojih se istovremeno koriste dve fotografije izdvaja se stereovizija [20], dok se kod višepoglednih izdvaja fotogrametrija i videogrametrija [32]. Fotogrametrija može biti izvedena kao aero (engl. *Aerial*) ili zemaljska (engl. *Terrestrial*), što samo govori o načinu akvizicije fotografija. Ukoliko se akvizicija fotografija vrši sa zemlje onda se radi o blisko predmetnoj fotogrametriji (engl. *Close-Range Photogrammetry - CRP*), dok kod aero fotogrametrije, fotografije se snimaju iz aviona, helikoptera itd., ili sve češće pomoću bespilotnih letelica (engl. *Unmanned Aerial Vehicles - UAV*). Sa razvojem digitalne fotogrametrije omogućena je automatizacija procesa, kao i obrada velikog broja fotografija primenom algoritma za određivanje strukture iz kretanja (engl. *Structure from Motion – SfM*) [33].

Aktivne optičke metode 3D digitalizacije karakteriše da senzori detektuju reflektovani svetlosni signal koji je poslat iz veštačkog izvora, ostvarujući aktivnu interakciju sa objektom 3D digitalizacije [20]. Glavni predstavnici aktivnih optičkih metoda 3D digitalizacije su: metode zasnovane na triangulaciji (laserska triangulacija, struktuirana svetlost, aktivna stereovizija, itd.) [34,35], zatim metode zasnovane na vremenu leta (vremenskoj detekciji) poslatog i primljenog signala (pulsiranje svetlosnog zraka), kao i metode zasnovane na modulaciji svetlosnog signala (faznoj detekciji) – fazni terestički laserski skeneri [19,36]. Pored ovih metoda, razlikuju se još i izvedbe pasivnih metoda u aktivnom obliku, kao i metode zasnovane na interferometriji (Muir-ova i holografija) [37].

Poseban vid aktivnih metoda jesu adaptacije pasivnih metoda. Ove metode zasnovane su na pasivnim metodama, ali obično koriste dodatne izvore svetlosti kako bi im se poboljšala efikasnost. Primeri aktivne izvedbe pasivnih metoda su određivanje dubine fokusiranjem/defokusiranjem, metode generisanja 3D modela zasnovane na bazi stereovizije, polarizacije, fotometrije i strukture iz kretanja [28,29,38].

1.1 Predmet istraživanja

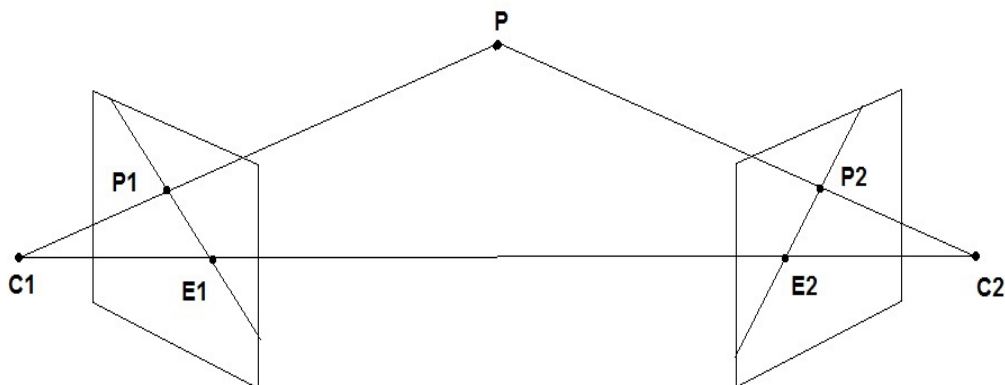
Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije se odnose na jedan od pravaca bliskopredmetne fotogrametrije (CRP), zasnovan na određivanju strukture iz kretanja (SfM) [33]. Kako bi se izvršila uspešna 3D digitalizacija primenom CRP zasnovanoj na SfM, površi objekta moraju imati izraženu vizuelnu teksturu [39,40]. Kod ove metode 3D digitalizacije razvijeni algoritmi za obradu slike (engl. *Image Processing*) i mašinskog vida (engl. *Machine Vision*) koriste vizuelnu teksturu površi objekta za detekciju, orijentaciju i određivanje lokalnih obeležja-tačaka na dvodimenzionalnim (2D) digitalnim fotografijama [41,42]. Osnovni princip fotogrametrije je stereovizija [43], kod koje je za rekonstrukciju položaja karakterističnih tačaka u prostoru potrebno najmanje 2 fotografije na kojima su karakteristične tačke vidljive. Slika 1.2. prikazuje osnovni princip rada CRP zasnovanoj na SfM. Karakteristične tačke na objektu koje je potrebno rekonstruisati označene su sa slovima a, b i c, dok su njihove detektovane projekcije označene sa odgovarajućim indeksom a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 , c_2 , c_3 , a sa C_1 , C_2 , C_3 , su označeni položaji optičkih centara.



Slika 1.2. Princip CRP zasnovane na SfM.

Pomoću detektovanih lokalnih karakterističnih obeležja-tačaka na fotografijama (koordinate projekcija posmatranih tačaka u koordinatnom sistemu fotografije) principima stereovizije (epipolarne geometrije, triangulacije) simultano se određuje relativan položaj snimljenih fotografija i pozicija detektovanih karakterističnih tačaka u prostoru, minimizirajući srednju kvadratnu grešku (SKG) reprojekcije [44].

Epipolarna geometrija predstavlja geometriju između dve fotografije koja ne zavisi od strukture scene već samo od unutrašnjih parametara kamere i relativne orijentacije jedne fotografije u odnosu na drugu [22]. Slika 1.3 prikazuje epipolarnu geometriju između dve fotografije. Tačka P predstavlja nepoznatu tačku u prostoru čiji položaj je potrebno odrediti. Tačke C1 i C2 predstavljaju optičke centre kamera (foto-aparata). Kada se iz optičkih centara C1 i C2 povuku prave tako da prolaze kroz tačku P, preseči će ravan fotografije u tačkama P1 i P2 koje predstavljaju centralne projekcije tačke P na ravni fotografija.

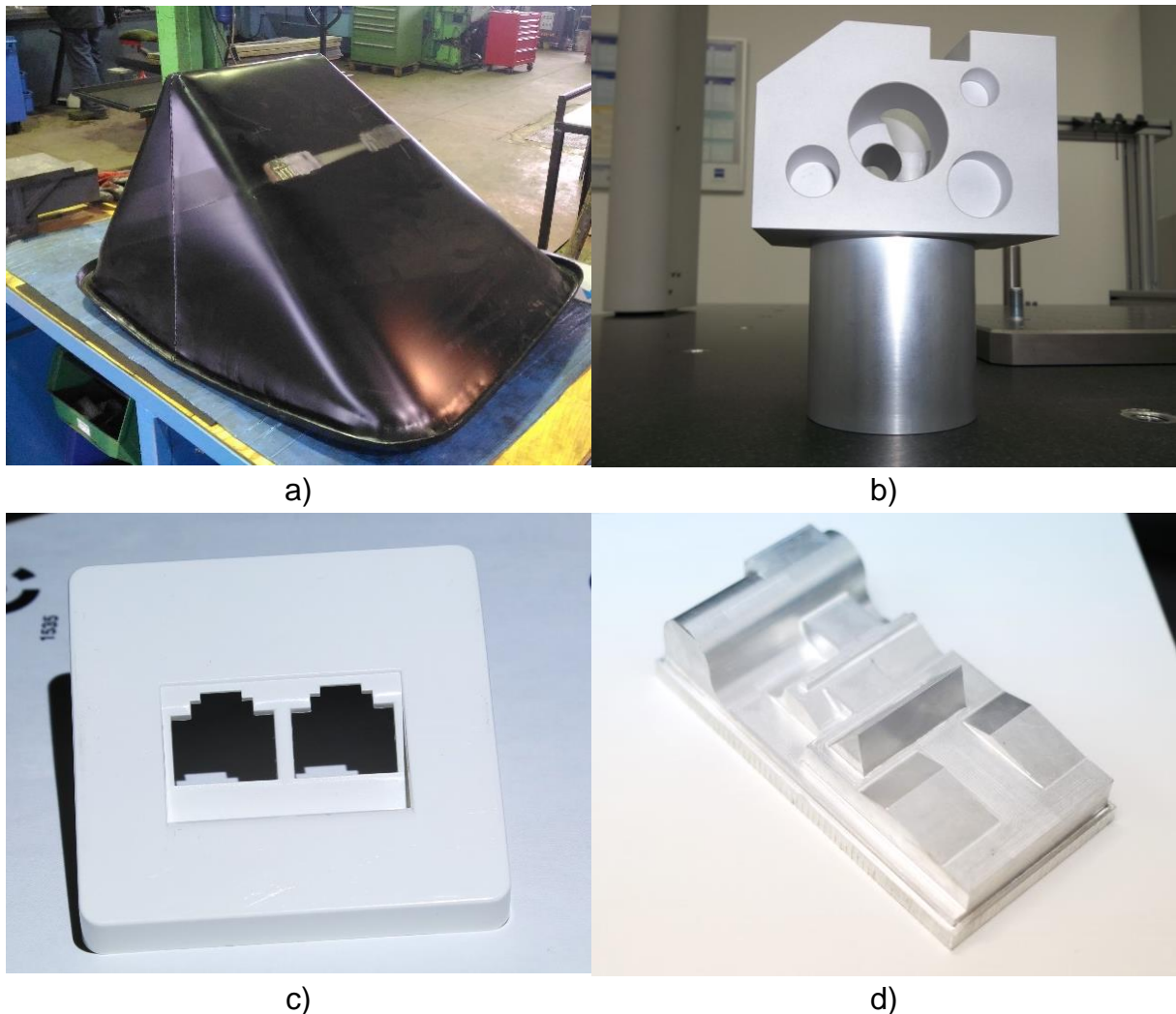


Slika 1.3. Epipolarna geometrija dve fotografije [22].

Tačke E1 i E2 predstavljaju projekcije optičkih centara na posmatrane ravni fotografija i nazivaju se još epipolovi. Ravan koju konstruišu tačke C1, P, C2 naziva se epipolarna ravan, a prave koje se mogu povući u ravni fotografije kroz P1, E1 i P2, E2 nazivaju se epipolarne linije. Projekcija tačke P koja se vidi na levoj (ili desnoj) fotografiji može se u stvarnosti nalaziti bilo gde samo na epipolarnoj liniji [22]. Na ovaj način se pretraga karakterističnih tačaka na fotografijama svodi sa 2D pretrage na jednodimenzionu pretragu duž epipolarnih linija i omogućava lakše pronalaženje odgovarajuće tačke, smanjivanje vremena pretrage i odbacivanje velikog broja potencijalnih karakterističnih tačaka.

Karakteristične tačke na površi objekta se mogu lako detektovati ukoliko objekat poseduje odgovarajuću vizuelnu teksturu [45]. Kada se govori o (digitalnoj) fotografiji, izražena vizuelna tekstura okarakterisana je sa naglom promenom gradijenta vrednosti intenziteta (nijanse sive) piksela koji predstavljaju manje kompaktne i lako uočljive delove na digitalnoj fotografiji [46]. Kako vizuelna svojstva objekta zavise od fizičko-optičkih karakteristika materijala koji se nalaze na površi i kreiraju vizuelnu teksturu, tako postoje površi objekata koje su pogodne, ili u suprotnom nepogodne za 3D digitalizaciju ovom metodom. Ukoliko površi objekta nisu dodatno tretirane sredstvima koja prikrivaju prirodna optička svojstva materijala (npr. nisu korišćeni premazi, boje, prah i sl.), onda se može reći da samo određeni materijali u prirodnom stanju imaju pogodnu vizuelnu teksturu.

Problem se javlja kod 3D digitalizacije objekata sa nedovoljno izraženom i monotonom vizuelnom teksturom [47–50]. Monotona vizuelna tekstura, suprotno od izražene, ogleda se u ujednačenosti boja (blagim prelazima, nijansama) objekta i/ili u dominantnosti samo jedne boje. Usled male promene u gradijentu intenziteta piksela dolazi do detekcije nedovoljnog broja karakterističnih tačaka na fotografijama. Veoma nepovoljna vizuelna stanja površi javljaju se kod svih prethodno obrađenih metalnih površi kao i kod površi izrađenih od polimera (Slika 1.4.).



Slika 1.4. Nepovoljne vizuelne površi metalnih i polimernih objekata sa aspekta 3D digitalizacije CRP na bazi SfM:

a) koš ručnih kolica, b) aluminijumski test komad za KMM c) polimerni poklopac internet utičnice d) aluminijumski test model.

Pored negativnih vizuelnih karakteristika površi objekta u pogledu teksture, te površi često prati i visok stepen refleksije. Posmatrane površi objekata sa slike 1.4.b, 1.4.c i 1.4.d obrađene u visokom kvalitetu, odnosno imaju veoma male vrednosti površinske hrapavosti, dok su površi objekta na slici 1.4.a premazane zaštitnim slojem boje koja objektu daje monotonu vizuelnu teksturu sa povišenim stepenom refleksije.

Deskriptori koji se koriste za detekciju karakterističnih tačaka veoma lako mogu matematički da definišu lokalna obeležja poput ivica, uglova, kao i regione sa istim ili sličnim intenzitetom piksela, pod uslovom da su takva obeležja prisutna na površi objekta 3D digitalizacije. Ukoliko je broj takvih lokalnih obeležja mali ili uopšte nisu prisutni na posmatranoj površi, dovodi se u pitanje mogućnost primene CRP zasnovane na određivanju SfM i rekonstrukcije prethodno opisanih površi primenom ove metode. Objekti sa nepovoljnim vizuelnim karakteristikama (Slika 1.4), poput metalnih mašinskih delova izrađenih konvencionalnim ili nekonvencionalnim postupcima obrade, zatim brizgani polimerni delovi za široku upotrebu, kao i gipsani ili keramički objekti su čest predmet 3D digitalizacije u industriji [51,52]. Da bi se umanjili negativni uticaji vizuelnih karakteristika, neophodno je takve objekte podvrgnuti tehnikama za poboljšanje vizuelnih karakteristika.

Jedna od tehnika za poboljšanje vizuelnih karakteristika je fizičko nanošenje tankog sloja praha ili boje na površi objekta [53,54]. Ova tehnika se, pre svega, koristi kod 3D digitalizacije transparentnih i visoko reflektivnih objekata [55,56]. Takođe, primenom ove tehnike mogu se postići veoma dobri rezultati 3D digitalizacije optičkim metodama. Osnovni nedostatak ove tehnike je u narušavanju topografije (taktilna tekstura-hrapavost) površi zbog neujednačenog nanošenja sloja praha ili boje, uz rizik od delimičnog pa i trajnog estetskog oštećenja. Nakon obavljene 3D digitalizacije usled nemogućnosti uklanjanja nanete boje ili praha može da se javi rizik i od fizičkog oštećenja površi prilikom uklanjanja nanetog sredstva, mehaničkim ili hemijskim putem.

Sledeća tehnika za poboljšanje vizuelnih karakteristika je projektovanje svetlosne obrazaca (engl. *Pattern*) – svetlosne teksture koji se koristi kod aktivne stereovizijske fotogrametrije [57]. Odlika aktivne stereovizijske metode je kodiranje strukturiranog svetlosnog ili laserskog obrasca koji se koristi za uspostavljanje veze između kamera i projektora. Termin svetlosna tekstura, koji će se dalje koristiti, predstavlja projektovanu sintetičku sliku ili već snimljenu postojeću digitalnu fotografiju na neprovidnu površ. Sposobnost softvera da detektuje snimljeni obrazac utiče na performanse sistema, uključujući tačnost merenja, broj rekonstruisanih tačaka, brzinu percepcije i pouzdanost [58].

Zbog principa na kome počiva CRP na bazi SfM, primena svetlosne teksture u vidu kodiranog obrasca nije moguća, dok su zabeleženi pokušaji primene projektovanja različitih svetlosnih tekstura na kojima su bili prirodni primeri sa izraženom vizuelnom teksturom, ali sa različitim uspehom [39,59]. U zavisnosti od tipa primenjivanih slika/fotografija za projektovanje (koji nisu u potpunosti istraženi), kao i veze između uređaja za projektovanje svetlosne teksture, objekta 3D digitalizacije i uređaja za akviziciju fotografija, otvara se prostor za istraživanje efekata primene novih svetlosnih tekstura. Značaj toga se ogleda u činjenici da ukoliko se na površi objekta ne detektuje odgovarajući broj karakterističnih tačaka ili detektovane karakteristične tačke ne

ispunjavaju stereovizijska (epipolarna) ograničenja, 3D digitalizacija takvih površi neće biti moguća.

Istraživanje u okviru ove disertacije orijentisano ka unapređenju tačnosti 3D digitalizacije bazirane na pasivnoj CRP SfM metodi, kod objekata bez karakterističnih obeležja, primenom nedestruktivne tehnike poboljšanja vizuelnih karakteristika površi objekta. Kod objekata 3D digitalizacije bez izražene vizuelne teksture, čak i malo povećanje broja detektovanih tačaka značajno utiče na poboljšanje tačnosti rezultata 3D digitalizacije [39].

1.2 Cilj istraživanja i hipoteze

U ovom istraživanju posebna pažnja je posvećena rešavanju problema 3D digitalizacije površi bez karakterističnih obeležja primenom projektovanja sintetički generisanih slika u vidu svetlosnih tekstura. Akcenat je stavljen na generisanje novih sintetičkih slika koje imaju izraženu vizuelnu teksturu, njihovu evaluaciju i primenu na objektima sa monotonim vizuelnim površima.

Osnovni cilj istraživanja je unapređenje tačnosti rezultata 3D digitalizacije CRP zasnovane na određivanju SfM, kod objekata bez karakterističnih obeležja, uz pomoć projektovanih sintetički generisanih slika u vidu svetlosnih tekstura. Navedeni osnovni cilj će biti ostvaren kroz realizaciju:

- Upporedne analize novokreiranih sintetički generisanih slika preko višekriterijumske metode, kod kojih su posmatrani statistički parametri koji ukazuju na neuređenost, rasipanje i distribuciju intenziteta piksela na generisanim slikama;
- Planarne 3D digitalizacije (realne i virtualne), - metode razvijene za međusobno relativno rangiranje posmatranih novokreiranih svetlosnih tekstura, preko kvantitativnog rezultata odnosa detektovanog broja tačaka i ostvarene SKG i maksimalne greške (MG) reprojekcije;
- Evaluacije najuspešnijih sintetički generisanih slika - svetlosnih tekstura, koja će se izvršiti na dva objekta sa monotonom vizuelnom teksturom. Na prvi objekat primeniće se tri svetlosne teksture koje su najbolje rangirane novokreirane sintetičke slike u okviru višekriterijumske analize i rezultata planarne 3D digitalizacije. Na drugom objektu koristiće se takođe tri svetlosne teksture - dve najbolje rangirane novokreirane i jedna najbolje rangirana sintetička slika za projektovanje svetlosne teksture prema literaturnom izvoru [60];
- Verifikacije primene svetlosnih tekstura kod CRP 3D digitalizacije sa aspekta geometrijske tačnosti, što će se realizovati primenom računarom podržane inspekcije (CAD inspekcije), kod koje će kao referentni 3D modeli biti korišćeni CAD modeli, odnosno rezultati merenja sa koordinatnoj mernoj mašini (KMM) i

modeli generisani na bazi rezultata 3D digitalizacije optičkim sistemom poznate tačnosti, odnosno merne nesigurnosti.

Cilj istraživanja obuhvata i analizu uticaja koordinacije komponenti sistema za 3D digitalizaciju pomoću svetlosnih tekstura, pošto se akvizicija vrši samo sa jednom, a ne sa dve ili više kamera. Pod koordinacijom se podrazumeva definisanje relativnog položaja i kretanje osnovnih komponenti sistema za CRP zasnovani na određivanju SfM:

- projektora svetlosne teksture,
- objekta 3D digitalizacije i
- uređaja za akviziciju fotografija – digitalne kamere.

Rezultati ove analize će poslužiti kao osnova za razvoj novih sistema za apliciranje teksture i akviziciju fotografija.

Očekivani rezultati istraživanja obuhvataju:

- Razvoj i analizu novih, do sada neprimenjivanih svetlosnih tekstura kod 3D digitalizacije objekata sa monotonom vizuelnom teksturom, primenom CRP.
- Unapređenje nivoa ukupne tačnosti rezultata CRP SfM 3D digitalizacije kod objekata sa monotonom vizuelnom teksturom.
- Definisanje teorijskih osnova za razvoj novih sistema za apliciranje svetlosne teksture i akviziciju fotografija.

Uvidom u predmet i cilj istraživanja izvedene su sledeće hipoteze:

H1: Moguće je kreirati sintetičke slike na osnovu decimala iracionalnih brojeva, koje bi projektovanjem u vidu svetlosnih tekstura na površi objekta bez karakterističnih obeležja privremeno podigle kvalitet vizuelne teksture, a samim tim i tačnost 3D digitalizacije.

H2: Najpogodnija vizuelna tekstura sintetički generisane slike ima izraženu nasumičnu grubu tekstu. Takva vrsta teksture omogućava laku detekciju karakterističnih tačaka.

1.3 Struktura doktorske disertacije

Disertacija se sastoji od 8 poglavlja.

U poglavlju 1 predstavljeni su predmet i cilj istraživanja, kao i hipoteze istraživanja. Poglavlje 2 prikazuje analizu dosadašnjih istraživanja sa pregledom stanja u oblasti CRP zasnovane na određivanju SfM, gde su predstavljeni aktuelni trendovi i najčešće upotrebljavani deskriptori i detektori karakterističnih tačaka. Takođe, u okviru ovog poglavlja predstavljena je analiza postojećih primenjivanih svetlosnih tekstura i

sistema za projektovanje od strane drugih autora i dat je kratak osvrt na pravac istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji.

Poglavlje 3 opisuje pojam svetlosnih tekstura i generisanje novih sintetičkih slika za projektovanje svetlosnih tekstura, kao i opis karakteristika uređaja za projektovanje svetlosnih tekstura - projektora.

Poglavlje 4 se odnosi na analizu i rangiranje sintetički generisanih slika preko deskriptivnih statističkih pokazatelja koji predstavljaju ulaz za višekriterijumsku analizu, a rangiranja svetlosnih tekstura su vršena preko rezultata realne i virtualne planarne 3D digitalizacije.

Poglavlje 5 sadrži analizu uticaja različitih načina koordinacije komponenti sistema za 3D digitalizaciju primenom CRP zasnovane na određivanju SfM i daje idejna rešenja za nove sisteme.

Poglavlje 6 predstavlja verifikaciju najuspešnijih sintetičkih slika (svetlosnih tekstura) u studijama slučaja, pri čemu su prikazani i prodiskutovani rezultati. U poglavlju 7 izvedeni su zaključci, sa posebnim osvrtom na ostvarene naučne i stručne doprinose ovog istraživanja, kao i moguće pravce budućih istraživanja. U poslednjem poglavlju 8 dat je pregled korišćene literature.

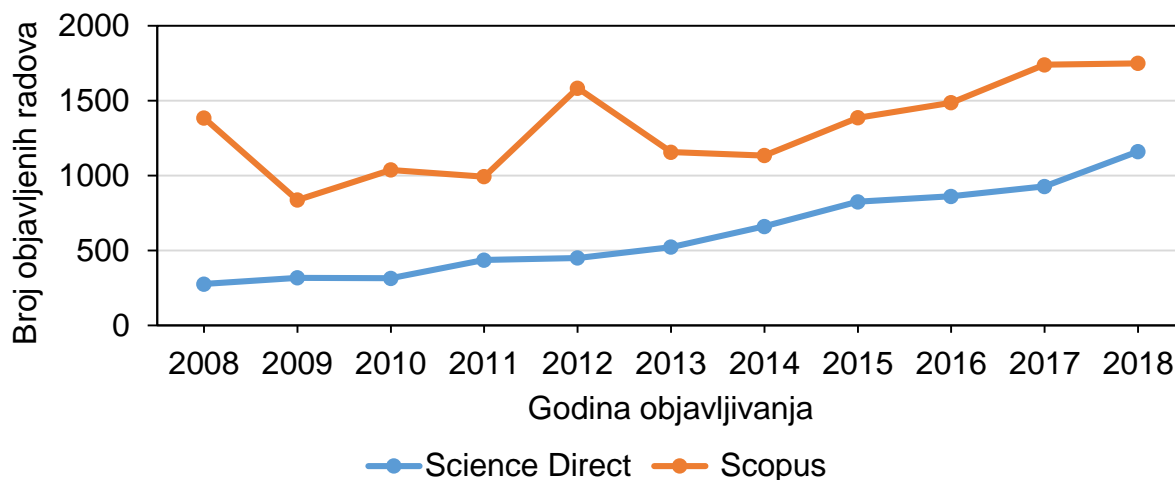
2. ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U OBLASTI

Kod savremenog projektovanja proizvoda, pored funkcionalnih zahteva koje proizvod treba da ispuni, velika pažnja se posvećuje estetskim, ergonomskim i aspektima eko-dizajna. Prve dve grupe aspekata impliciraju obilnu primenu geometrijski kompleksnih površi [61]. Tehnologije koje pokreću rast i razvoj metoda 3D digitalizacije našle su svoje mesto u okviru četvrte industrijske revolucije, odnosno Industrije 4.0 (engl. *Industry 4.0*). Kao primer tih tehnologija izdvajaju se veliki podaci (engl. *Big Data*), koji kao pojam označava velike i kompleksne skupove podataka. Kod manipulacije sa tako velikom količinom podataka, tradicionalne aplikacije za obradu nisu primenljive. Te velike skupove podataka karakteriše raznovrsnost formata, velike brzine obrade i pristupa, kao i veliki protok informacija. Da bi se rešio problem obrade velike količine podataka, obrada se vrši u oblaku (engl. *Cloud*). Ideja oblaka je da se prikupljeni podaci šalju putem interneta do servera, odnosno da se deljenjem hardverskih resursa umreženih računara u oblaku vrše složene operacije obrade podataka koji se potom vraćaju nazad do krajnjeg korisnika [62].

Nezaobilazna je i upotreba veštačke inteligencije, interneta stvari (engl. *Internet of Things - IoT*) i bežičnog prenosa podataka i informacija [63]. Razvoj hardverskih i softverskih komponenti savremenih sistema za 3D digitalizaciju (3D skeneri) uključuju potrebu za već pomenutim tehnologijama industrije 4.0. Prema *Global Market Insights* [64] u 2017 god. tržište 3D skenera samo u Sjedinjenim Američkim Državama iznosilo je preko 3 milijarde dolara sa predviđanim rastom od 15% u periodu od 2017. do 2024. god.

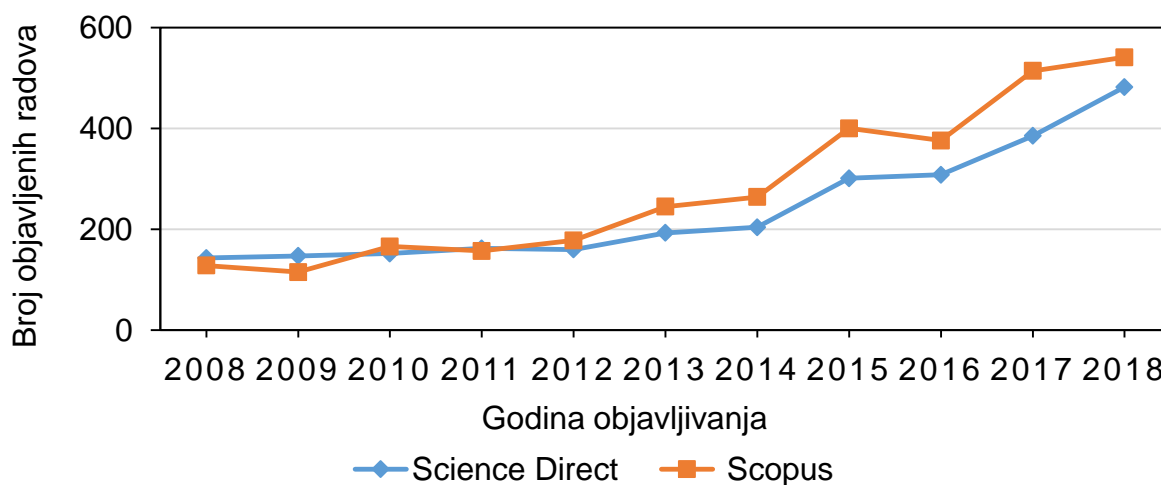
Do danas razvijeni aktivni i pasivni optički sistemi 3D digitalizacije su konstantno komparirani sa ciljem analize njihovih kvantitativnih (rezolucija, tačnost, brzina akvizicije, itd.) i kvalitativnih karakteristika (kompaktnost, mobilnost, namena, itd.) [20,21,38,65]. Između CRP i areo fotogrametrije može se povući paralela, gde je takođe broj detektovanih kontrolnih tačaka i tačnost rekonstrukcije položaja od izuzetne važnosti [36,66,67]. Kao vodeći predstavnik pasivnih metoda, fotogrametrija je veoma popularna oblast istraživanja, što potvrđuje i veliki broj objavljenih naučnih radova u proteklim godinama sa tendencijom daljeg rasta. Na slici 2.1. prikazan je broj objavljenih naučnih radova u naučnim časopisima gde u nazivu, ključnim rečima i

apstraktu figuriše reč „*Photogrammetry*“ u proteklih 10 godina prema dva vodeća servisa za pretragu naučnih radova *Science Direct* [68] i *Scopus-u* [69].



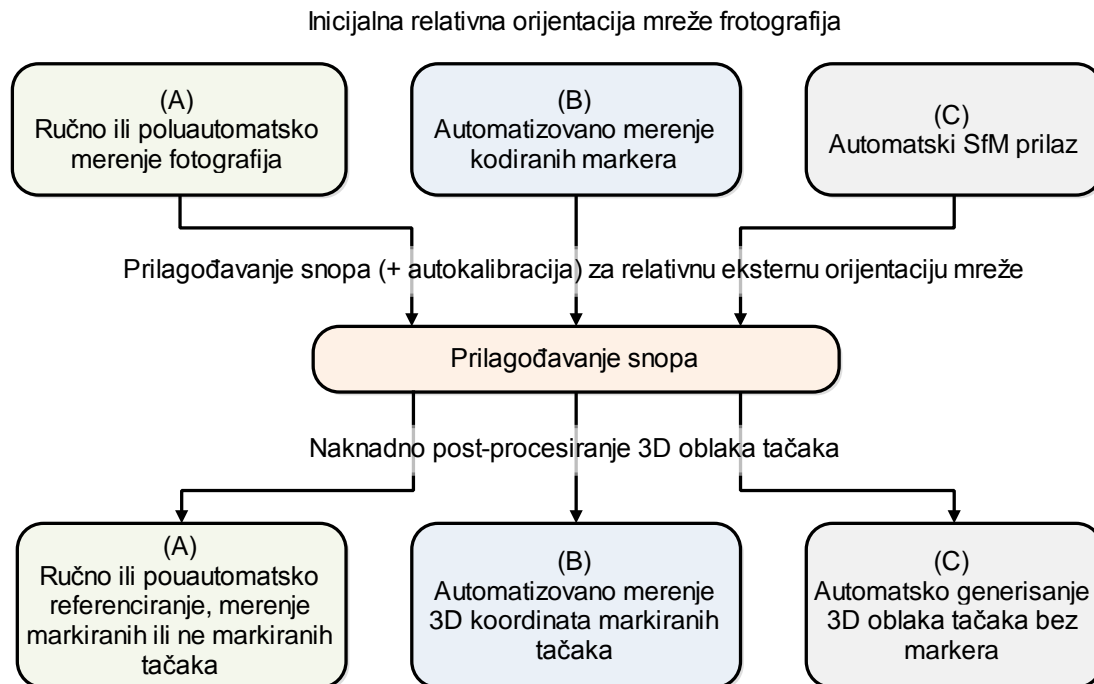
Slika 2.1. Broj radova u proteklih 10 godina koji su u naslovu, ključnim rečima ili apstraktu sadržavali reč „*Photogrammetry*“ u bazama *Science Direct* i *Scopus*.

Razvoj CRP kao metode 3D digitalizacije prikazan je u radu [70], a detaljna primena i principi na kojima počiva ova metoda prikazani su u radovima [22,71,72]. Veoma popularna CRP metoda zasnovana na određivanju SfM [44] je u prethodnim godinama bila predmet istraživanja mnogih istraživača, a koja je predmet istraživanja i u ovoj disertaciji. Popularnost zaslužuje prvenstveno zbog pristupačnog hardvera. Slika 2.2. prikazuje broj radova u proteklih 10 godina koja su u naslovu, ključnim rečima ili apstraktu sadržavale reči „*Structure from Motion*“ prema servisima za pretragu naučnih časopisa *Science Directu* i *Scopusu*. Takođe sa slike 2.2. može se primetiti trend rasta objavljenih radova i u ovoj oblasti CRP.



Slika 2.2. Broj radova u proteklih 10 godina koji su u naslovu, ključnim rečima ili apstraktu sadržavali reči „*Structure from Motion*“ u bazama *Science Direct* i *Scopus*.

Pregled značajnijih dostignuća u istraživanju na polju CRP u prethodne četiri decenije predstavljen je od strane autora Clive Fraser-a [65]. Clive Fraser-ov rad je fokusiran na evoluciju CRP metode od ručne do automatske orijentacije fotografija, kao i od ručnog merenja karakterističnih tačaka do automatskog generisanja 3D oblaka tačaka visoke rezolucije. Na slici 2.3. dat je dijagram toka procesa koji pokazuje tri usvojena pristupa orijentacije i obrade fotografija kod CRP-a prema stepenu automatizacije [65].



Slika 2.3. Opcije obrade fotografija kod CRP prema stepenu automatizacije [65].

Prema Clive Fraser – u [65] vrlo je korisno imati sva tri pristupa orijentacije fotografija prikazanih na slici 2.3. unutar jedinstvenog sistema za obradu podataka. Softver Agisoft Methashape i iWitnessPRO V4 su primeri takvih sistema [73,74].

Softver za 3D digitalizaciju CRP zasnovanoj na određivanju SfM igraju ključnu ulogu u 3D rekonstrukciji površi objekata sa složenom (engl. *Free-Form*) geometrijom. Jedan od faktora koji utiče na tačnost rekonstruisanog 3D modela pomoću CRP zasnovanoj na SfM je softver (algoritam) za generisanje oblaka tačaka niske rezolucije i procenu pozicija sa kojih su fotografije snimljene, dok je drugi hardverske prirode, odnosno povezan je sa kvalitetom i tipom senzora koji služi za generisanje digitalne slike [75]. Zbog dostupnosti i upotrebe velikog broja različitih uređaja opremljenih sensorima za generisanje digitalne slike npr. mobilni telefoni, digitalne kamere, Mousavi i sar. [56], postavili su pitanje koji senzor za generisanje digitalne fotografije i koji softveri za obradu fotografija mogu dovesti do tačnije i potpunije 3D rekonstrukcije fizičkog 3D modela. Da bi to postigli, upoređivali su različite dostupne uređaje, od kamera mobilnih telefona do profesionalnih kamera i popularne softverske pakete. Ustanovili su da je tačnost rekonstrukcije 3D modela direktno vezana za vrstu

senzora, softvera i složenost objekta koji se rekonstruiše. Analiza tačnosti 3D rekonstrukcije pomoću različitih uređaja i softvera CRP zasnovanoj na SfM prikazana je i u radovima [75–77] gde su izvedeni slični zaključci kao i u [56]. Pregled dostupnih aktuelnih blisko-predmetnih fotogrametrijskih softvera dat je u tabeli 2.1..

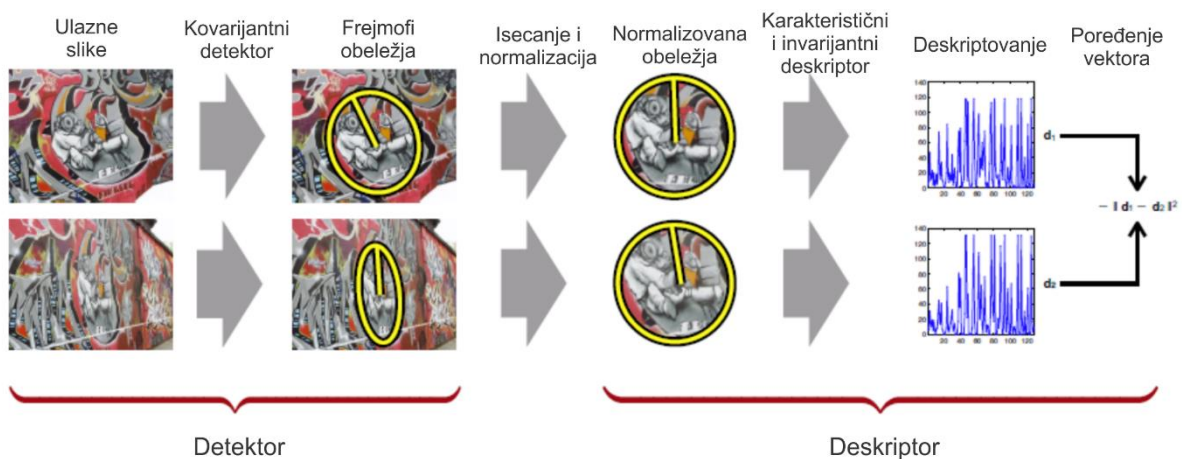
Tabela 2.1. Pregled dostupnih fotogrametrijskih softvera u 2019 godini [78].

Naziv softvera	Primena	Podržani izlazni formati	Operativni Sistem
COLMAP	Aero i CRP	ply, vrml	Win, Mac, Linux
Meshroom	Aero i CRP	abc, obj	Win, Linux
MicMac	Aero i CRP	geotiff, ply, xml	Win, Mac, Linux
Regard3D	Aero i CRP	obj, ply	Win, Mac, Linux
VisualSFM	Aero i CRP	ply	Win, Mac, Linux
Aero i CRP	Aero i CRP	-	Win, Mac, Linux
WebODM	Aero		Win, Mac
Agisoft Metashape	Aero i CRP	fbx	Win, Mac, Linux
RealityCapture	Aero i CRP	jpg, png, XYZ, XYZRGB, tiff, bmp, dib, rle, jpeg, jpe, jfif, exif, exr, tif, wdp, jxr, dds, KML, KMZ, obj, ply, partlist, fbx, dxf, dae, bvh, htr, trc, asf, amc, c3d, aoa, mcd, wmv, mp4	Win
Autodesk ReCap	Aero i CRP	asc, cl3, clr, e57, fls, fws, isproj, las, pcg, ptg, pts, ptx, rds, txt, xyb, xyz, zfs, zfprj	Win
Photomodeler	Aero i CRP	3ds, 3dm, dxf, igs, kml, kmz, las, ma, ms, obj, pts, byu, facet, iv, ply, stl, txt, wrl	Win
SOCET GXP	Aero		Win
3DF Zephyr	Aero i CRP	ply, obj, fbx, pdf 3D, u3d, dae, pts, ptx, xyz, txt, las, e57	Win
Pix4D	Aero	obj, fix, dxf, las, las, kml, tif, osgb, slpk, shp	Win, Mac, Android
iWitnessPRO	Aero i CRP	TXT, CSV, PTS, LAS, PLY, DXF, KML	Win
Bentley ContextCapture	Aero i CRP	3ms, 3sm, kml, dae, fbx, obj, dae, stl	Win

Tendencija razvoja softvera CRP zasnovanoj na SfM kreće se ka pojednostavljenju upotrebe za krajnje korisnike, kao i povećanju brzine detekcije karakterističnih tačaka, paralelnom procesiranju fotografija, mogućnosti obrade u oblaku itd. U nastavku biće data podela i uloga detektora i deskriptora koji se najčešće koriste kod softverskih paketa za 3D digitalizaciju pomoću CRP zasnovanoj na određivanju SfM.

2.1 Detektori i deskriptori kod 3D digitalizacije primenom SfM-a

U poslednje dve decenije detektori i deskriptori lokalnih obeležja (engl. *local features*) postali su popularni alati u oblasti računarske vizije, a svoju primenu su pronašli i kod 3D digitalizacije objekata primenom SfM-a [79]. Sa aspekta računarske vizije susreće se opis lokalnih obeležja u dva glavna konteksta [80]. U prvom kontekstu, lokalno obeležje predstavlja opis karakteristika izdvojene male regije na slici. Takvi opisi lokalnog obeležja obično se nazivaju lokalni deskriptori i predstavljaju se kao vektori, stvarnih brojeva ili binarnih cifara. Lokalni deskriptori se mogu dobiti spajanjem intenziteta piksela ili računanjem histograma posmatrane regije. U drugom kontekstu, lokalno obeležje je karakteristična tačka ili regija slike, a često se naziva i ključnim, karakterističnim, interesnim ili sidrenim tačkama [81]. Detekcija karakterističnih tačaka obično uključuje i određivanje skupa transformacija koje se mogu primeniti na lokalni region kako bi njegov deskriptor bio invarijantan na geometrijske ili fotometrijske transformacije. Veoma je važno pronaći i detektovati na slici tačnu lokaciju takvog lokalnog obeležja, koja se naziva detekcija, i dodeliti odgovarajući lokalni deskriptor [81]. Tok detekcije i deskripcije lokalnog obeležja dat je na (Slika 2.4.).



Slika 2.4. Tok detekcije i deskripcije lokalnog obeležja [81].

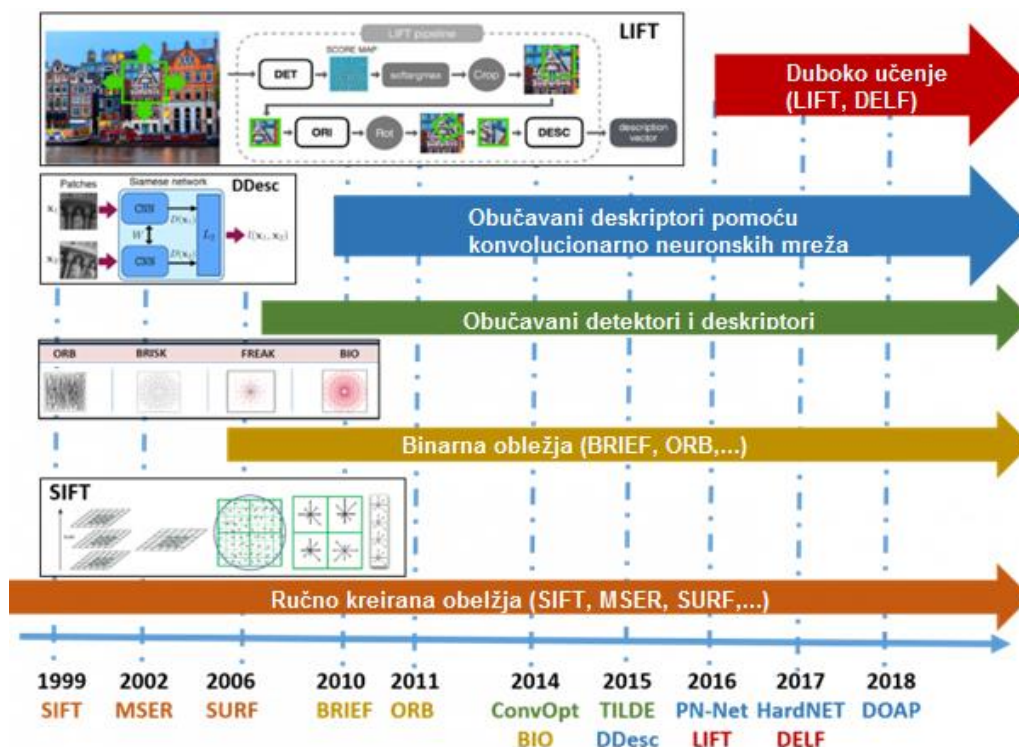
Pošto je geometrijski odnos između dve slike iste scene obično projektivna transformacija, moglo bi se tvrditi da lokalne karakteristike treba da budu invarijantne projektivnim transformacijama, ili da bi one trebale biti invarijantne na affine transformacije [81].

U idealnom slučaju, lokalna obeležja bi u potpunosti odgovarala karakterističnim delovima objekta. U praksi je to neizvodljivo, jer bi bila potrebna visoka interpretacija sadržaja u okviru scene. Umesto toga, detektori pronalaze lokalna obeležja direktno na osnovu jedinstvenog obrasca koji predstavlja grupa piksela istog intenziteta. Pogodna lokalna obeležja bi trebalo da imaju sledeće karakteristike [82]:

- **Ponovljivost** - s obzirom da su dve slike istog objekta ili scene, snimljene iz različitih uglova, na obe slike bi trebalo da se nađe visok procenat detektovanih karakterističnih tačaka na delu scene koje su vidljive na obe slike.
- **Prepoznatljivost / informativnost** – lokalna obeležja koja se pronalaze i detektuju treba da pokažu mnogo varijacija, kako bi se karakteristične tačke mogle lako izdvojiti i nedvosmisleno preklapati.
- **Lokalitet** – obeležja treba da budu što manja, kako bi se smanjila verovatnoća okluzije i omogućilo jednostavno aproksimiranje modela geometrijskih i fotometrijskih transformacija između dve slike snimljenih iz različitih uglova.
- **Kvantitet** - broj detektovanih lokalnih obeležja treba biti dovoljno velik, tako da se pronađe razuman broj lokalnih obeležja čak i na malim objektima. Međutim, optimalan broj lokalnih obeležja zavisi od primene. U idealnom slučaju broj detektovanih lokalnih obeležja treba da se prilagodi u velikom rasponu jednostavnim i intuitivnim pragom. Gustina obeležja treba da odražava informativni sadržaj slike kako bi se dobio kompaktni prikaz iste.
- **Tačnost** - Detektovana lokalna obeležja treba da obezbede tačnu lokalizaciju, kako na slici, tako i u pogledu razmere i obliku.
- **Efikasnost** – ukoliko je moguće, detekcija lokalnih obeležja na novoj slici treba da bude obavljena u što kraćem vremenskom periodu.
- **Invarijantnost** - preferirani pristup je da se lokalna obeležja matematički modeliraju, a zatim razviju metode za detekciju obeležja na koje primenjene matematičke transformacije ne utiču.
- **Robusnost** – otpornost lokalnih obeležja na prisustvo šuma, efekata diskretizacije, kompresije, zamagljivanje itd.

Od prikazanih karakteristika idealnog lokalnog obeležja tačnost i robusnost imaju značajan uticaj na tačnost 3D digitalizacije [83].

Hronološki razvoj detektora i deskriptora prikazan je na slici 2.5. i tabeli 2.2.. Među prvim razvijeni su deskriptori za ručno kreirana obeležja, od kojih su najpoznatiji SIFT (engl. *Scale Invariant Feature Transform*) [84], MSER (engl. *Maximally Stable Extremal Regions*) [85], SURF (engl. *Speeded-Up Robust Feature*) [86] i FAST (engl. *Features from Accelerated Segment Test*) [87].



Slika 2.5. Hronološki razvoj detektora i deskriptora lokalnih obeležja u poslednje dve decenije [88].

Tabela 2.2. Pregled postojećih prilaza u detektovanju i deskriptovanju lokalnih obeležja [88].

	Arhitektura	Primena	Opis
Ručno kreirana obeležja	Ručno kreirani detektori (DoG, Hariss,...) i deskriptori (gradijent histograma).	SfM algoritmi, Kombinacija slika, Pretraga slika u velikim bazama podataka.	Visoka robusnost na promenu položaja, ali smanjena na promenu osvetljenja. Dobar izbor za većinu aplikacija, najčešće za offline aplikacije.
Ručno kreirana binarna obeležja	FAST – varijantni detektori i deskriptori zasnovani na poređenju intenziteta piksela.	Praćenje obeležja, Vizijski SLAM mobilni i ugrađeni (engl. <i>embedded</i>) vizijski sistemi, proširena realnost	Imaju visoku ponovljivost koristeći Hammingovo rastojanje, visoku brzinu i malu upotrebu memorije, pogodni za mobilne i aplikacije u realnom vremenu (engl. <i>real time</i>).
Obučavana obeležja	Obučavani detektori i deskriptori, obučavanje binarizacijom.	Prepoznavanje slika, delova slika, lica i objekata.	Potreban set za obučavanje.
Obučavana obeležja preko konvolucionih neuronskih mreža	Sijamske neuronske mreže sa: klasifikacijom i rangiranjem gubitaka, podudaranjem rezultata ili sa deskriptorima.	Prepoznavanje delova slika, Verifikacioni zadaci.	Primenjivi kako na region, tako i na celu sliku, potreban veliki set za obučavanje, može da savlada različite uslove osvetljenja.
End to end obučavana obeležja	Deskriptori obučavani pomoću dubokih neuronskih mreža.	Preklapanje lokalnih obeležja.	Obučavanje na nivou slike ali sa označenim korespondiranim tačkama, zajedničko obučavanje detektora i deskriptora.

Uloga detektora i deskriptora kod SfM-a je da opiše određenu karakterističnu tačku u prostoru na jedinstven i nedvosmislen način pomoću vektora kako bi se kasnije mogla prepoznati na fotografijama snimljenih iz različitih uglova. Za što tačniji opis karakteristične tačke često se koriste tačke iz neposrednog okruženja [82].

Iako su pristupi zasnovani na obučavanju napredovali do te mere da sada dostižu najveću srednju prosečnu preciznost preklapanja zajedničkih tačaka, nedavna istraživanja u vezi njihove primene kod rekonstrukcije 3D modela zasnovane na obradi slike, sugerišu da ručno kreirana obeležja poput SIFT-a i dalje rade jednako dobro ili čak i bolje nego obeležja nastala primenom veštačke inteligencije [82,83,88].

Izbor detektora i deskriptora lokalnih obeležja Cao i saradnici [89] smatraju za veoma važnim faktorom kod SfM-a, pa su u svom radu imali za cilj da eksperimentalnim putem odrede koji od deskriptora pruža bolje performanse. Ustanovili su da SIFT i SURF deskriptori [90] imaju bolje performanse i odnosu na ORB (engl. *Oriented fast and Rotated Brief*) i BRISK (engl. *Binary Robust Invariant Scalable Key points*) deskriptore [91]. U nastavku je da ta kratak opis najpoznatijih deskriptora (SIFT i SURF) za primenu kod SfM-a.

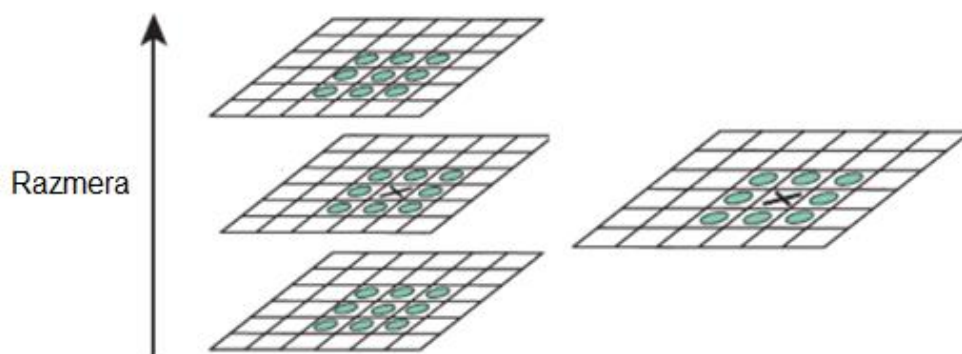
2.1.1 SIFT - Scale Invariant Feature Transform

SIFT algoritam [84] kao i njegove varijacije [92] su najčešće implementirani u komercijalnim softverima za 3D rekonstrukciju zasnovanu na SfM [83]. Jedan od najčešće korišćenih komercijalnih softvera je Agisoft Metashape [93]. Detekcija i deskripcija kod SIFT-a se sastoji iz tri glavna koraka [94]:

- detektovanje lokalnih ekstrema,
- lokalizacija karakterističnih tačaka i
- opisivanje orijentacije vektora.

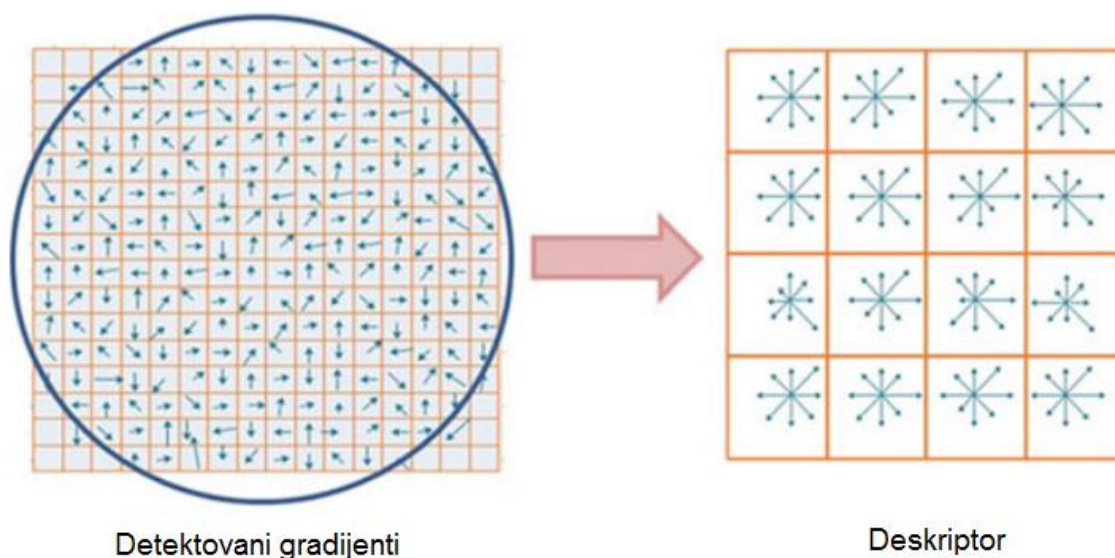
Detektovanje ključnih tačaka dobija se pomoću piramidalnog filtriranja, koji koristi razliku između originalne slike i slike na koju je primenjen Gausov filter, tako da se na novodobijenoj slici mogu uočiti lokalni ekstremi [79,94]. Lokalni maksimumi i minimumi otkrivaju se nakon toga za svaku detektovanu tačku i upoređuje se sa osam susednih piksela na trenutnoj slici i devet susednih piksela u razmeri iznad i ispod koji formiraju piramidu (Slika 2.6.). Lokalni maksimumi i minimumi su odabrani ako posmatrani piksel ima veću ili manju vrednost nijanse sive od svih svojih susednih piksela [79,94].

Nakon što su kandidati za ključne tačke detektovani upoređivanjem piksela sa njihovim susedima, sledeći korak je definisanje podataka o lokaciju, razmeri i odnosu glavne zakrivljenosti. U ovom koraku odbacuju se tačke sa niskim kontrastom, ili nedovoljno definisane tačke [81].



Slika 2.6. Piramidalna detekcija karakteristične tačke [81].

U poslednjem koraku dodeljuje se dosledna orijentacija na osnovu lokalnih obeležja svakoj karakterističnoj tački. Faza deskripcije SIFT algoritma započinje uzorkovanjem veličine i orijentacije gradijenta slike u regionu 16×16 oko svake ključne tačke koristeći razmeru za selekciju razlike Gausovog zamućenja. Zatim se stvara set orijentacionih histograma gde svaki histogram sadrži uzorke iz podregije 4×4 prvobitnog neposrednog okruženja i ima osam zraka za orijentaciju u svakom (Slika 2.7.) [79,81]

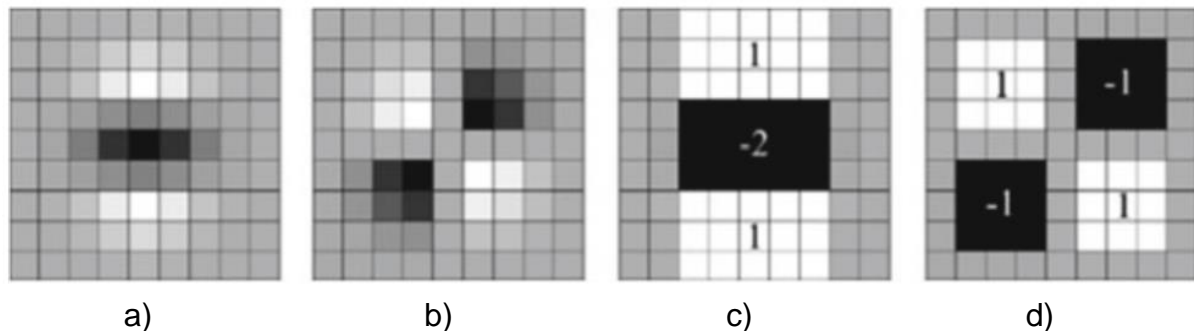


Slika 2.7. Šematski prikaz SIFT deskriptora za regiju 16×16 pix i veličinu polja deskriptora 4×4 [79].

Pošto postoje 4×4 histograma sa po 8 zraka, karakteristični vektor ima $4 \times 4 \times 8 = 128$ elemenata za svaku ključnu tačku. Na kraju, vektor karakteristika se normalizuje na da bi se obezbedila invarijantnost na afine promene u osvetljenosti i omogućilo pronalaženje ključne tačke na susednoj fotografiji [94,95].

2.1.2 SURF - Speeded-Up Robust Features deskriptor

SURF [96] je detektor i deskriptor lokalnih obeležja. Detektor je zasnovan na Heseovoj matrici (nem. *Ludwig Otto Hesse*) [97]. U fazi detekcije karakterističnih tačaka, umesto idealnih Gausovih funkcija, izračunavanje se zasniva na jednostavnim 2D filterima kvadratnog oblika, gde koristi detektor na osnovu Heseove matrice koji služi za selekciju razmere i lokacije. Osnovna ideja ovog detektora je da se efikasno približe drugom izvodu Gausove funkcije uz pomoć skupa 2D filtera (Slika 2.8.).



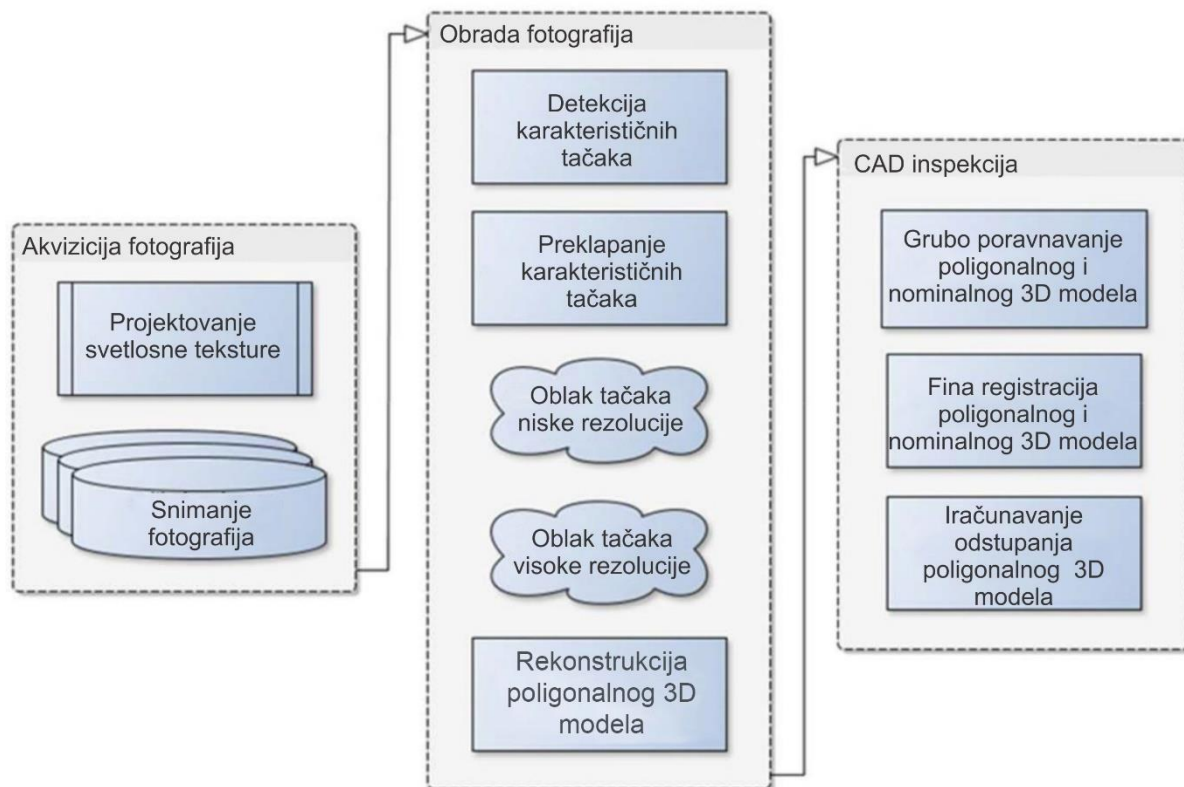
Slika 2.8. Drugi izvod Gausove funkcije u različitim pravcima:
 a) y pravac b) xy pravci c) aproksimacija u y pravcu d) aproksimacija u xy pravcima
 [79].

Nakon identifikacije karakteristične tačke, prvi korak obrade je dodeljivanje orijentacije unutar kružne regije oko karakteristične tačke. Zatim se kvadratna regija poravnava sa odabranom orijentacijom i deskriptor SURF se izdvaja računanjem Haar-ovih talasnih odziva [95].

2.2 Analiza primene svetlosnih tekstura kod CRP zasnovanoj na SfM

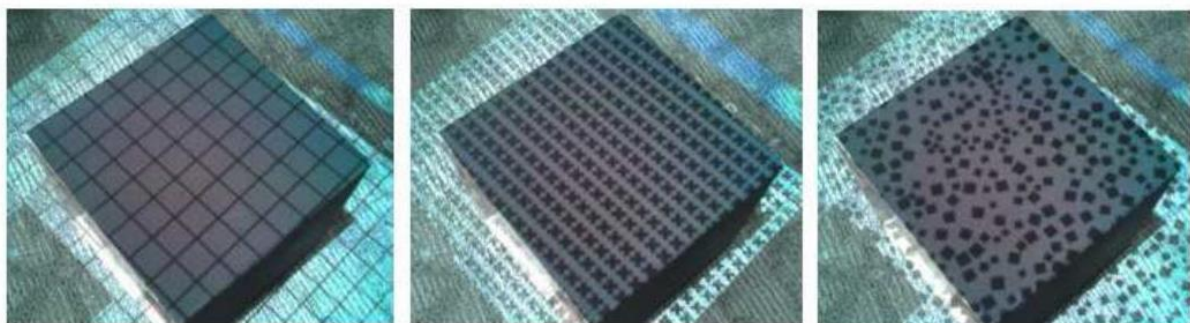
U okviru naučnih radova iz oblasti CRP SfM-a, značajan broj je fokusiran na istraživanja koja se bave poboljšanjem vizuelnih karakteristika objekata primenom svetlosnih tekstura. Osnovni tok procesa ispitivanja svetlosnih tekstura predstavljen je od strane Jahanzeb Hafeez-a i saradnika [98] i sastoji se iz tri glavne faze (Slika 2.9.). Prva faza se odnosi na projektovanje svetlosne teksture i snimanje fotografija objekta iz više različitih pozicija. Druga faza se odnosi na obradu fotografija prema uobičajenim koracima SfM-a, a u trećoj fazi se vrši provera odstupanja rekonstruisanih poligonalnih 3D modela u odnosu na nominalni 3D model.

Sintetičke slike se sastoje od elemenata koji - kada se projektuju – kreiraju veštačku svetlosnu teksturu prekrivajući površine posmatranog objekta. Tako projektovane svetlosne teksture pomažu detektorima lokalnih obeležja, kao što je SIFT, da pronađu različite karakteristične tačke u snimljenom setu fotografija [98].



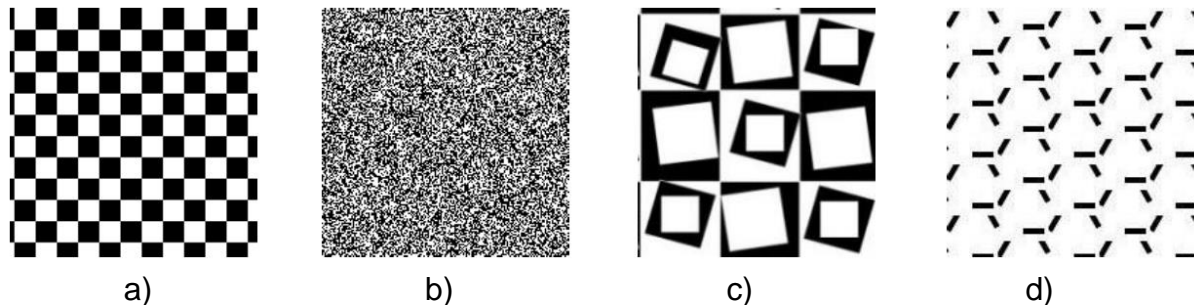
Slika 2.9. Šema toka snimanja fotografija, 3D rekonstrukcije i evaluacije rekonstruisanih površi objekata bez karakterističnih obeležja [98].

Hafeez i sar. [98] su kreirali tri serije sintetičkih slika mreža, x marker i nasumični kvadrati (Slika 2.10.) od kojih je svaka serija sadržala po pet varijacija koje su se međusobno razlikovale po gustini prisutnih obeležja. Na osnovu dobijenih rezultata zaključili su da sa povećanjem gustine i kontrasta sintetičke slike, detektuje se veći broj tačaka, ali da najveći broj tačaka ne znači i najveću geometrijsku tačnost. Najmanja izmerena vrednost standardne devijacije od 0,9 mm je dobijena upotrebom sintetičke slike sa najgušćim udelom iz serije x markera dok je standardna devijacija bez upotrebe svetlosne teksture iznosila 13,4 mm.



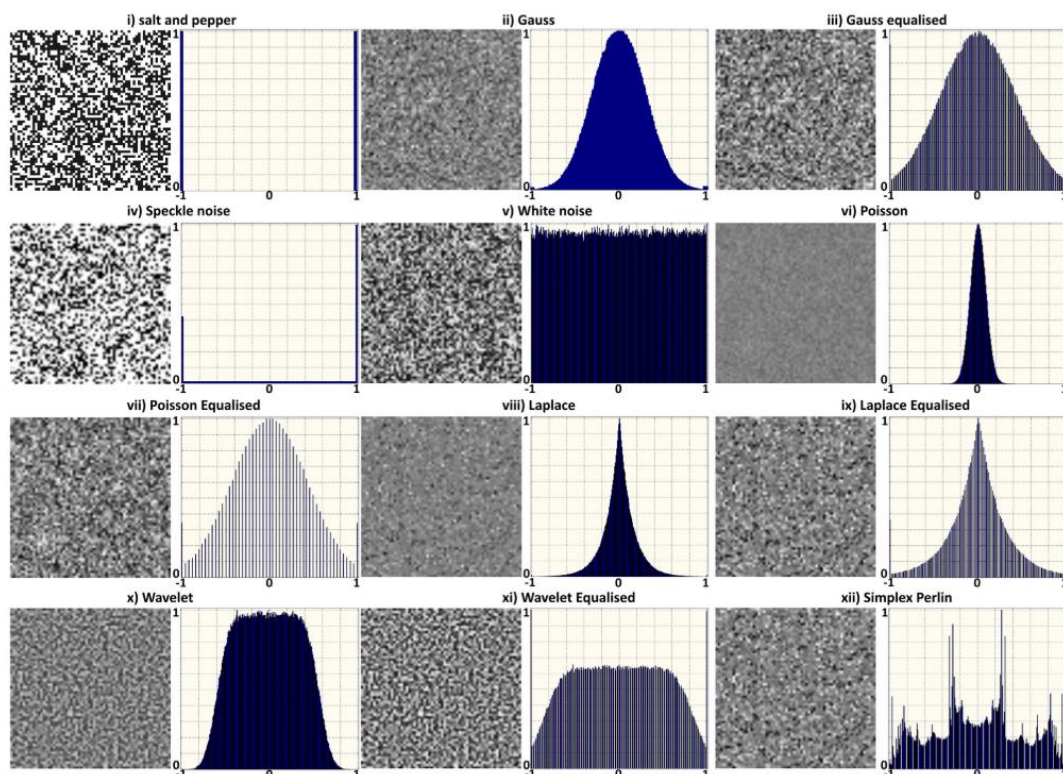
Slika 2.10. Svetlosne teksture:
a) mreža b) x markeri c) nasumični kvadrati [98].

Testiranje sintetički generisanih slika u obliku šahovske table, elektronskog šuma, kvadrata, kosih linija prikazani su kod autora Jahanzeb Hafeez-a i saradnika [99] (Slika 2.11.). Dok je procena sintetički generisanih slika za potrebe poboljšanja vizuelnih karakteristika predstavljena je u radu [100].



Slika 2.11. Primeri korišćenih sintetičkih slika za projektovanje svetlosnih tekstura: a) šahovska tabla b) elektronski šum c) kvadrata d) kose linije [99].

Problem nedostatka vizuelne teksture je istraživao od strane Anestis Koutsoudis i sar. u radovima [60,101,102]. Oni su u okviru istraživanja vezanog za sintetičke slike [60] ispitivali uticaj različitih sintetički generisanih slika baziranih na determinističkim algoritmima (engl. *Noise Function-based Pattern - NFP*) (Slika 2.12.) na rezultate 3D digitalizacije koristeći CRP na bazi SfM-a, dok su rezultate 3D digitalizacije verifikovali CAD inspekcijom.



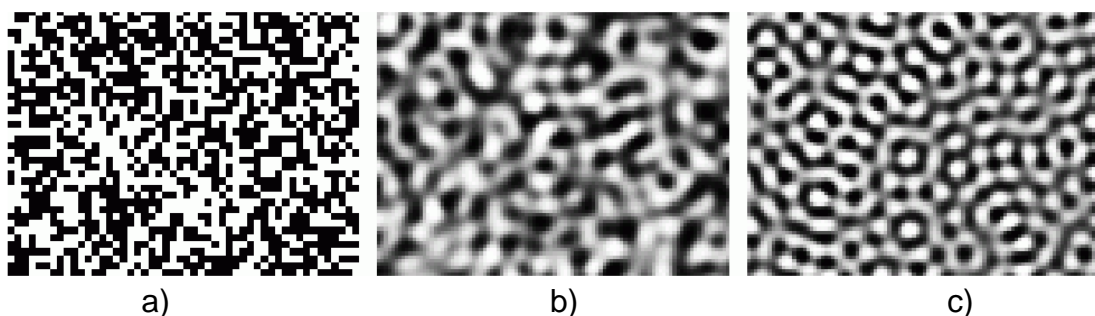
Slika 2.12. Sintetičke slike generisane na osnovu determinističkih algoritama [60].

Testiranja su vršena na sledećim sintetičkim slikama [60] (Slika 2.12.): so i biber (engl. *salt and paper*), Gausova sintetička slika, normalizovana Gausova sintetička slika, šareni šum (engl. *speckle noise*), beli šum (engl. *white noise*), Poisson (engl. *Poisson*), Poisson normalizovan, Laplasijan, Laplasijan normalizovan, wavelet, wavelet normalizovan i simpleks Perlin. Ostvarena tačnost se kretala u intervali od ± 1 mm. Takođe su zaključili da tamne površi i dalje predstavljaju izazov u pogledu 3D digitalizacije primenom SfM metode.

Isabella Toschi i saradnici su u svom radu [59] predstavili proceduru za poboljšanje automatizovane 3D rekonstrukcije površi industrijskih objekata koji imaju slabo izraženu vizuelnu teksturu. Da bi poboljšali karakteristike vizuelne teksture testiranog objekta, pomoću piko projektora su projektovali sliku koja je podsećala na teksturu šljunka sa udaljenosti od oko jednog metra, tako da projektovana slika ostane jasna na površini objekta. Rezultati su pokazali da je sa upotrebom svetlosne teksture dobijena najmanja greška kod dužinskih mera.

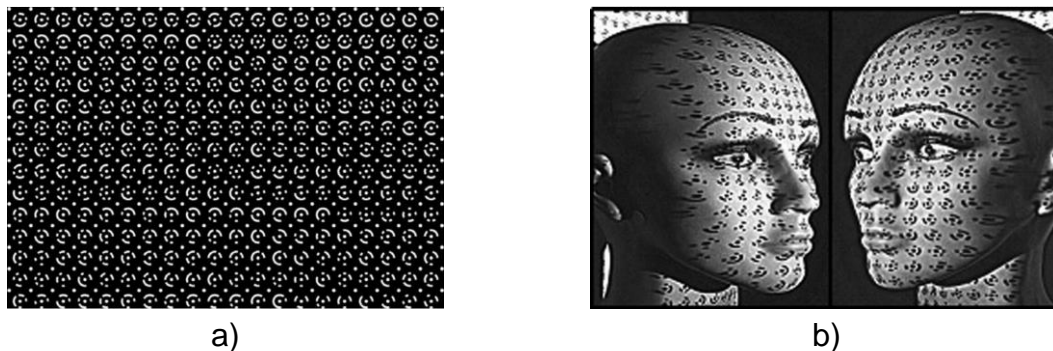
Upotrebu stohastičke svetlosne teksture kod aktivne stereovizije prikazali su Sergio Fernandez i sar. [49]. Oni su projektovanu svetlosnu teksturu koristili za povećanje vizuelnih karakteristika objekta, ali bez osvrtnja na samu konstrukciju sintetičke slike, čime se omogućava generisanje oblaka tačaka visoke rezolucije. Rezultati koje su dobili pokazuju da je tačnost približna drugim aktivnim tehnikama 3D digitalizacije. Kurt Konolige i sar. [57] analizirali su uticaj svetlosne teksture kod aktivnog stereovizijskog sistema sa akcentom na stvaranje optimalnih svetlosnih tekstura baziranih na Hemingovim (engl. *Richard W. Hamming*) kodovima. Zatim su analizirali uticaj ponavljanja (faze) kodova i uticaj zamućenja projektovane svetlosne teksture usled nesavršenosti uređaja za projektovanje.

Upotreba projektovanih sintetički generisanih slika zabeležena je i u medicini za potrebe 3D digitalizacije ljudskog lica [103]. Binarna sintetička slika (Slika 2.13.a) sastavljena je od blokova 2x2 piksela koji su nasumično kreirani, dok su preostrale dve slike (Slika 2.13.b i Slika 2.13.c) izvedene primenom Furierovih (franc. *Jean-Baptiste Joseph Fourier*) transformacija.



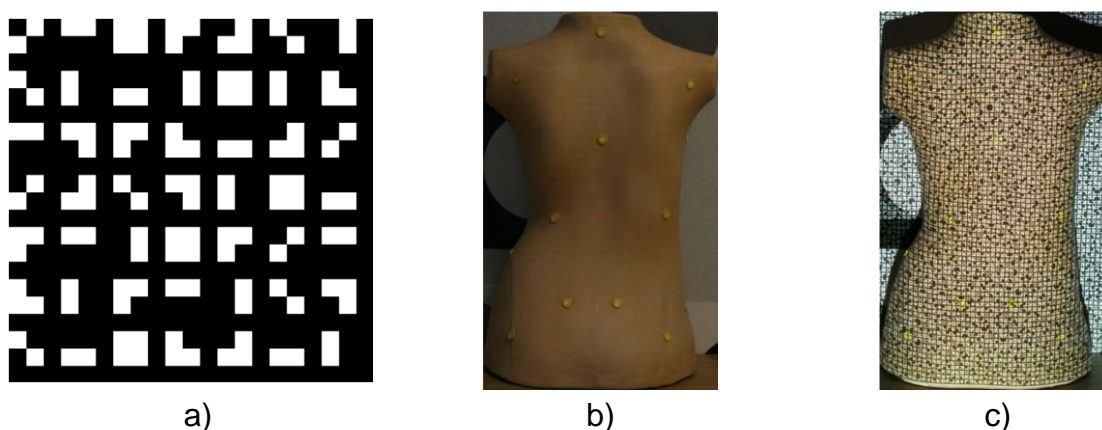
Slika 2.13. Sintetičke slike:
a) binarna b) potisnute visoke frekv. c) potisnute visoke i niske frekv. [103].

Projektovanje svetlosne teksture u vidu kodiranih i nekodiranih markera koji se koriste za uspostavljanje razmere kod CRP predstavljen je radu [104]. Autori su, kao jedan od glavnih problema prilikom primene ove vrste svetlosne teksture, naveli nedostatak kontrasta prilikom projektovanja sintetičke slike u vidu kodiranih i nekodiranih markera na ljudsko lice, ali su taj problem prevazišli snimanjem fotografija u uslovima gde je eliminisano ambijentalno osvetljenje, a projektovani su svetli (invertovani) kodirani markeri (Slika 2.14.).



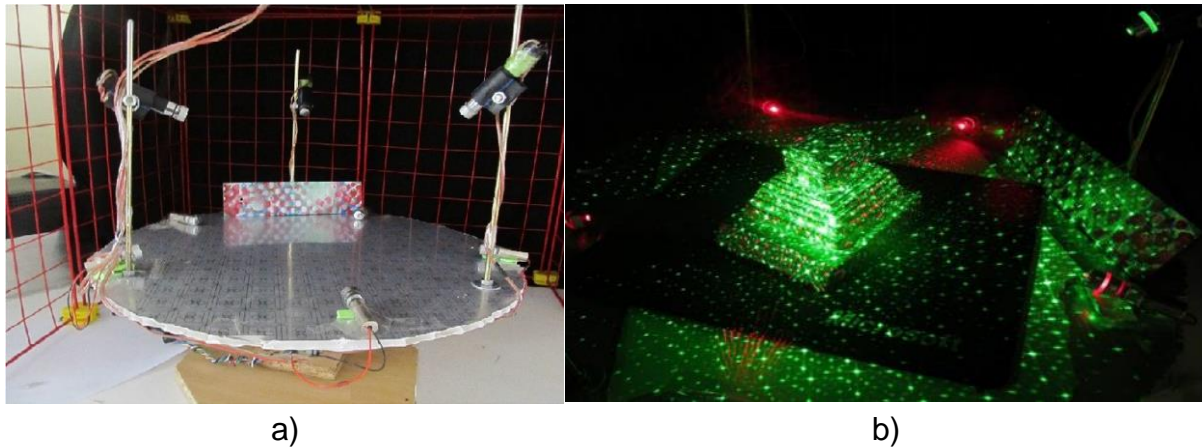
Slika 2.14. Poboljšanje vizuelnih karakteristika kodiranim i nekodiranim markerima: a) sintetička slika b) svetlosna tekstura [104].

Pored samih sintetičkih slika razvijani su i različiti fotogrametrijski sistemi za akviziciju fotografija. Ovi sistemi često se sastoje iz više kamera i video projektor a i specijalizovani su 3D digitalizaciju u određenoj oblasti. U medicini, pored 3D rekonstrukcije glave razvijani su i sistemi za 3D digitalizaciju torza primenom projektovanja svetlosnih tekstura [105]. Jedan takav sistem razvijan je od strane Yu-Chuan Chang [106] koji se sastoji od četiri video projektora i sedam sinhronizovanih kamera. Za potrebe ovog sistema razvijena je posebna binarna sintetička slika (Slika 2.15.).



Slika 2.15. 3D digitalizacija torza: a) kreirana sintetička slika b) torzo bez projektovane svetlosne teksture c) torzo sa projektovanom svetlosnom teksturom [106].

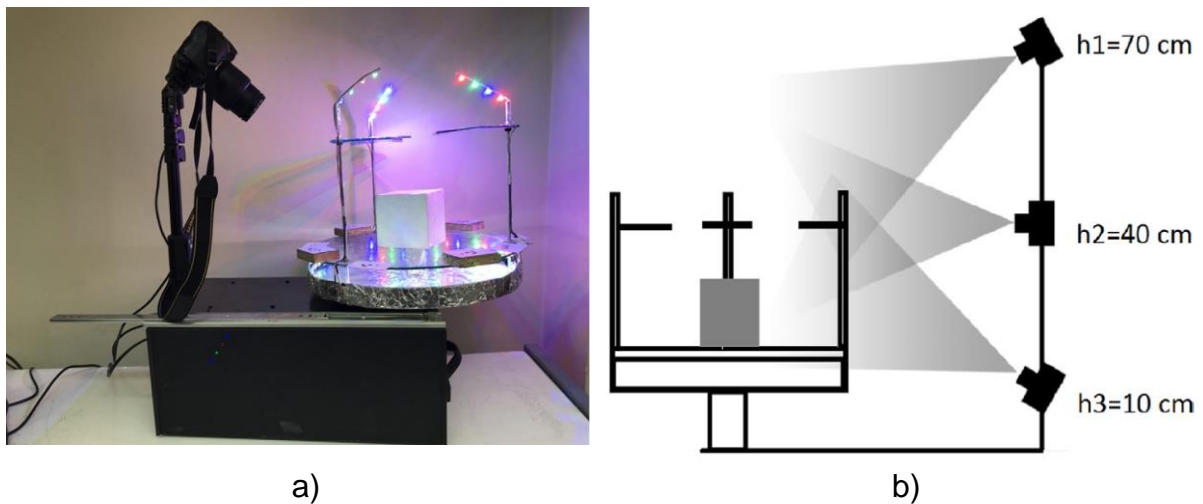
Ali Hosseinaveh Ahmadabadian i sar. [47,107], razvili su sistem za 3D digitalizaciju objekata bez naglašene vizuelne teksture primenom tačkastih lasera različitih boja.



Slika 2.16. Sistem za fotogrametrijsku 3D digitalizaciju objekata bez izražene vizuelne teksture:

a) izgled sistema b) izgled sistema u radu [47,107].

Dobijeni rezultati 3D digitalizacije primenom SfM metode takođe su verifikovani CAD inspekcijom. Unapređena automatizovana verzija prethodnog sistema (Slika 2.17.) predstavljena je u radu Ali Hosseinaveh Ahmadabadian-a i saradnika [108].



Slika 2.17. Sistem za fotogrametrijsku 3D digitalizaciju površi bez vizuelne teksture: a) izvedeno rešenje b) šema mogućnosti pozicioniranja kamere [108].

Ming Zhou i Clive S. Fraser [109] vršili su istraživanje uticaja projektovanja svetlosne teksture sa neponavljajućim rasporedom (engl. *Non-Repeating Pattern - NRP*) na sistemu sa četiri kamere (engl. *Multi View Sensor System- MVSS*) u realnom vremenu.

2.3 Istraživanja u ovoj disertaciji

Različita komercijalna rešenja zasnovana na metodama 3D digitalizacije su već odavno prisutna na evropskom i svetskom tržištu sa tendencijom daljeg razvoja sistema za 3D digitalizaciju [110]. Oblasti primene fotogrametrijske rekonstrukcije su veoma široki, pa su stoga Ying-mei i saradnici klasifikovali primenu CRP zasnovane na određivanju SfM u deset kategorija kako bi pomogli istraživačima da što bolje pozicioniraju svoj rad u kontekstu postojećih tehnika [111]:

- 1) rekonstrukcija 3D modela,
- 2) proširena realnost,
- 3) autonomno navođenje i navigacija,
- 4) snimanje pokreta,
- 5) kalibracija robota,
- 6) obrada slike/videoa,
- 7) 3D modeliranje,
- 8) daljinska detekcija,
- 9) organizacija i izbor fotografija i
- 10) segmentacija i registracija, vojna primena.

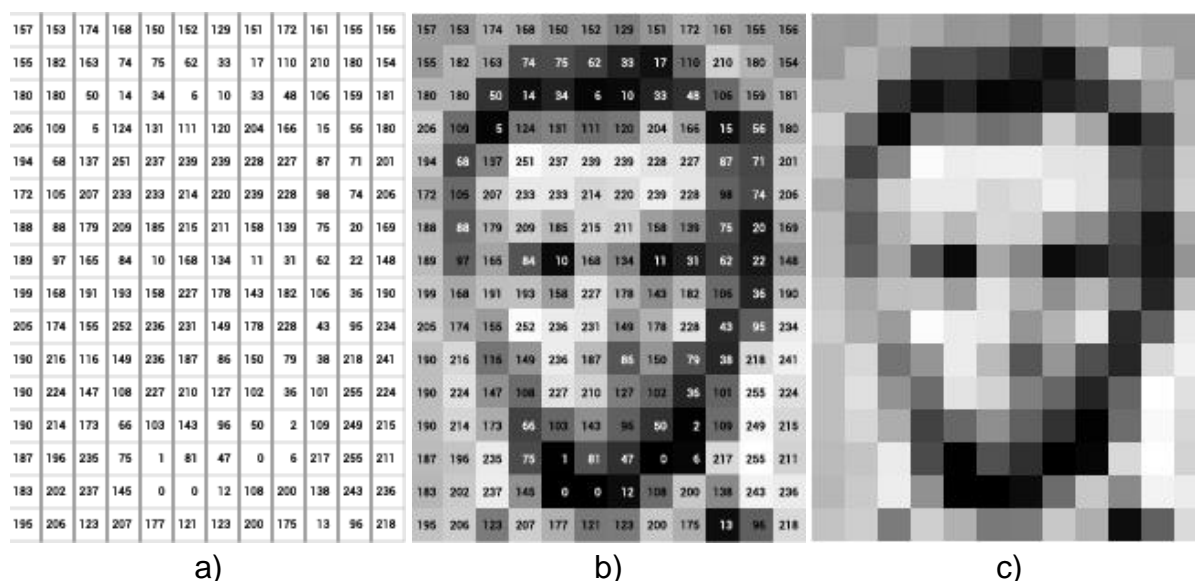
Od navedenih deset kategorija, istraživanja sprovedena u okviru ove disertacije odnose se na prvu kategoriju – rekonstrukcija 3D modela.

Na osnovu prethodne analize radova CRP metoda bazirana na SfM, zahvaljujući konstantnom razvoju na polju 3D digitalizacije i sve većem ulaganju u digitalnu tehniku, danas je veoma pristupačna, a takođe može da parira ostalim metodama 3D digitalizacije u pogledu tačnosti, ukoliko se primenjuje na objektima koji poseduju potrebne vizuelne karakteristike.

U ovom istraživanju za razliku od analiziranih radova fokus je stavljen na kreiranje novih sintetičkih slika, kao i novom načinu u njihovoj evaluaciji. Takođe za razliku od predstavljenih sistema za akviziciju fotografija koji koriste sintetičke slike ili drugi vid za projektovanje svetlosti (kako bi privremeno podigli kvalitet vizuelne teksture) predstaviće se idejna rešenja sistema koji koriste samo jedan projektor i jednu kameru.

3. SINTETIČKE SLIKE I SVETLOSNE TEKSTURE

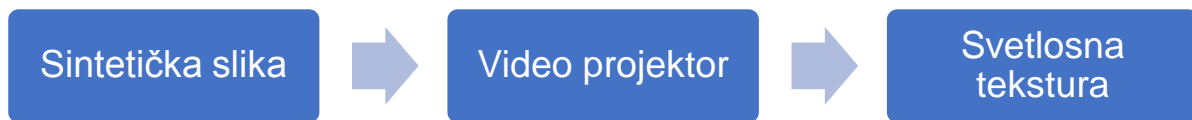
Uspešnost SfM algoritma kod određivanja karakterističnih obeležja na snimljenoj 2D fotografiji je ključan za sve naredne faze (kreiranje oblaka tačaka visoke rezolucije i kreiranje površinskog 3D modela) u procesu 3D digitalizacije [45]. 2D Digitalna slika je definisana kao dvodimenzionalna funkcija, $f(x, y)$, gde su x i y prostorne (ravanske) koordinate, a amplituda u bilo kom paru koordinata (x, y) naziva se intenzitet u toj koordinati (Slika 3.1.). Termin nijansa sive (engl. *gray level*) se često koristi za označavanje intenziteta monohromatskih slika [112], a digitalna slika u svom 8-bitnom zapisu sadrži 256 različitih nivoa sive boje, gde vrednosti 0 i 255 predstavljaju granične (minimalne i maksimalne) vrednosti odnosno crnu i belu boju.



Slika 3.1. Digitalna slika:

a) matrica intenziteta b) matrica intenziteta sa dodeljenim nijansama sive c) finalni izgled digitalne slike [113].

Stoga sintetička slika je svaka digitalna slika koja je nastala veštačkim putem. Projektovanjem sintetičke slike pomoću video projektora na površi objekata vrši se transformacija u svetlosnu teksturu (Slika 3.2.).



Slika 3.2. Transformacija sintetičke slike u svetlosnu teksturu.

3.1 Generisanje sintetičkih slika na osnovu decimala iracionalnih brojeva

Iracionalni brojevi su realni brojevi koji ne mogu biti zapisani kao razlomak dva cela broja. Odlikuje ih jedna posebna karakteristika, a to je da ne postoji periodičnost u beskonačnom nizu iza decimalnog zareza. Upravo ova osobina ih čini pogodnim za kreiranje sintetičkih slika za projektovanje svetlosnih tekstura i poboljšanja vizuelnih karakteristika na površima objekata koji takvu teksturu ne poseduju, a gde tehnike fizičkog poboljšanja teksture nisu dozvoljene. U nastavku su predstavljeni poznatiji iracionalni brojevi, čiji decimalni brojevi su korišćeni za kreiranje sintetičke slike, odnosno rasterske bitmape. Izračunavanje svih potrebnih decimala se vrši pomoću y croucher 0.7.5 Build 9481 softvera [114–116].

Na prvom mestu među najpoznatijim iracionalnim brojevima je svakako broj pi (π). Broj π je matematička konstanta koja se definiše kao odnos obima i prečnika kruga ili kao odnos površine kruga i kvadrata nad njegovim poluprečnikom. Veoma često se primenjuje u raznim matematičkim operacijama vezanih za geometrijski oblik kruga. Do danas razvijen je veliki broj algoritama za računanje decimala broja π [117,118]. Prema Machinu [117] (engl. *John Machin*) do sada najtačnija aproksimacija broja π data je formulom (3.1).

$$\pi = 1/\log(5) + 1/\log(239) \quad (3.1)$$

Izračunata vrednost broja π zaokruženog na 20 decimala pomoću Machinove formule iznosi 3,14159265358979323846. Za veoma precizno izračunavanje površine i obima kruga dovoljno je koristiti prvih 5 ili 6 decimala, ali zbog svojih iracionalnih karakteristika ljude je uvek privlačilo da izračunaju što veći broj decimala broja π , pa tako danas postoje bilioni izračunatih decimala. Sa softverom y croucher 0.7.5 Build 9481 mogu da se izračunaju decimale broja π preko algoritma (3.2) Chudnovsky-og iz 1988 [119]:

$$\frac{1}{\pi} = \frac{\sqrt{10005}}{4270934400} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{(6k)!}{(k!)^3(3k)!} \frac{(13591409 + 545140134k)}{640320^{3k}} \quad (3.2)$$

ili algoritma Ramanujan-a (3.3) iz 1910 [119]:

$$\frac{1}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{9801} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(4k)! (1103 + 26390k)}{k!^4 396^{4k}} \quad (3.3)$$

Trenutni svetski rekord u izračunavanju decimala broja π postavljen je 21.01.2019. od strane Emma Haruka Iwao i iznosi 31.415.926.535.897 decimala (31 bilijarda 415 biliona 926 miliona 535 hiljada 897) [114].

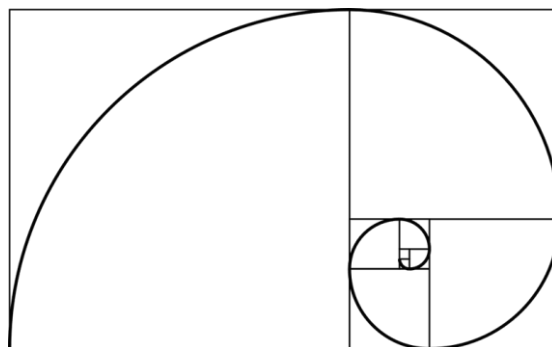
Drugi iracionalni broj čije decimale će biti korišćene za kreiranje sintetičkih slika je broj fi (φ) poznatiji kao zlatni presek. U matematici predstavlja odnos između dve veličine a i b koje zadovoljavaju jednačinu (3.4) [120], uz pretpostavku da je $a > b$.

$$\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} = \varphi \quad (3.4)$$

Ova jednačina ima jedno jedinstveno iracionalno pozitivno rešenje (3.5).

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,61803398 \dots \quad (3.5)$$

Slika 3.3. predstavlja konstrukciju spirale zlatnog preseka, koja može da se nađe u prirodi kod puževa. Zlatni presek poznat je od davnina. Korišćen je još od antičkog doba u arhitekturi, građevinarstvu, a takođe i u umetnosti i ima veoma široku upotrebu u modernom dizajnu [121].



Slika 3.3. Grafički prikaz zlatnog preseka kod konstrukcije spirale.

Iracionalni broj e , poznat kao Ojlerov broj ili Neperova konstanta, osnova je prirodnog logaritma i jedan od najznačajnijih brojeva u savremenoj matematici. Po svojim karakteristikama e broj je iracionalan, realan i transcendentan [122]. U matematici se koristi za definisanje eksponencijalnih funkcija, takođe ima primenu i u drugim oblastima poput ekonomije za proračun kamatnog računa ili u biologiji za proračun porasta populacije živih organizama tokom vremena.

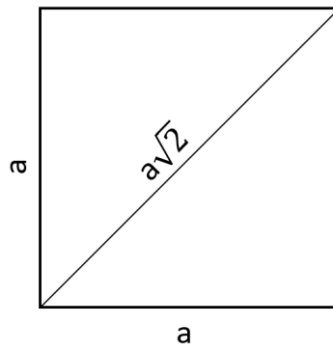
Y-croucher koristi Taylor seriju za $\exp(1)$ (3.6) i $\exp(-1)$ (3.7) formulu za izračunavanje decimala broja e [119]:

$$e = \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} + \dots \quad (3.6)$$

$$e = \frac{1}{0!} - \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} - \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} - \dots \quad (3.7)$$

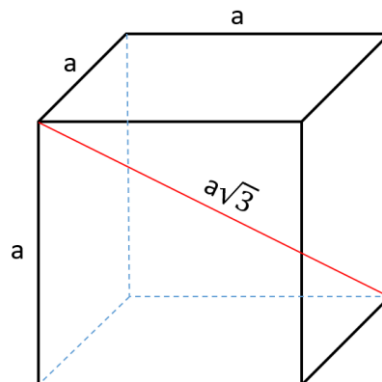
Trenutni svetski rekord u broju izračunatih decimala drži Gerald Hofmann sa izračunatim 8 000 000 000 000 decimala.

Veliki broj kvadratnih korena su takođe iracionalni brojevi kao npr. $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, $\sqrt{5}$, $\sqrt{6}$, $\sqrt{7}$, $\sqrt{8}$ itd. Kvadratni koren prirodnog broja 2 ili $\sqrt{2}$ je iracionalni broj koji predstavlja odnos dužine dijagonale kvadrata i njegove stranice (Slika 3.4.).



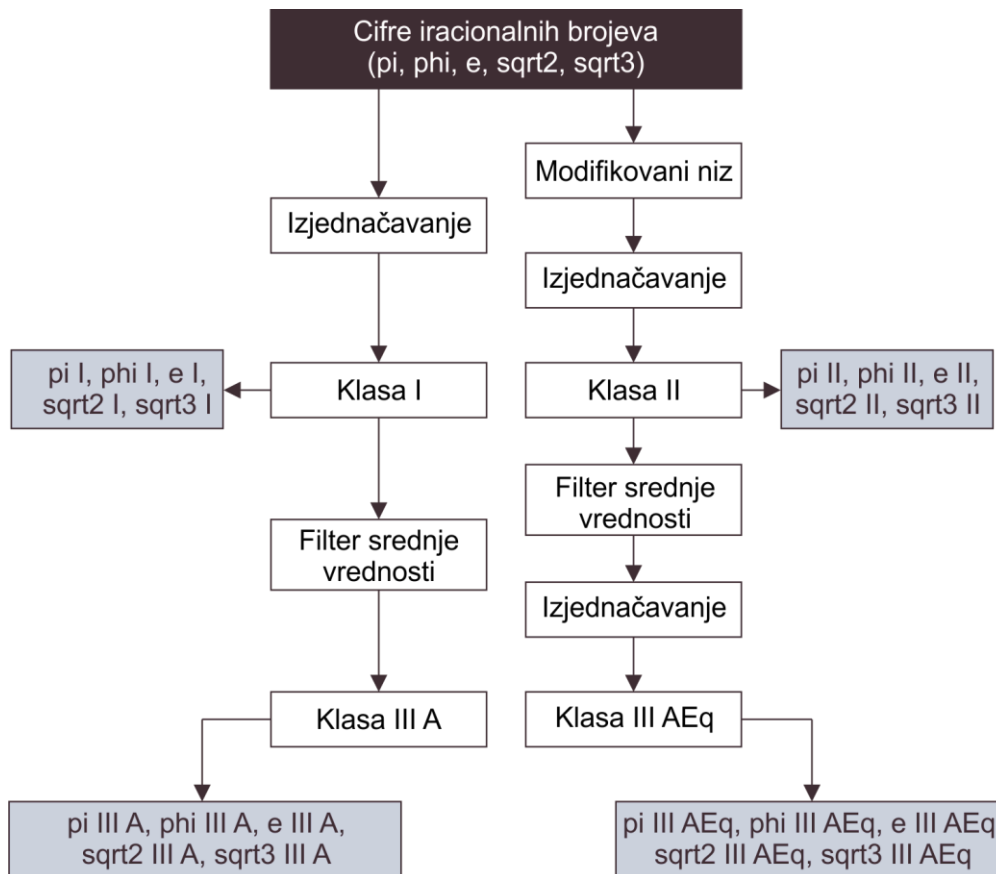
Slika 3.4. Grafički prikaz odnosa stranice i dijagonale kvadrata.

Za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji korišćiće se još i decimale kvadratnog korena broja 3, koji predstavlja dužinu dijagonale kocke stranice a . Dužina dijagonale kocke predstavlja dužinu telesne dijagonale (Slika 3.5).



Slika 3.5. Grafički prikaz odnosa stranice i dijagonale kocke.

Sintetičke slike predstavljene u nastavku mogu se podeliti u tri opšte klase prema broju nijansi sive boje. Klasa I sintetičkih slika sadrži samo 10, klasa II 19, a klasa III može da sadrži između 19 i 256 različitih nijansi sive. Ova podela prema klasama uslovljena je prirodom kreiranja sintetičkih slika. Sintetičke slike se kreiraju u dva pravca (Slika 3.6.). Jednom pravcu pripadaju sintetičke slike klase I i klase III A, dok drugom pravcu pripadaju slike klase II i klase III AEq [123].



Slika 3.6. Šematski prikaz kreiranja sintetičkih slika generisane na osnovu cifara iracionalnih brojeva [123].

3.1.1 Klasa I

Sintetičke slike klase I nastaju izračunavanjem potrebnog broja decimala određenog iracionalnog broja i slaganjem istih u matricu. Matrica veličine $m \times n$ odgovara broju piksela buduće sintetičke slike tako da svaki decimalni broj predstavlja određeni intenzitet u 8-bitnom zapisu. Rezultat složenih vrednosti u matrici je rasterska bitmapa. Zbog karakteristike zapisa, primenjuje izjednačavanje histograma koje podrazumeva ravnomerno raspoređivanje svih vrednosti od 0 do 9 u rasponu od 0 do 255. Generisana bitmapa (sintetička slika) sadrži 8 nijansi sive boje, potpuno crnu boju koju predstavlja 0 i potpuno belu boju predstavljenu sa 9 (ekvivalent 255). Na slici 3.7. dat je primer koda napisanog u Matlabu za kreiranje sintetičkih slika klase I na osnovu decimala iracionalnih brojeva [123].

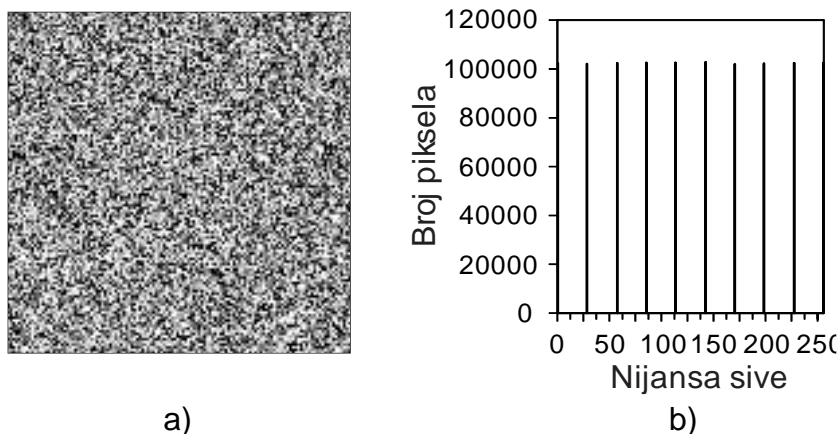
```

M = dlmread('Digits'.txt');           % Uvoz decimalnog niza u .txt formatu
M1=uint8(M);                          % Konverzija decimala u 8-bitni zapis
reswidth = 1280;                       % Rezolucija širina
resheight = 800;                       % Rezolucija visina
WXGA= reswidth*resheight;              % Rezolucija projektora
b = M1(1:WXGA);                        % Ograničenje niza na rezoluciju projektora
B = reshape(b,[], resheight);          % Kreiranje sintetičke slike
B1=B';                                  %
imwrite(B1, 'name_l.bmp');              % Snimanje sintetičke slike

```

Slika 3.7. Kod napisan u Matlab softverskom paketu za generisanje sintetičkih slika klase I na osnovu decimala iracionalnih brojeva [123].

Slike generisane na osnovu decimala iracionalnih brojeva u klasi I imaju 10 različitih nijansi odnosno boja – intenziteta (Slika 3.8.) i konstantan raspored intenziteta piksela u celom rasponu 0 – 255.



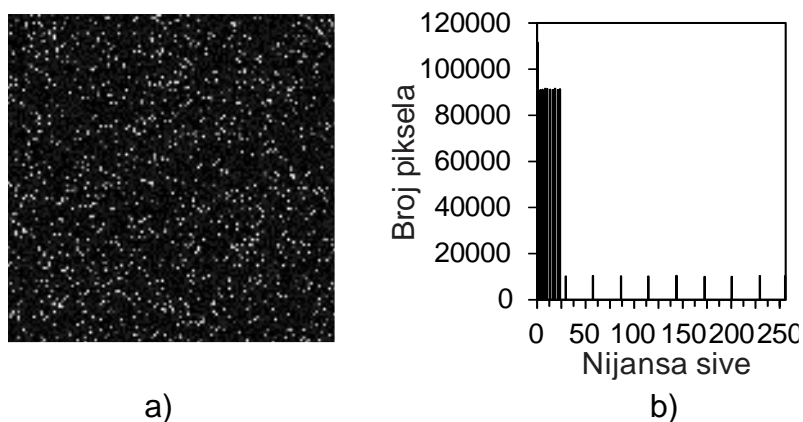
Slika 3.8. Slika generisana na osnovu decimala broja π (π I):
a) vizuelna interpretacija b) histogram nakon ujednačavanja [123].

Pošto iracionalne brojeve karakteriše neponovljivost sekvence i nizu iza decimalnog zareza, sintetičke slike generisane na ovaj način imaju jedinstvenu i snažnu stohastičku vizuelnu teksturu.

3.1.2 Klasa II

Sintetičke slike klase II pripadaju drugom pravcu i nastaju prethodnom obradom niza decimala iracionalnih brojeva. Obrada se sastoji u modifikaciji prethodno izračunate sekvence decimala iracionalnog broja. Koristi se nešto uvećana sekvenca nego što je potrebna za klasu I. Nakon toga vrši se pretraživanje i spajanje dve iste susedne cifre. Modifikovani niz nakon sređivanja sadrži brojeve kao i klasa I od 0 do 9, ali i nove brojeve 11, 22, 33, ..., 88, 99 dobijene združivanjem istih susednih cifara proširujući broj nijansi sa 10 na 19. Frekvencija novih brojeva dobijenih združivanjem je mnogo

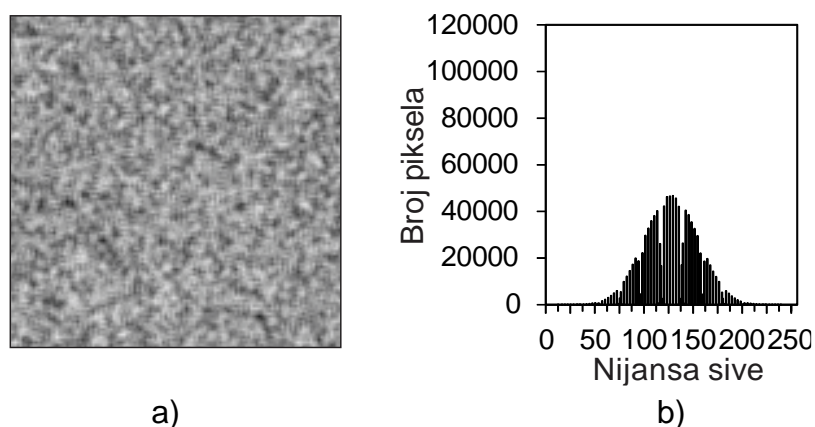
manja u odnosu na frekvenciju brojeva od 0 do 9 i pored ujednačavanja histograma generisanom slikom preovlađuju tamne nijanse sa nasumičnom distribucijom svetlih tačaka (Slika 3.9.) [123].



Slika 3.9. Grafički prikaz sintetičke slike klase II:
a) vizuelna interpretacija b) histogram [123].

3.1.3 Klasa III A

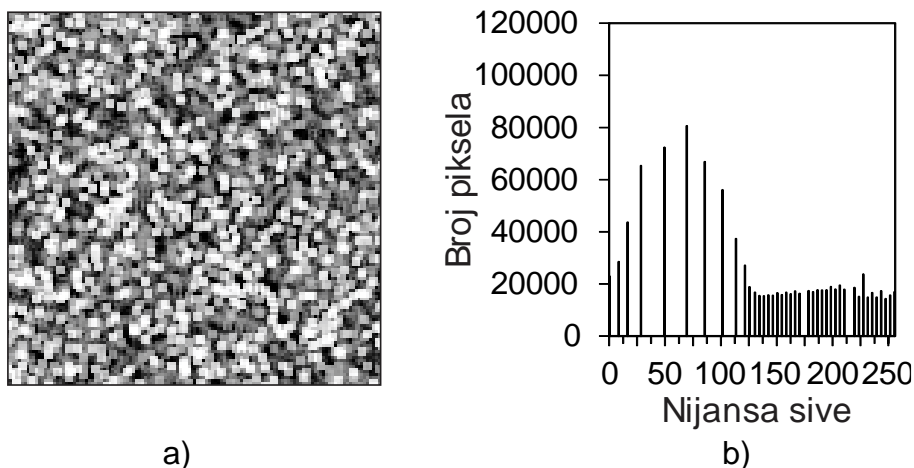
Sintetičke slike klase III A pripadaju prvom pravcu i nastaju kada se na već generisanu sintetičku sliku klase I primeni filter srednje vrednosti (engl. *Average filter*). Veličina filtera iznosi 3x3 piksela što znači da se posmatrani piksel zamenjuje srednjom vrednošću svojih najbližih susjednih piksela koji ga okružuju. Primenom ovog filtera dobija se sintetička slika sa histogramom koji poprima oblik normalne raspodele (Slika 3.10.). Slike u ovoj klasi sadrže intenzitete u rasponu od 0 do 255 ali ne poseduju granične vrednosti (0 i 255), odnosno nemaju crnu i belu boju. Poređenjem vizuelnih interpretacija slika klase I i klase III A primetni su manji kontrast i veća ujednačenost na slikama klase III A, što je posledica primene filtera srednje vrednosti.



Slika 3.10. Grafički prikaz sintetičke slike klase III A:
a) vizuelna interpretacija b) histogram [123].

3.1.4 Klasa III AEq

Klasa III AEq drugog pravca nastala je obradom sintetičkih slika klase II. Predstavlja nadogradnju sa ciljem postizanja većeg kontrasta i izražajnije neujednačenosti (Slika 3.11.a). Sintetičke slike ove klase poseduju kombinovani histogram (Slika 3.11.b) kojeg odlikuju delovi normalne i uniformne raspodele.



Slika 3.11. Sintetička slika klase III AEq:
a) vizuelna interpretacija b) histogram [123].

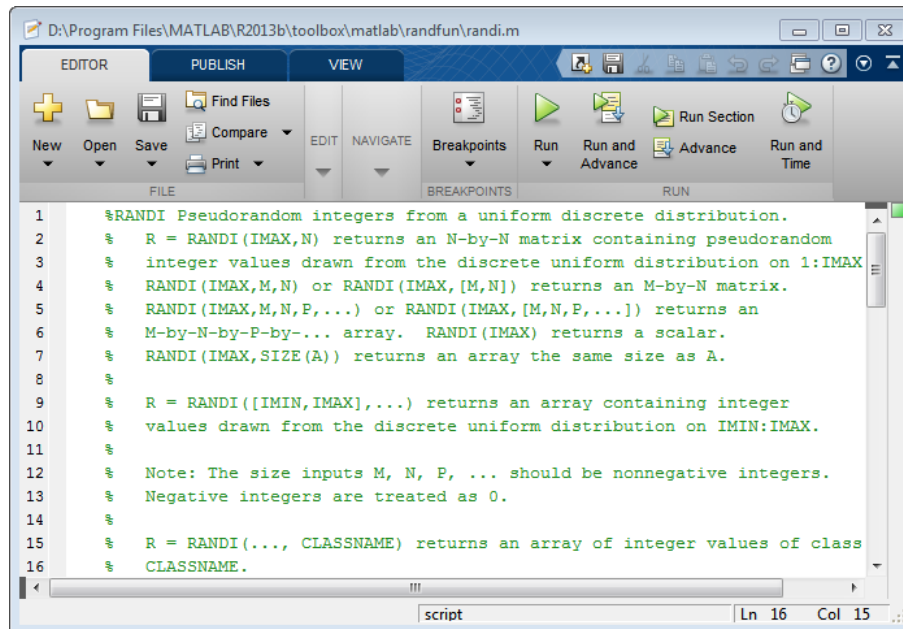
Sintetičke slike ove klase dobijaju se kada se na slike klase II primene prvo filter srednje vrednosti, a zatim izvrši izjednačavanje histograma (engl. Histogram Equalization). Intenziteti su raspoređeni u rasponu od 0 do 255, s tim da nisu zastupljene sve nijanse sive boje. U poređenju sa klasom II u klasi III AEq nema izraženih svetlih tačaka već su obrazovane veće grupe svetlijih i tamnijih piksela, sa blagom prednošću tamnijih piksela koji su dominantni u klasi II [123].

3.2 Generisanje sintetičkih slika na bazi determinističkih algoritama

Sintetička slika može se dobiti i uz pomoć determinističkih algoritama slažući niz nasumičnih brojeva u matricu. Deterministički algoritmi u oblastima računarskih nauka predstavljaju uzročno posledične algoritme koji za određene, iste ulazne podatke, uvek daju određene iste izlazne podatke. Stoga, proces je moguće lako kontrolisati i ponavljati. Deterministički algoritam izračunava matematičku funkciju koja ima jedinstvenu definisanu vrednost - izlaz za određeni ulaz u svom domenu. Sintetički generisane slike uz pomoć ovakvih algoritama mogu se proizvesti uz prethodno određene ulazne vrednosti. U nastavku biće detaljnije objašnjeno generisanje sintetičkih slika uz pomoć nekoliko najpoznatijih determinističkih algoritama [124,125].

3.2.1 Sintetičke slike uniformnog histograma

Funkcija „randi“ implementirana u Matlab softverskom paketu služi za kreiranje matrice nasumičnih brojeva uniformno raspoređenih u određenom intervalu (Slika 3.12) [126].



Slika 3.12 Randi funkcija – Matlab.

Implementirana funkcija (3.8) za generisanje uniformnog nasumičnog niza zasnovana je na Lehmerovom algoritmu (engl. *Derrick Henry Lehmer*) [125]. Za generisanje niza potrebno je definisati četiri cela broja.

$$X_{(n+1)}=(a \cdot X_n+b) \cdot \text{mod}(m) \quad (3.8)$$

Gde su:

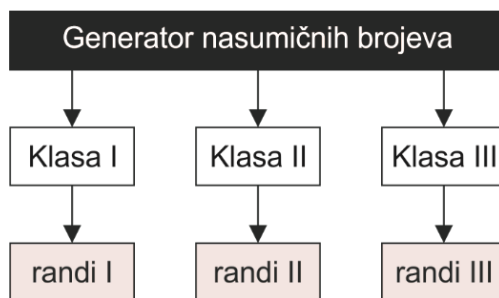
X_n – početni broj (seme),

a – činilac,

b – korak,

m – moduo.

Početni broj niza uzima se proizvoljno iz intervala $1,2,3,\dots, m-1$, a izgled niza zavisi od pomenutih početnih parametara. Na slici 3.13. prikazana je šema generisanja sintetičkih slika pomoću generatora nasumičnih brojeva. Pomoću generatora nasumičnih brojeva kreirane su sintetičke slike u tri klase. Randi I, II i III sintetičke slike dobijene su pomoću već pomenute „randi“ funkcije [105]. Za kreiranje sintetičkih slika prethodno je potrebno definisati veličinu buduće matrice koja odgovara rezoluciji buduće slike.



Slika 3.13. Šema generisanja sintetičkih slika na osnovu generatora nasumičnih brojeva [123].

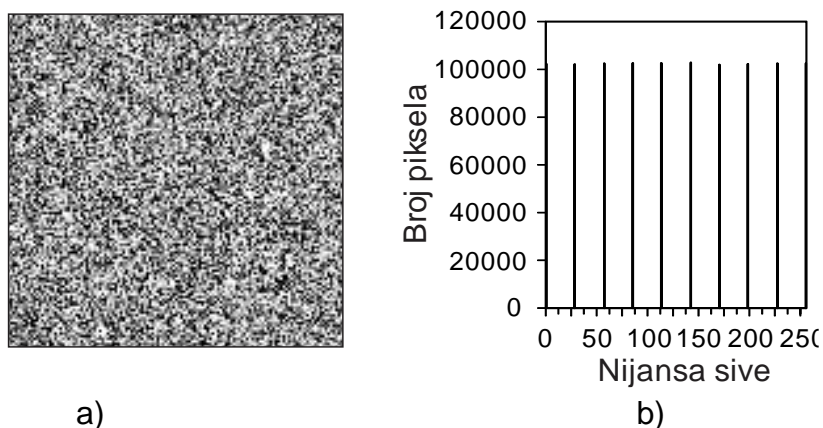
Rezolucija slike određuje se prema stvarnoj rezoluciji projektora koji će biti korišćen za projektovanje. Kod kreiranja sintetičke slike randi I nakon izvršavanja funkcije randi kreira se matrica celih brojeva u intervalu od 0 do 9. Kreirana rasterska bitmapa u ovakvom obliku mora se podvrgnuti ujednačavanju histograma kako bi se nijanse sive boje uniformno rasporedile u dijapazonu od 0 do 255 koliko je definisano 8-bitnim zapisom. Primer koda napisanog u Matlab-u za kreiranje sintetičke slike klase I (Slika 3.14.):

```

reswidth=1280;           % širina slike
reshight=800;           % visina slike
R = randi([0 9],[reswidth reshight]); % kreiranje matrice celih brojeva u intervalu
                           od 0 do 9
n=10;                   % broj nijansi
J = histeq(R,n);        % ujednačavanje histograma
imwrite=(J, 'randi_1.bmp'); % snimanje sintetičke slike
  
```

Slika 3.14. Kod napisan u Matlab-u za kreiranje sintetičke slike klase I.

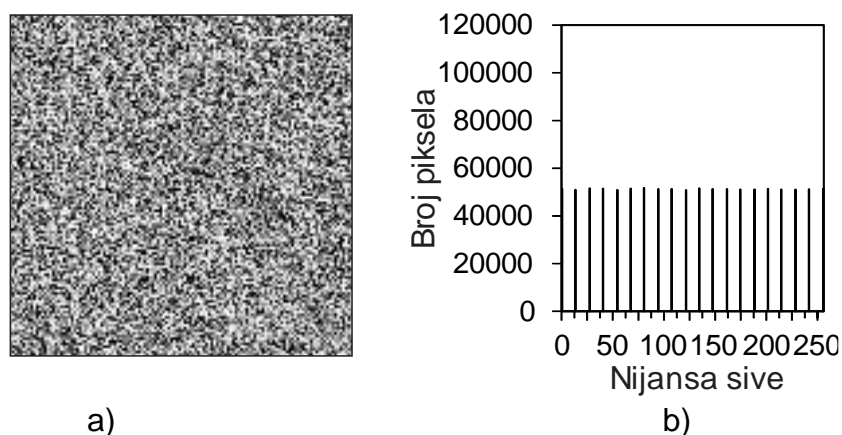
Slika 3.15. prikazuje vizuelnu interpretaciju kreirane sintetičke slike randi I klase I, kao i izgled njenog histograma.



Slika 3.15. Randi I sintetička slika:
a) vizuelna interpretacija b) histogram [123].

Ovu sintetičku sliku karakteriše snažna stohastička vizuelna tekstura. Prilikom snimanja sintetičke slike potrebno je izabrati format zapisa koji ne vrši kompresiju, npr. .bmp, .tif kako ne bi došlo do gubitka kvaliteta slike. Izgled histograma sintetičke slike klase I uniformnih brojeva gotovo je identičan histogramu klase I sintetičkih slika iracionalnih brojeva, ali razlika je u distribuciji brojeva unutar same matrice koja predstavlja sintetičku sliku.

Randi II sintetička slika dobija se na sličan način kao i randi I. Razlika između ove dve slike se ogleda u broju nijansi, tako da randi II sintetička slika sadrži 19 različitih nijansi sive. Prilikom generisanja ove sintetičke slike biraju se brojevi između 0 i 18. Na slici 3.16. prikazana je vizuelna reprezentacija i karakterističan histogram randi II sintetičke slike.

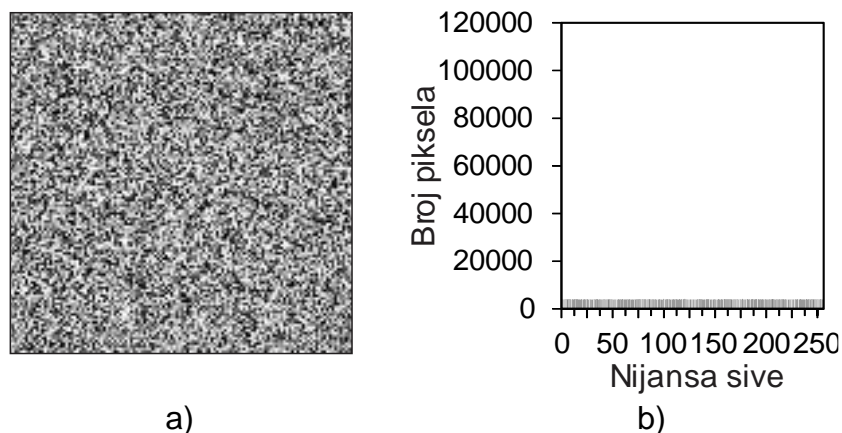


*Slika 3.16. Randi II sintetička slika:
a) vizuelna interpretacija b) histogram [123].*

Funkciju ujednačavanja histograma „histeq“ za određeni broj nijansi je takođe potrebno primeniti na ove sintetičke slike. Kao rezultat na histogramu sa slike 3.16.b može se uočiti uniformna distribucija nijansi sive u ukupnom intervalu vrednosti od 0 do 255. Ukupan broj piksela svake nijanse je prepolovljen u odnosu na randi I, što je posledica skoro dvostrukog povećanja broja nijansi sive.

Sintetička slika randi III je takođe dobijena pomoću generatora nasumičnih brojeva s tim da su za generisanje ove slike korišćeni brojevi u intervalu od 0 do 255. Na slici 3.17. prikazana je vizuelna interpretacije randi III slike i njen histogram.

Za razliku od randi I i randi II ova sintetička slika ne zahteva primenu funkcije ujednačavanja histograma zbog činjenice da samim kreiranjem sadrži uniformno distribuirani histogram na celom intervalu nijanse sive od 0 do 255. Radi lakšeg poređenja ordinata na histogramu je zadržana u istoj razmeri kako bi se uočila razlika u distribuciji i broju korišćenih nijansi.



Slika 3.17. Rand III slika generisana funkcijom nasumičnog niza sa 256 nijansi sive: a) vizuelna interpretacija b) histogram [123].

Karakteristike ovih slika se ogledaju u brzini i lakoći kreiranja, ali promenom i jednog ulaznog parametra pri kreiranju, dolazi do promene u distribuciji piksela nijansi sive što može da dovede do promena u distribuciji određenih nijansi, a samim tim i krajnjem izgledu sintetičke slike koje na prvi pogled deluju veoma ujednačeno.

3.2.2 Sintetičke slike sa histogramom u obliku normalne raspodele

Pored uniformino distribuiranih histograma, često se mogu sresti i sintetičke slike sa histogramima u obliku Gausove normalne raspodele. Model Gausovog šuma (engl. *Gaussian Noise*), koji se često naziva i „normalan šum“, se zbog svoje matematičke fleksibilnosti u prostornom i frekventnom domenu često susreće u praksi. Takođe se naziva i elektronski šum jer se javlja u pojačivačima signala ili sensorima. Funkcija na osnovu koje se generiše sintetička slika data je jednačinom (3.9) [120,127].

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.9)$$

Gde je:

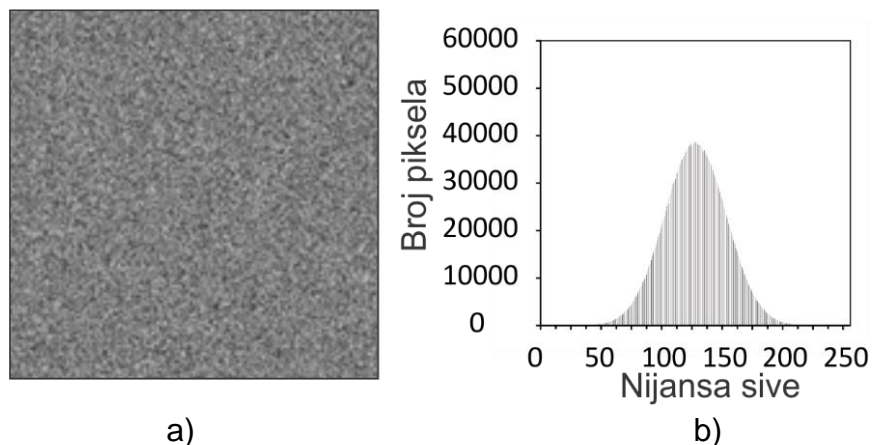
z – intenzitet piksela (gray level)

μ - srednja aritmetička sredina od z

σ - standardna devijacija

σ^2 – varijansa

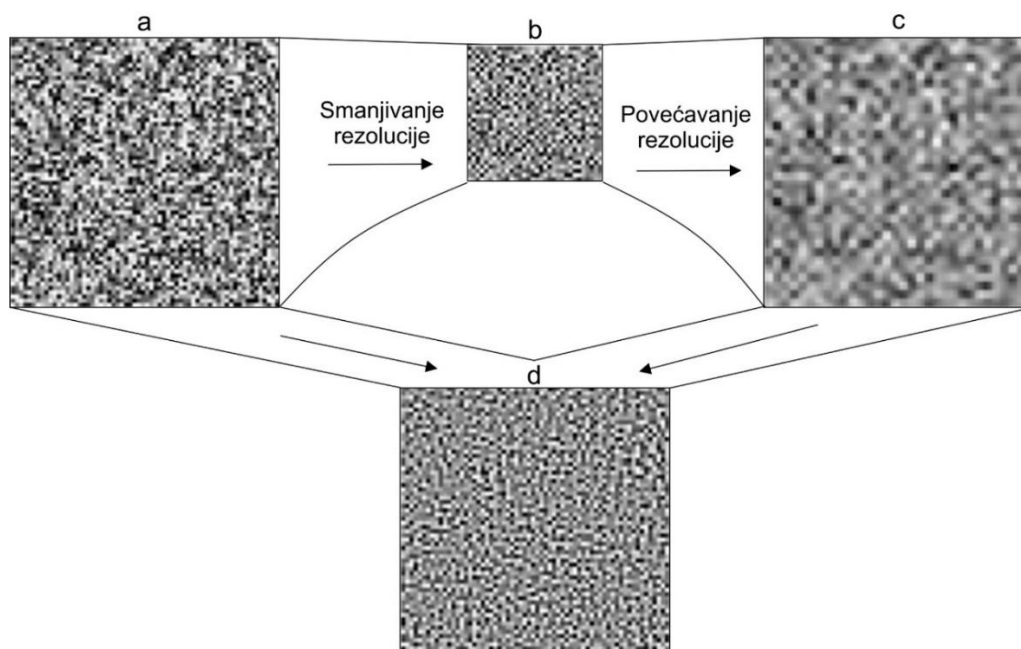
Histogram sintetičke slike generisan pomoću ove funkcije ima izgled normalne raspodele (Slika 3.18.). Karakteristika sintetičke slike sa histogramom u obliku normalne raspodele je da se najveći broj nijansi sive nalazi oko srednje aritmetičke sredine graničnih vrednosti. Drugim rečima sintetičkom slikom će preovlađivati pretežno sive nijanse sa veoma malim brojem nijansi koje teže graničnim vrednostima (crne ili bele boje).



Slika 3.18. Gausova sintetička slika i histogram:
a) vizuelna interpretacija b) histogram [60].

3.2.3 Sintetičke slike sa kombinovanim histogramom

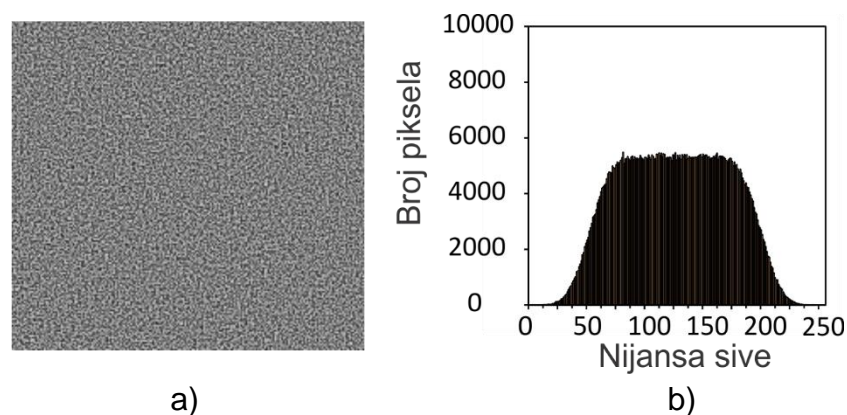
Kreiranje različitih sintetičkih slika u vidu šuma je veoma važno i u 3D računarskoj grafici za stvaranje većeg stepena imerzivnosti. Wavelet šum je nastao iz sintetičke slike sa uniformno distribuiranim nijansama sive boje u celom dijapazonu poput randi III sintetičke slike [128]. Primer generisanja wavelet sintetičke slike prikazano je na slici 3.19..



Slika 3.19. Grafički prikaz konstruisanja wavelet nasumičnog šuma:
a) sintetička slika sa uniformno distribuiranim histogramom b) interpolacija smanjivanje rezolucije slike c) povećanje rezolucije slike interpolacijom d) finalna slika [128].

Kao ulaz koristi se sintetička slika sa uniformno distribuiranim histogramom (Slika 3.19.a), čija se veličina (rezolucija) smanjuje interpolacijom tako da nova slika ima duplo manje dimenzije širine i visine od početne slike (Slika 3.19.b). Novo dobijena umanjena slika usled interpolacije gubi određene informacije o intenzitetu piksela. Sledeći korak je povećanje dimenzije slike na početnu vrednost (Slika 3.19.c). Zbog narušenog kvaliteta prilikom smanjivanja rezolucije novokreiranu sliku karakteriše efekat zamućenja. U finalnom koraku vrši se oduzimanje početne sintetičke slike i slike nakon uvećanja. Kao rezultat nastaje wavelet sintetička slika (Slika 3.19.d).

Izgled wavelet sintetičke slike i njen histogram prikazani su na slici 3.20. sa koje se može vizuelno uočiti fina zrnasta tekstura, a izgled histograma podseća na zarubljenu normalnu raspodelu, tj. kombinaciju uniformnog i normalno distribuirang histograma.



*Slika 3.20. Wavelet sintetička slika:
a) vizuelna interpretacija b) histogram [50][60].*

Upravo zbog kombinacije dva pomenuta karakteristična histograma wavelet sintetička slika je uspešno korišćena za povećanje vizuelnih karakteristika na površima objekata bez karakterističnih obeležja u prethodnim istraživanjima autora [60].

3.3 Uređaji za projektovanje svetlosnih tekstura

Vidljiva svetlost predstavlja deo elektromagnetnog spektra određenih talasnih dužina koje su vidljive golim okom. Spektar vidljive sunčeve svetlosti se kreće između 400 i 700 nanometara talasne dužine. Izvori svetlosti mogu biti prirodni ili veštački. Kao najvažniji prirodni izvor svetlosti je Sunce, odnosno sunčeva svetlost. Veštački izvori svetlosti predstavljaju pobuđeno stanje materijala izazvanih dovođenjem nekog vida energije (npr. električne energije) ili se dobija kao proces sagorevanja različitih materija (plamen-vatra) [129].

U zavisnosti od optičkih svojstava materijala i sredine u kojoj se svetlost prostire, prema zakonima fizike svetlost se može odbiti od površine objekta, apsorbovati ili proći iz jedne optičke sredine u drugu. Odbijana svetlost izvora od površi objekta

omogućava živim bićima koja imaju razvijeno čulo vida njihovu vizuelnu percepciju. Kod odbijanja svetlosti može se javiti idealno spekularnio i difuznu odbijanje. Prema zakonima optike upadni ugao zraka svetlosti kod idealnog spekularnog odbijanja je ekvivalentan izlaznom zraku nakon odbijanja od površi objekta. Svojestvo gotovo idealnog odbijanja u najvećoj meri imaju ogledala i materijali koji se ponašaju kao ogledala. Slično ogledalima ponašaju se metalne površi obrađene u visokom kvalitetu (brušene i/ili polirane) kod proizvoda koji zahtevaju visoku tačnost. Rezultat obrade metalnih površina u visokom kvalitetu je smanjena površinska hrapavost koja doprinosi pravilnom, a ne difuznom odbijanju svetlosti [129,130].

Digitalna slika projektovana na površinu objekta pomoću uređaja za projektovanje svetla (projektor) stvara svetlosnu teksturu. Projektori su prevashodno dizajnirani sa velikim otvorima blende kako bi se rasipanje svetlosti emitovane iz izvora sveo na minimum. Međutim, ovaj optički dizajn dovodi do veoma uskog polja dubinske oštine [131]. Zbog ograničenja konstrukcijskih komponenti video projektor (prizme, ogledala, obojeni diskovi, tečni kristali) koji doprinose razlaganju svetlosti na određenim talasnim dužinama i ponovnog mešanja na željeni način, projektori imaju manju maksimalnu rezoluciju od uređaja koji se koriste za generisanje digitalnih slika. Iz tog razloga, tokom projektovanja slike, dolazi do smanjenja kvaliteta projekcija slika veće rezolucije [57]. Osnovna uloga projektor je da projektuje svetlosnu sliku sa računara na površ sa koje će se projektovana svetlost vratiti do oka posmatrača ili u slučaju 3D rekonstrukcije do senzora.

Prema načinu kreiranja slike projektori mogu se podeliti na [132]:

- reflektivne DLP (engl. *Digital Light Processing - DLP*) i
- transmisione LCD (engl. *Liquid Crystal Display – LCD*) projektore (Slika 3.21.).



Slika 3.21. Osnovne vrste video projektor DLP i LCD [132].

Nezavisno o kojoj tehnologiji projektovanja slike se radi projektore odlikuje nekoliko važnih osobina kao što su [132,133]:

- rezolucija,
- osvetljenje i
- kontrast.

Rezolucija projektor određuje detaljnost slike koja se prikazuje, odnosno može se reći da je mera preciznosti predstavljanja slike sa računara (ili drugog medija sa kojeg je omogućena veza sa projektorom). Ukoliko je rezolucija ulaznog uređaja (računar) veća od rezolucije projektor, slika koja će se projektovati izgubiće na kvalitetu, pošto projektor ne može da podrži rezoluciju ulaznog uređaja u odnosu 1:1. Površina predmeta koji će biti osvetljen jednim pikselom projektor zavisi od rezolucije projektor i udaljenosti projektor i može da se izrazi kao GSD (engl. *Ground Sample Distance - GSD*) projektor [133].

Osvetljenje projektovane slike zavisi od jačine izvora svetlosti i mogu da se razlikuju od proizvođača do proizvođača, pa tako mogu da se razlikuju projektori sa specijalnim sijalicama sa užarenim vlaknom, led sijalicama i laserima. Video projektori koji koriste sijalice sa užarenim vlaknom imaju najkraći radni vek i obično efikasno radi između 3000 i 4000 sati. Dok projektori sa LED sijalicama i laserima mogu da imaju radi vek i preko 20000 sati. Jačina osvetljenja video projektor izražava se u lumenima [133].

Kontrast video projektor je takođe veoma važan i predstavlja odnos između najsvetlijeg i najtamnijeg projektovanog piksela [132]. Moguće je da video projektor ima veoma snažan izvor svetlosti ali nizak kontrast, pa bi projektovana slika delovala izbledele. Za potrebe projektovanja svetlosnih tekstura, potrebno je koristiti video projektore sa što većim kontrastom kako bi stvoreni vizuelni efekat bio što veći.

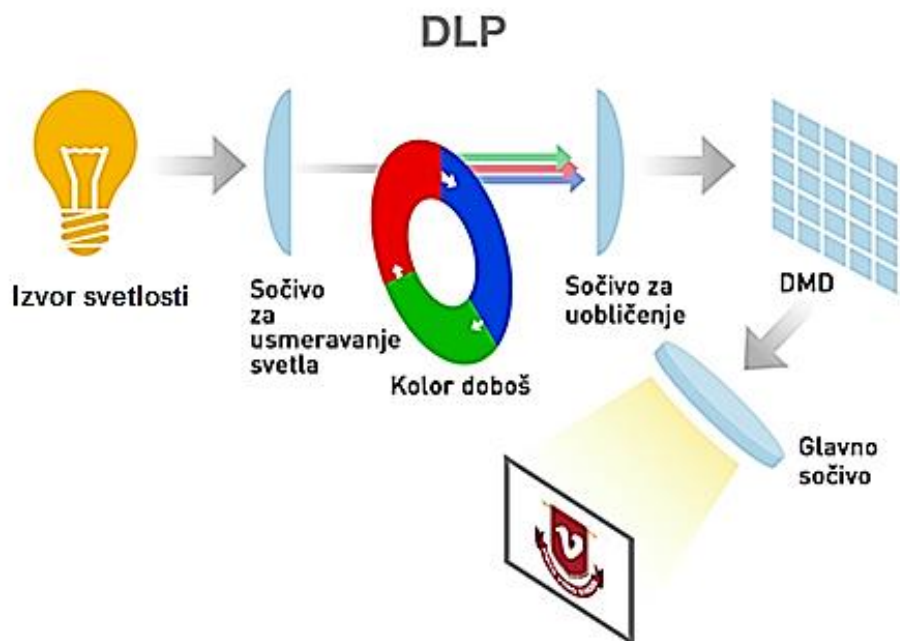
Pored navedenih osnovnih svojstava video projektor potrebno je uzeti u obzir i vrstu sočiva i optičke karakteristike. Video projektori namenjeni za projektovanje slike na ravne površine poput onih koji se koriste za kućne bioskope ili „power point“ prezentacije imaju veoma malu dubinsku oštrinu, pa nisu pogodni za projektovanje na nepravilne 3D površi. Isto kao i kod kamere (foto-aparata) dubinska oštrina zavisi od otvora blende, žižne daljine i udaljenosti tačke fokusa.

3.3.1 DLP projektori

DLP projektori svoj rad baziraju na DLP čipu (Slika 3.22.), koji predstavlja mikro-opto-elektromehanički sistem DMD (engl. *Digital Micromirror Device*) koji se sastoji od sićušnih ogledala.

Svako ogledalo i ugao pod kojim reflektuje svetlo u ovom čipu je moguće nezavisno podešavati, pomerati bliže ili dalje od svetlosnog izvora kako bi se projektovani svetliji ili tamniji pikseli. Brzina kojom se uključuju i isključuju ogledala, omogućava DMD čipu kreiranje senki i nijansi sive boje. Boja se stvara propuštanjem svetlosnog zraka preko

obrnog kolor doboša. Doboš se nalazi između svetlosnog izvora lampe i DMD uređaja. Sinhronizacijom pokreta ogledala i kolor doboša kreiraju se boje. Osnovni model kolor doboša podržava crvenu, plavu i zelenu boju, dok oni napredniji uređaji mogu da reprodukuju nijanse ljubičaste, tamnoplave i žute boje. Nakon što boja dospe u DMD, kreirana slika se uvodi kroz sočivo i projektuje na predviđenu površinu [133].



Slika 3.22. Princip rada DLP projektora [134].

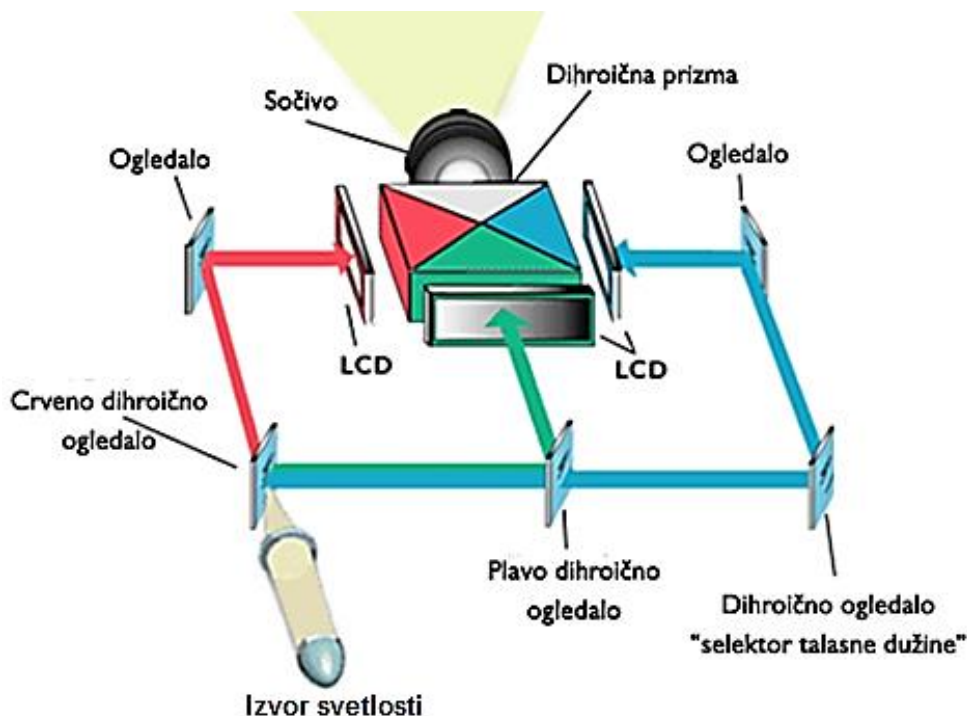
Neke od prednosti DLP projektora su [133]:

- potpuno digitalna tehnologija,
- nema konverzije analogno/digitalno, odnosno gubitka signala,
- kvalitet slike ne degradira sa vremenom (kao kod LCD projektora)
- rešetka slike (kao kod LCD projektora) nije vidljiva
- visoke vrednosti kontrasta (>3000:1)
- prikaz potpuno crne/bele boje
- manje osetljivi na uticaje prašine, vlage i toplote i
- male dimenzije/težina (prenosivi projektori).

3.3.2 LCD projektori

LCD projektori (Slika 3.23.) koriste 3 LCD tehnologiju, patentirani sistem koji kombinuje tri ekrana od tečnih kristala. Slika se kreira u nekoliko koraka, koja počinje od tačkastog svetlosnog izvora. Ova bela svetlost prolazi do tri ogledala koja se zovu dihroična ogledala koja su specijalno oblikovana tako da reflektuju svetlost tačno određene talasne dužine. U ovom slučaju ogledala reflektuju crvenu, plavu i zelenu talasnu dužinu. Svaki svetlosni snop boje pogađa jedan od tri LCD panela, koji prima

električni signal koji govori kako da se poređaju pikseli na ekranu da bi se napravila slika. Sva tri LCD panela kreiraju istu sliku. Slike imaju različite nijanse zbog obojene svetlosti koja prolazi kroz panel. Slika se potom spaja u prizmi, kreirajući jedinstvenu sliku koja se propušta kroz sočivo i potom projektuje na predviđenu površinu [133].



Slika 3.23. Princip rada LCD projektora [135].

Neke od prednosti LCD projektora su [135] :

- pogodniji za kompjuterske aplikacije jer daju oštriju sliku
- omogućavaju kvalitetnu projekciju na većim objektima
- nemaju pokretne delove kao DLP projektori
- pristupačniji su u pogledu cene u odnosu na DLP projektore
- ne dolazi do distorzija boja („duga efekat“).

3.4 Svetlosne teksture

Svetlosne teksture u prirodi nastaju kada sunčevi zraci na svom putu ka objektu nailaze na prepreke koje delimično menjaju intenzitet osvetljenosti objekta. Kombinacija osvetljenih i neosvetljenih delova objekta (delovi u senci ili polusenci) stvaraju na površi objekta lako uočljive kontrastne regione. Primeri prirodnih svetlosnih tekstura dati su na slici 3.24. Najjednostavniji primer svetlosnih tekstura u prirodi se javlja prolaskom sunčevih zraka kroz retku krošnju drveća, gde sunčevi zraci padaju na tlo, pri čemu zraci delimično obasjavaju tlo i objekte koji se nalaze ispod krošnji (Slika 3.24.a).



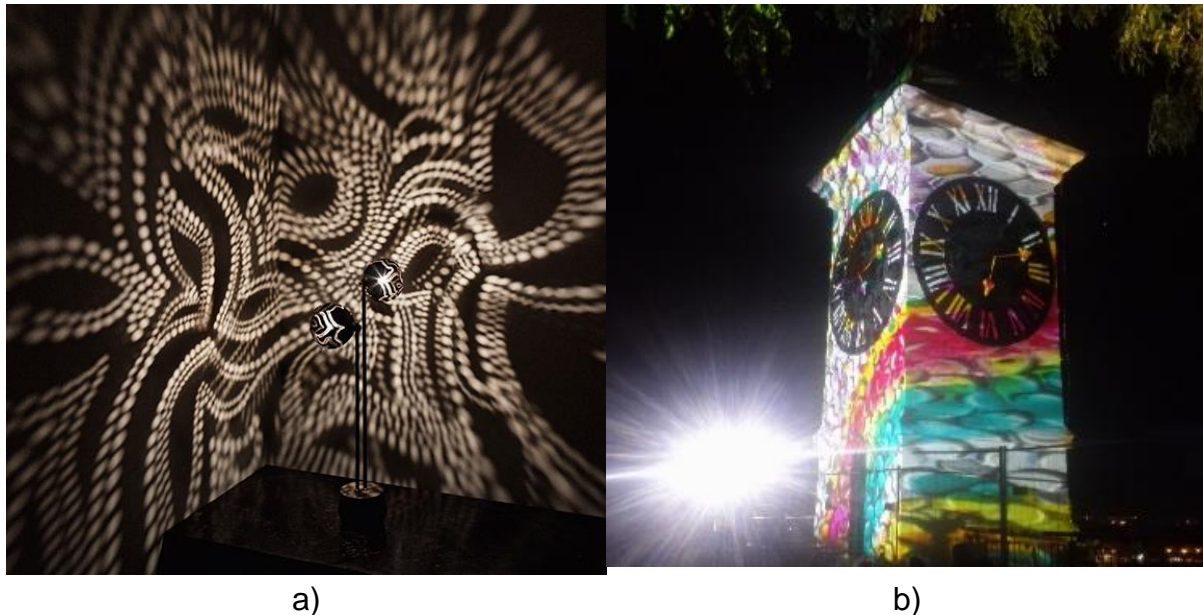
*Slika 3.24. Svetlosne teksture u prirodi:
a) senke drveća b) refleksija vode [136].*

Drugi primer svetlosnih tekstura u prirodi je prilikom odbijanja sunčeve svetlosti od površi vode projektujući se na površi objekta. Ovu vrstu svetlosne teksture je najlakše primetiti na konstrukciji mostova ili zidovima pored vodenih površina. Nažalost svetlosne teksture u ovom obliku ne mogu se iskoristiti za primenu u CRP zasnovanoj na određivanju SfM iz razloga što su veoma osetljive na spoljašnje uticaje npr. vetar koji u svakom trenutku može da promeni izgled svetlosne teksture, odnosno relativan položaj teksture i posmatranog objekta (Slika 3.24.b).

Svetlosne teksture mogu biti kreirane i veštačkim putem. Ukoliko se između izvora svetlosti i posmatranog objekta postavi neprovidna perforirana prepreka, na posmatranom objektu će se javiti senka i/ili polusenka stvarajući kontrastne regione na posmatranoj površi objekta (Slika 3.25.a). Objekat u ovom slučaju predstavlja zid na kome se može uočiti svetlosna tekstura. Eliminisanjem svetlosnog izvora momentalno se gubi svetlosna tekstura, a vizuelne karakteristike površi objekta se vraćaju u stanje pre projekcije. Veštačke svetlosne teksture predstavljaju projekciju

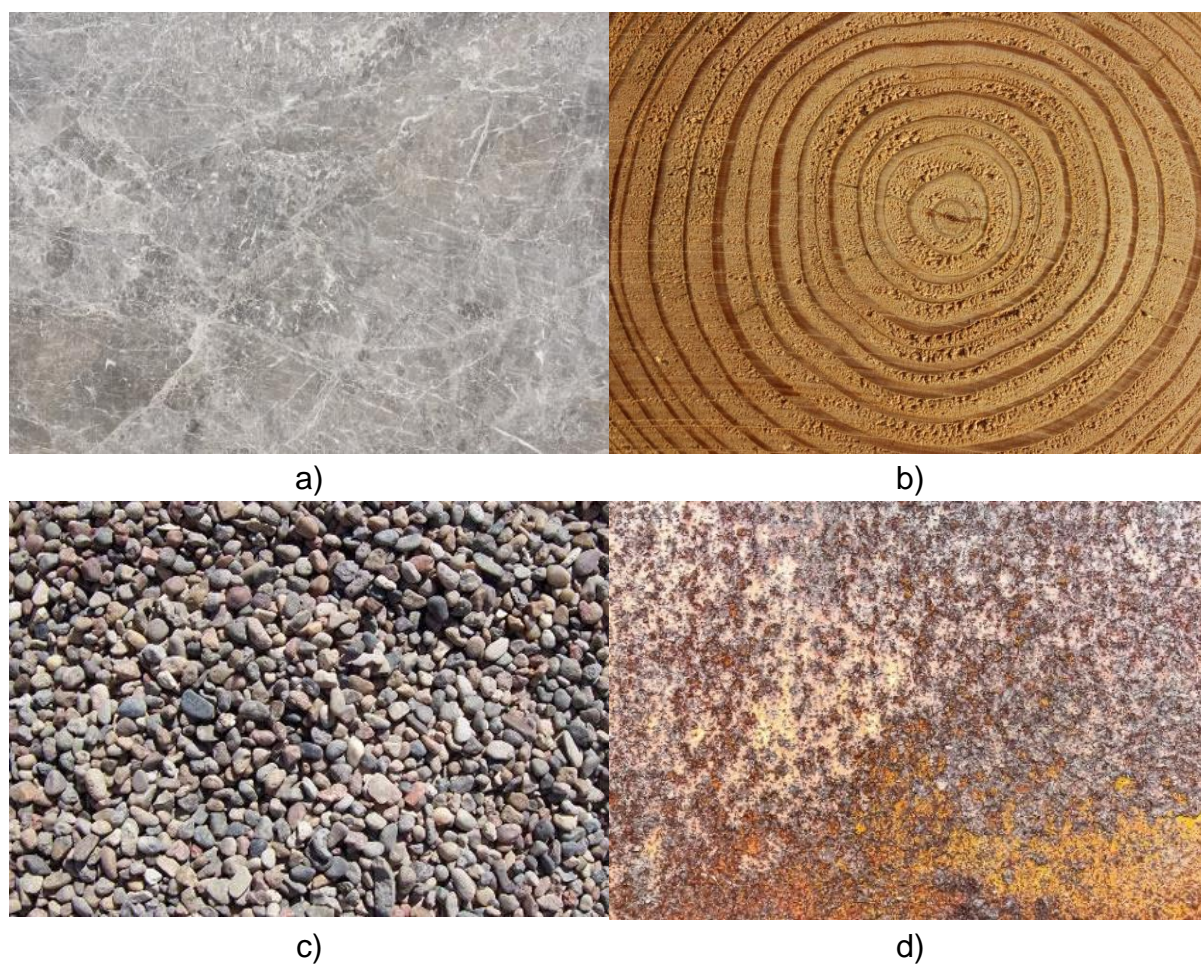
2D slika na objekte bez izražene vizuelne teksture pomoću uređaja za projektovanje svetlosti – video projektora.

Sledeći primer projektovanja svetlosne teksture prikazan je na slici 3.25.b, gde je uz pomoć video projektora projektovana slika u boji koja u potpunosti menja vizuelnu percepciju objekta. Shodno tome se povećava i obogaćuje kvalitet vizuelne teksture objekata, koja je potrebna za 3D digitalizaciju primenom CRP zasnovane na određivanju SfM.



*Slika 3.25. Veštačke svetlosne teksture:
a) prolazak svetlosti kroz perforirani objekat [137] b) projektovanje proizvoljne 2D slike na objekat.*

Poseban vid obogaćenja vizuelno monotonih površi objekata je izražen kod aktivnih optičko-refleksivnih metoda zasnovanih na rekonstrukciji 3D oblika na osnovu 2D fotografija. Ovoj grupi pripadaju skeneri na bazi strukturirane svetlosti. Kod pasivnih sistema, kojima CRP pripada, projektovana svetlosna tekstura treba da omogući lako i jednostavno detektovanje oblika kao što su: ivice, uglovi, regioni sa jednakim vrednostima intenziteta piksela itd. Inspiracija za takvu vrstu vizuelne teksture može se takođe pronaći u prirodi (Slika 3.26). Vizuelne teksture kamena, drveta, šljunka ili korozije metala predstavljaju veoma pogodne tipove tekstura i objekti sa ovakvim teksturama ne predstavljaju problem za 3D digitalizaciju CRP zasnovanoj na određivanju SfM.



Slika 3.26. Primeri vizuelne teksture koji se mogu naći u prirodi povoljnih za primenu SfM fotogrametrijske metode:
a) mermer b) drvo c) šljunak d) površinska korozija metala.

4. KOMPARATIVNA ANALIZA SINTETIČKI GENERISANIH SLIKA I SVETLOSNIH TEKSTURA

4.1 Deskriptivni statistički pokazatelji kvaliteta sintetičke slike

Deskriptivni statistički pokazatelji se vrlo često koriste za procenu i određivanje kvaliteta slika i fotografija [94,112,138–140]. Njihova uloga je da okarakterišu stohastička svojstva i prostornu distribuciju intenziteta piksela (nijansa sive) na slici. Na osnovu statističkih pokazatelja može se utvrditi u kolikoj meri je fotografija dobra ili loša za određenu primenu. Za razliku od umetničkih fotografija kod kojih se kvalitet izražava ocenom eksperata, za kvalitet slika za projekciju svetlosnih tekstura izraziće se preko deskriptivnih statističkih pokazatelja.

Slike koje se koriste za projektovanje svetlosne teksture moraju da budu odgovarajućeg kvaliteta u pogledu [123]:

- rezolucije - koja odgovara rezoluciji video projektora i
- nasumičnosti i neuređenosti karakterističnih obeležja.

Različiti statistički momenti zasnovani na histogramu nijanse sive poznatiji i kao statistički pokazatelji prvog reda (Tabela 4.1.), koriste se za određivanje: srednje vrednosti, standardne devijacije, trećeg momenta (nagiba histograma), entropija, ujednačenosti i uniformnosti. Ovi pokazatelji uzimaju u obzir celu sliku, a ne uzimaju u obzir informacije o relativnom položaju piksela na slici [46].

Srednja vrednost kao statistički pokazatelj poznatija kao prvi moment i kazuje kolika je prosečna vrednost intenziteta nijanse sive na celoj slici [141].

Standardna devijacija pokazuje koliko u proseku elementi matrice (pikseli slike) odstupaju od vrednosti srednje aritmetičke sredine skupa i predstavlja drugi moment. Stoga vrednost standardne devijacije predstavlja i nivo prosečnog kontrasta na fotografiji [46].

Ujednačenost predstavlja meru relativne ujednačenosti susednih piksela u regionu. R ima vrednost 0 za region sa konstantnim intenzitetom i teži ka 1 kod regiona sa velikim odstupanjima vrednosti intenziteta [46].

Treći moment je mera koja opisuje nagib, odnosno simetričnost histograma. Mogu se javiti vrednosti između -1 i 1. Vrednost 0 ukazuje na simetričan histogram [46].

Mera uniformnosti ima najveću vrednost kada postoji samo jedna nijansa sive (maksimalna uniformnost) [46].

Entropija je statistička mera nasumičnosti koja karakteriše teksturu ulazne slike. Takođe predstavlja meru uniformnosti histograma. Kada je distribucija intenziteta nijanse sive uniformna, entropija ima maksimalne vrednosti. Veće vrednosti entropije ukazuju i na veću neuređenost intenziteta sive na slici i obrnuto [46].

Tabela 4.1. Statistički pokazatelji prvog reda [112].

Statistički pokazatelj	Formula
Srednja vrednost (prvi moment)	$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$
Standardna devijacija (drugi moment)	$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i)}$
Ujednačenost	$R = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma^2)}$
Nagib histograma (treći moment)	$\mu_3 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i)$
Uniformnost	$\text{uni} = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i)$
Entropija	$e = - \sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i)$

Gde su:

- m – srednja aritmetička sredina intenziteta slike
- z_i – intenzitet piksela slike
- $p(z_i)$ - funkcija histograma slike,
- L – broj mogućih intenziteta

Statistički pokazatelji drugog reda (Tabela 4.2.) uzimaju u obzir i lokaciju posmatranog piksela relativno u odnosu na susedne piksele. Za izračunavanje pokazatelja drugog reda izračunava se GLCM matrica (engl. *Gray Level Co-occurrence Matrix - GLCM*). Analizom GLCM matrice moguće je izračunati pokazatelje poput: kontrasta, korelacije, energije i homogenosti [46,142].

Tabela 4.2. Statistički pokazatelji drugog reda [141,143].

Statistički pokazatelj	Formula
Kontrast	$\text{kon} = \sum_{i,j=0}^{L-1} z_{ij}(i-j)^2$
Korelacija	$\text{kor} = \sum_{i,j=0}^{L-1} z_{ij} \frac{(i-m)(j-m)}{\sigma^2}$
Energija	$\text{ene} = \sum_{i,j=0}^{L-1} -\ln(z_{ij})^2$
Homogenost	$\text{hom} = \sum_{i,j=0}^{L-1} \frac{z_{ij}}{1+(i-j)^2}$

Kontrast - pokazatelj koja predstavlja razliku između dva piksela i njihovih najviših i najnižih vrednosti nijanse sive. Takođe predstavlja količinu lokalnih varijacija nijansi sive prisutnih na slici. Visoka vrednost kontrasta ukazuje na oštriju sliku, odnosno veće lokalne varijacije intenziteta piksela [143].

Korelacija - pokazatelj linearnosti intenziteta piksela slike posmatranih u određenom pravcu. Visoke vrednosti korelacije ukazuju na znatan broj piksela sa istim intenzitetom posmatranih u određenom pravcu, odnosno da na slici postoji periodičnost [143].

Energija - pokazatelj uniformnosti i ponovljivosti određenih parova piksela. Viša vrednost energije se javlja kod konstantnih i periodičnih slika [143].

Homogenost - pokazatelj nivoa sive. Ima veće vrednosti za manje razlike u intenzitetima nivoa sive kod parova piksela, a najveću ako su sve vrednosti intenziteta jednake. Homogenost je obrnuto proporcionalna kontrastu ukoliko je energija konstantna [143].

Prema istraživanjima Wang i sar. [144] energija i kontrast kao statistički pokazatelji drugog reda imaju značajan udeo kod opisivanja i poređenja slika sa različitim teksturama.

4.2 Višekriterijumska analiza sintetičkih slika

Višekriterijumske metode odlučivanja se koriste za rešavanje problema kod kojeg se mora uzeti u obzir veći broj kriterijuma. Obično kriterijumi koji služe za poređenje ne dolaze iz istog domena, pa je često potrebno rangirati kvalitativne i kvantitativne kriterijume. Kriterijume je potrebno normalizovati, odnosno svesti ih na vrednosti koje je moguće porediti. Takođe, dešava se i da određeni kriterijumi imaju veću važnost ili uticaj za donošenje konačne odluke pa se moraju uzeti u obzir i težinski faktori, kojima se iskazuje nivo važnosti kriterijuma. Kao faze u procesu odlučivanja mogu se izdvojiti sledeće [145]:

- definisanje problema,
- utvrđivanje kriterijuma,
- formulisanje funkcionalnih veza,
- generisanje alternativa
- primena rešenja.

Procena teoretski najpogodnije slike izvršena je korišćenjem tehnike za preferenciju reda po sličnosti sa idealnim rešenjem (engl. *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution - TOPSIS*), višekriterijumskom metodom odlučivanja [146]. Da bi se primenila TOPSIS višekriterijumska metoda i rešio jedan višekriterijumski problem, potrebno je definisati:

- matrice performansi,
- tip kriterijuma („min“ ili „max“) i
- težinske faktore.

Rešavanje višekriterijumskog problema pomoću TOPSIS metode počinje normalizacijom matrice performansi. Redovi matrice performansi X sadrže alternative A_i dok su u kolonama smešteni kriterijumi C_j . Element matrice x_{ij} predstavlja rejting (performansu) alternative A_i u odnosu na kriterijum C_j . Za m kriterijuma (C_1, C_2, \dots, C_m) i n alternativa (A_1, A_2, \dots, A_n) matrica X ima oblik (4.1), dok upisane vrednosti iznad matrice (w_1, w_2, \dots, w_m) predstavljaju težinske faktore kriterijuma [146].

$$\begin{array}{cccccc}
 & C_1 & C_2 & \cdot & \cdot & C_m \\
 & w_1 & w_2 & \cdot & \cdot & w_m \\
 A_1 & \left[\begin{array}{cccccc}
 x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & x_{1m} \\
 x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{2m} \\
 \cdot & \cdot & & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & & & \cdot \\
 x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & x_{nm}
 \end{array} \right. & & \\
 \mathbf{X} = & & & & & & (4.1)
 \end{array}$$

Zbir težinskih faktora mora biti 1. Da bi se dobili elementi bezdimenzione veličine potrebno je izvršiti vektorsku normalizaciju prema (4.2) kako bi matrica R poprimila oblik (4.3) [146].

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (4.2)$$

$$\begin{array}{cccccc}
 C_1 & C_2 & \cdot & \cdot & C_m \\
 w_1 & w_2 & \cdot & \cdot & w_m
 \end{array} \quad (4.3)$$

$$R = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{matrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdot & \cdot & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdot & \cdot & r_{2m} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdot & \cdot & r_{nm} \end{bmatrix}$$

Sledeći korak je množenje normalizovane matrice performansi težinskim faktorima. Težinska normalizovana matrica V predstavljena je pomoću (4.4) [146].

$$V = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{matrix} \begin{matrix} C_1 & C_2 & \cdot & \cdot & C_m \\ \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdot & \cdot & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \cdot & \cdot & v_{2m} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdot & \cdot & v_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{matrix} \begin{matrix} C_1 & C_2 & \cdot & \cdot & C_m \\ \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdot & \cdot & w_m r_{1m} \\ w_2 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdot & \cdot & w_m r_{2m} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ w_1 r_{n1} & w_2 r_{n2} & \cdot & \cdot & w_m r_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.4)$$

Gde je svako v_{ij} proizvod normalizovane performanse alternative i odgovarajućeg težinskog faktora kriterijuma. Nakon toga moguće je uspostaviti relacije za pozitivno A^+ (4.5) i negativno A^- (4.6) idealno rešenje [146].

$$A^+ = \{(\max_{ij} v_{ij} | j \in G)\}, \{(\min_{ij} v_{ij} | j \in G')\}, i = 1, \dots, n = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_m^+\} \quad (4.5)$$

$$A^- = \{(\min_{ij} v_{ij} | j \in G)\}, \{(\max_{ij} v_{ij} | j \in G')\}, i = 1, \dots, n = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-\} \quad (4.6)$$

Gde je:

$G = \{j = 1, 2, \dots, m \mid j \text{ pripada kriterijumima sa "max" vrednostima}\}$

$G' = \{j = 1, 2, \dots, m \mid j \text{ pripada kriterijumima sa "min" vrednostima}\}$

Alternative koje imaju najveće, odnosno najmanje vrednosti v_{ij} u odnosu na kriterijume "max" i "min" predstavljaju pozitivna A^+ i negativna A^- idealna rešenja respektivno. Nakon što su izračunata idealna rešenja prelazi se na izračunavanje n-dimenzionih Euklidskih rastojanja svih alternativa od datih idealnih rešenja preko (4.7) i (4.8) [146].

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, \dots, n \quad (4.7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, \dots, n \quad (4.8)$$

Kao poslednji korak u TOPSIS višekriterijumskoj metodi vrši se određivanje relativne blizine alternativa idealnom rešenju za svaku alternativu preko relativne blizine (engl. *Relative Closeness* - RC_i^+) preko (4.9) [146].

$$RC_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, i = 1, \dots, n \quad (4.9)$$

Alternativa A_i je bliža idealnom rešenju ako je RC_i^+ bliže vrednosti 1, a alternative se rangiraju po opadajućim vrednostima [146].

Pretpostavka je da najpogodnija vizuelna tekstura ima izraženu nasumičnu grubu teksturu. Takva vrsta teksture je bogata mrljama, rubovima, jedinstvenim oblicima koji omogućavaju laku detekciju karakterističnih tačaka. Statističke karakteristike takve teksture su iskorišćene za definisanje tipa kriterijuma [46,112,147]:

- srednja aritmetička sredina - (prosečni intenzitet) treba da odgovara srednjoj vrednosti od graničnih vrednosti,
- standardna devijacija (prosečni kontrast) i pokazatelj ujednačenosti treba da imaju što veću vrednost,
- uniformnost, energija, homogenost, korelacija treba da teži nuli,
- treći momenat kao pokazatelj predstavlja asimetričnost histograma, (nulta vrednost označava simetrične histograme),
- entropija je mera neuređenosti i poželjno je da ima što veću vrednost,
- kontrast treba da ima veću vrednost, jer vrednost nultog kontrasta predstavlja sliku sa ujednačenim intenzitetima piksela.

4.3 Metoda planarne 3D digitalizacije

Komparacija novo kreiranih sintetičkih slika za projektovanje svetlosnih tekstura realizovana je pomoću metode planarne 3D digitalizacije. Kod ove metode mogu se razlikovati realna i virtualna planarna 3D digitalizacija. Obe metode imaju za cilj da obezbede kvantitativne podatke i izvrše rangiranje svetlosnih tekstura na osnovu kvaliteta rezultata 3D digitalizacije. Metoda se realizuje projektovanjem svetlosne teksture na ravnu površ sa monotonom vizuelnom teksturom, koja se zatim snima kamerom (kod realne), a kod virtualne se vrši mapiranje teksture na ravan u virtualnom okruženju koja se zatim snima virtualnom kamerom [123]. Kvalitet rezultata 3D digitalizacije može se pratiti preko nekoliko različitih parametara kao što su [100,123]:

- broj rekonstruisanih tačaka (RT),
- vrednost srednje kvadratne greške (SKG) reprojekcije i
- vrednost maksimalne greške (MG) reprojekcije.

Za grubu procenu broj rekonstruisanih tačaka se može posmatrati kao parametar kvaliteta 3D digitalizacije, dok je SKG i MG reprojekcije zavisna upravo od broja rekonstruisanih tačaka uključenih u proračun. SKG reprojekcije je rastojanje između

tačke na slici gde se može projektovati rekonstruisana 3D tačka, a originalna projekcija te 3D tačke otkrivena je na fotografiji [148]. Posmatrajući svaki parametar zasebno, ne može se doći do validnog zaključka o kvalitetu 3D digitalizacije. Prilikom svake 3D digitalizacije rekonstruiše se različit broj tačaka, koje predstavljaju ulazni podatke za izračunavanje SKG i MG reprojekcije.

Da bi se izvelo poređenje u pogledu kvaliteta projektovanih svetlosnih tekstura za svaku SKG reprojekcije izračunat je odnos R_{SKGre} između broja RT i SKG reprojekcije $SKGre$ (4.10). Po istoj analogiji izračunat je i odnos R_{MGre} između broja RT i MG reprojekcije $MGre$ (4.11) [123].

$$R_{SKGre} = \frac{RT}{SKGre} \quad (4.10)$$

$$R_{MGre} = \frac{RT}{MGre} \quad (4.11)$$

Dobijene vrednosti odnosa su normalizovane preko (4.12) i (4.13), gde su $maxR_{SKGre}$ i $maxR_{MGre}$ najveće izračunate vrednosti svakog odnosa, tako da je kvalitet 3D digitalizacije Q izračunat kao srednja vrednost normalizovanih procentualnih vrednosti $R_{SKGre\%}$ i $R_{MGre\%}$ (4.14) [123].

$$R_{SKGre\%} = \frac{R_{SKGre}}{maxR_{SKGre}} \cdot 100 \quad (4.12)$$

$$R_{MGre\%} = \frac{R_{MGre}}{maxR_{MGre}} \cdot 100 \quad (4.13)$$

$$Q = \frac{R_{SKGre\%} + R_{MGre\%}}{2} \quad (4.14)$$

Predstavljen model omogućava relativno poređenje posmatrane grupe svetlosnih tekstura sa aspekta kvaliteta 3D digitalizacije uključujući broj RT, SKG i MG reprojekcije. U grupi analiziranih svetlosnih tekstura, najkvalitetnija će kod 3D digitalizacije dati najveći broj rekonstruisanih tačaka sa najmanjom razlikom između SKG i MG reprojekcije [123].

Tačnost i kvalitet rezultata 3D digitalizacije takođe zavisi i od međusobne udaljenosti (položaja) kamere, video projektora i objekta. Parametar koji pokazuje koliko jedan piksel na digitalnoj fotografiji ili piksel svetlosne teksture pokriva stvarnu fizičku površ na objektu izražava se preko veličine GSD [149]. GSD može se reći drugim rečima da predstavlja detaljnost 3D digitalizacije. GSD za digitalne kamere i video projektore može se izračunati prema formuli (4.15) [150]:

$$\text{GSD} = \frac{D \cdot p_x}{f} \quad (4.15)$$

Gde su:

- GSD – veličina pokrivenosti površi jednim pikselom [mm/pix],
- D - udaljenost objekta 3D digitalizacije od senzora kamere/projektora [mm],
- f - žižna daljina objektiva [mm],
- p_x – veličina piksela [mm/pix].

Veličina piksela p_x koja se koristi za izračunavanje GSD-a preko formule (4.15) zavisi od fizičkih dimenzija senzora, pre svega od duže strane senzora koja predstavlja širinu w_s mm, kao i podržanog broja piksela na širini fotografije izraženoj u pikselima w_f (pix). Na osnovu poznate fizičke veličine senzora i podržane rezolucije moguće je izračunati vrednost p_x preko formule (4.16) [150]:

$$p_x = \frac{w_s}{w_f} \quad (4.16)$$

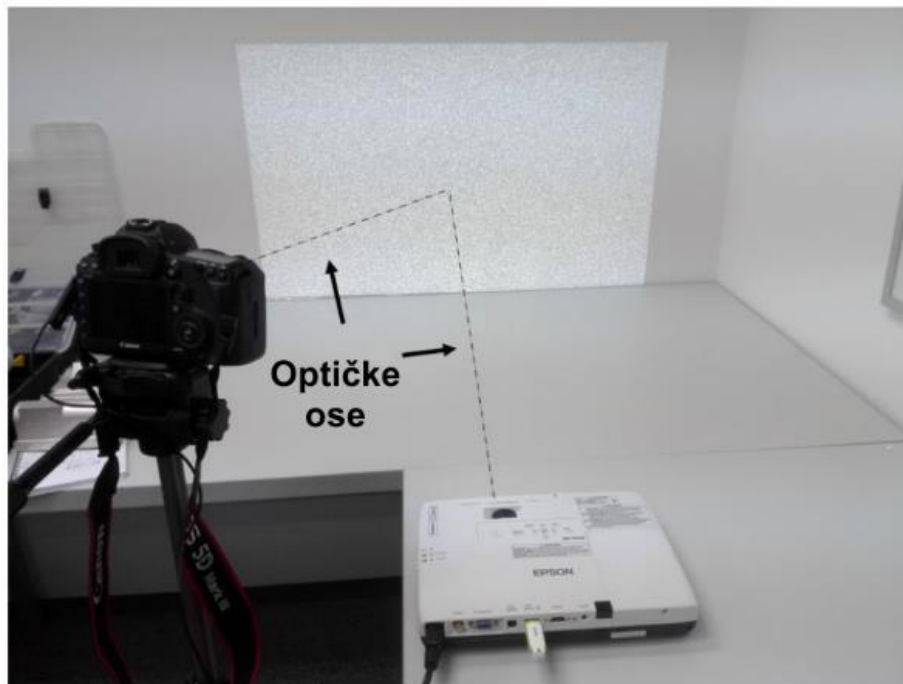
Prilikom snimanja objekta iz stacionarne pozicije, dok se radni predmet relativno kreće u odnosu na kameru pomoću obrtnog stola, vrednost GSD-a blago varira oko proračunate vrednosti usled promene dubine i same geometrije snimanog objekta. Ova odstupanja GSD-a su još izraženija ukoliko se fotografisanje izvodi sa stacionarnim predmetom i pokretnom kamerom. Upravo zbog ovog odstupanja, ali i zbog prisutnih optičkih distorzija uzima se 1/3 ili 1/2 manja GSD vrednost od željene detaljnosti. Sa povećanjem rezolucije snimljenih fotografija, nivoa preklapanja i broja fotografija, kao i poboljšanjem kvaliteta vizuelne teksture, tačnost rekonstruisanog 3D modela raste [151].

4.3.1 Realna planarna 3D digitalizacija

Metoda realne planarne 3D digitalizacije ima za cilj da se sa minimalnim brojem snimljenih fotografija, sa opremom koja će se kasnije koristiti za 3D digitalizaciju, odredi kvalitet svetlosnih tekstura u realnim uslovima. Kao metoda za ocenjivanje (poređenje) svetlosnih tekstura ima nekoliko prednosti [123]:

- tokom snimanja fotografija nema problema sa okluzijom (projektovana svetlosna tekstura je kompletno vidljiva na svim fotografijama),
- ne zahteva se komplikovano podešavanje hardvera, jer ne zahteva specijalnu opremu i prostor, a omogućava fino podešavanje opreme prema realnim uslovima osvetljenja,
- potreban je minimalni broj fotografija za 3D rekonstrukciju,
- prethodna kalibracija kamere nije potrebna (ali je poželjna) pošto se svi koeficijenti korekcije distorzije izračunavaju simultano tokom obrade fotografija
- rad se bazira na dostupnoj opremi, koja će se kasnije koristiti za 3D digitalizaciju objekta (kamera i projektor).

Postavka opreme za testiranje svetlosnih tekstura predstavljena na slici 4.1. gde se može videti video projektor postavljen na sto koji projektuje svetlosnu teksturu na ravnu površ (u ovom slučaju beli zid), dok je kamera koja snima fotografije postavljena pored projektora tako da su im optičke ose konvergentne [123].



Slika 4.1. Princip akvizicije fotografija kod realne planarne 3D digitalizacije [123].

Udaljenosti projektora i kamere od belog zida je približno jednaka, a određuje se uz pretpostavku da će se sa sličnih pozicija i vršiti akvizicija fotografija prilikom 3D digitalizacije konkretnog fizičkog objekta. Testiranje svetlosnih tekstura se vrši na sledeći način:

- sintetičke slike pomoću prenosne memorije se prenose sa računara na video projektor i projektuje se prva svetlosna tekstura,
- kamera sa inicijalne pozicije snima svetlosnu teksturu, nakon koje se projektuje sledeća i postupak snimanja se vrši za sve svetlosne teksture,
- pomeranje kamere na sledeću poziciju i snimanje svih svetlosnih tekstura se ponavlja.

Kao minimalni broj pozicija za snimanje fotografija svetlosnih tekstura (teoretski dve pozicije), uzima se tri. Razlog za uvođenje treće fotografije leži u tome što se pomoću nje obezbeđuje stabilnost u procesu obrade fotografija. Razmak između dve susedne fotografije bi trebao da odgovara razmaku koji bi se koristio i prilikom 3D digitalizacije, a prema preporukama i ranijim istraživanjima iznosi između 5° i 20° [45,101,152].

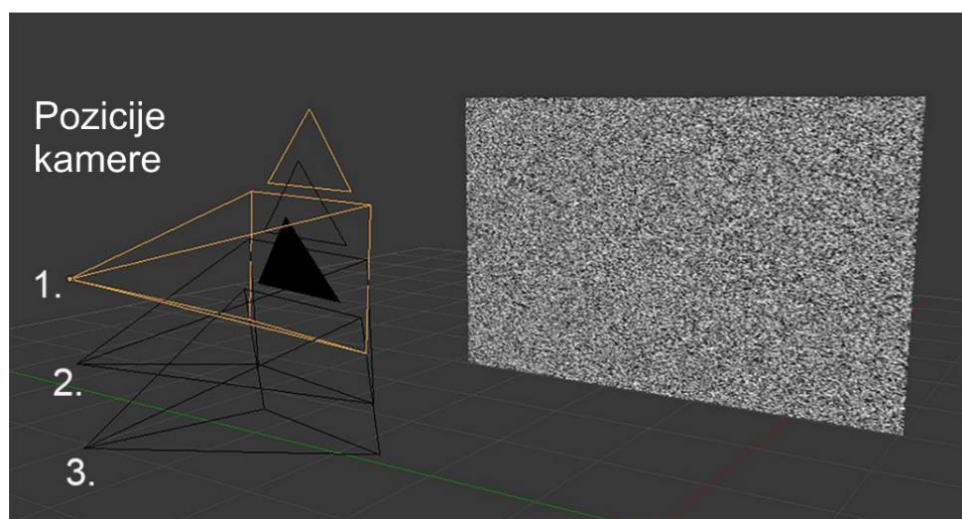
4.3.2 Virtualna planarna 3D digitalizacija

Fotogrametrijska 3D digitalizacija takođe može da se vrši i u virtualnom okruženju [153,154]. Predstavljena metoda virtualne planarne 3D digitalizacije može da se koristi u dve svrhe:

- za verifikaciju svetlosnih tekstura u realnoj planarnoj 3D digitalizaciji ili,
- za simuliranje novih svetlosnih tekstura pod kontrolisanim uslovima.

Za realizaciju virtuelne planarne 3D digitalizacije potrebno je koristi softver koji omogućava mapiranje teksture sa sintetičke slike na ravnu površ, kao i da omogući podešavanje osvetljenja scene i snimanje pomoću virtuelnih kamera. Jedan od takvih programa je Blender [155].

Za potrebe verifikacije svetlosnih tekstura u realnoj planarnoj 3D digitalizaciji, virtuelno okruženje se organizuje na isti način kao i stvarno podešavanje (Slika 4.2.). Kreirana površ virtuelne ravni ima istu veličinu kao projekcija stvarne vizuelne teksture, a virtuelne kamere se pozicioniraju na približno isti način kao i prilikom stvarne 3D digitalizacije. Takođe, koristi se isto podešavanje virtuelne kamere u pogledu rezolucije rendera i žižne daljine. Kada se postavi određena sintetička slika na ravan da simulira svetlosnu teksturu vrši se snimanje pomoću virtualnih kamera [123].

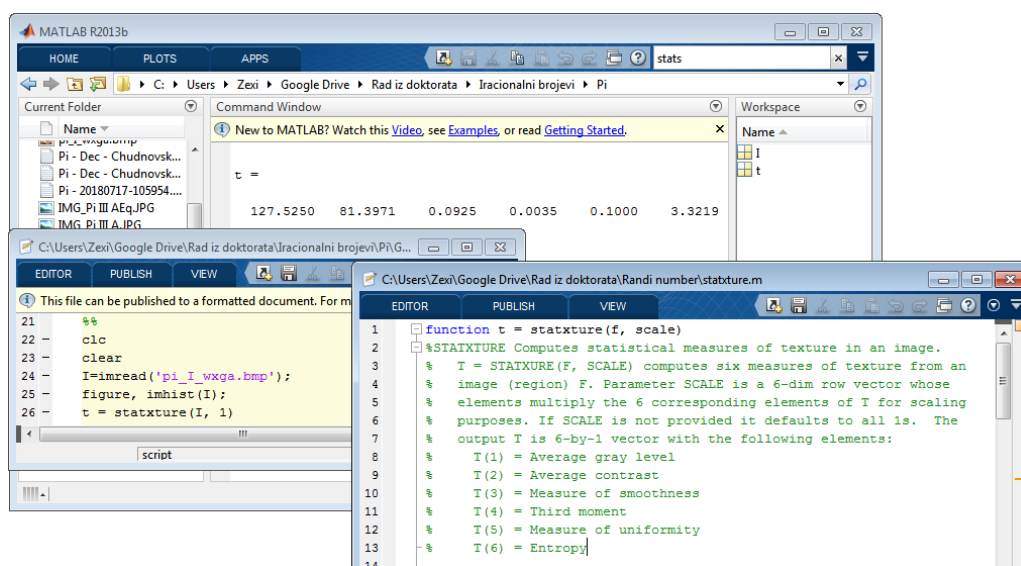


Slika 4.2. Postavka virtualne planarne 3D digitalizacije u Blender-u za verifikaciju svetlosnih tekstura.

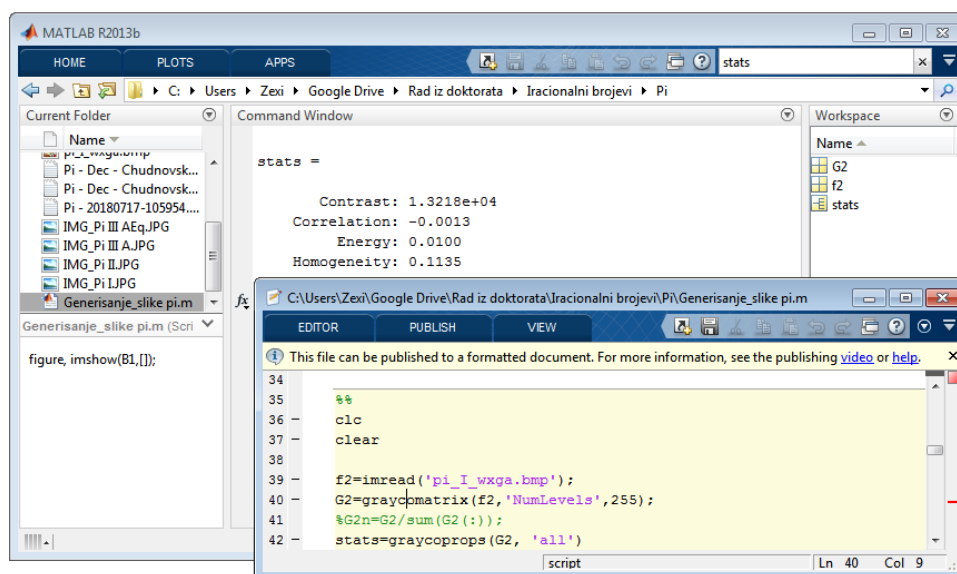
Kada je reč o simuliranju novih svetlosnih tekstura pod kontrolisanim uslovima, kombinacije i varijante podešavanja virtualnog okruženja su bezbrojne. Svrha testiranja svetlosnih tekstura u virtualnom okruženju je da se predvidi njihovo ponašanje usled nesavršenosti optičkih i mehaničkih karakteristika foto aparata kao i osetljivost na promenu parametara, kao što su osvetljenje, rezolucija kamere, pozicije kamere itd.

4.4 Rezultati komparativne analize sintetičkih slika i svetlosnih tekstura

Deskriptivni statistički pokazatelji su izračunavani u Matlab softverskom paketu pomoću funkcije *statxture* i komande *stats* za svaku kreiranu sintetičku sliku. Pomoću funkcije *statxture* (Slika 4.3) izračunate su vrednosti za srednju vrednost (SV), standardnu devijaciju (STD), treći moment (TM) (nagib histograma), entropiju (ENT), ujednačenost (UJE) i uniformnost (UNI), dok su sa pomoću funkcije *stats* (Slika 4.4) za GLCM matricu izračunate vrednosti za kontrast (KON), korelaciju KOR, energiju (ENE) i homogenost (HOM).



Slika 4.3 Statxture funkcija Matlab.



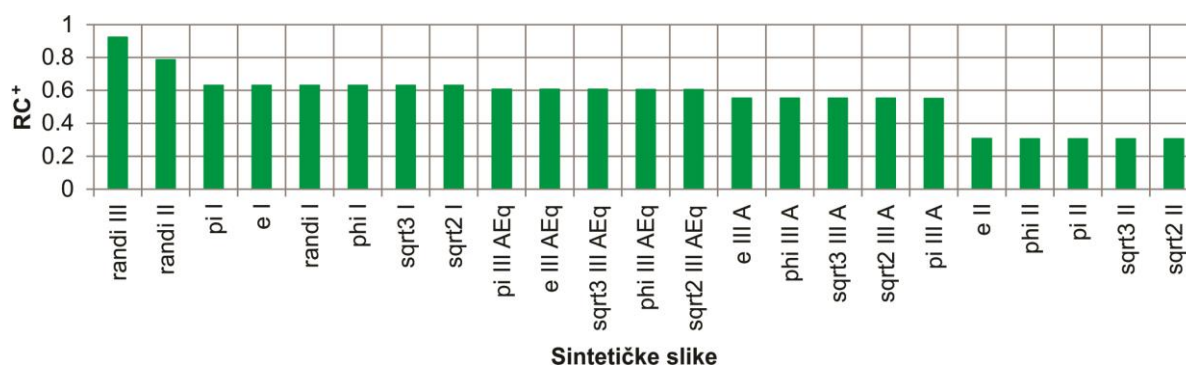
Slika 4.4 Stats komanda – Matlab.

Sve izračunate vrednosti deskriptivnih statističkih pokazatelja prikazane su u tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Izračunate vrednosti statističkih pokazatelja za da te sintetičke slike.

Sinet. slika	SV	STD	UJE	TM	UNI	ENT	KON	KOR	ENE	HOM
pi I	127,5250	81,3971	0,0926	0,0035	0,1000	3,3219	13218	-0,0013	0,0100	0,1135
pi II	23,1930	44,0293	0,0289	4,9597	0,0841	3,7403	3877	-0,0024	0,0077	0,1251
pi III A	127,3535	27,2187	0,0113	-0,0026	0,0294	5,3637	493	0,6664	0,0012	0,1331
pi III AEq	127,3283	74,7139	0,0791	0,0527	0,0361	5,0954	4137	0,6289	0,0029	0,1817
phi I	127,7785	81,4623	0,0926	-0,0538	0,1000	3,3219	13221	0,0001	0,0100	0,1132
phi II	23,1606	43,9537	0,0289	4,9420	0,0842	3,7394	3863	-0,0024	0,0077	0,1250
phi III A	127,6051	27,1854	0,0112	-0,0022	0,0292	5,3867	492	0,6663	0,0011	0,1329
phi III AEq	127,5058	74,7295	0,0791	0,0589	0,0364	5,0854	4135	0,6293	0,0030	0,1830
e I	127,7144	81,3953	0,0925	-0,0368	0,1000	3,3219	13235	-0,0027	0,0100	0,1128
e II	23,0800	43,7236	0,0286	4,8775	0,0842	3,7388	3824	-0,0026	0,0077	0,1250
e III A	127,5422	27,2290	0,0113	-0,0027	0,0291	5,3892	493	0,6666	0,0011	0,1326
e III AEq	127,8410	74,9504	0,0795	-0,0490	0,0364	5,0879	4161	0,6292	0,0030	0,1818
sqrt2 I	127,8440	81,4570	0,0926	-0,0523	0,1000	3,3219	13211	0,0007	0,0100	0,1135
sqrt2 II	23,1849	44,0032	0,0289	4,9550	0,0842	3,7398	3873	-0,0027	0,0077	0,1253
sqrt2 III A	127,6687	27,2742	0,0113	-0,0036	0,0290	5,3931	492	0,6685	0,0011	0,1325
sqrt2 III AEq	127,5118	74,7942	0,0792	0,0357	0,0367	5,0626	4127	0,6306	0,0030	0,1847
sqrt3 I	127,7617	81,4699	0,0926	-0,0552	0,1000	3,3219	13225	-0,0001	0,0100	0,1136
sqrt3 II	23,1905	43,9906	0,0289	4,9436	0,0841	3,7406	3873	-0,0032	0,0077	0,1250
sqrt3 III A	127,5900	27,2655	0,0113	-0,0044	0,0290	5,3922	492	0,6679	0,0011	0,1330
sqrt3 III AEq	127,4252	74,6808	0,0790	0,0607	0,0362	5,0937	4124	0,6297	0,0030	0,1815
randi I	127,7385	81,4827	0,0926	-0,0477	0,1000	3,3219	13241	-0,0010	0,0100	0,1136
randi II	127,2396	77,2937	0,0841	0,0139	0,0500	4,3219	11926	-0,0003	0,0025	0,0687
randi III	127,5106	73,9389	0,0776	-0,0053	0,0039	7,9998	10931	0,0001	0,0000	0,0364

Nakon izvršene normalizacije podataka iz tabele 4.3. realizovana je višekriterijumska metoda TOPSIS čiji rezultati su predstavljeni na slici 4.5..

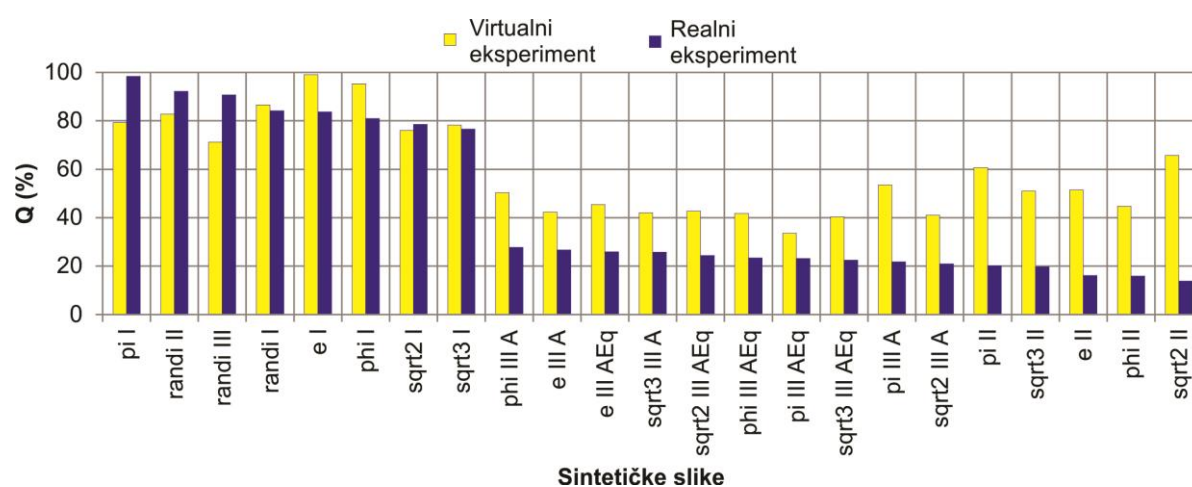


Slika 4.5. TOPSIS rezultati rangiranja sintetičkih slika.

Rezultati planarne 3D digitalizacije (realne i virtualne) prikazani su u tabeli 4.4. i na slici 4.6.

Tabela 4.4 Rezultati realne i virtualne planarne 3D digitalizacije dobijeni pomoću Agisoft Metashape softvera.

Svetlosna tekstura	Br. rekonstruisanih tačaka		SKG reprojekcije (pix)		MG reprojekcije (pix)	
	realni	virtualni	realni	virtualni	realni	virtualni
pi I	216389	156685	0,0715	0,0647	1,9480	3,4425
pi II	76471	127519	0,1432	0,0716	2,9568	3,4497
pi III A	89456	96607	0,1119	0,0797	4,4937	2,2310
pi III AEq	81034	94702	0,0996	0,0863	3,6085	5,5096
phi I	217344	157231	0,0703	0,0634	3,1056	2,3285
phi II	76832	127345	0,1414	0,0967	4,7828	4,6718
phi III A	89698	96878	0,1110	0,0795	2,7231	2,5254
phi III AEq	81048	94896	0,0999	0,0864	3,4980	3,2526
e I	217161	156167	0,0694	0,0637	2,9030	2,1120
e II	76019	127158	0,1399	0,0946	4,5851	3,4968
e III A	89702	95876	0,1113	0,0828	2,9138	3,3921
e III AEq	81631	94502	0,0961	0,0848	2,9877	2,7655
sqrt2 I	216563	156826	0,0692	0,0659	3,4154	3,7290
sqrt2 II	77350	127342	0,1402	0,0957	6,9227	2,2037
sqrt2 III A	89271	96196	0,1125	0,0858	4,8297	3,5019
sqrt2 III AEq	81538	94468	0,0974	0,0863	3,3097	3,0593
sqrt3 I	217077	156831	0,0699	0,0642	3,6240	3,6123
sqrt3 II	77490	127823	0,1371	0,0949	3,2698	3,5944
sqrt3 III A	89261	96402	0,1109	0,0803	3,1140	3,6128
sqrt3 III AEq	81215	94883	0,0993	0,0850	3,8961	3,5617
randi I	217035	156669	0,0695	0,0651	2,8506	2,7564
randi II	216882	156776	0,0699	0,0627	2,2916	3,2290
randi III	216152	156598	0,0710	0,0639	2,3137	4,7696



Slika 4.6. Rezultati virtualnog i realnog eksperimenta planarne 3D digitalizacije.

4.4.1 Diskusija rezultata komparativne analize

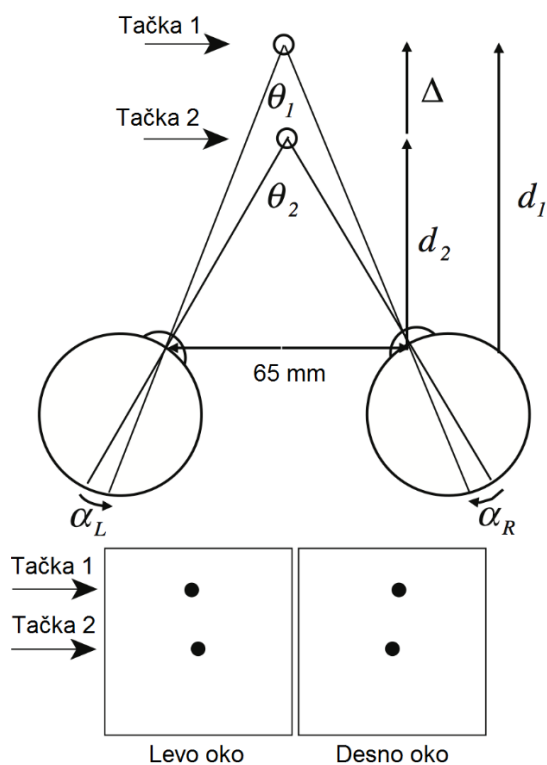
Vrednosti statističkih pokazatelja sintetičkih slika prikazani u tabeli 4.3. pokazuju za svaku sintetičku sliku iste klase veoma mala odstupanja u rezultatima. Veoma mala odstupanja u rezultatima govore o sličnosti distribucije cifara kod iracionalnih brojeva. Osnovna razlika među analiziranim sintetičkim slikama je u broju nijansi sive, koje su svrstane u tri klase. Srednja vrednost nijanse sive kod svih klasa blago varira oko srednje vrednosti raspona 127,5, osim kod klase II gde je dosta niža i iznosi približno 23 što ukazuje da preovlađuju tamnije nijanse sive. Vrednost standardne devijacije je najviša kod klase I, dok je najniža kod klase IIIA. Nagib histograma koji se definiše trećim momentom je, takođe, jedino kod klase II narušen. Najviša vrednost entropije, kao mere nasumičnosti, je izračunata kod randi III klase, a zatim slede klase IIIA i IIIAEq. Visoka vrednost entropije u ovim klasama opravdava se velikim brojem nijansi sive prisutnih na slici. Najveća razlika u kontrastu javlja se između klase I i klase IIIA, a najbliži je sa randi III i randi II klasom.

Poznato je da se prilikom transformacije sintetičke slike u svetlosnu teksturu gubi na kvalitetu projekcije. Ukoliko susedni pikseli na sintetičkoj slici imaju slične intenzitete u rasponu nijansi 0 do 255, što je karakteristično za klasu III, može doći do obrazovanja većih regiona koje softver može da okarakterise ključnom tačkom.

Prema rezultatima višekriterijumske metode, kod komparativne analize, sintetičke slike klase I zauzimaju mesto neposredno posle randi II i sintetičkih slika randi III koje takođe imaju ravnomerno raspoređeni histogram, ali sa većim brojem nijansi od klase I. Međutim, kod realne planarne 3D digitalizacije pi I zauzima prvo mesto, a zatim slede randi II i randi III klase. Virtuelna planarna 3D digitalizacija potvrđuje dominaciju klase I kada se radi o kvalitetu 3D digitalizacije posmatranoj preko parametra „Q“.

5. ANALIZA UTICAJA KOORDINACIJE KOMPONENTI SISTEMA 3D DIGITALIZACIJE CRP ZASNOVANE NA ODREĐIVANJU SfM

Pozicije sa kojih se snimaju fotografije igraju važnu ulogu u samom procesu 3D digitalizacije. Prilikom snimanja fizičkog objekta potrebno je obezbediti neophodno preklapanje kako bi se stekli uslovi za 3D rekonstrukciju. Akvizicija fotografija podrazumeva sve korake, od postavljanja fizičkog objekta u merni prostor (vidno polje kamere) do gotovih fotografija za softversko procesiranje. Akvizicija fotografija se vrši snimanjem fotografija sa relativno malim pomeranjem formirajući stereo parove fotografija sa određene udaljenosti, slično ljudskom stereovizijskom sistemu (Slika 5.1.).



Slika 5.1. 3D vidno polje i bazna osnova stereo para kod ljudske stereovizije [156].

U zavisnosti od vrste objektiva kojom je opremljena kamera za akviziciju fotografija i veličine bazne osnove, ukoliko su optičke ose susednih kamera paralelne ili približno paralelne, vrednosti rastojanja kamere i najbliže tačke 3D stereo polja prikazane su tabeli 5.1

Tabela 5.1. Zavisnost najbliže tačke 3D stereo polja u zavisnosti od žižne daljine objektiva i bazne osnove stereo para (podaci u tabeli prikazani su u metrima) [157].

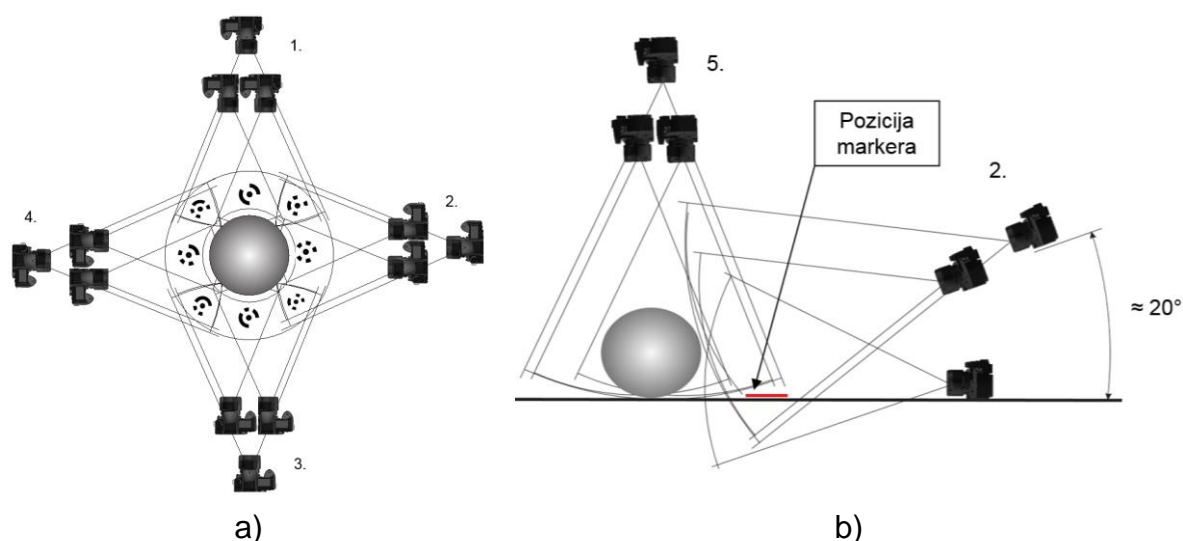
Objektiv mm	Bazna osnova stereo para mm														
	30	35	40	45	50	55	60	70	75	80	85	90	95	100	
12	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1	1	1,1	1,1	1,2	Širokougaoni objektivi
15	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	
18	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	
21	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	
24	0,7	0,8	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,7	1,8	1,9	2	2,2	2,3	2,4	
27	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	
30	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9	3	
35	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,5	2,6	2,8	3	3,2	3,3	3,5	
40	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	Normalni objektivi
45	1,4	1,6	1,8	2	2,3	2,5	2,7	3,2	3,4	3,6	3,8	4,1	4,3	4,5	
50	1,5	1,8	2	2,3	2,5	2,8	3	3,5	3,8	4	4,3	4,5	4,8	5	
55	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8	3	3,3	3,9	4,1	4,4	4,7	5	5,2	5,5	
60	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6	4,2	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	6	Tele objektivi
65	2	2,3	2,6	2,9	3,3	3,6	3,9	4,6	4,9	5,2	5,5	5,9	6,2	6,5	
70	2,1	2,5	2,8	3,2	3,5	3,9	4,2	4,9	5,3	5,6	6	6,3	6,7	7	
80	2,4	2,8	3,2	3,6	4	4,4	4,8	5,6	6	6,4	6,8	7,2	7,6	8	
90	2,7	3,2	3,6	4,1	4,5	5	5,4	6,3	6,8	7,2	7,7	8,1	8,6	9	
100	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	
125	3,8	4,4	5	5,6	6,3	6,9	7,5	8,8	9,4	10	10,6	11,3	11,9	12,5	
150	4,5	5,3	6	6,8	7,5	8,3	9	10,5	11,3	12	12,8	13,5	14,3	15	
175	5,3	6,1	7	7,9	8,8	9,6	10,5	12,3	13,1	14	14,9	15,8	16,6	17,5	
200	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	
250	7,5	8,8	10	11,3	12,5	13,8	15,0	17,5	18,8	20	21,3	22,5	23,8	25	
300	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18	21	22,5	24	25,5	27	28,5	30	
350	10,5	12,3	14	15,8	17,5	19,3	21	24,5	26,3	28	29,8	31,5	33,3	35	
400	12	14	16	18	20	22	24	28	30	32	34	36	38	40	

Za potrebe CRP najčešće se koriste objektivi sa normalnim uglom gledanja (objektiv 50 mm ima 46° ugao gledanja), pošto se sa njima postiže optimalan odnos između optičkih distorzija i ugla gledanja, odnosno prikaza dubine na slici. Objektivi sa manjom žižnom daljinom imaju veće optičke distorzije i obrnuto [148,157].

Broj potrebnih fotografija može da varira i od faktora koji se ne mogu menjati, među koje se ubrajaju veličina i kompleksnost objekta 3D rekonstrukcije. Zbog toga je u

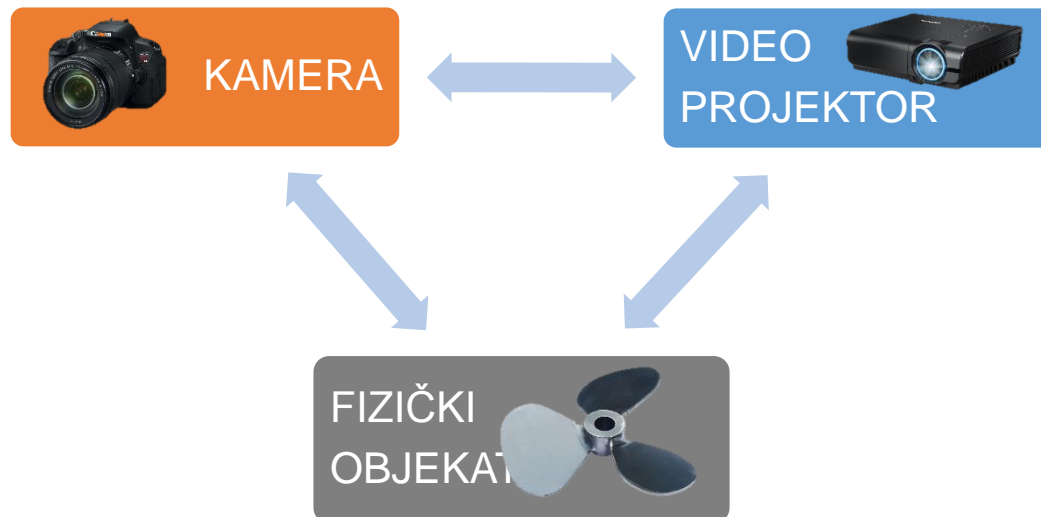
slučaju objekata većih dimenzija i/ili složenije geometrije potreban veći broj fotografija. U opštem slučaju, razlikuju se dve osnovne vrste objekata - ravanski (zidovi, reljefi, ravne površine), kod kojih se fotografisanje vrši paralelno sa objektom (prema preporukama potrebno je ostvariti bar 60% preklapanja) i zapreminski izolovani objekti (pristup objektu je omogućen sa svih strana) gde se preporučuje fotografisanje u inkrementima od približno $15^\circ \sim 20^\circ$ [158]. Osim pravilno raspoređenih fotografija u pomenutim inkrementima moguće je vršiti akviziciju fotografija metodom koncentrisanja fotografija. Ova metoda omogućava 3D digitalizaciju fizičkog objekta pomoću grupa fotografija snimljenih sa veoma bliskih položaja tako da formiraju koncentrisanu grupu [159].

Koncentrisana grupa se sastoji minimum od tri fotografije pod uslovom da su na svim fotografijama jasno uočljivi kodirani markeri koji su postavljeni u mernom prostoru oko objekta ili na samom objektu. Za razliku od standardnih strategija za snimanje fotografija, na osnovu preporuka proizvođača softvera za fotogrametriju taj broj nema ograničenja [73,160]. Položaj i broj grupa koncentrisanih fotografija zavisi samo od složenosti radnog predmeta (Slika 5.2).



*Slika 5.2. Prikaz strategije za fotografisanje primenom koncentrisanja fotografija sa 5 grupa fotografija:
a) pogled od gore b) pogled sa strane – uprošćen prikaz [159].*

Osim ove dve osnovne grupe fizičkih objekata, mogu se sresti unutrašnjosti fizičkih objekata (sobe, prostorije itd.). Takođe, javljaju se i strategije fotografisanja fizičkih objekata postavljenih na obrtni sto, kao i strategije istovremenog fotografisanja sa više kamera. Prilikom projektovanja svetlosnih tekstura na površinu objekta u cilju poboljšanja vizuelnih karakteristika sistem se proširuje video projektorom (Slika 5.3.) [50,123].



Slika 5.3. Komponente sistema za 3D digitalizaciju CRP i projektovanom svetlosnom teksturom.

Kod posmatranja relativnog položaja između elemenata koji čine sistem za 3D digitalizaciju CRP potpomognutu projektovanom svetlosnom teksturom razlikuju se sledeći mogući slučajevi:

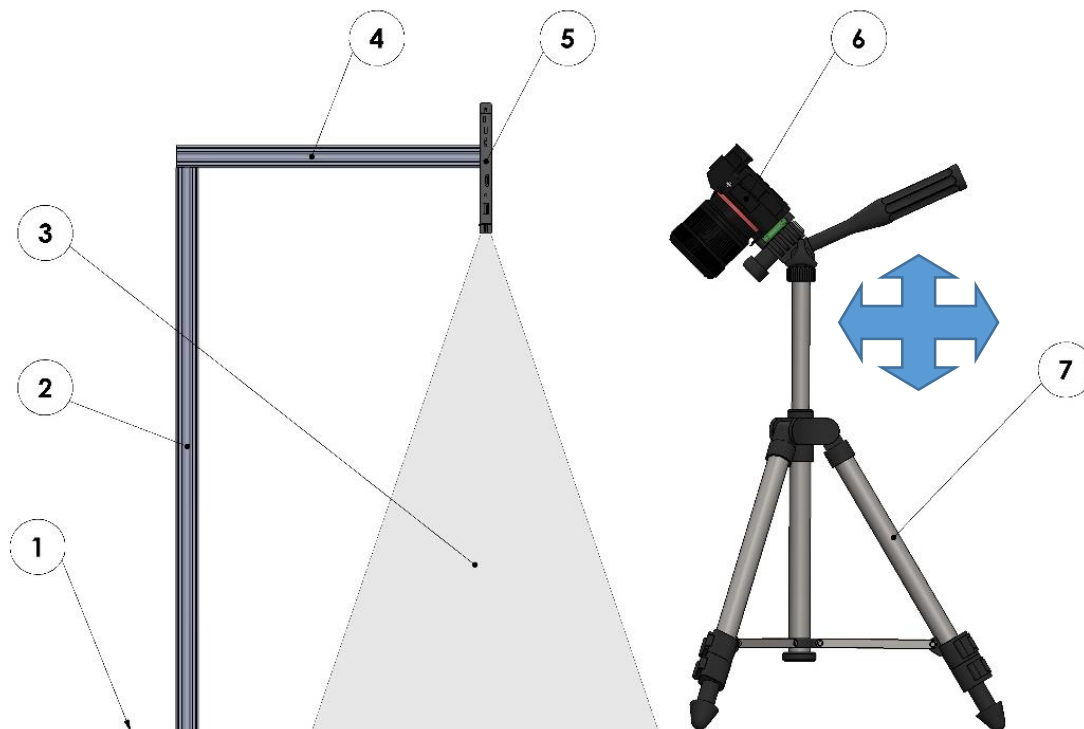
- projektor i objekat su stacionarni, dok kamera vrši relativno kretanje u odnosu na projektor i objekat,
- kamera je stacionarna, dok se projektor i objekat zajedno relativno kreću u odnosu na kameru,
- kamera i projektor su stacionarni, dok relativno (obrotno) kretanje vrši objekat.

5.1 Statičan projektor i objekat, pokretna kamera - sistem 1

Statičan projektor i objekat, pokretna kamera - predstavlja najjednostavniji sistem za 3D digitalizaciju pomoću svetlosnih tekstura (Slika 5.4.). Potreban je samo nosač projektor (4), koji se postavlja na podlogu (5) na kojoj se nalazi objekat 3D digitalizacije (3) a opcionalno i držač kamere. Komponente sistema potrebno je postaviti tako da projektor (1) omogućava nesmetano kretanje kamere (2) oko predmeta 3D digitalizacije (3).

Prednosti ovakve konfiguracije je upotreba jednostavne opreme i brzina akvizicije fotografija koja je omogućena zbog proizvoljnog postavljanja kamere u odnosu na objekat 3D digitalizacije. Veoma je pogodan za objekte tipa diska tj. objekata koji nemaju izraženu treću dimenziju.

Mane ovakvog sistema su opasnost od slučajnog pomeranja projektor (1) prilikom premeštanja kamere sa jedne pozicije na drugu, kao i ograničenost digitalizacije na samo deo koji se nalazi pod projektovanom svetlosnom teksturom [59].

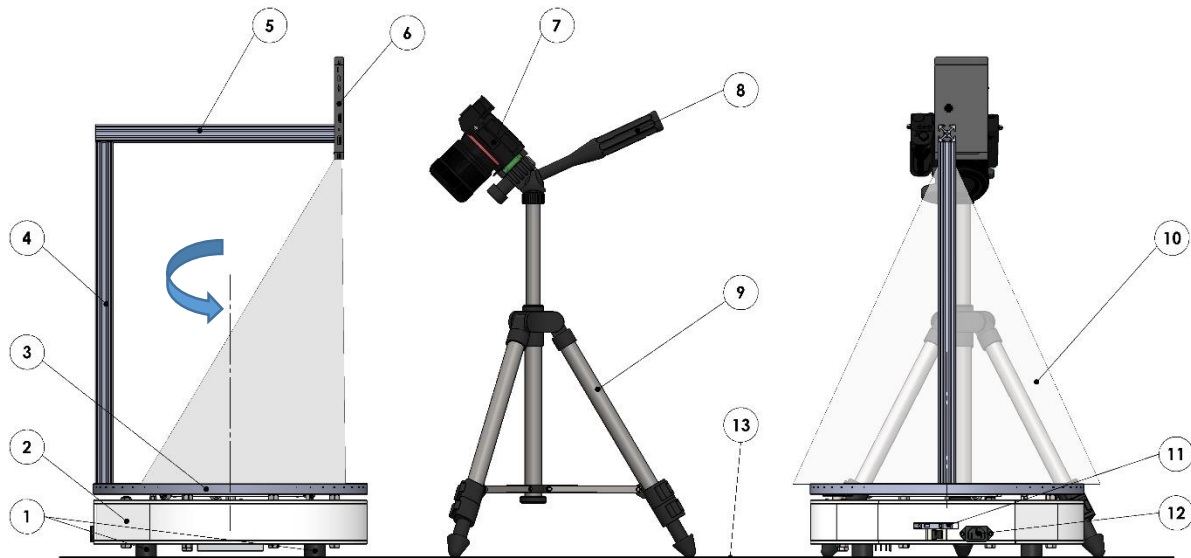


Slika 5.4. Relativni položaj komponenti u sistemu 1:
 (1) podloga, (2) vertikalni nosač, (3) polje projektovane svetlosne teksture, (4) nosač projektora, (5) video projektor, (6) kamera, (7) stativ.

5.2 Obrtni sto sa projektorom, statična kamera - sistem 2

Sistem sa obrtnim stolom sa projektorom i statičnom kamerom, zahteva izradu složenije noseće konstrukcije koja bi obezbeđivala relativan položaj komponenti (Slika 5.5). U ovom sistemu, obrtni sto (2) se oslanja na podlogu (13) preko elemenata za oslanjanje (1) dok kamera (5) za vreme akvizicije ostaje fiksirana. Relativno kretanje vrši objekat 3D digitalizacije (4) koji je postavljen na obrtnu ploču stola (3). Na horizontalni nosač (7) koji je inkorporiran preko vertikalnog nosača (8) u obrtnu ploču stola (3) postavljen je video projektor (6). Ugao zakretanja obrtnog stola sa video projektorom u odnosu na fiksiranu kameru ne bi trebao da bude veći od $\pm 45^\circ$ za snimanje jednog seta fotografija. Veći opseg rotacije nije preporučljiv iz razloga što površi ne bi bile pokrivena projektovanom svetlosnom teksturom. Strategija snimanja fotografija bi se izvodila u najmanje tri nivoa po visini, a po potrebi i više u zavisnosti od složenosti objekta 3D digitalizacije.

Za 3D digitalizaciju kompletnog objekta neophodno je kreirati više podsetova fotografija i izvršiti naknadno poravnavanje i spajanje podsetova u finalni set. Kodirani markeri za uspostavljanje razmere bi se postavljali na ploču stola na poznatim rastojanjima formirajući pri tome kružne ili pravougaone forme.



Slika 5.5. Relativni položaj komponenti u sistemu 2:

(1) elementi za oslanjanje obrtnog stola, (2) kućište, (3) obrtna ploča, (4) vertikalni nosač projektor, (5) horizontalni nosač projektor kamera, (6) mini projektor, (7) kamera, (8) ručica za podešavanje ugla kamere, (9) stativ, (10) polje projektovane svetlosti, (11) port za konekciju sa računarom, (12) port za napajanje (13) podloga.

Prednosti ove konfiguracije se ogledaju u:

- robusnijoj konstrukciji,
- smanjenom mogućnošću od kolizije između projektor i kamere,
- većoj tačnosti i boljoj ponovljivosti akvizicije fotografija.

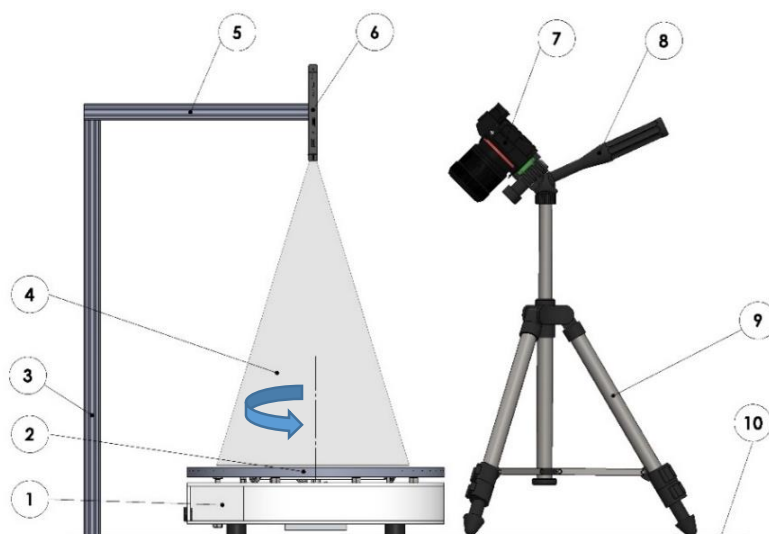
Svako relativno pomeranje radnog predmeta u odnosu na projektor kao i kod prethodnog sistema dovešće do netačnih rezultata, a takođe je prisutno i ograničenje površi koje se nalaze pod projektovanom svetlošću. Kako bi se osigurala veća tačnost i krutost celog sistema konzolni nosač mogao bi se zameniti portalnim. Nakon snimanja jednog podseta fotografija, objekat 3D digitalizacije bi morao da se ručno postavi u novu poziciju da bi se mogao snimiti novi podset fotografija.

Izbor mini projektor je veoma važna u ovom sistemu, iz razloga što treba da obezbedi kvalitetnu projekciju svetlosne teksture, treba da bude što manje težine zbog mogućih vibracija prilikom zakretanja sa pločom stola. Takođe, poželjno je da napajanje projektor bude nezavisno, kako bi se izbegla upotreba kabla za napajanje koji bi predstavljao smetnju prilikom zakretanja ploče stola i snimanja fotografija.

5.3 Obrtni sto, fiksna kamera i projektor - sistem 3

Poslednja konfiguracija koja će biti prikazana je konfiguracija kada su kamera i projektor fiksirani, ali je optička osa projektor kolinearna sa osom rotacije obrtnog stola (Slika 5.6.). U ovom slučaju rotacija svetlosne teksture se vrši pomoću računara

i prati rotaciju obrtnog stola, tako da je ostvareno relativno pomeranje radnog predmeta sa kamerom, a nije narušen relativni odnos radni predmet – svetlosna tekstura.



*Slika 5.6. Relativni položaj komponenti u sistemu 3:
(1) kućište obrtnog stola, (2) obrtna ploča, (3) vertikalni nosač, (4) polje projektovane svetlosti, (5) horizontalni nosač projektora, (6) video projektor, (7) kamera, (8) ručica za podešavanje ugla kamere, (9) stativ, (10) podloga.*

Idejno rešenje ovog sistema je prikazano na slici 5.6. Sistem je izveden sa nosačima (4, 5) video projektora (6) koji nije spojen sa kućištem obrtnog stola (1), nego je vezan za podlogu (10), mada je moguća integracija vertikalnog nosača (3) sa kućištem (1) kako bi se formirao kompaktan sistem. Polje svetlosne teksture (4) vrši sinhronizovano kretanje sa pločom (2) obrtnog stola, dok je kamera (7) fiksirana na stativu (9).

Prednosti predložene konfiguracije sistema 3 je u mogućnosti snimanja fotografija u punom krugu (360°), kao i mogućnosti sinhronizacije projektora i obrtnog stola. Zbog same konfiguracije elemenata predstavljeni sistem bi najviše odgovarao 3D digitalizaciji radnih predmeta oblika diska, odnosno 2,5D objekata kod kojih z osa (osa normalna na površ stola) nije toliko izražena.

Za 3D digitalizaciju složenijih radnih predmeta neophodno je koristiti fleksibilan pribor za stezanje i pozicioniranje radnog predmeta. Kao jedno od mogućih rešenja je kreiranje specijalnog pribora sa mogućnošću podešavanja ugla nagiba stegnuto g radnog predmeta.

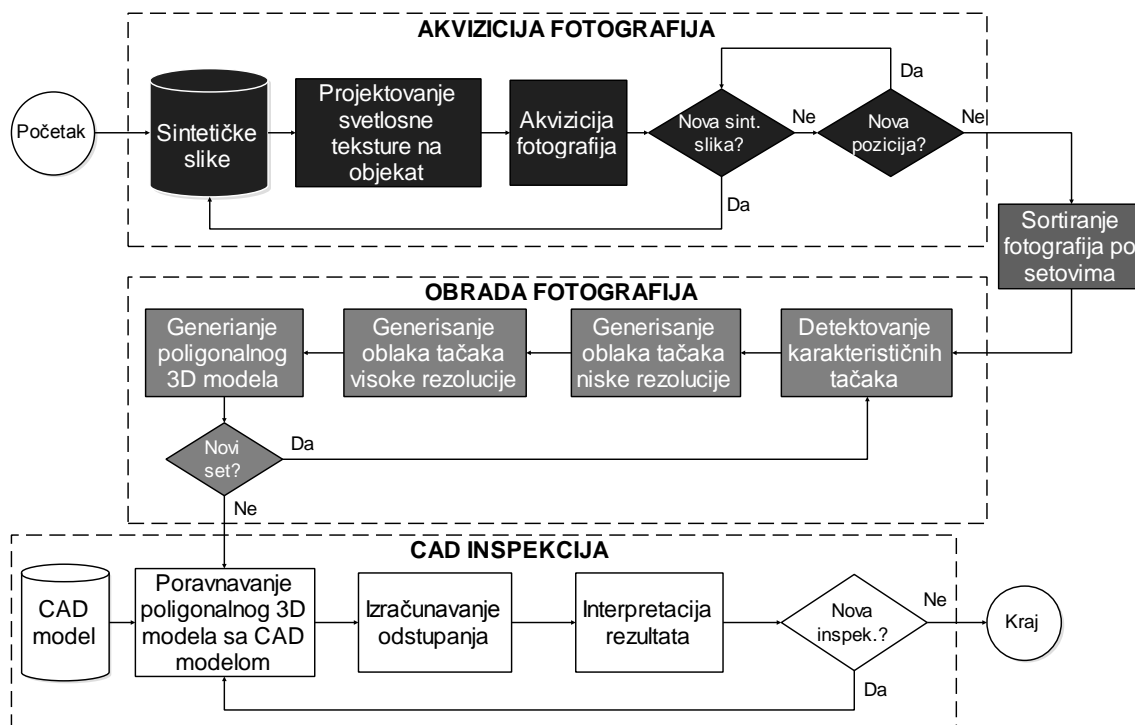
6. VERIFIKACIJA SINTETIČKIH SLIKA I SVETLOSNIH TEKSTURA KOD CRP

Verifikacija novih sintetičkih slika i svetlosnih tekstura, predloženih u ovom istraživanju, sprovedena je kroz dve studije slučaja:

- aluminijumski test model i
- dentalni model.

Verifikacija je zasnovana na metodologiji koja je definisana prema sledećem algoritmu (Slika 6.1.), a koji je u korelaciji sa algoritmom prikazanim na slici 2.9.. Algoritam se sastoji se iz tri glavne celine:

- akvizicija fotografija,
- obrade fotografija i
- CAD inspekcije.



Slika 6.1. Algoritam toka verifikacije sintetičkih slika i njihovih svetlosnih tekstura.

Pored akvizicije i obrade fotografija, koje su sastavni deo fotogrametrijske metode 3D digitalizacije, CAD inspekcija, metoda računom podržane inspekcije CAI (*engl. Computer Aided Inspection*), predstavlja efikasan vid kontrole izmerene (realne) geometrije u odnosu na nominalnu geometriju, posebno kada su u pitanju površi složenije geometrije [161]. Nominalna geometrija je, u okvirima savremenog mašinskog inženjerstva, najčešće definisana u obliku 3D CAD modela, dok je izmerena (realna) geometrija najčešće sadržana u obliku trodimenzionalnog oblaka tačaka, ili u obliku 3D poligonalne mreže. U CAD inspekciji se, za uspostavljanje odnosa između nominalne i realne geometrije, koriste algoritmi zasnovani na metodi najmanjih kvadrata. Najpoznatiji među njima je ICP algoritam (*engl. Iterative Closest Points - ICP*) [162], koji služi za registraciju i poravnavanje dva oblaka tačaka ili dve poligonalne mreže. Na slici 6.2. prikazan je osnovni tok CAD inspekcije.



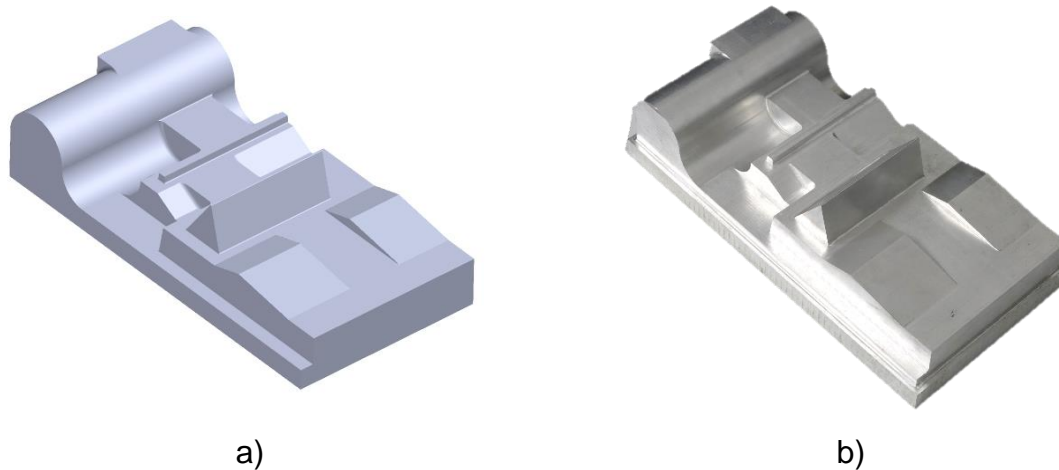
Slika 6.2. Osnovni tok CAD inspekcije [163].

Kod ICP-a se oblak tačaka u odnosu na koji se vrši provera odstupanja se postavlja za referentni, dok se drugi uz pomoć transformacija (translacije i rotacije) dovodi u preklopljeni položaj iterativnim putem. Tokom iteracija algoritam dovodi slobodan oblak tačaka u najbliži položaj u odnosu na postavljeni referentni oblak tačaka [162,164,165]. Oblaci tačaka u svom zapisu sadrže geometrijske kvantitativne (brojčane), a mogu da sadrže i atributivne (opisne) podatke. Geometrijski podaci su predstavljeni preko koordinata tačaka i njihovih vektora normala, dok kod atributivnih podataka to mogu biti podaci o načinu prikaza tačke, kao što je boja itd. Mnogi ICP algoritmi koriste kombinaciju geometrijskih i atributivnih podataka radi postizanja što boljih izlaznih rezultata [166].

6.1 Studija slučaja 1 - Aluminijumski test model

Studija slučaja 1 bazirana je na modelu koji sadrži veći broj osnovnih geometrijskih oblika (prizme, kupe, cilindri...), kombinovanih na način da predstavljaju složenu geometrijski strukturu. Na osnovu CAD modela (Slika 6.3.a) proizveden je test model

od aluminijuma na CNC glodalici (Slika 6.3.b). Zbog svoje monotone vizuelne teksture odabrani test model može se smatrati objektom veoma nepoželjnih karakteristika za 3D digitalizaciju primenom CRP bazirane na određivanju SfM



Slika 6.3. Aluminijumski test model:
a) CAD model b) fizički model.

Gabaritne dimenzije test modela su 280 x 140 x 70 mm, a obrađen je u visokom kvalitetu. Kao posledica niske površinske hrapavosti test model karakteriše visoka refleksivnost, što ga čini odličnim primerom za proveru efikasnosti primene predloženih sintetičkih slika i svetlosnih tekstura.

Polazeći od činjenice da projektor i objekt ostaju fiksirani tokom snimanja fotografija i da samo kamera ima relativno kretanje u odnosu na njih, visoko refleksivne regije (bele tačke) će promeniti sopstveni relativni položaj na površi objekta usled pomeranja kamere i omogućiti snimanje problematične regije. Ako je na slici primećena visoko refleksivna regija, dovoljno je da se snime najmanje dve slike sa različitih pozicija kod kojih će se izbeći ili minimizirati uticaj visoko refleksivne regije.

6.1.1 Akvizicija fotografija

Na osnovu raspoložive opreme za akviziciju fotografija korišćena je DSLR (engl. *Digital Single Lens Reflex*) kamera marke Canon 5D Mark III serije sa CMOS (engl. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) full frame senzorom i Canon EF 50 mm f/1.2L USM (engl. *Ultra Sonic Motor*) objektivom (Slika 6.4.). Kamera je bila postavljena na stativ da bi se izbeglo zamućenje fotografija za vreme ekspozicije, a upravljanje je vršeno pomoću prenosnog laptop računara na kome su ujedno i pohranjivane snimljene fotografije. Korišćeni softver za upravljanje kamerom omogućavao je potpunu kontrolu podešavanja svih parametara u manuelnom režimu uz mogućnost praćenja realnog prikaza slike (engl. *Live Mode*). Akvizicija fotografija realizovana je u najvišoj rezoluciji koju podržava kamera od 5120 x 3840 piksela u

JPEG formatu zapisa. Udaljenost kamere od 0,7 m \pm 0,05 m do objekta 3D digitalizacije, je izabrana da bi se ceo objekat našao unutar vidnog polja kamere, a radi obezbeđivanja potrebne dubinske oštine (engl. *Depth of Field - DoF*) izvršena su podešavanja kamere prema tabeli 6.1..

Tabela 6.1. Podešavanje kamere za date uslove osvetljenja.

Parametar	Podešena vrednost
Otvor blende F-broj	11
ISO osetljivost	100
Brzina zatvarača	1/8 s

Uz ovo podešavanje kamere prilagođeno uslovima osvetljenja i veličini objekta, obezbeđena je zadovoljavajuća dubinska oština.



Slika 6.4. Canon 5D Mark III sa Canon EF 50 mm f / 1.2L USM objektivom.

Da bi se smanjili problemi sa difrakcijom i aberacijom, uspostavljen je kompromis između udaljenosti od kamere, veličine otvora blende, ISO osetljivosti i brzine zatvarača. Proračunati GSD kamere za navedena podešavanja je iznosio 0,093 mm/pix, dok je projektor bio udaljen približno 1 m od test modela i postavljen pod uglom od 45° u odnosu na osu rotacije i njegov GSD je iznosio približno 0,7 \pm 0,1 mm/pix. Za projektovanje svetlosne teksture korišćen je LCD video projektor marke EPSON sa karakteristikama prikazanim u tabeli 6.2.. Kamera, projektor i objekat 3D digitalizacije su postavljene u relativni položaj kao što je prikazano u sistemu 1 (potpoglavlje 5.1).

Eksperiment je realizovan snimanjem setova fotografija objekta 3D digitalizacije sa tri različite svetlosne teksture dobijenih projektovanjem sintetičkih slika:

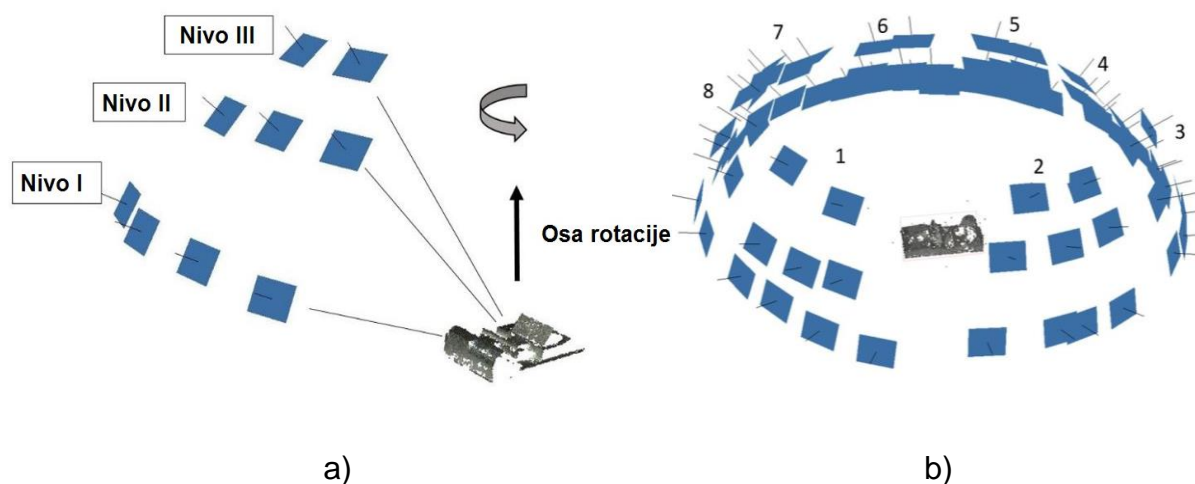
- pi I,
- randi II,
- randi III.

Tabela 6.2. Tehničke karakteristike EPSON EB-1761W video projektora.

SLIKA	
Tehnologija	3 LCD
Rezolucija	WXGA, 1280 x 800, 16:10
Osvetljenje	2600 - 1700 lumen-a
Kontrast	2000 : 1
OPTIKA	
Odnos prikaza projekcije	1,04 – 1,26:1
Zum	ručni
Širina projekcije	0,7 m – 6,8 m
Širina projekcije zum	0,8 m – 8,2 m

Izabrane sintetičke slike pripadaju različitim klasama i pomoću njih su postignuti najbolji rezultati u komparativnoj analizi.

Zbog ograničenog kretanja komponenti: test modela, projektora i kamere, nije bilo moguće rekonstruisati ceo test model, stoga je set fotografija podeljen na osam podsetova (Slika 6.5.b). Svaki podset se sastojao se od 9 fotografija (Slika 6.5.a), pa je kompletna 3D rekonstrukcija izvedena sa 72 fotografije.



Slika 6.5. Poravnavanje fotografija:
a) jedan podset b) set - osam podsetova.

Fotografije u svakom podsetu distribuirane su na tri nivoa. Četiri fotografije su snimljene na prvom nivou koji gradi najveći ugao sa osom rotacije. Sledeći nivo se sastojao od tri snimljene fotografije, dok su na poslednjem, trećem nivou koji gradi najmanji ugao sa osom rotacije, snimljene svega dve fotografije. Distribucija fotografija u setu podseća na kalotu i karakteristična je zapreminske objekte, poput test modela. Nakon akvizicije, pohranjene fotografije su razvrstane po setovima i pripremljene za dalju obradu.

6.1.2 Post procesiranje fotografija i generisanje 3D modela

Dužina procesa postprocesiranja digitalnih fotografija zavisi, pre svega, od kvaliteta ulaznih fotografija. Stoga, fotografije objekta 3D digitalizacije moraju biti visokog kvaliteta i sa odgovarajućim stepenom preklapanja. Sve fotografije su postprocesirane sa istim podešavanjima softvera. Postprocesiranje fotografija je izvršeno pomoću Agisoft Methashape softvera. Maske za odstranjivanje pozadine su kreirane u samom softveru i korišćene na svim fotografijama. Svaki set fotografija je obrađivan pojedinačno. Nakon prvog završenog koraka u okviru postprocesiranja (poravnavanja fotografija) dobijen je oblak tačaka niske rezolucije i virtualni prikaz procene pozicija sa kojih su snimljene fotografije.

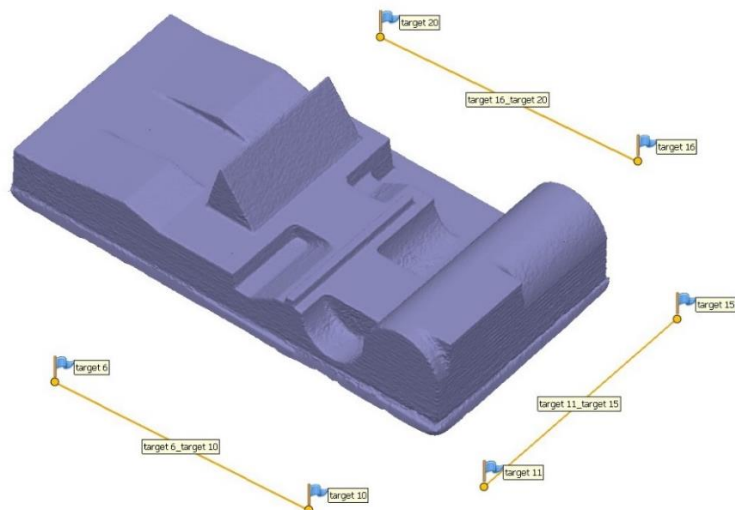
U tabeli 6.3. prikazani su rezultati 3D rekonstrukcije oblaka tačaka aluminijumskog test modela zajedno sa izračunatim kvalitetom 3D rekonstrukcije „Q“, koji predstavlja merilo za relativno poređenje korišćenih svetlosnih tekstura.

Tabela 6.3. Rezultati 3D rekonstrukcije oblaka tačaka niske rezolucije.

Svetlosna tekstura	Broj RT	SKG reprojekcije (pix)	MG reprojekcije (pix)	Q (%)
Bez svetlosne teksture	29195	1,0650	34,8576	15
pi I	88745	0,8712	39,1382	90
randi II	88381	0,8624	31,8868	100
randi III	88692	0,8629	36,9002	93

Nakon dobijanja oblaka tačaka niske rezolucije i virtuelnih položaja kamera, primenjen je MVS algoritam koji ima za cilj da kreira oblak tačaka visoke rezolucije. Kao finalni korak vrši se poligonizacija oblaka tačaka visoke rezolucije i dobija se sirovi (bez bilo kakve dodatne naknadne obrade ili filtriranja) poligonalni 3D model. Na osnovu postavljenih kodiranih markera sa rastojanjem od 160 mm između parova markera utvrđena je razmera, a greška definisane razmere iznosila je 0,039 mm (Slika 6.6.).

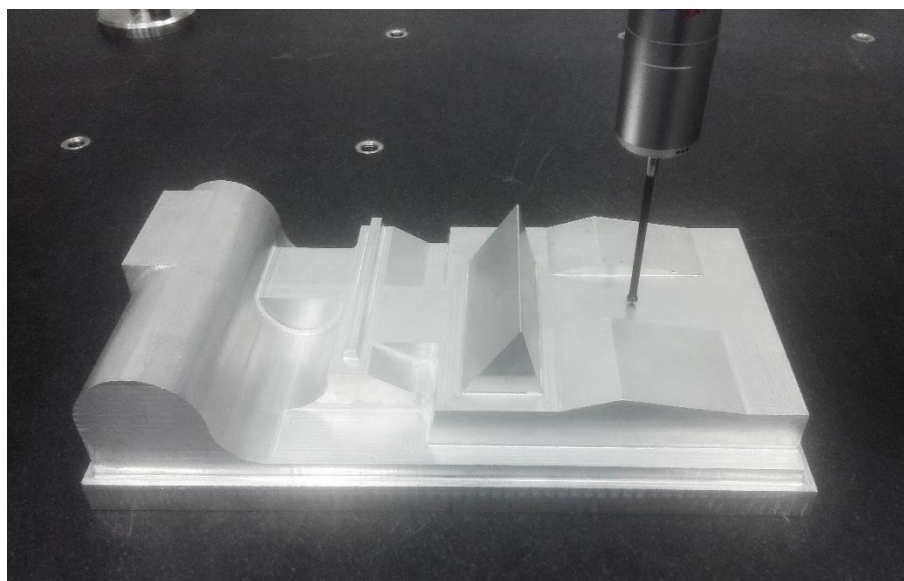
Rezultat postprocesiranja snimljenih fotografija su bila četiri poligonalna 3D modela. Tri poligonalna modela dobijena su primenom svetlosnih tekstura, dok je jedan poligonalni 3D model dobijen u opštim uslovima osvetljenja.



Slika 6.6. Uspostavljanje razmere na poligonalnom 3D modelu preko kodiranih markera.

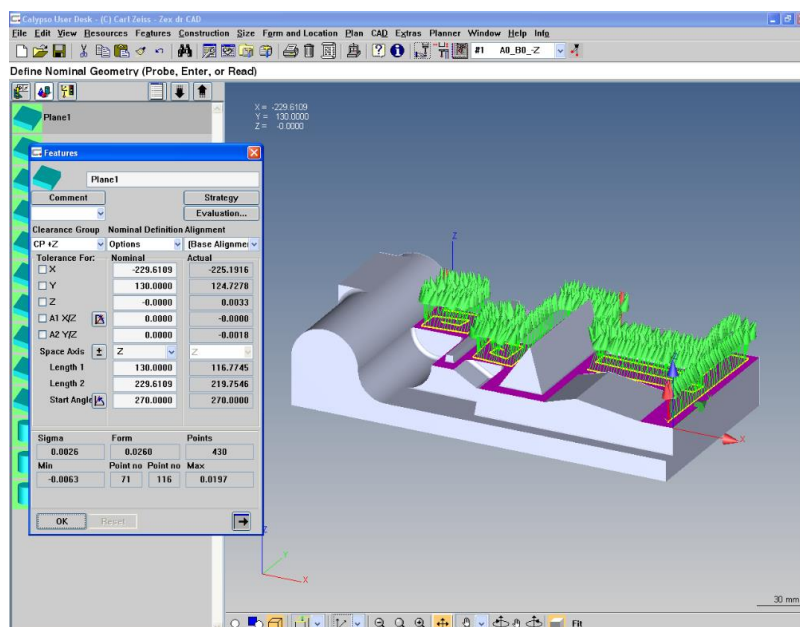
6.1.3. Merenje aluminijumskog test modela na KMM

Nakon fotogrametrijskog snimanja aluminijumski test model je postavljen na sto koordinatne merne mašine bez prethodnog stezanja u pribor, pošto za istim nije bilo potrebe jer je komad svojom težinom obezbeđivao dovoljnu silu na ploču stola, pri čemu nije ugrožavao proces merenja (Slika 6.7). Merenje je izvršeno upotrebom CARL ZEISS Contura G2 KMM, čija je najveća dozvoljena greška (engl. *Maximum Permissible Error – MPE*) $MPE = (1,9 + L/300) \mu\text{m}$, gde je L izmerena dužina izražena u mm.

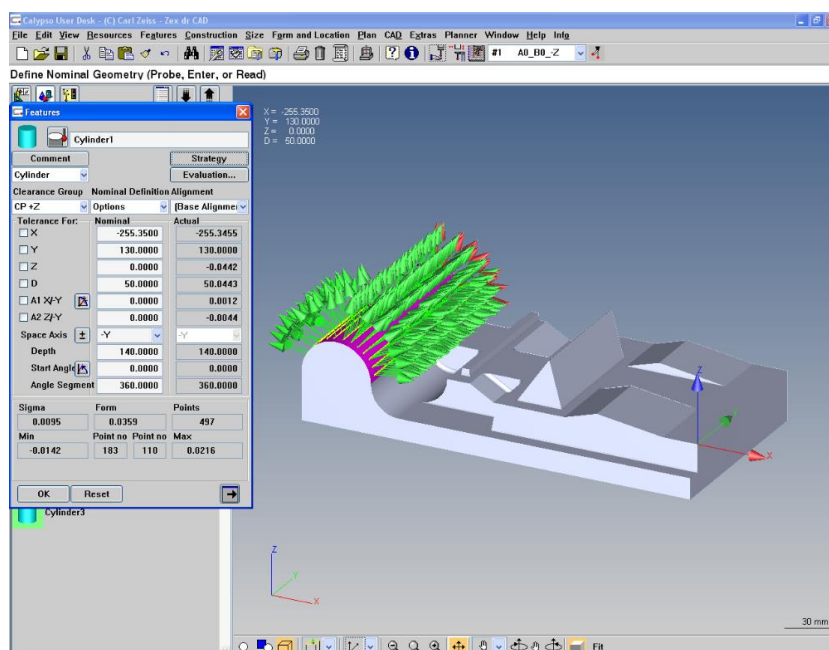


Slika 6.7. Merenje geometrijskih oblika na KMM.

Merenje geometrijskih oblika realizovano je u mernoj laboratoriji sa kontrolisanim mikroklimatskim uslovima (20 ± 0.5) °C. Obzirom na veličinu aluminijumskog test komada odabran je merni pipak sa dužinom stabla $L = 75$ mm i prečnikom sfere od 2,5 mm. Na slikama 6.8. i 6.9. prikazani su primeri strategije merenja ravnanskih i cilindričnih površina u pratećem KMM softveru CALYPSO 4.8.



Slika 6.8. Primer merenja ravni na KMM.



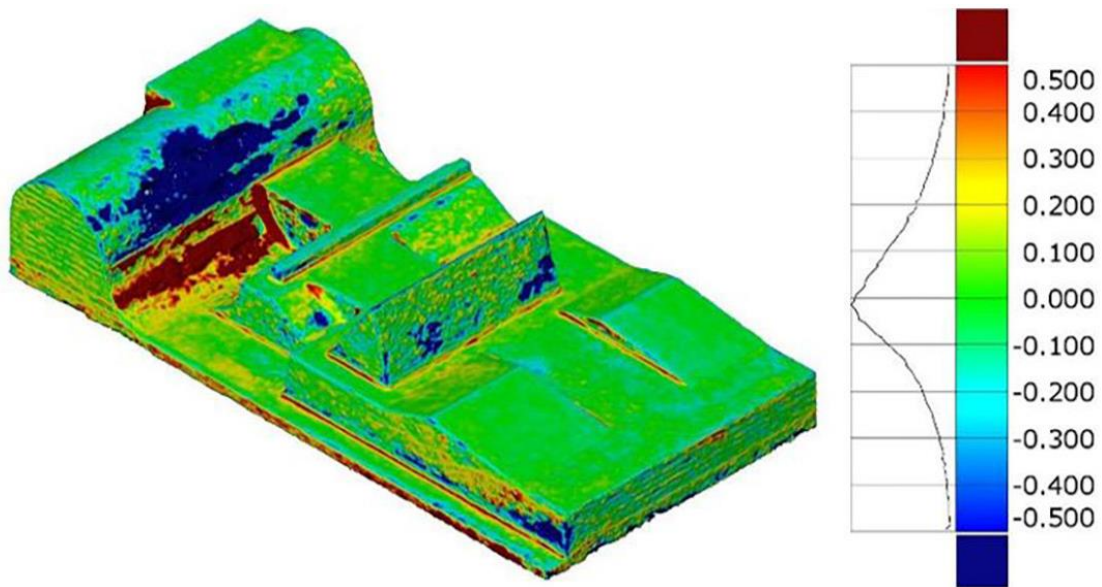
Slika 6.9. Primer merenja cilindra na KMM.

Uzorkovanje tačaka kod svih merenih geometrijskih oblika je vršeno u skenirajućem režimu sa korakom uzorkovanja od 2 mm. Shodno tome ukupan broj tačaka

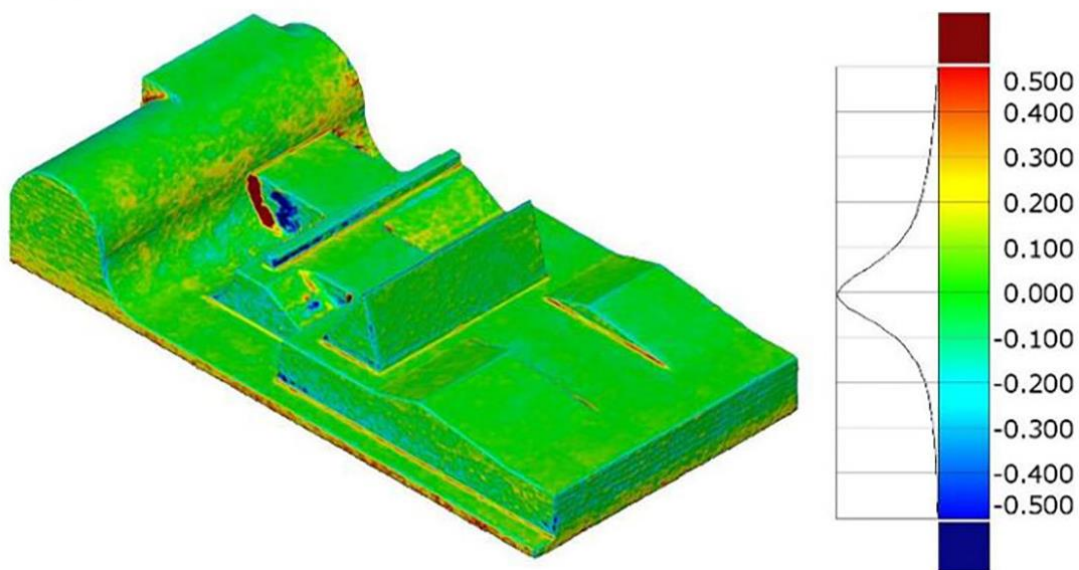
uzorkovan po jednom geometrijskom obliku se razlikovao i zavisio je od veličine merenog geometrijskog oblika.

6.1.4 CAD inspekcija i provera geometrijske tačnosti

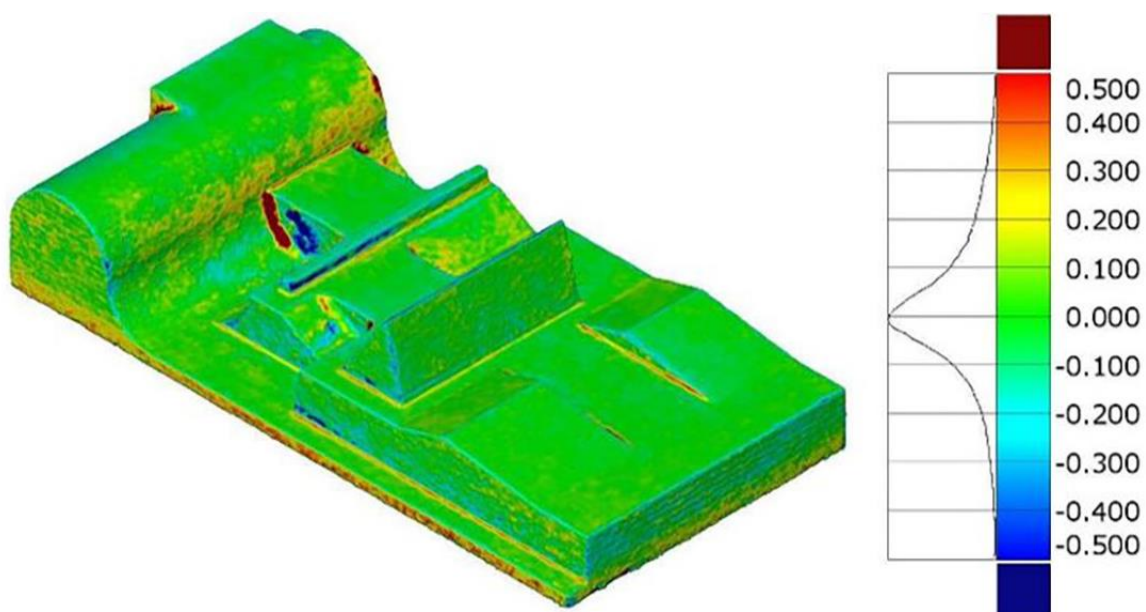
Za potrebe CAD inspekcije, zbog nepodržavanja rada sa oblacima tačaka u GOM Inspect-u [167] korišćeni su sirovi (nemodifikovani) poligonalni 3D modeli. Rezultati prikazani na slikama 6.10., 6.1., 6.12., 6.13. kao i tabeli 6.4. predstavljaju vizuelne i kvantitativne rezultate CAD inspekcije.



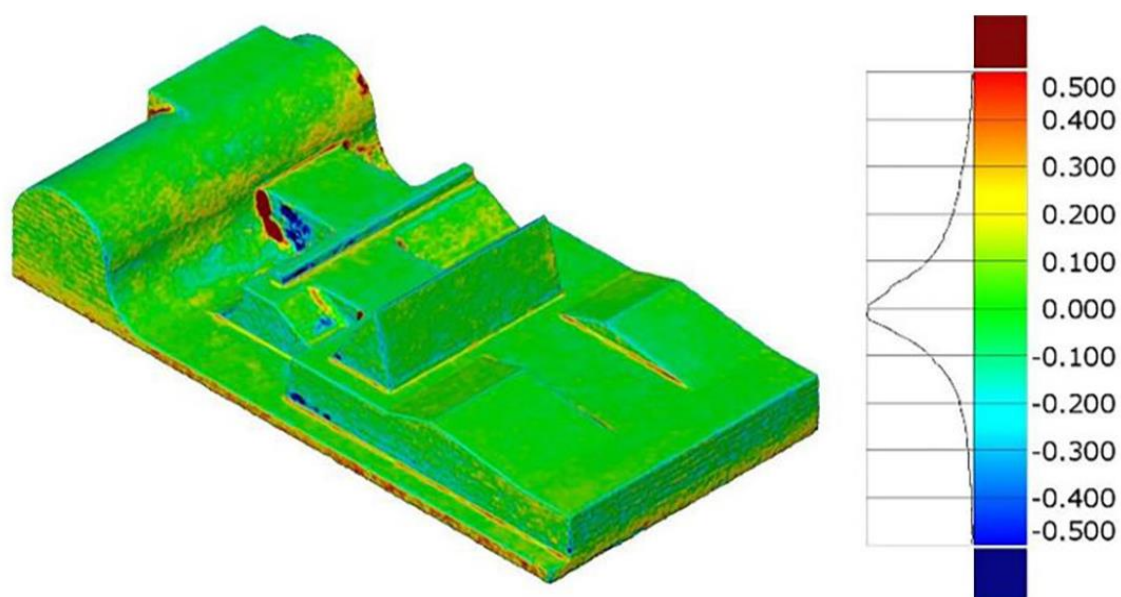
Slika 6.10. CAD inspekcija aluminijumskog test modela bez svetlosne teksture.



Slika 6.11. CAD inspekcija aluminijumskog test modela pi I svetlosna tekstura.



Slika 6.12. CAD inspekcija aluminijuskog test modela randi II svetlosna tekstura.



Slika 6.13. CAD inspekcija aluminijuskog test modela randi III svetlosna tekstura.














Tabela 6.4. Rezultati CAD inspekcije za aluminijumski test model.

Svetlosna tekstura	Gornje odstupanje (mm)	Donje odstupanje (mm)	Srednje odstupanje (mm)	Standardna devijacija (mm)
bez svetlosne teksture	+9,982	-9,998	-0,139	+1,188
pi I	+1,854	-3,243	+0,016	+0,173
randi II	+2,002	-2,177	+0,018	+0,176
randi III	+1,958	-4,004	+0,017	+0,189

Metoda najbolje pozicije (engl. *best-fit*) korišćena je za poravnavanje nominalnog CAD modela i rekonstruisanih poligonalnih 3D modela, dok je CAD inspekcija izvedena na svim rekonstruisanim površima. Maksimalno i minimalno dimenziono odstupanje predstavljeno je tamno crvenom i tamno plavom bojom, a kreće se u opsegu od $\pm 0,5$ mm, zelenom bojom su predstavljene regije sa minimalnim odstupanjem u odnosu na CAD model.

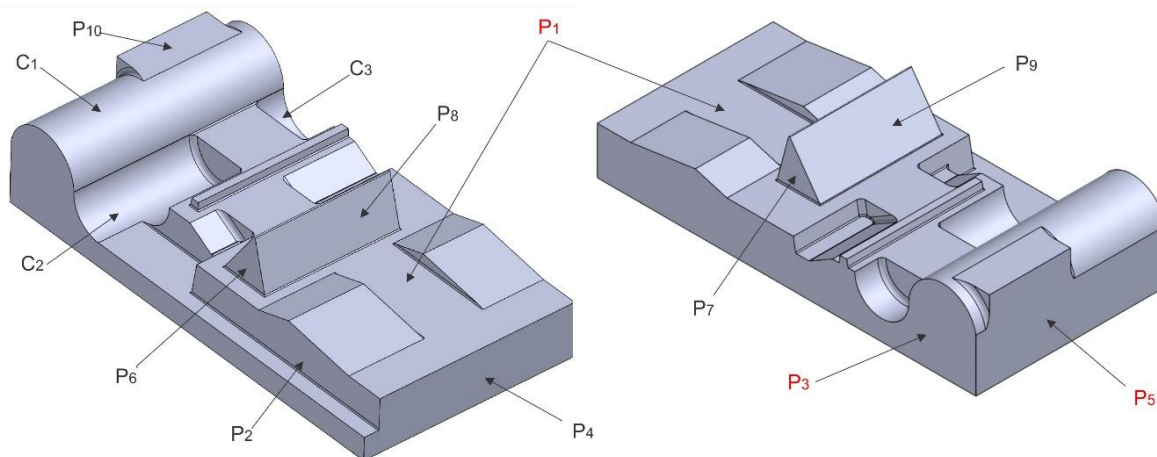
U okviru CAD inspekcije izvršena je i provera geometrijske i dimenzione tačnosti. Geometrijska tačnost je sprovedena preko tolerancija oblika i položaja koje su date u tabeli 6.5., dok su oznake kontrolisanih površi prikazani na slici 6.14.

Tabela 6.5. Izmerena odstupanja ispitivanih tolerancija oblika u odnosu na CAD model.

Tolerancija oblika	Oznaka površi	Odstupanje (mm)				
		KMM	*bez s.t.	pi I	randi II	randi III
 Cilindričnost	C ₁	0,034	2,094	0,747	0,778	0,738
 Cilindričnost	C ₂	0,046	1,480	0,662	0,685	0,813
 Cilindričnost	C ₃	0,041	0,973	0,979	1,125	1,123
 Ravnost	P ₁	0,025	0,748	0,430	0,480	0,484
 Ravnost	P ₂	0,012	0,746	0,556	0,643	0,576
 Ravnost	P ₃	0,254	0,628	0,618	0,625	0,559
 Ravnost	P ₄	0,123	0,686	0,612	0,585	0,654
 Ravnost	P ₅	0,209	0,818	0,683	0,642	0,874
 Ravnost	P ₆	0,028	0,514	0,415	0,419	0,431
 Ravnost	P ₇	0,019	0,593	0,455	0,506	0,539
 Ravnost	P ₈	0,017	0,741	0,371	0,470	0,401
 Ravnost	P ₉	0,025	0,662	0,445	0,390	0,471
 Ravnost	P ₁₀	0,025	0,567	0,300	0,377	0,313
// Paralelnost	P ₂ P ₃	0,132	0,883	0,590	0,758	0,731
// Paralelnost	P ₄ P ₅	0,419	0,723	0,761	0,814	0,943
// Paralelnost	P ₆ P ₃	0,195	0,593	0,441	0,516	0,491
// Paralelnost	P ₇ P ₃	0,147	0,629	0,481	0,546	0,630
⊥ Normalnost	P ₆ P ₁	0,050	0,544	0,470	0,499	0,499
⊥ Normalnost	P ₇ P ₁	0,024	0,634	0,478	0,513	0,578
⊥ Normalnost	P ₁₀ P ₅	0,116	0,695	0,375	0,392	0,317

*bez s.t - bez projektovane svetlosne teksture

Oznake C₁, C₂, C₃ predstavljaju cilindrične površine (konveksne i konkavne), dok su sa P₁,...,P₁₀ predstavljene ravni, a izabrane P₁,P₃ i P₅ ravni označene crvenom bojom predstavljaju referentne ravni. Od mogućih tolerancija oblika Izmerena odstupanja ispitivanih tolerancija oblika u odnosu na CAD model (Tabela 6.5.): cilindričnost, ravnost, paralelnost i normalnost.



Slika 6.14. Oznake kontrolisanih površi.

Dok su sa aspekta dimenzione tačnosti kontrolisana:

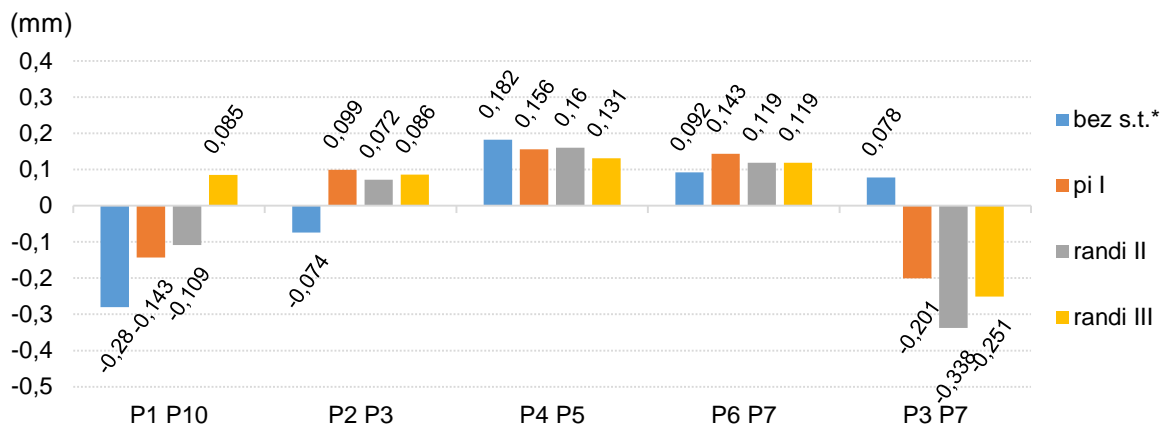
- rastojanja,
- radijusi i
- uglovi.

Prikazane vrednosti u okviru dimenzione analize u tabeli 6.6. predstavljaju izmerene vrednosti odstupanja aluminijumskog test komada u odnosu na CAD model.

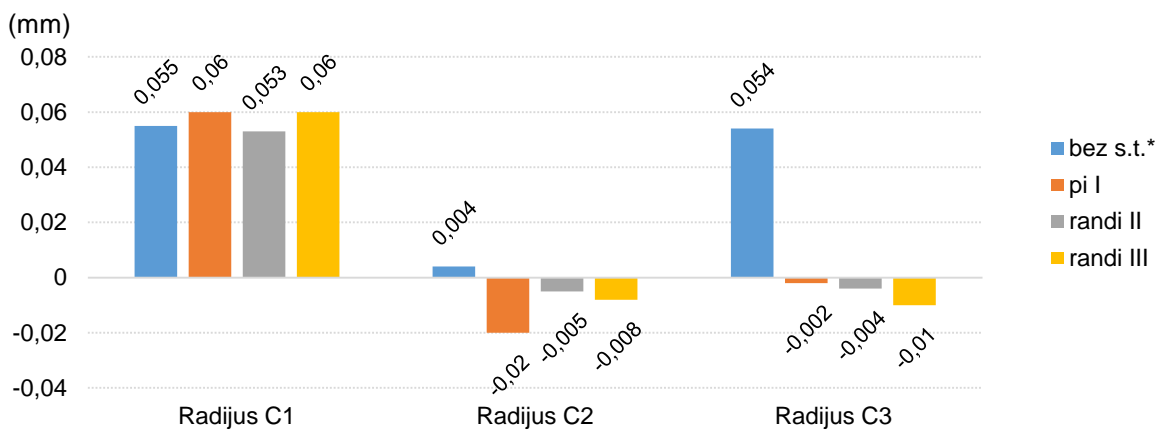
Tabela 6.6. Pregled ispitivanih dimenzionih karakteristika i izmerene vrednosti odstupanja.

Oznaka	Nominalne vrednosti (mm)	Izmerena odstupanja (mm)				
		KMM	*bez s.t.*	pi I	randi II	randi III
Rastojanje P ₁ P ₁₀	25	-0,012	+0,268	+0,131	+0,097	-0,097
Rastojanje P ₂ P ₃	130	+0,098	+0,172	-0,001	+0,026	+0,012
Rastojanje P ₄ P ₅	280	+0,233	+0,051	+0,077	+0,073	+0,102
Rastojanje P ₆ P ₇	90	-0,045	- 0,137	- 0,188	- 0,164	-0,164
Rastojanje P ₃ P ₇	30	+0,082	+ 0,004	+ 0,283	+ 0,420	+0,333
Radius C ₁	25	+0,022	- 0,033	- 0,038	-0,031	-0,038
Radius C ₂	20	-0,039	- 0,043	- 0,019	-0,034	-0,031
Radius C ₃	20	-0,037	- 0,091	- 0,035	-0,033	-0,027
Ugao P ₈ P ₉	50°	-0,017°	+0,105°	- 0,149°	-0,100°	-0,136°
Ugao P ₈ P ₁	105°	-0,011°	- 0,064°	- 0,115°	-0,119°	-0,112°
Ugao P ₉ P ₁	125°	-0,006°	+0,169°	- 0,004°	+0,019°	-0,024°

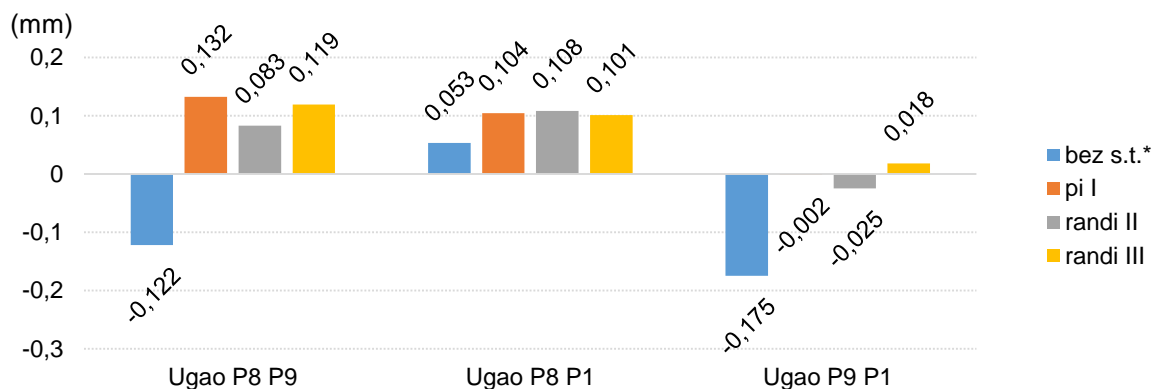
Kako bi se lakše uočila realna slika tačnosti poligonalnih 3D modela dobijenih fotogrametrijom na slikama 6.15., 6.16., i 6.17. prikazana su odstupanja fotogrametrijskih poligonalnih modela u odnosu na izmerene rezultate sa KMM.



Slika 6.15 Odstupanje izmerenih rastojanja na fotogrametrijskim modelima u odnosu na KMM.



Slika 6.16. Odstupanje radijusa od KMM.



Slika 6.17. Odstupanje uglova od KMM.

6.1.5 Diskusija rezultata

Kada je reč o CRP zasnovanoj na SfM najveći uticaj na rezultate 3D digitalizacije imaju ulazni podaci, odnosno snimljene digitalne fotografije. Posle poravnavanja fotografija mogu se izdvojiti prvi parametri kao što su broj RT, SKG i MG reprojekcije kao rezultati 3D digitalizacije. Na osnovu tabele 6.3. može se posmatrati i parametar Q koji je uveden u ovom istraživanju. Prema parametru Q najbolji rezultat 3D digitalizacije je ostvaren dok je na površi objekta bila projektovana randi II svetlosna tekstura, dok je na drugom mestu randi III. Ukupno posmatrano najlošiji rezultat je postignut sa fotografijama objekta načinjenim u uslovima bez projektovane svetlosne teksture. Pojedinačno gledajući najveći broj RT je ostvaren sa pi I i to za 3,039 puta više u odnosu na slučaj bez svetlosne teksture, a za 0,012 puta više od randi II. Kada je reč o SKG i MG reprojekcije pi I ima za 0,0088 pix veću SKG reprojekcije i za 7,2514 pix veću MG reprojekcije u odnosu na randi II.

U okviru CAD inspekcije najveća pozitivna i negativna odstupanja su ostvarena na rekonstruisanom poligonalnom 3D modelu čiji je oblak tačka niske rezolucije dobijen u uslovima dnevnog osvetljenja (Slika 6.10.a). Kritična odstupanja su prisutna na konveksnim i konkavnim površima zbog nedostatka vizuelne teksture i visokog stepena refleksivnosti. Takođe, viša pozitivna i negativna odstupanja su prisutna na vertikalnim površima. Razlog za lošu rekonstrukciju vertikalnih površi vezan je za nedostatak vizuelne teksture, koja pri datom položaju, broju i distribuciji fotografija u nivou I (Slika 6.5.) ne omogućava potrebnu detekciju ključnih tačaka.

Preostala tri poligonalna 3D modela dobijena primenom svetlosnih tekstura tokom faze snimanja fotografija, pokazala su međusobno vrlo slične rezultate CAD inspekcije (Slika 6.11. do Slika 6.13). Primetan je porast tačnosti oblika u problematičnim regionima, međutim, na uglovima i oštrim ivicama detektovana su manja odstupanja. Najviša dimenziona tačnost posmatrajući sve rekonstruisane površi 3D modela je dobijena pomoću pi I svetlosne teksture, gde su standardna devijacija i srednje odstupanje iznosili +0,173 mm i +0,016 mm. Takođe sa pi I svetlosnom teksturom je ostvareno i najmanje pozitivno odstupanje od +1,854 mm, dok je samo najmanje negativno odstupanje od -2,177 mm ostvareno sa randi II. Ostvarene visoke pozitivne i negativne vrednosti odstupanja (Tabela 6.4) posledica su korišćenja sirovog poligonalnog 3D modela za potrebe CAD inspekcije bez ikakve naknadne obrade (npr. redukcija šuma).

Na osnovu ispitivanih tolerancija oblika i položaja može se dobiti slika o geometrijskoj tačnosti rekonstruisanih 3D modela i primetiti da li je proces auto kalibracije dobro sproveden. Zbog same geometrije objekta, najviše je ispitivana ravnost, zatim paralelnost, normalnost i cilindričnost. Od ispitivanih tolerancija oblika i položaja najviše najboljih rezultata (Tabela 6.5.) 12/20 ostvareno sa pi I, randi II i randi III imali su po 3/20 najbolja rezultata, a najmanje najboljih rezultata 2/20 ostvareno bez

svetlosne teksture, dok su izmerene vrednosti tolerancije oblika i položaja daleko bolje.

Dimenziona tačnost analiziranih 3D modela sprovedena je nad istim elementima koji su korišćeni kod provere tolerancija oblika i položaja. U tabeli 6.6. prikazana su odstupanja izmerenih dužinskih i uglovnih mera u odnosu na CAD model. Kako bi se eliminisala greška izrade aluminijumskog test komada, isti je premeren pomoću KMM poznate merne nesigurnosti (potpoglavlje 6.1.3). Kod poređenja dužinskih mera, 3D model bez svetlosne teksture postigao je najmanje dimenziono odstupanje u 3 od 5 merene dimenzije u odnosu na izmerene vrednosti KMM, dok je randi III imao dva, odnosno randi II jedno najmanje dimenziono odstupanje (Slika 6.15). Kada su u pitanju radijusi odnosno dimenziona tačnost cilindričnih površi, prednost je na 3D modelima koji su dobijeni pomoću svetlosnih tekstura (Slika 6.16). Izmerene vrednosti uglova su podeljene, ali se uočava mala razlika izmerenih vrednosti uglova između 3D modela dobijenih pomoću svetlosnih tekstura u odnosu na 3D model koji je dobijen bez svetlosnih tekstura (Slika 6.17).

Sumirano, u tabeli 6.7. ocenjene su svetlosne teksture korišćene u ovoj studiji slučaja. Sa dva plusa ocenjen je odličan kvalitet, jedan plus označava delimičan kvalitet, dok je sa minus označen loš kvalitet. Na osnovu prethodno iznesenih i obrazloženih rezultata pi I svetlosna tekstura ima najviše pozitivnih ocena.

Tabela 6.7. Ocena svetlosnih tekstura.

Svetlosna tekstura	3D digitalizacija	CAI	Tolerancije oblika i položaja	Dimenziona tačnost
bez svetlosne teksture	-	-	-	++
randi II	+	+	+	+
randi III	+	+	+	-
pi I	++	++	++	-

6.2 Studija slučaja 2 - Dentalni model

U studiji slučaja 2 sprovedeno je ispitivanje svetlosnih tekstura pi I, randi III i wavelet u odnosu na projektovanje čiste bele svetlosti. Pi I i randi III sintetičke slike ocenjene su u komparativnoj analizi kao najbolje u svojoj klasi, dok je wavelet sintetička slika izabrana kao najbolja u istraživanju [60] između 12 ispitivanih sintetičkih slika kreiranih na osnovu različitih matematičkih funkcija.

Za ovo ispitivanje je iskorišćen dentalni test model [168], a izabran je zbog kompleksne (free form) geometrije i slabe teksturisanosti. Dimenzije dentalnog

modela su iznosile 85 x 70 x 37mm. Slika 6.18a prikazuje korišćeni fizički model, a Slika 6.18b njegov CAD model, koji je iskorišćen kao nominalni.



*Slika 6.18. Dentalni model:
a) fizički model b) nominalni CAD model.*

Nominalni 3D model dobijen je pomoću optičkog sistema za 3D digitalizaciju Atos II Triple Scan iz GOM-a. Ovaj sistem spada u grupu vodećih industrijskih optičkih mernih uređaja za 3D digitalizaciju, a zasnovan je na kombinaciji strukturirane svetlosti i stereovizije. Rezolucija ovog sistema se kreće između 0,02 i 0,62 mm [161].

Ekspertiment je osmišljen prema algoritmu (Slika 6.1.) da se pomoću video projektora, projektuju izabrane sintetičke slike u vidu svetlosne teksture i pri tom izvrši akvizicija fotografija. Svaka projektovana svetlosna tekstura rezultovaće jednim poligonalnim 3D modelom, dok će jedan set fotografija biti snimljen bez upotrebe svetlosnih tekstura. U finalnom koraku verifikacija svetlosnih tekstura će se vršiti proverom geometrijske tačnosti pomoću CAD inspekcije. Sa CAD inspekcijom utvrdiće se koji rekonstruisani poligonalni 3D model daje najbolje rezultate u vidu geometrijske tačnosti u odnosu na nominalni CAD model.

6.2.1 Akvizicija fotografija

Akvizicija fotografija za potrebe eksperimeta vršena je sa prethodno kalibrisanom DSLR kamerom Canon 1200D opremljenom sa APS-C senzorom sa krop faktorom 1,6 i objektivom EF-S 18 – 55 mm promenljive žižne daljine (Slika 6.19.). Pošto se radio o objektivu promenljive žižne daljine, za potrebe eksperimeta podešen je na maksimalnu vrednost (55 mm).

Udaljenost na koju je kamera postavljena i sa koje se u vidnom polju nalazio kompletan dentalni model iznosila je približno 0,5 m. Maksimalna podržana rezolucija video projektora iznosila je 1024x768 pix, dok su fotografije snimane u najvišoj podržanoj rezoluciji od 4608x3456 pix.

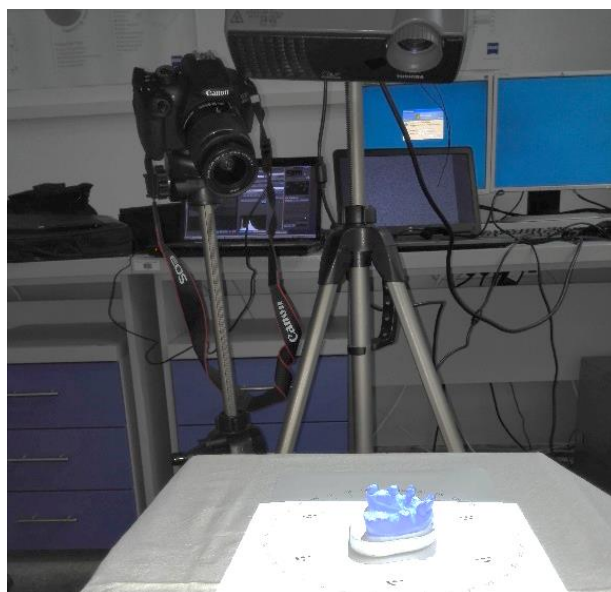


Slika 6.19. Canon 1200D sa objektivom EF-S 18 – 55 mm.

Podešavanja kamere su prikazana u tabeli 6.8., a postavka komponenti sistema kamera, video projektor, objekat je prikazana na slici 6.20. Otvor blende je bio F18 što je veoma mali, dok je ISO osetljivost zadržana na najmanjoj vrednosti. Ovakvo podešavanje je bilo neophodno kako bi se zadržali svi ostali uticajni faktori poput DoF-a i GSD-a. DLP Video projektor TOSHIBA TDP-S8 bio je postavljen na udaljenosti od 0,75 m i uglom od približno 50° u odnosu na ravan stola. Pri ovakvoj konfiguraciji komponenti sistema, ostvaren je GSD video projektora $0,7 \pm 0,1$ mm/pix, a GSD kamere je iznosio $0,07 \pm 0,01$ mm/pix.

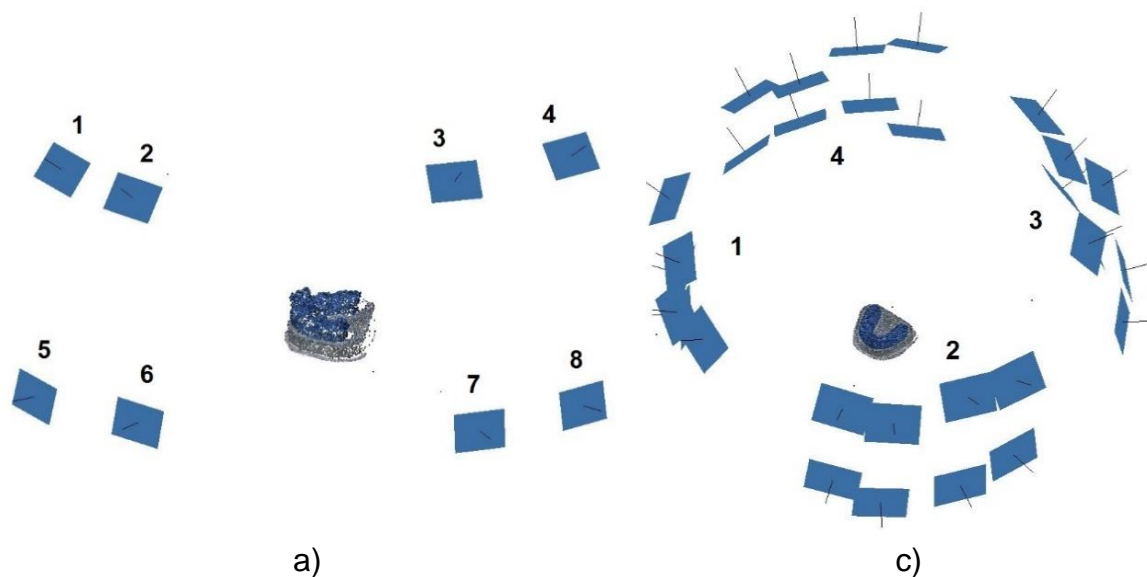
Tabela 6.8. Podešavanje kamere za date uslove osvetljenja.

Parametar	Podešena vrednost
Otvor blende F-broj	18
ISO osetljivost	100
Brzina zatvarača	1/13 s



Slika 6.20. Postavka komponenti sistema kamera, video projektor, objekat.

Zbog karakterističnog oblika gipsane vilice kompletna akvizicija fotografija izvedena je sa četiri podseta. Svaki snimljeni podset je sadržao osam fotografija formirajući četiri para, što rezultuje ukupno 32 fotografije po setu za svaku svetlosnu teksturu odnosno rekonstruisani 3D model. Za potrebe poređenja, snimljen je još jedan set fotografija bez projektovanih svetlosnih tekstura. Za vreme snimanja svakog podseta projektor i objekat 3D digitalizacije nisu bili pomerani. Distribucija fotografija u obliku stereoparova prikazana je na slici 6.21.a kompletnog seta na slici 6.21.b.



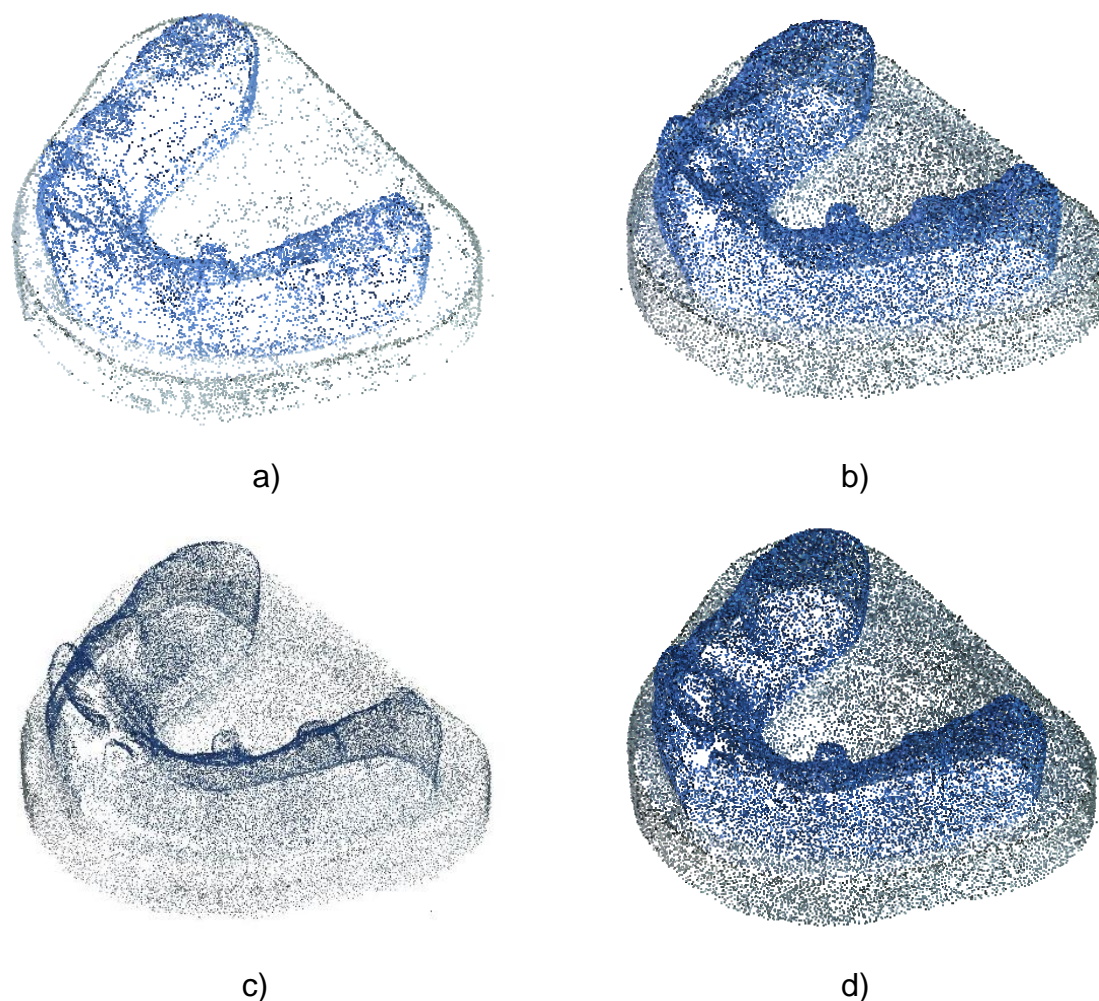
Slika 6.21. Akvizicija fotografija:

a) pozicije snimljenih fotografija u jednom podsetu b) pozicije snimljenih podsetova.

Nakon snimljenih podsetova za svaku svetlosnu teksturu objekat 3D digitalizacije je rotiran je za 90° u odnosu na projektor i fotografisanje je nastavljeno sa istom strategijom. U ovom slučaju primenjena je strategija grupisanja fotografija opisana u poglavlju 5.

6.2.2 Postprocesiranje fotografija i generisanje 3D modela

Nakon akvizicije fotografije su postprocesirane u Agisoft Methashape softveru [73]. Fotografije su prethodno raspoređene i obrađivane u podsetovima kako bi u finalnoj fazi bile spojene u jedan set. Prilikom obrade fotografija opcija za definisanje tačnosti (engl. *Accuracy*) kod poravnavanja fotografija (engl. *Align Photo*) bila je podešena na najviši nivo (engl. *Highest*). Najviši nivo obezbeđuje pretragu, detektovanje i preklapanje karakterističnih tačaka koristeći uvećanu fotografiju. Uvećanje fotografije je dvostruko i po širini i visini. Na slici 6.22. prikazani su oblaci tačaka niske rezolucije, dok su u tabeli 6.9. prikazani kvantitativni podaci rezultata prve faze 3D digitalizacije dentalnog modela.

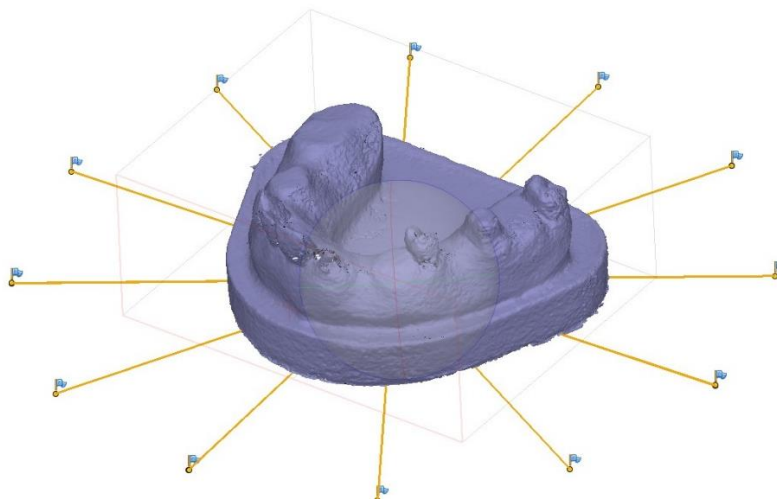


Slika 6.22. Oblaci tačaka niske rezolucije dentalnog modela:
 a) bez svetlosne teksture b) randi III c) wavelet d) pi I.

Nakon završene prve faze primenjen je MVS algoritam za generisanje oblaka tačaka visoke rezolucije, a nakon toga je kreirana poligonalna mreža. Dvanaest kodiranih markera, postavljenih u kružnicu prečnika 160 mm, iskorišćeno je za uspostavljanje razmere na 3D modelima (Slika 6.23.). Orijentacija markera na većem rastojanju smanjuje mogućnost stvaranja greške na generisanim poligonalnim 3D modelima.

Tabela 6.9. Rezultati prve faze 3D digitalizacije dentalnog modela.

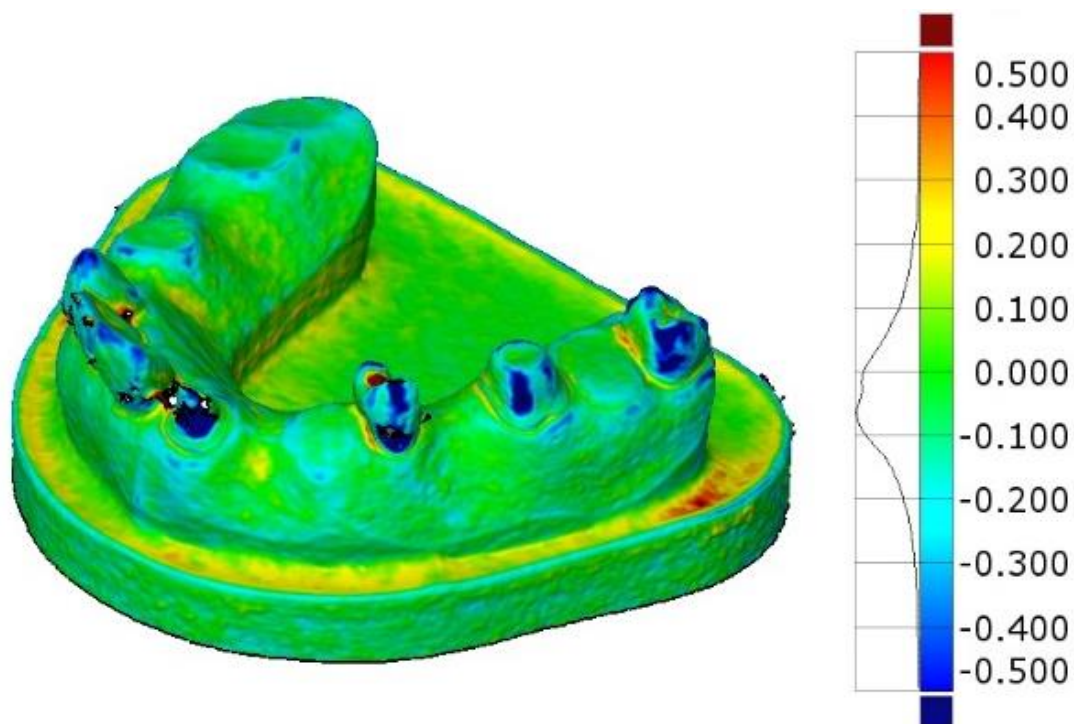
Svetlosna tekstura	Broj RT	SKG reprojekcije (pix)	MG reprojekcije (pix)	Q (%)
bez svetlosne teksture	28238	0,6477	35,0959	26
randi III	48547	0,4404	15,5019	76
wavelet	48239	0,5641	56,8001	45
pi I	51825	0,4500	9,4525	100



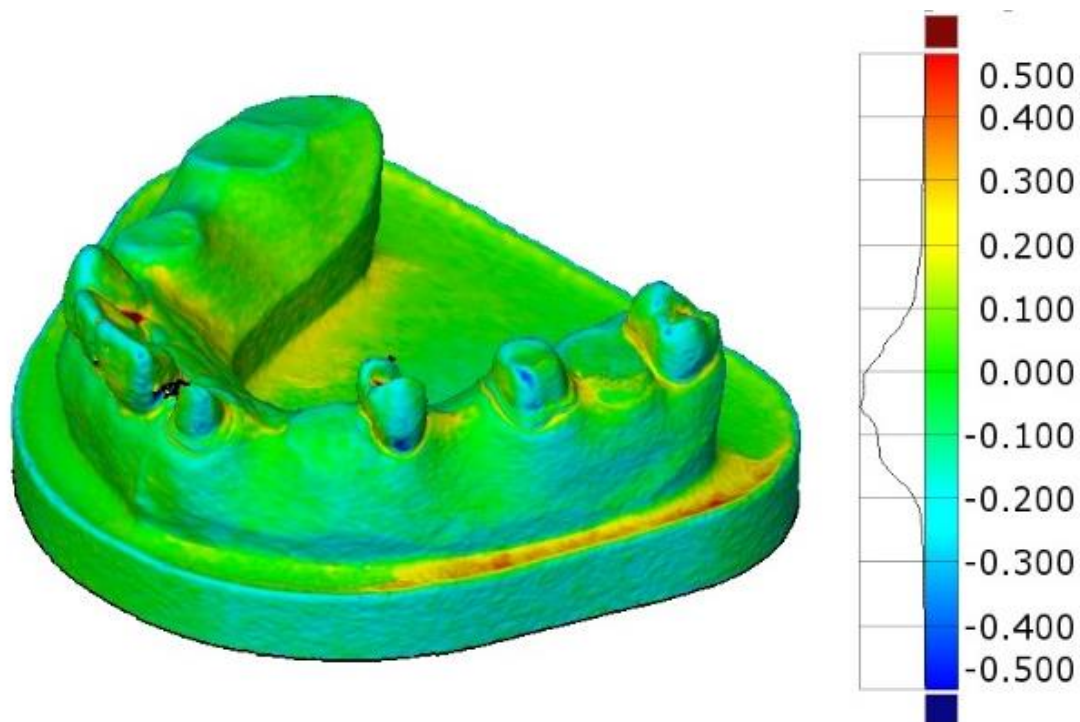
Slika 6.23. Uspostavljanje razmere dentalnog modela.

6.2.3 CAD inspekcija dentalnog modela

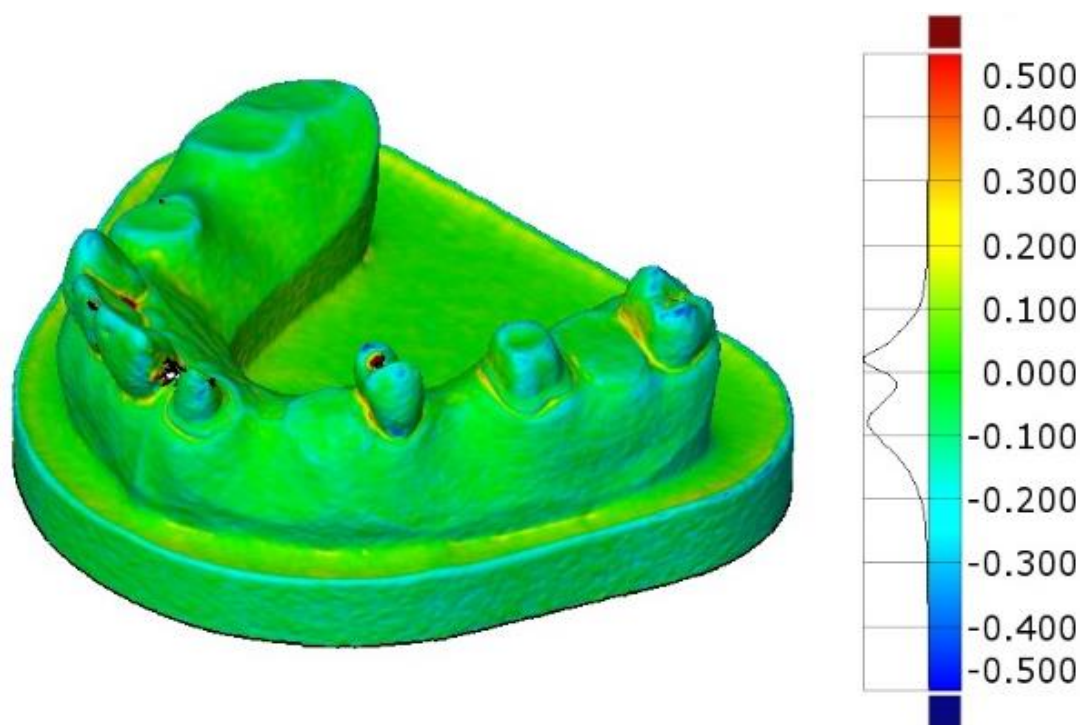
Pomoću CAD inspekcije realizovana je komparativna analiza između nominalne geometrije koju u ovom slučaju predstavlja 3D model dobijen pomoću optičkog sistema za 3D digitalizaciju ATOS i ispitivanih 3D modela dobijenih pomoću CRP na bazi SfM sa i bez primene svetlosnih tekstura. Rezultati CAD inspekcije prikazani su na slikama 6.24., 6.25., 6.26., 6.27 i tabeli 6.10..



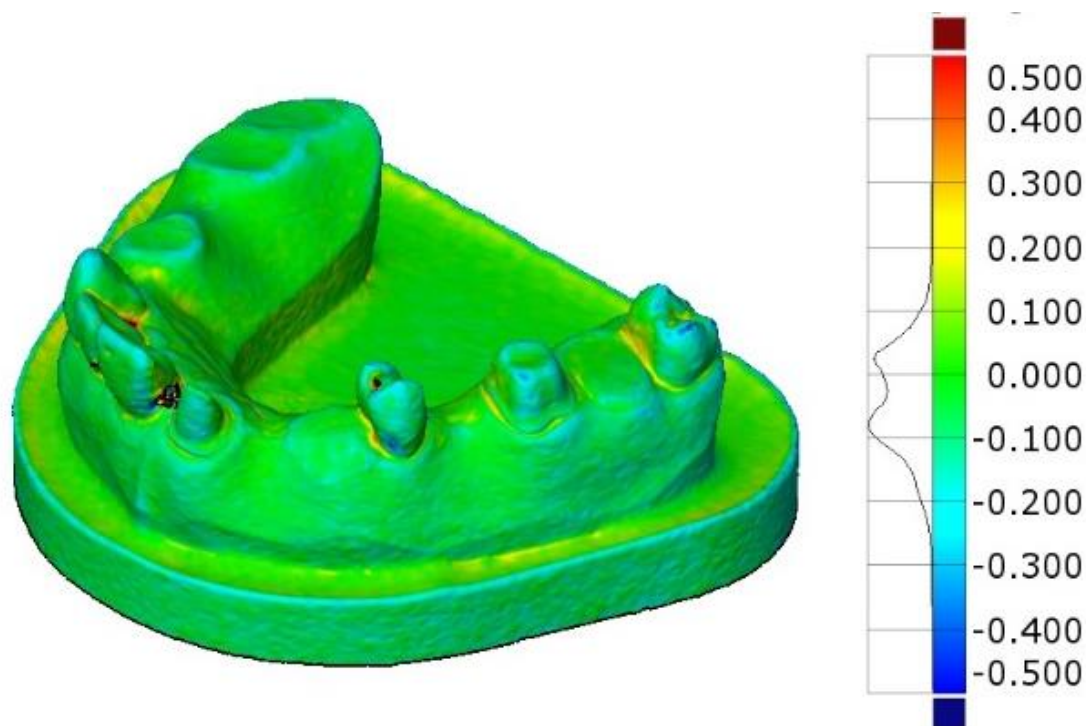
Slika 6.24. Rezultati CAD inspekcije dentalnog modela bez svetlosne teksture



Slika 6.25 Rezultati CAD inspekcije dentalnog modela randi III



Slika 6.26 Rezultati CAD inspekcije dentalnog modela wavelet



Slika 6.27 Rezultati CAD inspekcije dentalnog modela pi I

Nakon što su modeli poravnati na osnovu najbolje pozicije, urađena je pretraga odstupanja poligonalne mreže na udaljenosti od 1 mm. Prikazana odstupanja kreću se u intervalu od $\pm 0,5$ mm. Prednost CAD inspekcije u odnosu na druge vrste kontrole kao što je već spomenuto je u vizuelnoj interpretaciji i veoma lakom zapažanju problematičnih oblasti, i distribuciji odstupanja na celom 3D modelu.

Tabela 6.10. Rezultati CAD inspekcije.

Svetlosna tekstura	Gornje odstupanje (mm)	Donje odstupanje (mm)	Srednje odstupanje (mm)	Standardna devijacija (mm)
bez svetlosne teksture	+4,211	-9,875	-0,049	+0,184
randi iii	+4,521	-6,201	-0,036	+0,115
wavelet	+4,454	-3,897	-0,038	+0,109
pi i	+2,445	-2,969	-0,040	+0,102

6.2.4 Diskusija rezultata

Primenjena strategija grupisanja fotografija pokazala se uspešnom kod 3D digitalizacije sa projektovanim svetlosnim teksturama. Svetlosne teksture koje privremeno podižu kvalitet vizuelne teksture, obezbeđuju približno 40% više RT nego bez upotrebe svetlosne teksture.

Zbog male dubinske oštine projektora, prilikom projektovanja sintetičke slike dolazi do blagog zamućenja svetlosne teksture koje implicira povećanje GSD projektora u slučaju svetlosne teksture sa velikim brojem nijansi i kao rezultat se dobija smanjeni broj RT iako se objekat nalazi u polju dubinske oštine kamere.

Prema parametru Q, preko kojeg se dobija relativno poređenje analiziranih rezultata 3D digitalizacije, svetlosna tekstura pi I je najbolje rangirana, a zatim sledi randi III i wavelet. Prednost pi I svetlosne teksture koja pripada klasi I, je u tome što sadrži jedinstvenu teksturu i veoma lako omogućava softveru za obradu fotografija da detektuje karakteristične tačke na površi predmeta 3D digitalizacije. Između 3D modela dobijenih pomoću projektovanih svetlosnih tekstura postoje male varijacije u pogledu tačnosti, dok su u odnosu na 3D model generisan bez svetlosnih tekstura vidi povećanje tačnosti. Razlog za male varijacije u 3D modelima dobijenih pomoću projektovane svetlosne teksture može se uočiti iz njihovih histograma (Slika 3.8., Slika 3.17. i Slika 3.20.) i statističkih pokazatelja (Tabela 4.3).

Na osnovu slika 6.24. 6.25., 6.26., 6.27. i rezultata prikazanih u tabeli 6.10. uočavaju se najmanja maksimalna i minimalna odstupanja kao i najmanja vrednost standardne devijacije kod 3D modela dobijenim sa projektovanjem pi I svetlosne teksture (Slika 6.27). Sa druge strane najlošiji postignuti rezultati su bez upotrebe svetlosne teksture (Slika 6.24). Problematične regije (regije sa najvećim odstupanjima) vezane su prvenstveno za područje zuba. Zbog svoje geometrije i veličine zubi zahtevaju detaljniju akviziciju fotografija, kako bi se pokrile sve površi. Zbog relativnog pomeranja kamere dolazi do okluzije delova zuba, a zbog projektovanja svetlosne teksture i do stvaranja senki koje negativno utiču na sposobnost detekcije ključnih tačaka.

Projektovanje sintetičkih slika tokom faze akvizicije slike i generisanja oblaka tačaka niske rezolucije pokazuje povećanje broja RT, a samim tim i povećanje tačnosti rekonstruisanog poligonalnog 3D modela. Takođe je pokazano da projekcija sintetičkih slika doprinosi privremenom poboljšanju vizuelnih karakteristika objekta koji sadrže monotone i visoko reflektivne površine. U tabeli 6.11. date su ocene korišćenih svetlosnih tekstura za slučaj 3D digitalizacije i CAI. Sa dva plusa ocenjen je odličan kvalitet, jedan plus označava delimičan kvalitet, dok je sa minus označen loš kvalitet. Najbolje ocenjena svetlosna tekstura u ovoj studiji slučaja za oba kriterijuma je pi I klase I.

Tabela 6.11. Ocena svetlosnih tekstura.

Svetlosna tekstura	3D digitalizacija	CAI
bez svetlosne teksture	-	-
randi III	+	+
wavelet	+	+
pi I	++	++

7. ZAKLJUČCI

Ova doktorska disertacija predstavlja rezultat višegodišnjeg istraživanja u oblasti 3D digitalizacije, na polju blisko-predmetne fotogrametrije. Tokom godina istraživanja sa pažnjom su posmatrani i izučavani principi na kome se bazira poseban vid CRP, a koji je zasnovan na određivanju strukture iz kretanja (SfM). U okviru predmeta istraživanja predstavljeni su nedostaci i ograničenja CRP. Kao prepoznati problem CRP zasnovane na određivanju SfM, izdvojila se 3D digitalizacija objekta čija vizuelna tekstura ne može da obezbedi detektovanje i određivanje dovoljnog broja karakterističnih obeležja za uspešnu 3D digitalizaciju.

Predstavljenom analizom dosadašnjih istraživanja prikazano je kretanje broja objavljenih naučnih radova koji prikazuju da će se fotogrametrija i dalje konstantno razvijati i usavršavati osvajajući nove oblasti primene. Takođe, prikazom raznovrsnosti postojećih detektora i deskriptora lokalnih obeležja, njihovom načinu funkcionisanja, kao i pregledu postojećih sistema CRP-a na bazi projektovanja svetlosne teksture postavljene su osnove za kreiranje novih sintetičkih slika i novih sistema.

Ostvaren je osnovni cilj istraživanja, koji je vezan za unapređenje ukupne tačnosti 3D digitalizacije zasnovane na određivanju SfM, kod objekata bez karakterističnih obeležja, uz pomoć projektovanih sintetički generisanih slika u vidu svetlosnih tekstura.

Izvršena je komparativna analiza novokreiranih sintetički generisanih slika preko TOPSIS višekriterijumske metode, kod koje su posmatrani statistički parametri koji ukazuju na neuređenost, rasipanje i distribuciju intenziteta piksela (nijanse sive) na generisanim sintetičkim slikama. Pokazalo se da nakon primene sintetičkih slika u vidu svetlosne teksture primenom metode planarne 3D digitalizacije klase I, kao i sintetičkih slika sa uniformnim histogramima koje sadrže deset, devetnaest i više nijansi sive daju najbolje rezultate u pogledu broja rekonstruisanih tačaka i veličine SKG projekcije.

Verifikacija primene sintetičkih slika i njihovih svetlosnih tekstura sa aspekta geometrijske tačnosti je realizovana primenom računom podržane inspekcije (CAD inspekcije), kod koje su kao nosioci nominalnih karakteristika korišćeni CAD modeli

generisani pomoću CAD softvera, kao i na bazi rezultata 3D digitalizacije optičkim sistemom poznate tačnosti, odnosno merne nesigurnosti.

Za potrebne geometrijske i dimenzione tačnosti kako bi se eliminisala greška izrade kod aluminijumskog test komada, isti je izmeren pomoću Zeiss Contura G2 koordinatne merne mašine poznate merne nesigurnosti i ti rezultati su upoređeni sa rezultatima 3D digitalizacije blisko-predmetne fotogrametrije.

Pored osnovnog, cilj istraživanja je bio usmeren i ka analizi koordinacije komponenata sistema u kome su predstavljena dva nova idejna rešenja i to:

- Obrtni sto sa projektorom, statična kamera - sistem 2 i
- Obrtni sto, fiksna kamera i projektor - sistem 3.

Na osnovu postavljenih hipoteza i rezultata celokupnog istraživanja u okviru ove doktorske disertacije mogu se izvesti odgovori na postavljene hipoteze:

H1: Moguće je kreirati sintetičke slike na osnovu decimala iracionalnih brojeva, koje bi projektovanjem u vidu svetlosnih tekstura na površi objekta bez karakterističnih obeležja privremeno podigle kvalitet vizuelne teksture, a samim tim i tačnost 3D digitalizacije.

- Primenjene su nove sintetičke slike koje su generisane upotrebom cifara iracionalnih brojeva, kao i brojeva dobijenih upotrebom generatora slučajnih brojeva koje su projektovanjem u vidu svetlosnih tekstura pokazale povećanje ukupne tačnosti na rekonstruisanim površima složenih objekta bez karakterističnih obeležja.

Potvrđivanje H1.

H2: Najpogodnija vizuelna tekstura sintetički generisane slike ima izraženu nasumičnu grubu teksturu. Takva vrsta teksture omogućava laku detekciju karakterističnih tačaka.

- Pi I, sintetička slika klase I (sa 10 nijansi sive) u komparativnoj analizi bila je najviše rangirana u okviru svoje klase i tokom verifikacije tačnosti pokazala je najbolje rezultate u odnosu na ostale sintetičke slike uključene u istraživanje.
- Osnovne karakteristike te slike su mali broj sivih nijansi sive (deset nijansi) i njihova specifična distribucija, odnosno uniformno raspoređeni histogram, visok kontrast i entropija što je posledica iracionalnosti.

Potvrđivanje H2.

7.1 Naučni i stručni doprinosi

U okviru naučnih doprinosa treba izdvojiti:

- Pristup u kreiranju sintetičkih slika za projektovanje svetlosnih tekstura pomoću decimala iracionalnih brojeva. U okviru ovog pristupa iskorišćeno je svojstvo nasumičnosti cifara decimalnog zapisa iracionalnih brojeva. Na osnovu cifara različitih iracionalnih brojeva su generisane sintetičke slike sa različitim brojem nijansi sive.
- Planarnu i virtuelnu metodu 3D digitalizacije koja je korišćena za evaluaciju svetlosnih tekstura, a za koje je izveden kombinovani pokazatelj kvaliteta 3D digitalizacije „Q“. Ovaj pokazatelj objedinjuje tri osnovna pokazatelja kvaliteta 3D digitalizacije: srednju i maksimalnu kvadratnu grešku reprojekcije i broj rekonstruisanih tačka.
- Pokazano je da na tačnost 3D digitalizacije utiče vrsta projektovane sintetičke, broj i distribucija nijansi sive korišćene sintetičke slike.

Stručni doprinosi ovog istraživanja se ogledaju kroz sledeća zapažanja:

- Privremenim podizanjem kvaliteta vizuelne teksture površi objekata pomoću svetlosnih tekstura obezbeđena je uspešna 3D digitalizacija objekata bez karakterističnih obeležja sa povišenom tačnošću rezultujućeg 3D modela. Razvijene svetlosne teksture koju nastaju projektovanjem sintetičkih slika pomoću video projektora čine ključne elemente u ovom istraživanju.
- Realizacijom studije slučaja na fizičkim objektima, aluminijumski test model (oblast mašinskog inženjerstva) i dentalni model (oblast stomatologija) testirane su najbolje rangirane novo kreirane i postojeće sintetičke slike – svetlosne teksture. Pri tome je pokazano da testirane nove sintetičke teksture klase I daju najbolje rezultate u pogledu ukupne tačnosti.
- Analizom uticaja koordinacije komponenti fotogrametrijskog sistema prikazana je nova metoda za akviziciju fotografija tzv. grupisanjem fotografija i dva nova rešenja za koordinaciju i upravljanje komponentama sistema. Predložena nova idejna rešenja uključuju upotrebu automatizovanog obrtnog stola.

7.2 Pravci budućih istraživanja

Projektovanje sintetičkih slika u vidu svetlosnih tekstura kao jednog od brzog i efikasnog načina za poboljšanje vizuelnih karakteristika objekta otvara prostor za dalje

poboljšanje, prvenstveno u smislu mobilnosti hardverskih komponenti, iz razloga što projektor i objekat za vreme akvizicije fotografija moraju ostati u nepromenjenom relativnom položaju.

Dalja istraživanja pored predstavljenih idejnih rešenja sistema će se fokusirati na razvoj novih sistema za manipulaciju hardverskih komponenti postizanjem većeg stepena automatizacije prilikom akvizicije fotografija, sa ciljem da se dobije kompaktan sistem za fotogrametrijsko 3D snimanje.

8. LITERATURA

- [1] F. Roeding, *Reverse Engineering*. London: Springer London, 2008.
- [2] E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt, "Metrology of freeform shaped parts," *CIRP Annals*, vol. 56, no. 2, pp. 810–835, 2007.
- [3] D. Page, A. Koschan, M. Abidi, "Methodologies and Techniques for Reverse Engineering—The Potential for Automation with 3-D Laser Scanners," *Reverse Engineering*, London: Springer London, pp. 11–32, 2008.
- [4] P. Rodríguez-González, M. Rodríguez-Martín, F. Ramos, Luís, D. González-Aguilera, "3D reconstruction methods and quality assessment for visual inspection of welds," *Automation in Construction*, vol. 79, pp. 49–58, 2017.
- [5] S. Foster, D. Halbstein, *Integrating 3D Modeling, Photogrammetry and Design*. London: Springer London, 2014.
- [6] M. Sokac, I. Budak, D. Miljanovic, Z. Santosi, D. Vukelic, "Computer-aided modeling and additive manufacturing fabrication of patient-specific mandibular implant," *Lekar a Tehnika*, vol. 48, no. 4, pp. 113–117, 2018.
- [7] I. Budak, A. Kiralj, M. Sokac, Z. Santosi, D. Eggbeer, S. Peel, "Computer-aided methods for single-stage fibrous dysplasia excision and reconstruction in the zygomatico-orbital complex," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 728–737, 2019.
- [8] I. Aicardi, F. Chiabrando, A. Maria Lingua, F. Noardo, "Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 32, pp. 257–266, 2018.
- [9] G. Pavlidis, D. Tsiafakis, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, V. Tsioukas, C. Chamzas, "Preservation of Architectural Heritage through 3D Digitization," *International Journal of Architectural Computing*, vol. 5, no. 2, pp. 221–237, 2007.
- [10] V. Stojakovic, "Terrestrial photogrammetry and application to modeling architectural objects," *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 113–125, 2008.
- [11] V. Stojakovic, B. Tepavcevic, "Image-based modeling approach in creating 3D morphogenetic reconstruction of Liberty Square in Novi Sad," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 12, no. 1, pp. 105–110, 2011.
- [12] N. Vujica Herzog, B. Buchmeister, A. Beharic, B. Gajsek, "Visual and optometric issues with smart glasses in Industry 4.0 working environment," *Advances in*

- Production Engineering & Management*, vol. 13, no. 4, pp. 417–428, 2018.
- [13] N. Farahani, A. Braun, D. Jutt, T. Huffman, N. Reder, Z. Liu, Y. Yagi, L. Pantanowitz, “Three-dimensional imaging and scanning: Current and future applications for pathology,” *Journal of Pathology Informatics*, vol. 8, no. 1, pp. 1–36, 2017.
- [14] D. Page, A. Koschan, S. Voisin, N. Ali, M. Abidi, “3D CAD model generation of mechanical parts using coded-pattern projection and laser triangulation systems,” *Assembly Automation*, vol. 25, no. 3, pp. 230–238, 2005.
- [15] N. D’Apuzzo, “Overview of 3D surface digitization technologies in Europe,” in *SPIE-IS&T Electronic Imaging*, 2006, vol. 6056, p. 605605.
- [16] Q. Peng, H. Sanchez, “3D DIGITIZING TECHNOLOGY IN PRODUCT REVERSE DESIGN,” *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*, pp. 1–10, 2011.
- [17] L. De Chiffre, S. Carmignato, J.P. Kruth, R. Schmitt, A. Weckenmann, “Industrial applications of computed tomography,” *CIRP Annals*, vol. 63, no. 2, pp. 655–677, 2014.
- [18] R. Kamal, D. A. Kumar, “Three-Dimensional (3D) Modeling of the Knee And Designing of Custom made Knee Implant Using Mimics Software,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 327–330, 2013.
- [19] G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio, “State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation,” *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 568–601, 2009.
- [20] W. Chen, S. Li, Y.F., Zhang, J., Wanliang, “Active Vision Sensors,” *Active Sensor Planning for Multiview Vision Tasks*, Springer-Verlag London, 2008.
- [21] G. Bianco, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, “A comparative analysis between active and passive techniques for underwater 3D reconstruction of close-range objects,” *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 11007–11031, 2013.
- [22] R. Hartley, A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [23] S. Pertuz, D. Puig, M. A. Garcia, “Analysis of focus measure operators for shape-from-focus,” *Pattern Recognition*, vol. 46, no. 5, pp. 1415–1432, 2013.
- [24] K.-Y. K. Wong, R. Cipolla, “Structure and motion from silhouettes,” in *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*, vol. 2, pp. 217–222, 2001.
- [25] E. Prados, O. Faugeras, “Shape From Shading,” *Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*, Springer, pp. 375–388, 2009.
- [26] K. Kanatani, T. C. Chou, “Shape from texture: General principle,” *Artificial Intelligence*, vol. 38, no. 1, pp. 1–48, 1989.
- [27] Y. Adato, Y. Vasilyev, O. Ben-Shahar, T. Zickler, “Toward a theory of shape from specular flow,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1-8, 2007.
- [28] R. Mecca, F. Logothetis, R. Cipolla, “A differential approach to shape from

- polarization,” *British Machine Vision Conference 2017, BMVC 2017*, 2017.
- [29] G. Wetzstein, D. Roodnick, W. Heidrich, R. Raskar, “Refractive shape from light field distortion,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1180–1186, 2011.
- [30] A. Bajard, O. Aubreton, G. Eren, P. Sallamand, F. Truchetet, “3D Digitization of Metallic Specular Surfaces using Scanning from Heating Approach Alban,” *SPIE Electronic Imaging*, vol. 7864, pp. 3–10, 2011.
- [31] A. Bartoli, Y. Gerard, F. Chadebecq, T. Collins, D. Pizarro, “Shape-from-Template,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 37, no. 10, pp. 2099–2118, 2015.
- [32] J. Baqersad, P. Poozesh, C. Niezrecki, P. Avitabile, “Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 86, pp. 17–34, 2017.
- [33] A. Eltner, A. Kaiser, C. Castillo, G. Rock, F. Neugirg, A. Abellán, “Image-based surface reconstruction in geomorphometry—merits, limits and developments,” *Earth Surface Dynamics*, vol. 4, no. 2, pp. 359–389, 2016.
- [34] C. Cajal, J. Santolaria, D. Samper, A. Garrido, “Simulation of laser triangulation sensors scanning for design and evaluation purposes,” *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 14, no. 2, pp. 250–264, 2015.
- [35] A. Mohamed, P. Culverhouse, A. Cangelosi, C. Yang, “Active stereo platform: online epipolar geometry update,” *Eurasip Journal on Image and Video Processing*, vol. 2018, no. 1, 2018.
- [36] F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, P. Martínez-carricondo, “Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle,” *Measurement*, vol. 98, pp. 221–227, 2017.
- [37] K. Patorski, “Moiré methods in interferometry,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 8, no. 3–4, pp. 147–170, 1988.
- [38] J. Köhler, T. Nöll, N. Schmitz, B. Krolla, D. Stricker, “Structure from Motion in the Context of Active Scanning,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, pp. 620–628, 2015.
- [39] A. H. Ahmadabadian, S. Robson, J. Boehm, M. Shortis, K. Wenzel, D. Fritsch, “A comparison of dense matching algorithms for scaled surface reconstruction using stereo camera rigs,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 78, pp. 157–167, 2013.
- [40] C. H. H. H. Tang, H. E. Tang, P. K. J. J. Tay, “Low cost digital close range photogrammetric measurement of an as-built anchor handling tug hull,” *Ocean Engineering*, vol. 119, pp. 67–74, 2016.
- [41] M. Hassaballah, A. A. Abdelmgeid, H. A. Alshazly, “Image Features Detection, Description and Matching,” Springer International Publishing, vol. 630, pp. 11–45, 2016.
- [42] S. Wefers, A. Karmacharya, M. Pfarr-Harfst, F. Boochs, “Digital 3D reconstructed models A proposition for structuring visualisation workflows using semantic technologies for recommendations,” *Studies in Digital Heritage*, vol. 1,

- no. 2, pp. 537-546, 2017.
- [43] T. Moons, "3D Reconstruction from Multiple Images Part 1: Principles," *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, vol. 4, no. 4, pp. 287–404, 2008.
- [44] T. Xiang, L. F. Cheong, "Understanding the behavior of SFM algorithms: A geometric approach," *International Journal of Computer Vision*, vol. 51, no. 2, pp. 111–137, 2003.
- [45] J. Iglhaut, C. Cabo, S. Puliti, L. Piermattei, J. O'Connor, J. Rosette, "Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review," *Current Forestry Reports*, vol. 5, no. 3, pp. 155–168, 2019.
- [46] F. Tomita, S. Tsuji, *Computer Analysis of Visual Textures*. Boston, MA: Springer US, 1990.
- [47] A. H. Ahmadabadian, R. Yazdan, A. Karami, M. Moradi, F. Ghorbani, "Clustering and selecting vantage images in a low-cost system for 3D reconstruction of texture-less objects," *Measurement*, vol. 99, pp. 185–191, 2017.
- [48] A. Ley, R. Hänsch, O. Hellwich, "Reconstructing white walls: multi-view, multi-shot 3D reconstruction of textureless surfaces," in *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. III–3, pp. 91–98, 2016.
- [49] S. Fernandez, "One-shot pattern projection for dense and accurate 3D acquisition in structured light," PhD thesis, University of Girona, 2012.
- [50] Ž. Santoši, I. Budak, M. Šokac, T. Puškar, Đ. Vukelić, B. Trifković, "3D digitization of featureless dental models using close range photogrammetry aided by noise based patterns," *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 3, p. 297, 2018.
- [51] S. Khalfaoui, R. Seulin, Y. Fougerolle, D. Fofi, "An efficient method for fully automatic 3D digitization of unknown objects," *Computers in Industry*, vol. 64, no. 9, pp. 1152–1160, 2013.
- [52] W. Bösemann, "Industrial photogrammetry - Accepted metrology tool or exotic niche," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 41, pp. 15–24, 2016.
- [53] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, I. Harley, *Close Range Photogrammetry*, vol. 2. Whittles Publishing, 2006.
- [54] J. Harvent, B. Coudrin, L. Brèthes, J. J. Orteu, M. Devy, "Multi-view dense 3D modelling of untextured objects from a moving projector-cameras system," *Machine Vision and Applications*, vol. 24, no. 8, pp. 1645–1659, 2013.
- [55] G. Percoco, A. J. Sánchez Salmerón, "Photogrammetric measurement of 3D freeform millimetre-sized objects with micro features: an experimental validation of the close-range camera calibration model for narrow angles of view," *Measurement Science and Technology*, vol. 26, no. 9, pp. 1-9, 2015.
- [56] V. Mousavi, M. Khosravi, M. Ahmadi, N. Noori, S. Haghshenas, A. Hosseininaveh, M. Varshosaz, "The performance evaluation of multi-image 3D reconstruction software with different sensors," *Measurement*, vol. 120, no. February, pp. 1–10, 2018.

- [57] K. Konolige, "Projected texture stereo," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 148–155, 2010.
- [58] S. Barone, A. Paoli, A. V. Rationale, "Creation of 3D multi-body orthodontic models by using independent imaging sensors," *Sensors*, vol. 13, no. 2, pp. 2033–2050, 2013.
- [59] I. Toschi, E. Nocerino, M. Hess, F. Menna, B. Sargeant, L. MacDonald, F. Remondino, S. Robson, "Improving automated 3D reconstruction methods via vision metrology," in *Proc. of SPIE*, vol. 9528, no. June, p. 95280H, 2015.
- [60] A. Koutsoudis, G. Ioannakis, B. Vidmar, F. Arnaoutoglou, C. Chamzas, "Using noise function-based patterns to enhance photogrammetric 3D reconstruction performance of featureless surfaces," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 16, no. 5, pp. 664–670, 2015.
- [61] T. Luhmann, "Close range photogrammetry for industrial applications," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, no. 6, pp. 558–569, 2010.
- [62] M. Milošević, D. Lukić, S. Borojević, A. Antić, M. Đurđev, "A Cloud-Based Process Planning System in Industry 4.0 Framework," *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, no. November, pp. 202–211, 2019.
- [63] A. Analytics, A. U. Development, A. Web, U. A. Mapping, U. M. Disaster, "2018 Edition Geospatial Industry Outlook & Readiness Index," 2018.
- [64] "3D Scanning Market Size, Trends, Forecast – Research Report 2024." [Online]. Dostupno na: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/3d-scanning-market>. [Pristupio: 09.04.2019.].
- [65] C. Fraser, "Advances in Close-Range Photogrammetry," no. C, pp. 257–268, 2015.
- [66] L. Javernick, J. Brasington, B. Caruso, "Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry," *Geomorphology*, vol. 213, pp. 166–182, 2014.
- [67] M. Eckerstorfer, S. Solbø, E. Malnes, "Using 'Structure-from-Motion' Photogrammetry in Mapping Snow Avalanche Debris," *Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie*, vol. 21, no. august, pp. 171–178, 2015.
- [68] "ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books." [Online]. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/>. [Pristupio: 09.04.2019.].
- [69] "Scopus - Search for an author profile." [Online]. Dostupno na: <https://www.scopus.com/freelookup/form/author.uri>. [Pristupio: 09.04.2019.].
- [70] T. Schenk, "Introduction to Photogrammetry," 2005.
- [71] T. Thormählen, H. Broszio, P. Mikulastik, "Robust linear auto-calibration of a moving camera from image sequences," *Computer Vision–ACCV 2006*, pp. 71–80, 2006.
- [72] F. Zhou, Y. Wang, B. Peng, Y. Cui, "A novel way of understanding for calibrating stereo vision sensor constructed by a single camera and mirrors," *Measurement*, vol. 46, no. 3, pp. 1147–1160, 2013.

- [73] "Agisoft Metashape." [Online]. Dostupno na: <https://www.agisoft.com/>. [Pristupio: 19.02.2019].
- [74] "Photometrix - Photometrix Photogrammetry Software." [Online]. Dostupno na: <https://www.photometrix.com.au/>. [Pristupio: 06.12.2019].
- [75] F. Remondino, E. Nocerino, I. Toschi, F. Menna, "A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 42, no. 2W5, pp. 591–599, 2017.
- [76] P. Ingwer, F. Gassen, S. Püst, M. Duhn, M. Schällicke, K. Müller, H. Ruhm, J. Rettig, E. Hasche, A. Fischer, R. Creutzburg, "Practical usefulness of structure from motion (SfM) point clouds obtained from different consumer cameras," *Proceedings of SPIE - Mobile Devices and Multimedia: Enabling Technologies, Algorithms, and Applications*, vol. 9411, no. March, pp. 1–11, 2015.
- [77] I. Nikolov, C. Madsen, *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, Cham: Springer International Publishing, vol. 10059, no. 4., pp. 15-26, 2016.
- [78] Max von Übel, "2019 Best Photogrammetry Software (Some are Free) | All3DP," 2019. [Online]. Dostupno na: <https://all3dp.com/1/best-photogrammetry-software/>. [Pristupio: 19.10.2019].
- [79] M. Hassaballah, A. A. Abdelmgeid, H. A. Alshazly, *Image Features Detection, Description and Matching*, Studies in Computational Intelligence, Springer International Publishing, vol. 630, no. February. 2016.
- [80] C. Leng, H. Zhang, B. Li, G. Cai, Z. Pei, and L. He, "Local Feature Descriptor for Image Matching: A Survey," *IEEE Access*, vol. 7, no. c, pp. 6424–6434, 2019.
- [81] G. Csurka, C. R. Dance, M. Humenberger, "From handcrafted to deep local features," arXiv.org, pp. 1–41, 2018.
- [82] T. Tuytelaars and K. Mikolajczyk, "Local invariant feature detectors: A survey," *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, vol. 3, no. 3, pp. 177–280, 2007.
- [83] N. Govender, "Evaluation of Feature Detection Algorithms for Structure from Motion," 3rd Robotics and Mechatronics Symposium (ROBMECH 2009). Pretoria, South Africa, 8-10 November 2009.
- [84] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Second Edition*, pp. 1150–1157 vol.2, 1999.
- [85] J. Matas, O. Chum, M. Urban, T. Pajdla, "Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions," *Image and Vision Computing*, vol. 22, no. 10, pp. 761–767, 2004.
- [86] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. Van Gool, "Speeded-Up Robust Features (SURF)," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, no. 3, pp. 346–359, 2008.
- [87] D. Viswanathan, "Features from Accelerated Segment Test (FAST)," [Online]. Dostupno na:

- <https://pdfs.semanticscholar.org/cd26/7a4b04d835dbecf01d47fc69ed3a38c23055.pdf> [Pristupljeno: 12.12.2019].
- [88] G. C. Khedari, C. Dance, M. Humenberger, "From handcrafted to deep local features for computer vision applications. - Naver Labs Europe." [Online]. Dostupno na: <https://europe.naverlabs.com/blog/from-handcrafted-to-deep-local-features-for-computer-vision-applications/>. [Pristupljeno: 12.12.2019].
- [89] M. Cao, L. Cao, W. Jia, Y. Li, Z. Lv, L. Zheng, X. Liu, "Evaluation of Local Features for Structure from Motion," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 77, no. 9, pp. 10979–10993, 2018.
- [90] D. Mistry, A. Banerjee, "Comparison of Feature Detection and Matching Approaches: SIFT and SURF," *GRD Journals- Global Research and Development Journal for Engineering*, vol. 2, no. March, pp. 7–13, 2017.
- [91] S. Leutenegger, M. Chli, R. Y. Siegwart, "BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints," *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2011.
- [92] Y. Ke, R. Sukthankar, "PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors," *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004.
- [93] "Algorithms used in Photoscan." [Online]. Dostupno na: <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=89.msg323#msg323>. [Pristupljeno: 06.01.2020].
- [94] A. BRUNO, "Texture and Local Keypoints Analysis for Advanced Image Inspection", PhD thesis, Università degli Studi di Palermo, 2012.
- [95] M. Kashif, T. M. Deserno, D. Haak, S. Jonas, "Feature description with SIFT, SURF, BRIEF, BRISK, or FREAK? A general question answered for bone age assessment," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 68, no. February, pp. 67–75, 2016.
- [96] H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool, W. E. Holzinger, H. Löcker, B. Löcker, "SURF: Speeded Up Robust Features," *Bulletin of Insectology*, vol. 61, no. 1, pp. 404–417, 2006.
- [97] "Hessian Matrix," *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Springer, ISBN 978-1-4419-1137-7, 2013.
- [98] J. Hafeez, H. Jeon, A. Hamacher, S. Kwon, S. Lee, "The effect of patterns on image-based modelling of texture-less objects," *Metrology and Measurement Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 755–767, 2018.
- [99] J. Hafeez, S. Lee, S. Kwon, A. Hamacher, "Image Based 3D Reconstruction of Texture-less Objects for VR Contents," *International journal of advanced smart convergence*, vol. 6, no. 1, pp. 9–17, 2017.
- [100] J. Hafeez, A. Hamacher, S. Kwon, S. Lee, "Performance evaluation of patterns for image-based 3D model reconstruction of textureless objects," *International Conference on 3D Immersion, IC3D 2017 - Proceedings*, pp. 1–5, 2017.
- [101] A. Koutsoudis, B. Vidmar, F. Arnaoutoglou, "Performance evaluation of a multi-image 3D reconstruction software on a low-feature artefact," *Journal of Archaeological Science*, vol. 40, no. 12, pp. 4450–4456, 2013.

- [102] A. Koutsoudis, B. Vidmar, G. Ioannakis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, C. Chamzas, "Multi-image 3D reconstruction data evaluation," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, no. 1, pp. 73–79, 2014.
- [103] A. Wiegmann, H. Wagner, R. Kowarschik, "Human face measurement by projecting bandlimited random patterns," *Optics express*, vol. 14, no. 17, pp. 7692–8, 2006.
- [104] L. M. Galantucci, G. Percoco, U. Dal Maso, "Coded targets and hybrid grids for photogrammetric 3D digitisation of human faces," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 3, no. 3, pp. 167–176, 2008.
- [105] Z. Wróbel, P. Popielski, "An attempt to optimize the process of automatic point matching for homogeneous surface objects," *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 22, pp. 351–361, 2011.
- [106] Y. C. Chang, I. Detchev, A. Habib, "A photogrammetric system for 3D reconstruction of a scoliotic torso," *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference 2009, ASPRS 2009*, vol. 1, pp. 126–137, 2009.
- [107] A. Hosseininaveh Ahmadabadian, R. Yazdan, A. Karami, M. Moradi, F. Ghorbani, "A low-cost and portable system for 3D reconstruction of texture-less objects," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 40, no. 1W5, pp. 327–332, 2015.
- [108] A. Hosseininaveh Ahmadabadian, A. Karami, R. Yazdan, "An automatic 3D reconstruction system for texture-less objects," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 117, pp. 29–39, 2019.
- [109] M. Zhou, C. S. Fraser, "Automated surface extraction in real time photogrammetry," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII, pp. 943–950, 2000.
- [110] "3D Scanning - Techniques & Process of Digitalization." [Online]. Dostupno na: <https://www.columboengineering.com/blog/43-3d-scanning-techniques-process-of-digitalization>. [Pristupio: 09.04.2019].
- [111] Y. Wei, L. Kang, B. Yang, L. Wu, "Applications of structure from motion: a survey," *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, vol. 14, no. 7, pp. 486–494, 2013.
- [112] R. C. Gonzalez, Richard e. Woods, S. L. Eddins, *Digital image proccesing using MATLAB*, First edition. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2003.
- [113] "Understanding Images with skimage-Python - Towards Data Science." [Online]. Dostupno na: <https://towardsdatascience.com/understanding-images-with-skimage-python-b94d210afd23>. [Pristupio: 16.01.2020].
- [114] "y-cruncher - A Multi-Threaded Pi Program." [Online]. Dostupno na: <http://www.numberworld.org/y-cruncher/>. [Pristupio: 31.08.2018].
- [115] D. Lai, M. F. Danca, "Fractal and statistical analysis on digits of irrational numbers," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 36, no. 2, pp. 246–252, 2008.
- [116] I. Niven, *Numbers: Rational and Irrational*. Mathematical Association of America, 1961.

- [117] Y. Nishiyama, "Machin's Formula and Pi Finding Pi to 1000 decimal places," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 82, no. 3, pp. 421–430, 2013.
- [118] J. Gibbons, "Unbounded spigot algorithms for the digits of Pi," *American Mathematical Monthly*, vol. 113, no. 4, pp. 318–328, 2006.
- [119] "y-cruncher - Formulas." [Online]. Dostupno na: <http://www.numberworld.org/y-cruncher/internals/formulas.html>. [Pristupio: 31.08.2018].
- [120] C. Moler, *Numerical computing with MATLAB*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004.
- [121] J. Havil, *The Irrationals A Story of the Numbers You Can't Count On*. Princeton University Press, 2012.
- [122] S. Ehsan, A. Clark, K. McDonald-Maier, "Rapid Online Analysis of Local Feature Detectors and Their Complementarity," *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 10876–10907, 2013.
- [123] Ž. Santoši, I. Budak, V. Stojaković, M. Šokac, Đ. Vukelić, "Evaluation of synthetically generated patterns for image-based 3D reconstruction of textureless objects," *Measurement*, vol. 147, p.106883, 2019.
- [124] S. G. Hoggar, *Mathematics of Digital Images: Creation, Compression, Restoration, Recognition*. Cambridge University Press, 2006.
- [125] C. Moler, "9. Random Numbers," in *Numerical Computing with Matlab*, Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 255–267, 2004.
- [126] MATLAB randi - MathWorks España, "Uniformly distributed pseudorandom integers." [Online]. Dostupno na: <http://es.mathworks.com/help/matlab/ref/randi.html>. [Pristupio: 31.08.2018].
- [127] B. Mandelbrot, "A Fast Fractional Gaussian Noise Generator," *Water Resources Research*, vol. 7, no. 3, pp. 543-553, 1971.
- [128] R. L. Cook, T. DeRose, "Wavelet noise," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 212, p. 803, 2005.
- [129] L. Pedrotti, "Basic Geometrical Optics," in *Fundamentals of Photonics*, SPIE, pp. 73–116, 2008.
- [130] R. Danzl, F. Helml, S. Scherer, "Focus variation - A robust technology for high resolution optical 3D surface metrology," *Strojniski Vestnik*, vol. 57, no. 3, pp. 245–256, 2011.
- [131] D. Iwai, S. Mihara, K. Sato, "Extended Depth-of-Field Projector by Fast Focal Sweep Projection," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 462–470, 2015.
- [132] "Tips for Designing a Home Theater." [Online]. Dostupno na: <https://www.projectorscreenstore.com/store/blog/2-Projector-Screen-Store-Blog/Mistakes-and-Tips-for-Designing-a-Home-Theater>. [Pristupio: 18.09.2019].
- [133] E. Powell, "The Technology War: LCD vs. DLP," [Online]. Dostupno na: https://www.projectorcentral.com/lcd_dlp_comparison.htm?page=LCD [Pristupio: 18.09.2019].

- [134] C. M. Costa, G. Veiga, A. Sousa, L. Rocha, A. A. Sousa, R. Rodrigues, U. Thomas, "Modeling of video projectors in OpenGL for implementing a spatial augmented reality teaching system for assembly operations," *19th IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, ICARSC 2019*, no. April, 2019.
- [135] "How LCD Projectors Work." [Online]. Dostupno na: <http://www.tech-faq.com/how-lcd-projectors-work.html>. [Pristupio: 08.11.2019].
- [136] "Canal / Travelling Shot / Venice / Italy | SD Stock Video 658-050-134 | Framepool & RightSmith Stock Footage." [Online]. Dostupno na: <https://footage.framepool.com/en/shot/658050134-venice-italy-canal-wall-architecture-reflection>. [Pristupio: 18.11.2019].
- [137] B. Karablikovaite, "Handmade coconut lamp for your room - SKURA Design," 2016. [Online]. Dostupno na: <https://skuradesign.com/2016/02/02/handmade-coconut-lamp-for-your-room/>. [Pristupio: 18.09.2019].
- [138] M. H. Bharati, J. J. Liu, J. F. MacGregor, "Image texture analysis: Methods and comparisons," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 72, no. 1, pp. 57–71, 2004.
- [139] O. Engler, V. Randle, Introduction to Texture Analysis, Second Edition. CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [140] T. E. Sadowski, C. C. Broadbridge, J. DaPonte, "Statistical Texture Analysis of Microscopy Images for the Purpose of Surface Characterization," *MRS Proceedings*, vol. 894, pp. 0894-LL03-06, 2005.
- [141] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, B. R. Masters, Digital Image Processing, Third Edition, Pearson, 2008.
- [142] R. Haralick, "Textural Features for Image Classification," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, no. 6, pp. 610–621, 1973.
- [143] D. Gadkari, "Image Quality Analysis Using GLCM," Thesis, University of Central Florida, pp. 1–120, 2004.
- [144] Z. Wang, A. C. Bovik, L. Lu, "WHY IS IMAGE QUALITY ASSESSMENT SO DIFFICULT?," *IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*, 2002.
- [145] R. Ewa, "Multi-Criteria Decision Making Models By Applying the Topsis Method To Crisp and Interval Data," *Multiple Criteria Decision Making/University of Economics in Katowice*, vol. 6, no. MCDM, pp. 200–230, 2011.
- [146] C. L. Hwang, K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making, vol. 186, no. 82. Springer Berlin Heidelberg, 1981.
- [147] X. Zhang, J. Cui, W. Wang, C. Lin, "A Study for Texture Feature Extraction of High-Resolution Satellite Images Based on a Direction Measure and Gray Level Co-Occurrence Matrix Fusion Algorithm," *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1474, 2017.
- [148] Agisoft Metashape User Manual Professional Edition v. 1.5. Agisoft LLC, 2018.
- [149] C. Hoppe, M. Klopschitz, M. Rumpler, A. Wendel, S. Kluckner, H. Bischof, G. Reitmayr "Online Feedback for Structure-from-Motion Image Acquisition,"

- Proceedings of the British Machine Vision Conference 2012, pp. 70.1-70.12, 2012.
- [150] B. Felipe-García, D. Hernández-López, J. L. Lerma, "Analysis of the ground sample distance on large photogrammetric surveys," *Applied Geomatics*, vol. 4, no. 4, pp. 231–244, 2012.
- [151] V. Stojakovic, "MODELOVANJE NA OSNOVU SLIKA," Fakultet tehničkih nauka, 2018.
- [152] L. M. Galantucci, M. Pesce, F. Lavecchia, "A stereo photogrammetry scanning methodology, for precise and accurate 3D digitization of small parts with sub-millimeter sized features," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 1, pp. 507–510, 2015.
- [153] H. Esmaeili, H. Thwaites, "Virtual photogrammetry," in 2016 22nd International Conference on Virtual System & Multimedia (VSMM), pp. 1–6, 2016.
- [154] S. Bianco, G. Ciocca, and D. Marelli, "Evaluating the Performance of Structure from Motion Pipelines," *Journal of Imaging*, vol. 4, no. 8, p. 98, 2018.
- [155] "blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software." [Online]. Dostupno na: <https://www.blender.org/>. [Pristupio: 24.06.2019].
- [156] J. D. Green, J. Burge, J. A. Stansberry, B. Meinke, "Cameras a Million Miles Apart: Stereoscopic Imaging Potential with the Hubble and James Webb Space Telescopes," pp. 1–9. arXiv:1610.07483, 2016.
- [157] "3D Photography Stereo Base Look Up." [Online]. Dostupno na: <http://www.photographers-resource.co.uk/photography/3D/index.htm>. [Pristupio: 24.06.2019].
- [158] B. S. A. Alsadik, "Guided close range photogrammetry for 3D modelling of cultural heritage sites," PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2014.
- [159] Ž. Santoši, I. Budak, B. Trifković, M. Šokac, Đ. Vukaelić, M. Hadžistević, J. Hodolič, "Nova metoda za akviziciju geometrijskih podataka u dentalnoj protetici na bazi blisko-predmetne fotogrametrije," Tehničko rešenje, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2015.
- [160] "ReCap | Reality Capture And 3D Scanning Software | Autodesk." [Online]. Dostupno na: <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>. [Pristupio: 07.04.2019].
- [161] I. Budak, B. Trifkovic, T. Puskar, D. Vukelic, V. Vucaj-Cirilovic, J. Hodolic, "Comparative Analysis of 3D Digitization Systems in the Field of Dental Prosthetics," *Technical Gazette*, vol. 20, no. 2, pp. 291–296, 2013.
- [162] Z. Zhang, "Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces," *International Journal of Computer Vision*, vol. 13, no. 2, pp. 119–152, 1994.
- [163] "Computer-Aided Inspection services - Innovia3D." [Online]. Dostupno na: <https://www.innovia3d.com/services/computer-aided-inspection/>. [Pristupio: 16.01.2020].
- [164] N. Micheletti, J. H. Chandler, S. N. Lane, "Structure from Motion (SfM)

- Photogrammetry,” in *Geomorphological Techniques*, British Society for Geomorphology, 2015.
- [165] P. J. Besl, N. D. McKay, “A method for registration of 3-D shapes,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 239–256, 1992.
- [166] F. Pomerleau, F. Colas, R. Siegwart, “A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Mobile Robotics,” *Foundations and Trends in Robotics*, vol. 4, no. 1, pp. 1–104, 2015.
- [167] “GOM Inspect | GOM.” [Online]. Dostupno na: <https://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>. [Pristupio: 06.09.2018].
- [168] B. Trifkovic, I. Budak, A. Todorovic, D. Vukelic, V. Lazic, T. Puskar, “Comparative analysis on measuring performances of dental intraoral and extraoral optical 3D digitization systems,” *Measurement*, vol. 47, no. 1, pp. 45–53, 2014.