



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Martin Bilušić

MJERENJE OBJEKATA SLOŽENE GEOMETRIJE OPTIČKIM 3D MJERNIM SUSTAVOM

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Martin Bilušić

MJERENJE OBJEKATA SLOŽENE GEOMETRIJE OPTIČKIM 3D MJERNIM SUSTAVOM

DOKTORSKI RAD

Mentorica:
prof. dr. sc. Biserka Runje

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Martin Bilušić

COMPLEX OBJECTS MEASUREMENT BY USING AN OPTICAL 3D MEASURING SYSTEM

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
prof. Biserka Runje, PhD

Zagreb, 2026.

ZAHVALA

Najiskrenije zahvaljujem svojoj mentorici, prof. dr. sc. Biserki Runje, na ukazanom povjerenju, stručnom vodstvu, korisnim savjetima i bezuvjetnoj podršci pruženoj tijekom cjelokupnog procesa izrade ovog doktorskog rada.

Zahvaljujem članovima Povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada: prof. dr. sc. Dragutinu Lisjaku, prof. dr. sc. Željku Alaru, prof. dr. sc. Dušku Pavletiću, izv. prof. dr. sc. Branku Štrbcu i doc. dr. sc. Andreju Razumiću na izdvojenom vremenu, pažljivom čitanju rada te konstruktivnim savjetima i sugestijama.

Veliku zahvalnost dugujem Šibensko-kninskoj županiji, Razvojnoj agenciji Šibensko-kninske županije te svom poslodavcu, Razvojno-inovacijskom centru AluTech, na financiranju školarine. Posebno zahvaljujem ravnatelju Zoranu Belaku, koji je inicirao moj odlazak na doktorski studij, uložio trud u osiguravanje financiranja, te kontinuirano pratio moje školovanje.

Zahvaljujem svim svojim kolegama iz centra AluTech na svakodnevnoj pomoći i podršci, a posebno zahvaljujem kolegici Lei Lokas.

Također, zahvaljujem dr. sc. Nenadu Drvaru i Danijelu Ivšacu iz tvrtke Topomatika d.o.o. te Marku Pauku iz tvrtke IVANAL d.o.o. na susretljivosti i pomoći pri provedbi međulaboratorijskih usporedbi.

Zahvaljujem Luki Olivariju na korisnim savjetima i pomoći oko programiranja u Pythonu.

Posebnu zahvalu dugujem dr. sc. Josipu Stjepandiću na usmjeravanju, motivaciji i nesebičnoj podršci tijekom mog doktorskog studija.

Mojim roditeljima, Vladimiru i Ozani, hvala na odgoju, usađenim vrijednostima i svemu što su mi omogućili tijekom cijelog života. Veliko hvala i mojoj braći i sestri na stalnoj podršci.

Moja najveća hvala ide mojoj supruzi Ireni i sinu Anti. Hvala vam na ljubavi, strpljenju i razumijevanju koje mi uvijek pružate. Bez vaše podrške ovo postignuće ne bi bilo moguće.

SADRŽAJ

ZAHVALA.....	I
SADRŽAJ	II
SAŽETAK.....	IV
EXTENDED SUMMARY	V
POPIS SLIKA	IX
POPIS TABLICA.....	XII
POPIS OZNAKA	XIV
POPIS KRATICA	XVII
1. UVOD	1
1.1 Motivacija.....	2
1.2 Cilj i hipoteza istraživanja	3
1.3 Metode i plan istraživanja.....	4
1.4 Znanstveni doprinos	6
2. TEHNIČKE SPOSOBNOSTI I INDUSTRIJSKA PRIMJENA OPTIČKIH 3D MJERNIH SUSTAVA	7
2.1 Osnove optičkih 3D mjernih sustava.....	7
2.1.1 Klasifikacija mjernih metoda	7
2.1.2 Optički 3D mjerni sustavi	8
2.1.3 Usporedba optičkih 3D mjernih sustava s TMU i CT mjernim sustavima	10
2.2 Princip rada i tehnologije optičkih 3D mjernih sustava	12
2.3 Područja primjene optičkih 3D mjernih sustava.....	13
2.4 Analiza mjerne sposobnosti i procesa digitalne rekonstrukcije kroz odabrane industrijske slučajeve primjene	20
2.4.1 Rekonstrukcija objekata bez nominalnog CAD modela	20
2.4.2 Optička dimenzijska inspekcija objekata sa složenom unutarnjom geometrijom	22
2.4.3 Optička 3D digitalizacija objekata slobodne geometrije u arheologiji	24
2.4.4 Optička dimenzijska inspekcija u inovativnim procesima investicijskog lijevanja	25
2.4.5 Sinteza rezultata analiziranih slučajeva primjene	26
2.5 Optički 3D mjerni sustavi u kontekstu industrije 4.0	27
3. OSIGURAVANJE KVALITETE REZULTATA MJERENJA	30
3.1 Artefakti u optičkim 3D mjernim sustavima	31
3.1.1 Uloga referentnih artefakata u uspostavljanju mjeriteljske sljedivosti	31
3.1.2 Podešavanje mjernog sustava primjenom umjerne ploče	34
3.2 Mjerna nesigurnost	37
3.2.1 Utjecajni parametri kod mjerenja optičkim 3D mjernim sustavom.....	37

3.2.2 Metode procjene mjerne nesigurnosti	39
4. EKSPERIMENTALNI DIO	42
4.1 Mjerenje optičkim 3D mjernim sustavom	42
4.1.1 Ispitni uzorci	42
4.1.2 Postupak 3D skeniranja	44
4.1.3 Naknadna obrada podataka	47
4.2 Određivanje utjecajnih faktora	53
4.2.1 Plan pokusa	53
4.2.2 Rezultati mjerenja	55
4.2.3 ANOVA analiza	58
5. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI.....	63
5.1 Procjena mjerne nesigurnosti prema ISO 15530-3.....	63
5.2 Proračun mjerne nesigurnosti prema GUM.....	68
5.2.1 Standardna nesigurnost povezana s hrapavosti	70
5.2.2 Standardna nesigurnost povezana s poligonizacijom.....	71
5.2.3 Standardna nesigurnost povezana s premazom za matiranje	72
5.2.4 Standardna nesigurnost povezana s temperaturom	74
5.2.5 Standardna nesigurnost povezana s hardverom	77
5.2.6 Standardna nesigurnost povezana s mjeriteljem	78
5.2.7 Rezultati proširene mjerne nesigurnosti	79
5.3 Monte Carlo simulacija	82
5.4 Bayesova metoda	85
5.5 Usporedba rezultata procjene mjerne nesigurnosti.....	92
6. MEĐULABORATORIJSKA USPOREDBA.....	95
6.1 Metodologija ispitivanja	96
6.2 Rezultati međulaboratorijskih mjerenja.....	100
7. RASPRAVA	106
8. ZAKLJUČAK	114
LITERATURA.....	118
ŽIVOTOPIS	128
BIOGRAPHY.....	129

SAŽETAK

Optički 3D mjerni sustavi predstavljaju ključnu tehnologiju za precizno mjerenje i digitalizaciju objekata složene geometrije, no njihova primjena zahtijeva detaljnu analizu tehničkih mogućnosti i mjernih sposobnosti. U suvremenim proizvodnim i istraživačkim okruženjima, osobito u uvjetima digitalizacije i automatizacije unutar paradigme Industrije 4.0, optički 3D mjerni sustavi sve češće zamjenjuju klasične taktilne metode zbog svoje brzine, fleksibilnosti i beskontaktnosti naravi. Unatoč brojnim prednostima, njihova primjena još uvijek nosi značajne izazove u pogledu točnosti, ponovljivosti i kvantifikacije mjerne nesigurnosti, osobito kod složenih površina i u nestandardnim uvjetima mjerenja. S ciljem identifikacije dominantnih utjecajnih faktora na rezultate mjerenja, kvantifikacije pridružene mjerne nesigurnosti te obnovljivosti rezultata mjerenja optičkog 3D mjernih sustava u laboratorijskim i industrijskim uvjetima, u radu su provedena teorijska i eksperimentalna istraživanja. Teorijski dio rada obuhvaća klasifikaciju optičkih 3D mjernih sustava, analizu njihovog principa rada i industrijske primjene te pregled normativnog okvira. Eksperimentalni dio temelji se na 3D skeniranju namjenski dizajniranih ispitnih uzoraka složene geometrije koji simuliraju stvarne industrijske dijelove. Pritom je proveden faktorski plan pokusa s varijacijom odabranih ulaznih parametara. Statistička analiza rezultata izvedena je analizom varijance s ciljem identifikacije statistički značajnih faktora. Procjena mjerne nesigurnosti provedena je sveobuhvatnim hibridnim pristupom koji je obuhvatio četiri komplementarne metodologije. Analitička GUM metoda korištena je za izgradnju detaljnog matematičkog modela koji uključuje pojedinačne identificirane izvore nesigurnosti. Valjanost ovog modela numerički je potvrđena primjenom Monte Carlo simulacije (MCS). Također je korištena i Bayesova analiza kako bi se dobio potpuniji, probabilistički uvid u rezultate. Uz navedene pristupe temeljene na modelu, metoda prema normi ISO 15530-3:2011 primijenjena je eksperimentalno, kroz usporedbu s referentnim vrijednostima izmjerenima trokoordinatnim mjernim uređajem. Nadalje, kroz međulaboratorijsku usporedbu triju neovisnih institucija vrednovana je usporedivost rezultata i pouzdanost mjernog procesa. Dobiveni rezultati potvrđuju da pravilnim odabirom mjernih parametara i optimizacijom postupka skeniranja optički 3D mjerni sustavi mogu osigurati visoku razinu točnosti i obnovljivosti rezultata, čak i pri mjerenju zahtjevnih objekata složene geometrije. Disertacija doprinosi razvoju metodologije za objektivnu procjenu mjerne sposobnosti optičkih sustava te predstavlja korak prema njihovoj pouzdanoj integraciji u tehničke i industrijske sustave.

EXTENDED SUMMARY

Chapter 1: Introduction and Motivation

Optical 3D measuring systems are a crucial technology for the precise measurement and digitization of objects with complex geometries. With the increasing demands of Industry 4.0, digital manufacturing, medical modelling, and cultural heritage preservation, these systems offer significant advantages due to their non-contact nature and high data acquisition speed. Factors such as surface properties, scanning strategy, software processing parameters, and environmental conditions can significantly affect measurement quality. The objective of this research is to analyze these factors, develop a mathematical model to evaluate measurement uncertainty, and assess the quality and reliability of optical measurements based on standardized procedures and cross-laboratory validation.

Chapter 2: Technical Capabilities and Applications of Optical 3D Measuring Systems

This chapter provides a review of the operating principles, sensor classifications, and performance characteristics of optical 3D systems. It compares them with coordinate measuring machine (CMM) and computed tomography (CT) systems, discussing their limitations and advantages in terms of flexibility and speed. General use cases include quality control, reverse engineering, additive manufacturing, biomedical applications, and cultural heritage digitization. To further demonstrate their effectiveness in practice, the chapter analyzes four specific application scenarios: reverse engineering of a product without technical documentation, metrological validation of tooling with complex internal geometries, digital documentation of archaeological artifacts, and dimensional inspection within an innovative concept integrating 3D printing with investment casting. Their integration within Industry 4.0 environments is also considered, particularly for applications involving closed-loop manufacturing and adaptive process control.

Chapter 3: Quality Assurance of Measurement Results

Metrological principles underpinning optical 3D measurements are discussed, including the importance of metrological traceability and the role of the specific normative framework, with a special emphasis on the ISO 15530-3:2011 standard and the VDI/VDE 2634 guideline. The chapter identifies key uncertainty sources—categorized into hardware, software (e.g., polygonization), measurement object properties (e.g., reflectivity), environmental stability, and

the operator. Furthermore, it theoretically introduces four complementary uncertainty estimation methods: the empirical ISO 15530-3 substitution method, GUM-based analytical modelling, Monte Carlo simulation (MCS), and the Bayesian approach.

Chapter 4: Experimental Work

This chapter focuses on the experimental evaluation of the optical 3D measuring system. The research is based on scanning purpose-designed test specimens of complex geometry that simulate real industrial parts with varying surface roughnesses. To thoroughly investigate the impact of measurement and software settings on the results, a full factorial design of experiments was conducted by varying selected input parameters (i.e., surface roughness, spray application, polygonization, and interpolation). Statistical analysis of the results was performed using the ANOVA method to identify statistically significant effects on dimensional and geometrical characteristics, with residual analysis confirming the validity of the developed models.

Chapter 5: Measurement Uncertainty Estimation

This chapter details a comprehensive uncertainty estimation using a hybrid approach that integrates four distinct methodologies. An experimental assessment was conducted according to ISO 15530-3, and an analytical uncertainty budget was developed in line with the GUM framework. This analytical model was subsequently validated using Monte Carlo simulation. Additionally, an advanced Bayesian analysis provided a full probabilistic interpretation of the uncertainty. Seven key geometrical characteristics were analyzed, with the quantification of individual contributions from various factors. The high level of consistency across the four methods provided a robust and reliable uncertainty assessment, confirming that the performance of the system is well within acceptable ranges for industrial applications.

Chapter 6 – Interlaboratory Comparison

An interlaboratory study involving three institutions confirmed the reproducibility and comparability of optical 3D measurements. A unified protocol and a reference artefact were used, with reference values established by a highly accurate tactile coordinate measuring machine (CMM). The optical measurement results were evaluated using z-scores to assess accuracy against the CMM reference, while En scores were used to evaluate the compatibility of the estimated measurement uncertainties. The evaluation showed good agreement between

participants, highlighting the influence of sensor generation and operator technique. Crucially, the successful application of the En score directly validated the developed Bayesian uncertainty model, proving the method's reliability for industrial integration.

Discussion

In this chapter, the results of the experimental verification and uncertainty estimations are discussed. The research confirms that optical 3D scanning systems are reliable across diverse applications when influential parameters are properly controlled. Identified sources of variation are quantifiable and can be addressed through standardized procedures.

Conclusion

The final chapter of the doctoral thesis provides a comprehensive overview of the conducted research, where ultimate conclusions regarding the traceable dimensional metrology of optical 3D systems are drawn, and guidelines for further research are provided.

Ključne riječi: optički 3D mjerni sustavi, mjerna nesigurnost, povratno inženjerstvo, GUM, Monte Carlo simulacija, Bayesova metoda

Keywords: optical 3D measuring systems, measurement uncertainty, reverse engineering, GUM, Monte Carlo simulation, Bayesian method

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Trokoordinatni mjerni uređaj [17]	11
Slika 2.2. Princip rada optičkih 3D mjernih sustava sa strukturiranim svjetlom [14]	13
Slika 2.3. GD&T inspekcija čeličnog kalupa [16]	14
Slika 2.4. Primjena robotskih sustava opremljenih optičkim 3D skenerima [34].....	15
Slika 2.5. Usporedba izmjerenog odljevka s CAD modelom – vizualizacija odstupanja u postupku korekcije kalupa [37]	16
Slika 2.6. a) Optičko 3D skeniranje dentalnog modela pomoću crvenog lasera b) Digitalna 3D replika zubnog luka generirana nakon skeniranja [43]	18
Slika 2.7. Izvorni oblik ispitnog uzorka s vidljivom unutarnjom geometrijom	21
Slika 2.8. Dimenzijska inspekcija alata za brizganje voska	23
Slika 2.9. Rezultati digitalizacije arheoloških uzoraka	24
Slika 2.10. Rezultati dimenzijske usporedbe 3D ispisanog modela s CAD modelom.....	26
Slika 2.11. Primjena sustava PONTOS u analizi dinamike vozila – prikaz deformacije karoserije prilikom zatvaranja vrata pomoću vektora pomaka i vremenskog odziva [65]	28
Slika 3.1. Mjerni štap s kuglama dužine 200 mm [77]	32
Slika 3.2. Artefakt u obliku tetraedra [78].....	32
Slika 3.3. Slobodno oblikovani etalon [77].....	33
Slika 3.4. VDI/VDE 2634 kompatibilni artefakt [68]	33
Slika 3.5. GOM umjerna ploča [82]	35
Slika 3.6. Raspored optičkih kružnih markera na umjernoj ploči [82]	35

Slika 3.7. Proces umjeravanja optičkog 3D mjernog sustava	36
Slika 4.1. Tehnička skica ispitnog uzorka s dimenzijama.....	43
Slika 4.2. Fizički ispitni uzorak pripremljen za mjerenje.....	44
Slika 4.3. ATOS core mjerni koncept [48].....	46
Slika 4.4. Postupak skeniranja optičkim 3D mjernim sustavom.....	46
Slika 4.5. Prikaz funkcije poligonizacije u programskom paketu.....	48
Slika 4.6. Prikaz mjerenja promjera	49
Slika 4.7. Prikaz mjerenja osnovnog razmaka	50
Slika 4.8. Prikaz mjerenja kružnosti.....	50
Slika 4.9. Prikaz mjerenja koncentričnosti.....	51
Slika 4.10. Prikaz mjerenja ravnosti.....	51
Slika 4.11. Prikaz mjerenja paralelnosti.....	52
Slika 4.12. Prikaz mjerenja okomitosti	52
Slika 4.13. Normalni probabilistički grafikon: a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost.....	61
Slika 5.1. Funkcija gustoće vjerojatnosti: a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost.....	84
Slika 5.2. Prikaz putanja četiri lanca za kombiniranu standardnu mjernu nesigurnost u_c : a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost	88
Slika 5.3. Posteriorne razdiobe za kombiniranu standardnu mjernu nesigurnost (u_c): a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost	90

Slika 5.4. Kumulativne funkcije posteriornih razdioba za kombiniranu standardnu mjernu nesigurnost (uc): a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost	91
Slika 6.1. Trokoordinatni mjerni uređaj Zeiss CONTURA G2	96
Slika 6.2. Optički 3D skener: ATOS Compact scan	97
Slika 6.3. Optički 3D skener: ATOS 5	97
Slika 6.4. Odstupanje od TMU: a) mjerenje promjera, b) mjerenje osnovog razmaka, c) mjerenje kružnosti, d) mjerenje koncentričnosti, e) mjerenje ravnosti, f) mjerenje paralelnosti, g) mjerenje okomitosti	101
Slika 6.5. Grafički prikaz z-vrijednosti	102
Slika 6.6. Grafički prikaz faktora slaganja	104

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Vrijednosti hrapavosti (R_a) na objektima mjerenja	43
Tablica 4.2. Osnovne karakteristike ATOS Core 300 skenera [95]	45
Tablica 4.3. Usporedba karakteristika 3D modela	48
Tablica 4.4. Redoslijed mjerenja prema planu pokusa.....	55
Tablica 4.5. Rezultati mjerenja.....	57
Tablica 4.6. Rezultati p-vrijednosti ANOVA analize	58
Tablica 4.7. Rezultati R^2	59
Tablica 5.1. Rezultati srednje vrijednosti i standardnih devijacija mjerenja.....	67
Tablica 5.2. Rezultati mjernih nesigurnosti prema ISO 15530-3:2011.....	67
Tablica 5.3. Zbirni prikaz metoda procjene i funkcija gustoće vjerojatnosti za utjecajne faktore	70
Tablica 5.4. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala i mjerne nesigurnosti povezane s hrapavošću.....	71
Tablica 5.5. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala i mjerne nesigurnosti povezane s poligonizacijom.....	72
Tablica 5.6. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala i mjerne nesigurnosti povezane sa premazom	74
Tablica 5.7. Rezultati mjerne nesigurnosti povezane s temperaturom.....	76
Tablica 5.8. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, standardne devijacije i mjerne nesigurnosti povezane s hardverom	78
Tablica 5.9. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, standardne devijacije i mjerne nesigurnosti povezane s mjeriteljem	79

Tablica 5.10. Zbirni prikaz doprinosa standardnih mjernih nesigurnosti	79
Tablica 5.11. Rezultati proširene mjerne nesigurnosti prema GUM-u	80
Tablica 5.12. Rezultati Monte Carlo simulacije.....	83
Tablica 5.13. Rezultati Bayesove procjene mjerne nesigurnosti za geometrijske karakteristike	87
Tablica 5.14. Usporedba procijenjene proširene mjerne nesigurnosti različitim metodama ...	93
Tablica 6.1. Izračunate z-vrijednosti za analizirane geometrijske karakteristike.....	102
Tablica 6.2. Rezultat analize kompatibilnosti (faktor slaganja).....	104

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
a	mm	poluširina procijenjenog intervala
a_{aklim}	K^{-1}	poluširina procijenjenog intervala za aklimatizaciju
a_{inst}	K^{-1}	poluširina procijenjenog intervala za instrument
a_{vrem}	K^{-1}	poluširina procijenjenog intervala za vremensku stabilnost
b	mm	sustavna pogreška
E_n	-	faktor slaganja
k	-	faktor pokrivanja
L	mm	mjerna duljina
l_{avg}	mm	srednja izmjerena mjera
M	-	broj iteracija MCS simulacije
n	-	broj mjerenja
R^2	-	R kvadratni
R_a	μm	hrapavost površine
S_{hard}	mm	standardna devijacija rezultata mjerenja povezana s hardverom
S_{hrap}	mm	standardna devijacija rezultata mjerenja povezana s hrapavošću
S_{mjer}	mm	standardna devijacija rezultata mjerenja povezana s mjeriteljem
S_{pol}	mm	standardna devijacija rezultata mjerenja povezana s poligonizacijom
S_{premaz}	mm	standardna devijacija rezultata mjerenja povezana s premazom
T	$^{\circ}C$	maksimalna temperatura u proizvodnom okruženju
T_{sred}	$^{\circ}C$	srednja temperatura predmeta
u	mm	sastavljena standardna nesigurnost
U	mm	proširena mjerna nesigurnost
U_B	mm	proširena mjerna nesigurnost dobivena Bayesovom metodom
U_{cal}	mm	proširena mjerna nesigurnost povezana s umjeravanjem

U_{GUM}	mm	proširena mjerna nesigurnost dobivena GUM-om
U_{MC}	mm	proširena mjerna nesigurnost MCS simulacijom
$U(x_i)$	mm	proširena mjerna nesigurnost rezultata pojedinog laboratorija
$U(x_{ref})$	mm	proširena mjerna nesigurnost referentne vrijednosti
u_α	K ⁻¹	standardna mjerna nesigurnost koeficijenta toplinskog rastezanja
u_b	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana sa sustavnom pogreškom
u_c	mm	standardna mjerna nesigurnost (Monte Carlo simulacija, Bayesova metoda)
u_{cal}	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s umjeravanjem
u_{hard}	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s hardverom
u_{hrap}	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s hrapavošću površine
u_i	mm	standardne mjerne nesigurnosti povezane s identificiranim utjecajnim faktorima
u_{mjer}	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s mjeriteljem
u_p	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s mjernim postupkom
u_{pol}	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s poligonizacijom
u_{premaz}	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s premazom
u_T	mm	standardna mjerna nesigurnost temperature predmeta
$u_{T,aklim}$	mm	standardna mjerna nesigurnost aklimatizacije
$u_{T,inst}$	mm	standardna mjerna nesigurnost mjernog instrumenta
$u_{T,vrem}$	mm	standardna mjerna nesigurnost vremenske varijacije temperature
u_{temp}	mm	standardna mjerna nesigurnost zbog temperaturnih utjecaja na predmet mjerenja
u_w	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s materijalom i varijacijom proizvodnje
u_{wp}	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s proizvodnim procesom
u_{wt}	mm	standardna mjerna nesigurnost povezana s temperaturom

X	mm	srednja vrijednost svih sudionika
x	mm	srednja vrijednost sudionika
x_{cal}	mm	referentna vrijednost (umjerna vrijednost etalona)
x_i	mm	rezultat mjerenja pojedinog laboratorija
x_{ref}	mm	referentna vrijednost dobivena TMU mjerenjem
Y_i	mm	rezultat mjerenja
$\bar{y}$	mm	srednja vrijednost rezultata ponovljenih mjerenja
z		z-vrijednost
Grčke oznake		
α	K^{-1}	koeficijent toplinskog rastezanja materijala
$\Delta\alpha_c$	K^{-1}	koeficijent toplinskog rastezanja
μ	mm	stvarna vrijednost mjerene veličine / Očekivana srednja vrijednost
σ_{pt}	mm	standardna devijacija za ocjenu sposobnosti
$\hat{\sigma}$	mm	standardno odstupanje ocjenjivanja sposobnosti

POPIS KRATICA

3D	Trodimenzijski
AI	Artificial Intelligence – umjetna inteligencija
ANOVA	Analysis of Variance – analiza varijance
CAD	Computer Aided Design – računalom potpomognuto oblikovanje
CAM	Computer Aided Manufacturing – računalom potpomognuta proizvodnja
CDF	Cumulative Distribution Function – kumulativna funkcija razdiobe
CMM	Coordinate Measuring Machine – trokoordinatni mjerni uređaj
CNC	Computer Numerical Control – računalom podržano numeričko upravljanje
CT	Computed Tomography – računalna tomografija
DOE	Design of Experiments – plan pokusa
GD&T	Geometric Dimensioning and Tolerancing – geometrijsko kotiranje i toleriranje
GUM	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement – Vodič za procjenu mjerne nesigurnosti
HAA	Hrvatska akreditacijska agencija
HDI	Highest Density Interval - interval najviše gustoće
ISO	International Organization for Standardization – Međunarodna organizacija za normizaciju
KDE	Kernel Density Estimation - procjena gustoće jezgrom
MCMC	Markov Chain Monte Carlo – Markovljev lanac Monte Carlo
MCS	Monte Carlo Simulation – Monte Carlo simulacija
MDM	Measurement Data Management – upravljanje mjernim podacima
QIF	Quality Information Framework – Okvir za informaciju o kvaliteti
STL	Stereolithography – stereolitografska CAD datoteka
TMU	Trokoordinatni mjerni uređaj
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik – Udruga za elektrotehniku, elektroniku i informatičku tehnologiju
VDI	Verein Deutscher Ingenieure – Društvo njemačkih inženjera
VIM	Vocabulaire International de Métrologie – Međunarodni rječnik mjeriteljskih izraza

1. UVOD

Posljednjih nekoliko desetljeća bilježi se značajan napredak u području optičkih 3D mjernih sustava, što je u velikoj mjeri promijenilo pristup prikupljanju i analizi trodimenzionalnih podataka. Ovi sustavi danas predstavljaju nezamjenjiv alat za digitalnu rekonstrukciju fizičkih objekata u brojnim tehničkim i znanstvenim disciplinama. Njihova prednost ogleda se prvenstveno u sposobnosti brze, beskontaktna i detaljne digitalizacije složenih geometrijskih oblika. Zbog tih mogućnosti, optički 3D mjerni sustavi postali su ključni u suvremenim proizvodnim procesima.

Suvremeni proizvodni procesi, osobito u okviru četvrte industrijske revolucije (Industrija 4.0), značajno ovise o preciznim i integriranim digitalnim informacijama. U konceptima poput pametnih tvornica, digitalnih blizanaca te adaptivnih proizvodnih lanaca, optički 3D mjerni sustavi imaju sve izraženiju ulogu jer omogućavaju prikupljanje detaljnih trodimenzionalnih podataka ključnih za brzo donošenje odluka, pravovremenu optimizaciju proizvoda te fleksibilno prilagođavanje tržišnim zahtjevima. U tom kontekstu, pouzdanost mjerenja objekata složenih oblika nije važna samo u smislu kontrole kvalitete, već i za učinkovito upravljanje životnim ciklusom proizvoda (PLM, engl. *Product Lifecycle Management*), od koncepta do završne implementacije. U okviru PLM-a, integracija optičkih 3D mjernih sustava omogućuje uspostavu zatvorene petlje proizvodnje (engl. *closed-loop manufacturing*). U takvom informacijskom toku rezultati inspekcije ne služe samo za pasivno utvrđivanje (ne)sukladnosti, već se kao povratne informacije izravno vraćaju u odjele za digitalni dizajn i razvoj. Time se osigurava kontinuirano usavršavanje digitalnih modela, brza prilagodba proizvodnih alata i cjeloživotna optimizacija proizvoda na temelju stvarnih izmjerenih podataka.

Primjena optičkih 3D mjernih sustava sve je učestalija i raznovrsnija u mnogim područjima, uključujući precizno inženjerstvo, automobilsku industriju, medicinu, te zaštitu povijesnih spomenika i arheoloških uzoraka. Zbog toga je važno sustavno razumjeti i optimizirati integraciju ovih tehnologija u proizvodnju, kontrolu kvalitete i digitalizaciju. Optički 3D skeneri nisu više izolirani instrumenti za povremeno prikupljanje podataka, već neizostavni dijelovi cjelovitih digitalnih tokova informacija koji podržavaju automatizaciju kontrole kvalitete i ubrzavaju razvoj novih proizvoda. Stoga je nužno razviti jasno definirane i standardizirane pristupe korištenja ovih tehnologija, specificirati zahtjeve za mjernu točnost u različitim industrijskim sektorima te dobro razumjeti ograničenja, ali i potencijale optičkih 3D

mjernih sustava u stvarnim proizvodnim uvjetima. Sustavno prepoznavanje specifičnih izazova za svaku pojedinačnu primjenu ključan je preduvjet za daljnji razvoj i efikasno korištenje ove tehnologije.

Unatoč prednostima, izazovi u pogledu točnosti i pouzdanosti optičkih 3D mjernih sustava posebno su izraženi kod objekata složene geometrije. Površinska svojstva materijala kao što su hrapavost, reflektivnost ili prozirnost, složenost oblika, nepristupačnost pojedinih geometrijskih karakteristika te promjenjivi uvjeti tijekom skeniranja mogu utjecati na konačne rezultate. Osim toga, način obrade dobivenih podataka, poput interpolacije ili izbora gustoće mreže, može uzrokovati sustavna odstupanja koja nije lako prepoznati bez temeljite analize. Upravo zbog tih specifičnosti potrebno je detaljnije razumjeti faktore koji utječu na kvalitetu rezultata, kao i jasno definirati izvore i veličinu mjerne nesigurnosti, kako bi se osigurala pouzdanost podataka te njihova učinkovita primjena u suvremenoj industriji.

Za razliku od taktilnih metoda, gdje su izvori pogrešaka relativno dobro definirani, optički sustavi kombiniraju utjecaje optike, površinskih karakteristika objekta, uvjeta okoline i algoritamske obrade podataka. Stoga je za učinkovitu primjenu ovih sustava potrebno razviti sustavne pristupe procjeni mjerne nesigurnosti, validaciji rezultata i optimizaciji postupaka skeniranja s ciljem minimiziranja pogrešaka.

1.1 Motivacija

Razvoj optičkih 3D mjernih sustava posljednjih desetljeća donio je duboke promjene u načinu prikupljanja, obrade i korištenja geometrijskih informacija o fizičkim objektima [1]. Unutar paradigme četvrte industrijske revolucije (Industrije 4.0), ove tehnologije postale su ključne za ostvarenje visokoprecizne digitalizacije fizičkih objekata, omogućujući stvaranje digitalnih blizanaca, optimizaciju proizvodnih procesa i unapređenje istraživačkih i konzervatorskih aktivnosti [2–4]. Sve veća zastupljenost optičkog 3D mjerenja u područjima poput automatizirane kontrole kvalitete, razvoja proizvoda, medicinske primjene te zaštite kulturnih spomenika i arheoloških artefakata jasno pokazuje njegovu važnu ulogu u suvremenoj industrijskoj praksi i istraživačkim aktivnostima [3, 5–7].

Unatoč značajnom napretku, primjena optičkih 3D mjernih sustava i dalje je suočena s nizom izazova u osiguravanju točnosti i pouzdanosti rezultata, posebno pri mjerenju objekata složenih geometrijskih svojstava [8, 9], [10]. Površinske karakteristike materijala, poput reflektivnosti,

hrapavosti i prozirnosti, s varijabilnim uvjetima skeniranja i parametrima softverske obrade, mogu značajno utjecati na kvalitetu dobivenih podataka [8, 9, 11]. Ovi utjecaji zahtijevaju dubinsku analizu i razumijevanje dominantnih faktora koji oblikuju rezultate mjerenja.

Mjerna nesigurnost predstavlja ključni parametar u procjeni kvalitete trodimenzionalnih podataka. Standardizirani pristupi poput ISO 15530-3:2011 koriste se za procjenu nesigurnosti mjerenja, no njihova izvorna primjena bila je prvenstveno usmjerena na taktilne mjerne sustave [2, 12]. Iako je primjenjiv i za optičke mjerne sustave, posebna pažnja mora se posvetiti prilagodbi metodologije specifičnostima optičkih sustava, s obzirom na njihovu osjetljivost na karakteristike površine i uvjete okoline [8, 12]. Osim toga, postoji nedovoljna istraženost u pogledu ponašanja mjerne nesigurnosti pri mjerenju različitih geometrijskih karakteristika. Promjeri, duljine, paralelnosti i ravnosti podložni su različitim utjecajima tijekom skeniranja i obrade podataka, što zahtijeva zasebnu analizu i modeliranje nesigurnosti za svaku vrstu značajke posebno [1, 8, 12]. Ovo dodatno naglašava potrebu za dubljim razumijevanjem i prilagodbom mjernih strategija kod mjerenja optičkim 3D mjernim sustavima.

Posebnu složenost integracije ovih sustava naglašavaju raznovrsne primjene poput povratnog inženjerstva i digitalne rekonstrukcije proizvoda [13, 14], metrološke validacije alata i odljevaka [8, 12], dokumentacije i konzervacije arheoloških artefakata [3, 7], te validacije inovativnih proizvodnih koncepata temeljenih na aditivnim tehnologijama [2].

Zbog svega navedenog, postoji izražena potreba za provođenjem sveobuhvatnih istraživanja usmjerenih na identifikaciju i kvantifikaciju utjecajnih faktora, razvoj i validaciju metodologija za procjenu mjerne nesigurnosti te optimizaciju mjernih i postprocesnih postupaka. Kroz sustavno istraživanje moguće je poboljšati razumijevanje ograničenja i mogućnosti optičkih 3D mjernih sustava, čime se olakšava njihova pouzdanija i učinkovitija primjena u industrijskoj praksi te istraživačkim i konzervatorskim aktivnostima.

1.2 Cilj i hipoteza istraživanja

Cilj istraživanja je utvrditi sposobnost mjerenja objekata složene geometrije optičkim 3D mjernim sustavom. Za uspješno utvrđivanje mjerne sposobnosti potrebno je procijeniti iznos najmanje mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja.

Hipoteza istraživanja:

Moguće je utvrditi i kvantificirati parametre koji značajno utječu na točnost i preciznost rezultata mjerenja objekata složene geometrije optičkim 3D mjernim sustavom te razviti matematički model mjernog sustava u cilju procjene mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja.

1.3 Metode i plan istraživanja

Svrha ovog istraživanja je eksperimentalno ispitati tehničke mogućnosti optičkih 3D mjernih sustava u različitim područjima primjene, identificirati dominantne utjecajne faktore koji utječu na točnost mjerenja te kvantificirati mjernu nesigurnost pri određivanju različitih geometrijskih karakteristika. Istraživanje uključuje i međulaboratorijsku usporedbu kako bi se ispitala obnovljivost i usporedivost rezultata između različitih optičkih sustava.

U teorijskom dijelu rada dan je pregled tehničkih značajki i klasifikacija optičkih 3D mjernih sustava s obzirom na vrstu senzora, izvor svjetlosti i metodu triangulacije. Objašnjeni su osnovni principi rada sustava koji koriste strukturirano svjetlo. Posebna pažnja posvećena je primjeni optičkih 3D mjernih sustava u različitim područjima: od kontrole kvalitete i povratnog inženjerstva, preko medicinskih i stomatoloških primjena, pa sve do dokumentiranja i očuvanja kulturnih spomenika i arheoloških uzoraka.

Analizirani su ključni faktori koji utječu na točnost i pouzdanost optičkih 3D mjerenja. Utjecaji su kategorizirani kroz pet glavnih područja: hardver (npr. optičke komponente, umjeravanje senzora), softver (algoritmi za poligonizaciju i interpolaciju), karakteristike objekta (materijal, hrapavost, reflektivnost), uvjeti okoliša (temperatura, vibracije, osvjetljenje) te ljudski faktor, odnosno stručnost i postupci operatera. Ovakav pristup omogućuje cjelovitije razumijevanje izvora pogrešaka i mjerne nesigurnosti u različitim realnim uvjetima primjene. Dodatno je prikazan važeći normativni okvir, uz naglasak na važnost korištenja referentnih artefakata u evaluaciji performansi i osiguravanju mjeriteljske sljedivosti. Teorijski dio rada također uključuje usporedbu optičkih 3D mjernih sustava s klasičnim koordinatnim mjernim uređajima i računalnom tomografijom, pri čemu su istaknute prednosti i ograničenja svakog pristupa u kontekstu točnosti, brzine i primjenjivosti na složene geometrije.

S obzirom na sve širu uporabu optičkih 3D mjernih sustava u tehničkim i industrijskim primjenama, u radu je provedena analiza njihove učinkovitosti kroz četiri reprezentativna slučaja primjene. Odabrani primjeri obuhvaćaju: povratno inženjerstvo i digitalnu

rekonstrukciju proizvoda, metrološku validaciju dimenzijskih značajki u industrijskom procesu, dokumentaciju arheoloških artefakata, te validaciju inovativnog koncepta temeljenog na integraciji 3D ispisa i investicijskog lijevanja (engl. *Investment casting*). Dobiveni rezultati pružaju uvid u širi kontekst primjene optičkih sustava i omogućuju vrednovanje njihove učinkovitosti pri skeniranju složenih objekata u raznolikim tehničkim i tehnološkim uvjetima.

Zbog složenosti optičkih 3D mjernih sustava i mnoštva parametara koji djeluju na rezultat mjerenja, izrađen je potpuni faktorski plan pokusa (engl. *Design of Experiments* – DOE) s ciljem identifikacije i kvantifikacije ključnih parametara. Plan pokusa obuhvatio je četiri ulazna faktora (hrapavost površine, nanošenje premaza, poligonizaciju i interpolaciju), a eksperimenti su provedeni u laboratorijskim uvjetima uz korištenje istog optičkog sustava i operatera, čime su obuhvaćene kritične faze mjernog procesa: priprema objekta i obrada podataka.

Za statističku analizu rezultata mjerenja primijenjena je analiza varijance (engl. *Analysis of Variance* – ANOVA), koja je omogućila identifikaciju značajnih faktora. Uz ANOVA analizu, za svaku geometrijsku značajku izračunat je koeficijent determinacije (R^2), čime se procijenila učinkovitost razvijenih modela. Dodatno, analizirani su normalni probabilistički grafikoni reziduala, kako bi potvrdili pretpostavku normalnosti i valjanost statističkog modela.

S obzirom na prethodno utvrđene dominantne faktore koji utječu na rezultate optičkih 3D mjerenja, bilo je nužno provesti sustavnu procjenu mjerne nesigurnosti radi kvantifikacije ukupne varijabilnosti mjernog procesa. Procjena mjerne nesigurnosti provedena je primjenom hibridnog pristupa koji je obuhvatio četiri komplementarne metodologije: eksperimentalnu, analitičku, numeričko-simulacijsku i Bayesovu. Analitički pristup prema smjernicama Vodiča za procjenu mjerne nesigurnosti (engl. *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* – GUM) korišten je za izgradnju matematičkog modela koji uključuje sve pojedinačne izvore nesigurnosti. Valjanost ovog analitičkog modela dodatno je numerički provjerena primjenom Monte Carlo simulacije (MCS, engl. *Monte Carlo Simulation* – MCS). Paralelno s tim, metoda prema normi ISO 15530-3, koja se temelji na eksperimentalnom pristupu korištenjem referentnog objekta, omogućila je praktičnu procjenu nesigurnosti u realnim uvjetima rada. Također, primijenjena je i Bayesova analiza kako bi se dobio potpuniji, probabilistički uvid u rezultate.

S ciljem vrednovanja obnovljivosti i kompatibilnosti rezultata mjerenja između različitih laboratorija, provedena je međulaboratorijska usporedba. Usporedba je izvedena na temelju

identičnog uzorka i unaprijed definiranog mjernog protokola u tri neovisna laboratorija. Primijenjeni su optički 3D mjerni sustavi istog principa rada. Kao osnova za usporedbu, referentne vrijednosti geometrijskih značajki utvrđene su visoko preciznim mjerenjem na trokoordinatnom mjernom uređaju (TMU, engl. *Coordinate Measuring Machine* – CMM). Za vrednovanje rezultata korišteni su statistički pokazatelji koji omogućuju kvantitativnu ocjenu odstupanja svakog optičkog sustava u odnosu na TMU referencu. Kao standardizirani kriteriji primijenjeni su z-vrijednost (engl. *z-score*) za ocjenu razine slaganja rezultata te faktor slaganja za vrednovanje kompatibilnosti s obzirom na procijenjene mjerne nesigurnosti.

Eksperimentalni dio istraživanja proveden je korištenjem opreme dostupne u Razvojno-inovacijskom centru AluTech, gdje je primijenjen optički 3D mjerni sustav ATOS Core 300 u kombinaciji sa softverskim paketom GOM Inspect Professional za digitalnu obradu i analizu mjernih podataka. U okviru međulaboratorijske usporedbe uključeni su dodatni optički mjerni sustavi i infrastruktura u suradnji s tvrtkama Topomatika d.o.o. i IVANAL d.o.o. te Fakultetom tehničkih nauka u Novom Sadu.

1.4 Znanstveni doprinos

Znanstveni doprinos ovog istraživanja temelji se na sveobuhvatnom ispitivanju tehničkih mogućnosti i mjerne sposobnosti optičkih 3D mjernih sustava u kontekstu zahtjevnih mjerenja objekata složene geometrije, s posebnim naglaskom na njihovu primjenu unutar okvira Industrije 4.0. Ključni doprinos rada je razvoj i primjena hibridne metodologije za procjenu mjerne nesigurnosti, koja je integrirala četiri komplementarna pristupa: eksperimentalni (prema normi ISO 15530-3), analitički (prema GUM smjernicama), numeričko-simulacijski (Monte Carlo metoda) i Bayesovu analizu. Ovakav sveobuhvatni pristup omogućio je ne samo vjerodostojnu kvantifikaciju ukupne mjerne nesigurnosti i međusobnu provjeru primijenjenih metoda, već i identificiranje te vrednovanje utjecaja ključnih parametara procesa. Doprinos se dodatno očituje u detaljnoj analizi različitih geometrijskih značajki, kojom su specificirani i vrednovani dominantni utjecajni faktori i izvori nesigurnosti pri mjerenju složenih površina. Dobiveni rezultati potvrđuju da, uz pravilnu pripremu objekta i optimizaciju parametara skeniranja, optički 3D sustavi mogu postići visoku razinu točnosti i pouzdanosti. Kroz međulaboratorijsku usporedbu potvrđena je obnovljivost rezultata mjerenja primijenjenih optičkih 3D mjernih sustava te pouzdanost u različitim operativnim uvjetima.

2. TEHNIČKE SPOSOBNOSTI I INDUSTRIJSKA PRIMJENA OPTIČKIH 3D MJERNIH SUSTAVA

2.1 Osnove optičkih 3D mjernih sustava

2.1.1 Klasifikacija mjernih metoda

U kontekstu mjerne tehnologije, koordinatne mjerne metode mogu se široko podijeliti na aktivne i pasivne metode. Ova podjela temelji se na prirodi interakcije između mjernog senzora i mjernog objekta.

Aktivne mjerne metode definiraju prostorni položaj trenutno promatrane mjerne točke na površini objekta relativno u odnosu na mjerni senzor. Ove metode mogu uključivati fizički kontakt, kao u slučaju trokoordinatnog mjernog uređaja, gdje se vrh kontaktnog ticala senzora dodiruje s površinom objekta. Također, aktivne metode mogu biti bez kontakta, koristeći različite oblike energije, poput svjetla ili ultrazvuka, za projiciranje na objekt i analizu povratnog signala. To omogućuje mjerenje bez fizičkog kontakta između senzora i objekta. Na primjer, optičke metode kao što su triangulacija, interferometrija i fazne metode koriste koherentno ili nekoherentno svjetlo za precizno mjerenje [15]. Nasuprot tome, pasivne mjerne metode omogućuju dobivanje mjernih informacija bez fizičkog kontakta s objektom. One se oslanjaju na postojeće optičke karakteristike vidljive na površini objekta, kao što su geometrijski pravilne markacije ili strukture površine. Primjeri pasivnih metoda uključuju objektni raster i klasičnu fotogrametriju, gdje se koristi optičke komponente za akviziciju slike objekta [15].

Optički 3D skeneri su sofisticirani uređaji koji omogućuju brzu i preciznu digitalizaciju fizičkih objekata. Ovi skeneri prikupljaju podatke o objektima i njihovoj okolini, omogućujući digitalno modeliranje ili analizu, te stvaranje cjelovitih ili djelomičnih 3D mjerenja objekta.

Postoje dvije osnovne kategorije 3D skenera: kontaktni i beskontaktni. Kontaktni skeneri djeluju putem fizičkog kontakta s površinom objekta. Ovi uređaji koriste mehaničke ruke s pričvršćenim sondama koje dodiruju objekt i bilježe podatke o njegovoj površini. Tradicionalni trokoordinatni mjerni uređaji su primjer kontaktnih skenera koji se koriste za vrlo točna i precizna mjerenja u industrijskim primjenama, često u kontroliranim uvjetima kako bi se osigurala točnost. Prijenosni trokoordinatni mjerni uređaji slični su tradicionalnim, ali su lakši

i prilagodljiviji, što ih čini prikladnima za upotrebu na različitim lokacijama. Ipak, zbog svoje prirode, kontakti skeneri mogu deformirati ili oštetiti osjetljive površine objekata [16].

Za razliku od kontaktnih sustava, beskontaktni skeneri prikupljaju podatke bez fizičkog dodira s objektom, koristeći različite oblike energije za analizu vanjske strukture. Među njima posebno se ističu skeneri sa strukturiranim svjetlom, koji projiciraju specifične uzorke na površinu predmeta i zatim snimaju način na koji se ti uzorci deformiraju. Na temelju tih deformacija moguće je izuzetno precizno rekonstruirati složene oblike i fine detalje, što ovu tehnologiju čini izuzetno korisnom za složene geometrije. Iako su vrlo precizni (u industrijskoj praksi postižu točnost mjerenja od 0,05 do 0,1 mm, dok napredniji sustavi ostvaruju preciznost mjerenja i do $\pm 10 \mu\text{m}$) skeneri sa strukturiranim svjetlom mogu zahtijevati više skeniranja kako bi se dobila cjelovita slika objekta. Beskontaktni skeneri uključuju laserske skenere, koji koriste laser za mjerenje udaljenosti i oblika, te skenere s projiciranim svjetlom, koji koriste svjetlo za smanjenje utjecaja okolišnog svjetla [16].

2.1.2 Optički 3D mjerni sustavi

Optički 3D mjerni sustavi predstavljaju suvremenu alternativu taktilnim metodama mjerenja. Oni koriste optičke senzore za brzo i precizno snimanje površine objekta. Ove metode omogućuju dobivanje velike gustoće točaka s površine objekta, što je posebno korisno kod mjerenja fleksibilnih i mekih materijala, gdje je fizički kontakt neprikladan. Međutim, optičke metode također imaju određena ograničenja, uključujući nižu točnost u usporedbi s taktilnim senzorima, ograničenu geometrijsku dostupnost pri snimanju dubokih i skrivenih površina i osjetljivost na optička svojstva površina, kao što su reflektivne ili prozirne površine [17].

Jedan od najčešće korištenih optičkih senzora u industrijskoj metrologiji je triangulacijski senzor, koji se često koristi za mjerenje složenih slobodnih površina (npr. karoserije automobila). Ovi senzori koriste princip triangulacije za određivanje točnih koordinata na površini objekta, emitirajući laserske zrake i mjereći refleksiju. Standardni laserski triangulacijski senzori mogu mjeriti udaljenost u mjernom rasponu po dubini od $\pm 5 \text{ mm}$ do $\pm 250 \text{ mm}$ pri frekvenciji od 40 kHz ili više, s relativnom točnošću od približno 0,01 % ukupnog mjernog raspona senzora. Proširenje ovog principa poznato je kao laserski linijski senzor. Umjesto jedne točke projicira se jedna linija na objekt [17]. Laserski skeneri koriste laser za emitiranje svjetlosti koja se odbija od površine objekta. Povratni signal se analizira kako bi se odredila udaljenost i oblik objekta. Ova tehnologija omogućuje brzo prikupljanje točaka s

visokom preciznošću, što je korisno u industrijskim primjenama. Laserski skeneri mogu snimati od 100 do 1000 slika po sekundi, omogućujući detaljnu analizu čak i pri velikim brzinama proizvodnje, što je posebno važno u automobilskom i zrakoplovnom sektoru [18].

Projekcija strukturiranog svjetla može se smatrati proširenjem 1D i 2D triangulacijskih senzora. Ova tehnologija omogućuje iznimno brzu digitalizaciju složenih površina uz prikupljanje visoke gustoće točaka, što ju čini znatno efikasnijom od tradicionalnih metoda mjerenja [10], [19]. U industrijskoj praksi, standardni skeneri sa strukturiranim svjetlom postižu točnost mjerenja od približno 0,05 mm do 0,1 mm, što je sasvim dovoljno za brojne standardne industrijske zadatke, poput povratnog inženjerstva, kontrole kvalitete u aditivnoj proizvodnji te dimenzionalne inspekcije plastičnih komponenti [19] [20].

Fotogrametrija je još jedna optička mjerna metoda koja se koristi za rekonstrukciju i određivanje geometrije objekata putem spajanja dvodimenzionalnih slika snimljenih iz različitih kutova, često primjenom automatiziranih višeslikovnih metoda za 3D rekonstrukciju [21]. Ova metoda omogućuje pasivnu triangulaciju te je iznimno korisna za beskontaktno praćenje dinamičkih procesa i deformacija u inženjerskoj praksi, kao što su kontinuirano praćenje deformacija konstrukcije mostova [22] ili snimanje 3D pomaka i deformacija lopatica vjetroturbina tijekom njihova redovitog rada [23]. Međutim, optički 3D mjerni sustavi i fotogrametrija nisu bez svojih ograničenja. Posebno su osjetljivi na površine koje nemaju izraženu teksturu, kao i na visoko reflektivne ili prozirne materijale, što znatno otežava točnu 3D rekonstrukciju [24]. Nadalje, neobrađeni podaci u obliku oblaka točaka dobiveni optičkim sensorima neizbježno sadrže određenu razinu šuma uzrokovane pogreškama pri mjerenju ili ograničenjima senzora, zbog čega je nužno provesti napredne postupke obrade i filtriranja [25].

Optički 3D mjerni sustavi nalaze široku primjenu koja, osim samog mjerenja, obuhvaća prototipiranje, povratno inženjerstvo, kontrolu kvalitete i dokumentiranje kulturne baštine. Ove tehnologije omogućuju brzu i točnu analizu, što je ključno za optimizaciju proizvodnih procesa i osiguravanje visokih standarda kvalitete. Na primjer, 3D skeniranje je često korišteno za dokumentiranje složenih kulturnih artefakata, omogućujući detaljnu analizu i restauraciju uz minimalan rizik od oštećenja originalnih materijala [13, 14, 26, 27]. Optički 3D mjerni sustavi pružaju visoku preciznost i fleksibilnost u mjerenju, čineći ih nezamjenjivim alatom u mnogim industrijskim područjima. Iako postoje izazovi povezani s njihovom primjenom, kontinuirani napredak u tehnologiji donijet će daljnje poboljšanje njihove točnosti i učinkovitosti, čime se otvaraju nove mogućnosti za njihovu primjenu.

2.1.3 Usporedba optičkih 3D mjernih sustava s TMU i CT mjernim sustavima

Optički 3D mjerni sustavi, trokoordinatni mjerni uređaji i računalna tomografija (engl. *Computed Tomography* – CT) predstavljaju tri temeljne tehnologije u suvremenoj metrologiji, pružajući različite prednosti i suočavajući se s različitim izazovima. Svaka od ovih tehnologija koristi specifične metode za prikupljanje podataka o geometriji objekata, što omogućava njihovu primjenu u raznim industrijskim sektorima kao što su automobilska industrija, zrakoplovstvo, elektronika i medicina.

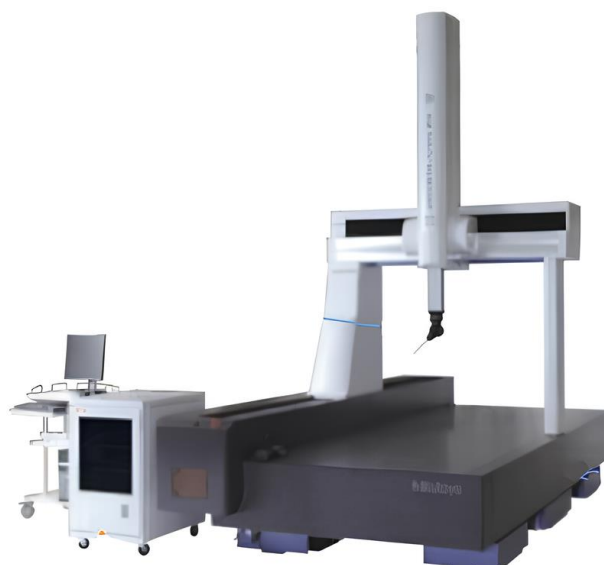
- Optički 3D mjerni sustavi

Optički 3D mjerni sustavi koriste razne metode, uključujući lasersko skeniranje, projekciju strukturiranog svjetla i fotogrametriju, kako bi brzo i precizno prikupljali podatke o površini objekata. Ovi sustavi su posebno korisni zbog svoje beskontaktnosti, što ih čini idealnim za mjerenje osjetljivih, fleksibilnih ili mekih materijala. Optički sustavi mogu generirati oblak točaka (engl. *point clouds*) u kratkom vremenu, što ih čini pogodnima za aplikacije poput kontrole kvalitete, povratnog inženjeringa i prototipiranja složenih geometrija [17, 28, 29].

Međutim, optički 3D sustavi imaju svoja ograničenja. Na primjer, njihova točnost može biti kompromitirana zbog površinskih svojstava kao što su refleksivnost, boja ili prozirnost materijala. Ovi faktori mogu uzrokovati pogreške u podacima, što zahtijeva dodatnu obradu kako bi se dobili precizni rezultati [17, 30].

- Trokoordinatni mjerni uređaji

Trokoordinatni mjerni uređaji su tradicionalni instrumenti u dimenzijskoj metrologiji, koristeći mehaničke sonde za kontaktno mjerenje objekata. Ove sonde, koje mogu biti opremljene različitim senzorima kao što su mehanički, laserski ili optički, omogućuju mjerenje složenih profila s visokom preciznošću. Trokoordinatni mjerni uređaji su poznati po svojoj sposobnosti da postignu točnost u mikrometarskom rasponu, a u nekim slučajevima čak i nanometarsku preciznost [18, 31]. Prikaz klasičnog trokoordinatnog mjernog uređaja dan je na slici 2.1.



Slika 2.1. Trokoordinatni mjerni uređaj [17]

Glavni nedostatak TMU-ova je njihova relativna sporost u usporedbi s optičkim sustavima. Proces skeniranja može biti dugotrajan, posebno kada je potrebno mjeriti velik broj točaka ili složene površine. Osim toga, kontaktna priroda TMU-a znači da je ova tehnologija manje prikladna za mjerenje osjetljivih ili lako oštećivih materijala. Kontakt sonde može izazvati fizičku promjenu ili oštećenje na površini mjerenog objekta, što je značajan problem kada se radi o vrijednim ili delikatnim predmetima, poput povijesnih artefakata [17, 18, 31].

- Računalna tomografija

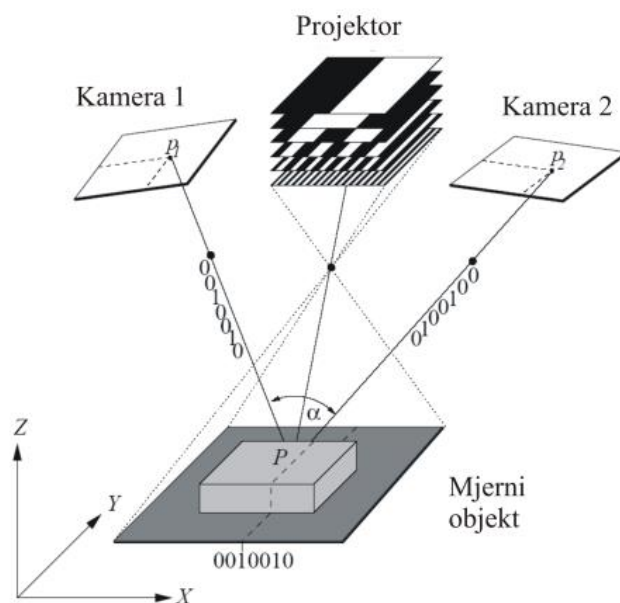
Računalna tomografija koristi rendgensko zračenje za stvaranje detaljnih 3D slika unutarnjih i vanjskih struktura objekata. Ovi uređaji su posebno korisni za mjerenje unutarnjih značajki koje su nepristupačne drugim metodama, kao što su unutarnje šupljine, poroznost materijala i deformacije koje se javljaju tijekom proizvodnih procesa [29]. Prednosti CT tehnologije uključuju mogućnost neinvazivnog ispitivanja i analize unutarnjih struktura. To omogućuje sveobuhvatnu procjenu kvalitete proizvoda, posebno u sektorima kao što su automobilska industrija i zrakoplovstvo, gdje su zahtjevi za točnošću i sigurnošću strogi. Međutim, CT skeneri su skupi i zahtijevaju specijalizirane uvjete rada, uključujući zaštitu od zračenja. Također, točnost mjerenja može biti ograničena pojavom artefakata u rekonstrukciji slike, osobito pri skeniranju objekata sa složenom geometrijom ili onih koji su sastavljeni od materijala značajno različitih gustoća [30].

- Usporedba i primjene

U industriji, izbor između optičkih 3D mjernih sustava, TMU-a i CT-a često ovisi o specifičnim zahtjevima primjene (npr. potrebna točnost, vrsta materijala i složenost mjerenih površina). Optički sustavi su idealni za brzo prikupljanje podataka i analizu složenih površina, ali su osjetljivi na površinska svojstva. TMU-ovi pružaju visoku preciznost i točnost, ali su sporiji i manje prikladni za osjetljive materijale. CT skeneri nude jedinstvenu sposobnost mjerenja unutarnjih struktura, ali su skupi i tehnički zahtjevni [17, 28–30, 32]. Na primjer, u zrakoplovnoj industriji, gdje je preciznost ključna, TMU-ovi se često koriste za mjerenje složenih komponenti poput lopatica motora. Međutim, za kompleksne komponente većih gabarita s unutarnjim geometrijama (poput lopatica turbina ili blokova motora), industrijski CT skeneri omogućuju potpunu i neinvazivnu analizu cjelokupnih unutarnjih i vanjskih struktura [33]. Ipak, uspješnost takvog skeniranja izravno je uvjetovana time da dimenzije i debljina materijala predmeta ne premašuju ograničenja mjernog volumena detektora i maksimalnu moć prodiranja rendgenskog zračenja [34]. S druge strane, optički 3D skeneri su korisni za brzu provjeru i povratno inženjerstvo, omogućujući brzo prilagođavanje i razvoj novih komponenti [29, 35]. Iako svaka od ovih tehnologija ima svoje specifične prednosti i ograničenja, njihov zajednički razvoj i primjena omogućuju napredak u preciznoj metrologiji. Kombinacija ovih tehnologija često pruža najopsežnije i najpreciznije rezultate, omogućujući industrijama da održe visoke standarde kvalitete i sigurnosti u svojim proizvodnim procesima.

2.2 Princip rada i tehnologije optičkih 3D mjernih sustava

Optički 3D mjerni sustavi koriste tehnologiju triangulacije za precizno mjerenje geometrije objekata (slika 2.2.). Triangulacija je metoda koja se oslanja na projiciranje uzorka svjetlosti na površinu objekta i analizu deformacija tog uzorka kako bi se odredile točke na površini objekta. Ova metoda koristi kombinaciju projektora i kamere (ili više njih) kako bi se osigurala točnost i preciznost mjerenja. U sustavu triangulacije, projektor projicira svjetlosni uzorak na objekt, dok kamere snimaju kako se taj uzorak deformira na površini objekta. Deformacije koje nastaju zbog promjena u topografiji površine, koriste se za izračunavanje točnih koordinata točaka na površini. Proces započinje umjeravanjem sustava kako bi se osigurala preciznost u mjerenju. Umjeravanje uključuje određivanje unutarnjih i vanjskih orijentacijskih parametara kamere i projektora, što omogućuje preciznu rekonstrukciju 3D geometrije objekta [36, 37].



Slika 2.2. Princip rada optičkih 3D mjernih sustava sa strukturiranim svjetlom [14]

Projektor u sustavu triangulacije može koristiti različite vrste svjetlosnih uzoraka, uključujući linijske, rešetkaste ili sinusoidne uzorke. Ovi uzorci pomažu u jednoznačnom određivanju koordinata točaka na objektu. Na primjer, u slučaju linijskog uzorka, kamera snima deformaciju linija dok prelaze preko površine objekta. Ova deformacija omogućuje izračunavanje udaljenosti između objektnih točaka i sustava snimanja, čime se dobivaju 3D koordinate [16, 37]. Jedan od glavnih izazova u ovoj tehnologiji je problem korespondencije, koji uključuje prepoznavanje odgovarajućih točaka na slikama snimljenim s različitih kutova. To se rješava umjeravanjem sustava i korištenjem složenih algoritama za obradu slike. Projektor igra ključnu ulogu u osiguravanju jednoznačnosti uzoraka, posebno kada se koriste dvije kamere. Iako projektor ne mora biti precizno umjeren, on mora osigurati jasnu definiciju projekcijskih zraka kako bi se olakšalo prepoznavanje točaka [36, 38].

2.3 Područja primjene optičkih 3D mjernih sustava

U industrijskoj praksi, optički 3D mjerni sustavi se sve češće koriste za provjeru dimenzijske točnosti i oblika složenih dijelova. Tradicionalne metode, poput trokoordinatnih mjernih uređaja, iako vrlo precizne, mogu biti ograničene kada je riječ o mjerenju složenih geometrija ili krhkih objekata. Nasuprot tome, 3D skeneri omogućuju brzo mjerenje čak i vrlo složenih oblika, pružajući visoku gustoću podataka i neovisnost o krutosti dijelova [39].

- Automobilska industrija

U automobilskoj industriji, optički 3D mjerni sustavi koriste se za detaljnu inspekciju i kontrolu kvalitete komponenti. Ovi sustavi omogućuju preciznu digitalizaciju dijelova, što je ključno za procese kao što su povratno inženjerstvo i razvoj novih proizvoda. Na primjer (slika 2.3.), u proizvodnji automobilskih plastičnih elemenata, zahtjevi za geometrijsko kotiranje i toleriranje (engl. *Geometric Dimensioning and Tolerancing* – GD&T) koriste se za provjeru točnosti dimenzija, osiguravajući da dijelovi ispunjavaju stroge standarde kvalitete [27, 40].



Slika 2.3. GD&T inspekcija čeličnog kalupa [16]

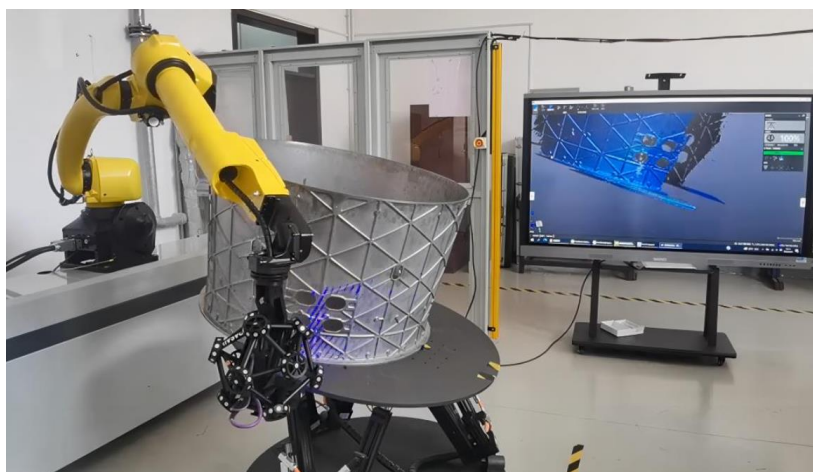
Usporedna istraživanja komercijalnih i industrijskih skenera na primjeru plastičnih dijelova ukazuju na stalnu potrebu za unapređenjem preciznosti mjernih sustava na specifičnim tržištima [40]. Također, kod specijaliziranih procesa poput kombiniranog oblikovanja lima i masivnog oblikovanja (engl. *sheet-bulk metal forming*) pri izradi zubaca zupčanika, izbor senzora i precizno pozicioniranje pokazali su se kritičnim čimbenicima za postizanje tražene točnosti [41].

U ljevaonicama, poput Volkswagen Poznań, optički 3D skeneri koriste se za mjerenje odljevaka i jezgri, omogućujući brzo i precizno određivanje dimenzija. Ovi sustavi pomažu u optimizaciji proizvodnih procesa, smanjujući vrijeme inspekcije i povećavajući preciznost [42]. Također, u inspekciji elemenata prijenosnika snage (poput zupčanika i vratila unutar mjenjačkih kutija vozila), 3D skeneri omogućuju precizno mjerenje i analizu specifičnih geometrijskih

parametara, kao što su odstupanja profila zubaca, čime se osigurava dugovječnost i funkcionalnost dijelova [43].

- Zrakoplovna industrija

Zrakoplovna industrija koristi optičke 3D mjerne sustave za inspekciju i kontrolu kvalitete složenih komponenti, kao što su dijelovi motora i trupa zrakoplova. Ovi sustavi omogućuju detaljnu analizu i praćenje deformacija, što je ključno za osiguravanje sigurnosti i pouzdanosti zrakoplova. Primjena robotskih sustava opremljenih optičkim 3D skenerima omogućuje automatsku inspekciju, smanjujući vrijeme potrebno za inspekciju velikih i složenih dijelova [35, 44]. Na slici 2.4. prikazan je eksperimentalni ispitni sustav za dinamičko 3D skeniranje, koji se sastoji od 3D skenera, optičkog uređaja za praćenje, robotske ruke te mjerne platforme sa šest stupnjeva slobode gibanja. Ovaj postav omogućuje kontinuirano mjerenje i automatsko prilagođavanje položaja pri skeniranju velikih zrakoplovnih komponenti.



Slika 2.4. Primjena robotskih sustava opremljenih optičkim 3D skenerima [34]

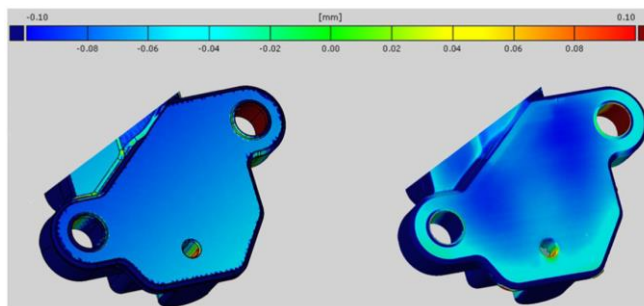
Najnovija istraživanja iz 2024. godine potvrđuju da primjena dinamičkih 3D skenera na velikim zrakoplovnim komponentama može povećati učinkovitost inspekcije za više od 75 %, uz istodobno poboljšanje pokrivenosti oblaka točaka za 18% [35]. Pritom se učinkovitost u ovom tehnološkom kontekstu odnosi prvenstveno na brzinu i automatizaciju procesa mjerenja te eliminaciju potrebe za dugotrajnim ručnim prilagodbama položaja obratka.

U proizvodnji zupčanika, optički 3D mjerni sustavi koriste se za precizno određivanje geometrijskih parametara, poput odstupanja profila zuba i pogrešaka bočnih površina. U zahtjevnim primjenama, kao što je automatizirana inspekcija stožastih zupčanika u avionskim

mjenjačima, optički 3D skeneri prikupljaju tisuće ili čak milijune mjernih točaka. Mogućnost analize cijelog elementa na temelju tako visoke gustoće podataka daje potpunu sliku o točnosti njegove izrade u odnosu na nominalni model izrađen računalom potpomognutim oblikovanjem (engl. *Computer Aided Design – CAD*) [45].

- Ljevačka industrija

Optički 3D mjerni sustavi u ljevačkoj industriji omogućuju preciznu inspekciju i kontrolu kvalitete odljevaka, posebno kod aluminijskih legura. Sustavi poput TRITOP i ATOS koriste se za mjerenje cilindričnih dijelova i složenih površina, detekciju grešaka i provjeru točnosti kalupa usporedbom s CAD modelima [42, 44]. Razvoj automatiziranih mjernih sustava u kombinaciji s industrijskim robotima povećava preciznost, ponovljivost i učinkovitost inspekcije, primjenom u metodama poput investicijskog lijevanja, stalnih kalupa i tlačnog lijevanja [45]. Pri tlačnom lijevanju aluminija optički skeneri omogućuju analizu deformacija odljevaka nastalih uslijed hlađenja. Na temelju tih podataka provodi se inverzna korekcija CAD modela kalupa. Zahvaljujući takvoj optimizaciji kalupa, novi odljevci postižu visoku razinu ravnosti i dimenzijske točnosti izravno u procesu lijevanja, čime se eliminira potreba za njihovom naknadnom strojnom obradom [46]. Primjer usporedbe odljevka s CAD modelom prikazan je na slici 2.5.



Slika 2.5. Usporedba izmjerenog odljevka s CAD modelom – vizualizacija odstupanja u postupku korekcije kalupa [37]

- Medicina

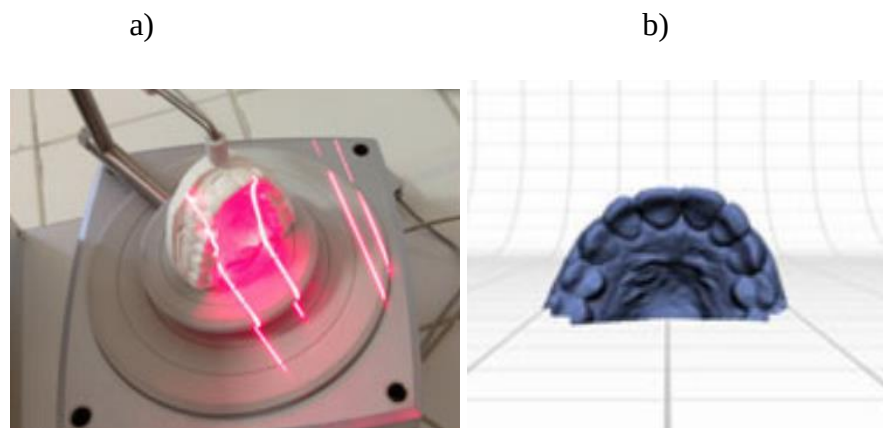
U medicini, 3D optički skeneri imaju ključnu ulogu u segmentaciji i modeliranju koštanih struktura, posebice u biomehaničkim analizama, izradi prilagođenih implantata i predoperativnom planiranju. Usporedba CT i optičkih 3D površinskih skenova bedrene kosti (femura) iz sedam laboratorija pokazala je varijacije u točnosti geometrije, s većim

odstupanjima u području vrata i velikog trohantera kosti, što naglašava važnost metode segmentacije i vještina operatera [47]. U pedijatriji, skeneri strukturiranog svjetla koriste se za kvantifikaciju deformiteta prsnog koša, omogućujući praćenje tretmana bez zračenja, s visokom pouzdanošću mjerenja i povećanom efikasnošću kliničkog rada [48].

U medicinskoj primjeni, optički 3D mjerni sustavi koriste se i za izradu personaliziranih implantata, precizno mapiranje anatomskih struktura te integraciju s virtualnom stvarnošću u svrhu poboljšanja kliničkih postupaka. Sustavna analiza primjene 3D skeniranja u medicini dodatno potvrđuje da precizna digitalizacija ne služi samo vizualizaciji, već izravno omogućuje izradu učinkovitijih i dugovječnijih implantata [6]. Sustavi omogućuju brzu digitalizaciju tijela pacijenta, što je osobito važno u rehabilitaciji i individualiziranom pristupu liječenju. Bibliometrijska analiza ukazuje na sve veći broj znanstvenih radova koji se bave ovom temom, potvrđujući rastući interes za primjenu 3D skeniranja u medicini [6, 49, 50].

- Dentalna industrija

U dentalnoj medicini, optički 3D skeneri postali su neizostavni alat za stvaranje digitalnih replika usne šupljine pacijenata, što je ključno za planiranje tretmana, dijagnostiku i izradu dentalnih aparata. Osim same izrade, digitalne replike u stomatologiji postaju ključan alat u edukaciji i naprednom planiranju kompleksnih kirurških zahvata [49]. Ovi skeneri omogućuju precizno skeniranje zuba i desni, neophodno za dizajn prilagođenih dentalnih implantata i krunica. Istraživanja su pokazala da priprema modela zuba može značajno utjecati na točnost prikupljenih podataka. U ovom kontekstu, skeneri bijelog svjetla i crvenih lasera korišteni su za digitalizaciju simuliranih krunica s različitim razinama konvergencije, što je pomoglo u razumijevanju utjecaja pripreme kalupa na točnost [51, 52]. Primjeri skeniranja i rezultirajuće digitalne replike prikazani su na slici 2.6.



Slika 2.6. a) Optičko 3D skeniranje dentalnog modela pomoću crvenog lasera b) Digitalna 3D replika zubnog luka generirana nakon skeniranja [43]

Optički 3D skeneri pokazali su se vrlo korisnima u forenzičkoj stomatologiji, osobito pri analizi otisaka ugriza. Usporedba kontaktnog i laserskog 3D skenera pokazala je da nema statistički značajnih razlika u nesigurnosti mjerenja između tih metoda, što potvrđuje pouzdanost 3D skeniranja u forenzičkoj praksi. Ova tehnologija povećava preciznost analize i smanjuje subjektivni utjecaj ispitivača [52].

- Kulturna baština

Jedna od ključnih primjena optičkih 3D mjernih sustava je u digitalizaciji muzejskih zbirki. Ove tehnologije omogućuju precizno bilježenje dimenzija i površinskih karakteristika artefakata, što je ključno za njihove digitalne arhive i reprodukciju. Digitalne replike mogu se koristiti za izradu fizičkih replika putem aditivnih metoda, poput 3D ispisa, što je osobito korisno za očuvanje originalnih predmeta koji su osjetljivi na oštećenja ili imaju visoku povijesnu vrijednost [53]. Optički 3D skeneri omogućuju preciznu rekonstrukciju oštećenih ili nedostajućih dijelova povijesnih građevina. Korištenjem 3D skeniranja i cementnog morta kao materijala za 3D ispis, moguće je reproducirati ukrasne elemente zgrada s visokom preciznošću. Na primjer, istraživanje provedeno na Huazhong Sveučilištu za znanost i tehnologiju u Kini pokazalo je uspješnu rekonstrukciju oštećenog kamenog postolja koristeći ovu metodu, čime je potvrđena njena praktičnost u restauraciji povijesnih građevinskih elemenata [3].

U području paleontologije, 3D skeneri omogućuju detaljnu digitalizaciju velikih paleontoloških uzoraka, poput kostiju dinosaura. Korištenje uređaja poput Kinect senzora omogućuje brzo i troškovno učinkovito skeniranje velikih fosila s visokom razlučivošću. Ova metoda je

primijenjena na skeniranje lubanje *Tyrannosaurus rexa*, omogućujući preciznu digitalnu repliku fosila, što je od velike važnosti za muzeje i istraživače u paleontologiji [54].

Optički 3D skeneri također su ključni u arheologiji, gdje se koriste za digitalizaciju arheoloških uzoraka poput noževa i kamenih alata. Ovi skeneri omogućuju neinvazivno mjerenje i izradu digitalnih modela, što je važno za očuvanje i daljnje proučavanje arheoloških nalaza [55].

- Brza izrada prototipa

Optički 3D mjerni sustavi i 3D ispis omogućuju preciznu digitalizaciju i fizičku reprodukciju objekata, što poboljšava točnost, skraćuje vrijeme izrade i otvara nove mogućnosti u medicini, dentalnoj industriji, geotehničkom inženjerstvu i izradi prototipova. U geotehničkom inženjerstvu koriste se za reprodukciju prirodnih stijenskih spojeva putem CAD-a i izrade kalupa, čime se smanjuju eksperimentalne pogreške i povećava učinkovitost. [56]. Primjenom metoda 3D skeniranja i preciznog graviranja u serijskoj proizvodnji prirodnih stijenskih spojeva postignuta je visoka geometrijska vjernost, što osigurava stabilne i ponovljive rezultate pri ispitivanjima smicanja [57]. Pri evaluaciji komponenti izrađenih tehnologijom ekstruzije materijala (MEX), čak i troškovno povoljniji 3D skeneri pokazuju zadovoljavajuću ponovljivost i točnost u detekciji sitnih geometrijskih detalja [58]. Ipak, u procesu povratnog inženjerstva, koji omogućuje digitalizaciju složenih dijelova uključujući i unutarnje strukture komponenti, i dalje su prisutni izazovi vezani uz optimizaciju obrade oblaka točaka, pri čemu kvaliteta ulaznih podataka ostaje primarni preduvjet za pouzdanu kontrolu proizvodnje [59].

Sinergija optičkih 3D mjernih sustava i aditivne proizvodnje unutar procesa brze izrade prototipa omogućuje razvoj visokopersonaliziranih rješenja. Tako se, primjerice, ovaj proces koristi za izradu prilagođenih ortoza, gdje skeniranje tijela i CAD dizajn rezultiraju bržim i troškovno povoljnijim rješenjima u usporedbi s tradicionalnim metodama [60]. Sličan pristup primjenjuje se i u naprednim biomedicinskim istraživanjima, gdje optičko 3D mjerenje služi za izradu CAD modela lezija, što je temeljni preduvjet za precizno 3D bioprintanje i kontrolu formiranja modela za rekonstrukciju hrskavice i kostiju [61].

U aditivnoj proizvodnji, optička metrologija i industrijska CT tehnologija osiguravaju točnu kontrolu kvalitete dijelova, pri čemu skeneri poput „Solutionix Rexcan“ pokazuju visoku preciznost [62]. U izradi proteza, digitalno skeniranje, CAD-CAM dizajn i stereolitografsko printanje voska omogućuju bržu, estetski prihvatljiviju i računalno potpomognutu proizvodnju

[63]. Integracija ovih tehnologija donosi inovativna rješenja za kompleksne izazove u inženjerstvu, medicini i izradi prototipova.

Budućnost 3D skeniranja uključuje povećanje točnosti i preciznosti, sposobnost stvaranja složenih oblika i učinkovitije planiranje prostora, poput digitalizacije cjelokupnih proizvodnih pogona radi stvaranja digitalnih blizanaca tvornica, što inženjerima omogućuje virtualnu optimizaciju razmještaja strojeva, prilagodbu proizvodnih linija i sprječavanje kolizija nove opreme s postojećom infrastrukturom [64]. Ove tehnologije postaju sve važnije u inženjerstvu, proizvodnji i društvenim primjenama, osiguravajući precizno i učinkovito prikupljanje podataka za različite svrhe.

2.4 Analiza mjerne sposobnosti i procesa digitalne rekonstrukcije kroz odabrane industrijske slučajeve primjene

Kako bi se teorijske spoznaje o tehničkim sposobnostima optičkih 3D mjernih sustava povezale sa stvarnim zahtjevima industrije, u ovom su potpoglavlju prikazani slučajevi primjene iz suvremene inženjerske prakse. Svrha prikaza ovih slučajeva primjene nije isključivo demonstracija primjenjivosti tehnologije, već prvenstveno identifikacija specifičnih mjeriteljskih izazova i potencijalnih izvora nesigurnosti koji se javljaju u realnim radnim uvjetima. Kroz analizu četiriju karakterističnih primjera (mjeriteljsku rekonstrukciju objekata bez nominalnog CAD modela, dimenzijsku inspekciju alata složene unutarnje geometrije, evaluaciju arheoloških objekata sa slobodnim površinama te kontrolu u hibridnim aditivno-ljevačkim procesima) detektirani su ključni problemi pri digitalizaciji. Identificirani izazovi, poput utjecaja refleksije materijala, nužnosti primjene matirajućeg premaza, naknadne obrade podataka, izravno ukazuju na potrebu za sustavnom znanstvenom evaluacijom. Time ovi praktični primjeri predstavljaju temelj i polazište za detaljno eksperimentalno istraživanje i procjenu mjerne nesigurnosti provedenu u nastavku rada.

2.4.1 Rekonstrukcija objekata bez nominalnog CAD modela

Povratno inženjerstvo predstavlja tipičan primjer primjene optičkih 3D mjernih sustava u situacijama kada izvorna tehnička dokumentacija ili CAD model nisu dostupni. U takvim slučajevima cilj mjerenja nije samo digitalizacija geometrije, već i rekonstrukcija parametarskog modela koji može poslužiti za daljnju analizu ili proizvodnju.

Kao karakterističan primjer analizirana je digitalna rekonstrukcija složenog proizvoda (slika 2.7.) korištenjem optičkog 3D skeniranja, pri čemu je objekt mjerenja element s izraženim zakrivljenim površinama i specifičnom unutarnjom geometrijom (mina kalibra 82 mm M74). Budući da su unutarnje strukture ovakvih objekata optički nedostupne, uzorak je bilo nužno uzdužno prerezati te ga adekvatno pripremiti za digitalizaciju. Zbog specifičnih svojstava tamne i reflektivne metalne površine, priprema je obuhvaćala nanošenje matirajućeg premaza radi smanjenja refleksije svjetla.



Slika 2.7. Izvorni oblik ispitnog uzorka s vidljivom unutarnjom geometrijom

Ovakvi objekti predstavljaju zahtjevan mjerni zadatak zbog potrebe za potpunim obuhvatom geometrije i visokom gustoćom mjernih točaka. S metrologijskog aspekta, ovaj tip primjene karakteriziraju sljedeći ključni izazovi, koji su izravno identificirani tijekom analize ovog uzorka:

- Geometrijska složenost – prisutnost slobodnih i zakrivljenih površina zahtijeva visoku rezoluciju mjerenja (veliku gustoću točaka) i povećava osjetljivost na pogreške aproksimacije tijekom poligonizacije i obrade podataka.
- Ograničena dostupnost unutarnjih površina – za snimanje unutarnje geometrije potrebno je osigurati pristup mjernom sustavu, što često zahtijeva dodatne fizičke zahvate na objektu, poput spomenutog uzdužnog piljenja.
- Optička svojstva površine – reflektivne površine otežavaju rad optičkim senzorima te zahtijevaju primjenu mat premaza, što predstavlja dodani sloj materijala koji može utjecati na konačni rezultat mjerenja.

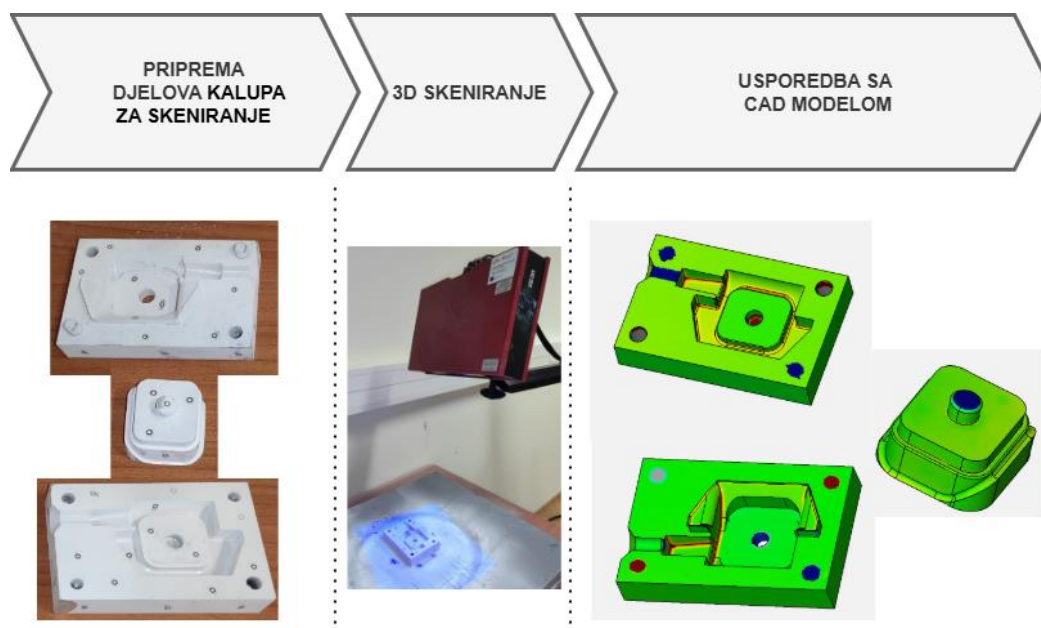
Kvaliteta konačnog CAD modela je izravno uvjetovana točnošću dobivene STL mreže. Budući da STL format predstavlja samo poligonalnu aproksimaciju površine generiranu unutar pripadajućeg softvera skenera, svako odstupanje nastalo tijekom digitalizacije i poligonizacije izravno se prenosi u naknadni postupak rekonstrukcije. Iako se sam proces generiranja parametarskog modela (primjerice, izvlačenje kontura i rotacijskih volumena u neovisnom CAD softveru) odvija izvan optičkog 3D mjernog sustava, pouzdanost te rekonstrukcije izravno ovisi o kvaliteti dobivenog STL modela, a time i o mjernoj nesigurnosti optičkog 3D mjernog sustava.

2.4.2 Optička dimenzijska inspekcija objekata sa složenom unutarnjom geometrijom

Dimenzijska inspekcija alata za brizganje voska, koji se primjenjuje u visokozahtjevnim procesima investicijskog lijevanja (engl. *Investment casting*), predstavlja karakterističan primjer mjeriteljske evaluacije objekata sa složenom unutarnjom geometrijom. S obzirom na to da svako odstupanje izravno utječe na kvalitetu voštanog modela i konačnog odljevka, zahtjevi za točnošću ovakvih alata su strogi.

Ovaj industrijski objekt predstavlja specifičan mjeriteljski zadatak zbog svoje složene unutarnje geometrije. Skeniranje ovakvih oblika zahtijeva obuhvaćanje kritičnih i teško dostupnih značajki, pri čemu se izazovi očituju na strmim površinama i uskim otvorima. Na takvim mjestima otežano je optimalno pozicioniranje senzora i prodiranje svjetlosti, što izravno povećava rizik od rasipanja mjernih podataka.

Proces mjeriteljske evaluacije navedenog alata obuhvaća pripremu ispitnog uzorka, optičku 3D digitalizaciju te analizu odstupanja u odnosu na nominalni CAD model. Nakon provedene digitalizacije, dobiveni podaci prostorno se poravnavaju s referentnim modelom, čime se omogućuje identifikacija kritičnih područja putem kromatskih mapa odstupanja. Navedeni postupak evaluacije uz vizualizaciju geometrijskih odstupanja na mjernom uzorku prikazan je na slici 2.8.



Slika 2.8. Dimenzijska inspekcija alata za brizganje voska

Rezultati provedene analize odstupanja pokazali su da se većina površina alata nalazi unutar dopuštene tolerancije od $\pm 0,1$ mm, čime je potvrđena sukladnost proizvodnog postupka sa zadanim specifikacijama. Međutim, vizualizacijom putem kromatskih mapa identificirana su određena odstupanja na sljedećim specifičnim dijelovima:

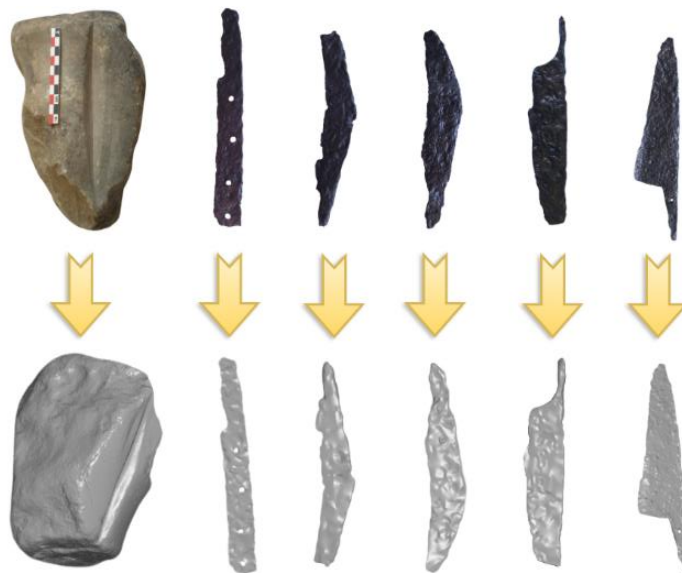
- Montažni otvori – zabilježena su manja odstupanja u dimenzijama otvora koja bi mogla utjecati na pravilno zatvaranje kalupa i dovesti do neusklađenosti pri brizganju voska.
- Unutarnje konture alata – uočene su razlike u geometriji određenih unutarnjih površina, što može uzrokovati odstupanja u dimenzijama konačnog vošanog modela.
- Jezgra alata – ovaj dio pokazao je najveća odstupanja koja mogu izravno utjecati na formiranje unutarnjih značajki odljevka te zahtijevati dodatne korekcije.

Iako vizualizirana odstupanja jasno lociraju nesukladnosti u proizvodnji, važno je uzeti u obzir da su upravo ove složene značajke (uski provrti i strme površine) područja na kojima do izražaja dolaze osnovna tehnička ograničenja optičke metode (hardvera). Otežana vizualna dostupnost i smanjeno prodiranje strukturiranog svjetla na tim specifičnim mjestima unose određenu razinu mjerne nesigurnosti u prikazani rezultat.

2.4.3 Optička 3D digitalizacija objekata slobodne geometrije u arheologiji

Arheološka dokumentacija i konzervacija igraju ključnu ulogu u očuvanju kulturne baštine, zahtijevajući visoku razinu detalja za preciznu rekonstrukciju i daljnju analizu. Pri evaluaciji ovakvih objekata, tradicionalne taktilne metode mjerenja (poput trokoordinatnih mjernih uređaja) često su neprikladne jer fizički kontakt mjernog ticala može izazvati nepovratna oštećenja na osjetljivim i delikatnim površinama povijesnih artefakata. Upravo u tome leži ključna prednost optičkih 3D mjernih sustava, njihova beskontaktna priroda omogućuje sigurnu digitalizaciju bez rizika od fizičke degradacije uzorka.

Proces digitalizacije ovakvih objekata u pravilu započinje pripremom uzoraka. Specifična tamna ili reflektirajuća svojstva starih materijala često zahtijevaju mjeriteljsku pripremu. Ta priprema uobičajeno obuhvaća nanošenje tankog sloja matirajućeg premaza radi smanjenja refleksije svjetla, te postavljanje referentnih točaka. Optičkim skenerom zatim se prikuplja oblak točaka, koji se naknadnom softverskom obradom i poligonizacijom pretvara u konačne 3D modele u STL formatu. Karakterističan proces skeniranja i rezultati digitalizacije arheoloških uzoraka prikazani su na slici 2.9.



Slika 2.9. Rezultati digitalizacije arheoloških uzoraka

Pri digitalizaciji, ovakvi objekti predstavljaju specifičan izazov zbog svoje nepravilne, slobodne geometrije i specifičnih optičkih svojstava starih materijala koji zahtijevaju korištenje premaza za matiranje. Za razliku od industrijskih primjena gdje se rezultati skeniranja redovito uspoređuju s projektiranim modelima, u arheologiji takva referenca ne postoji. Stoga cilj

ovakvih zadataka nije provjera dimenzijskih odstupanja, već postizanje maksimalne vjernosti digitalne rekonstrukcije zatečenog stanja. Uspješnost tog procesa izravno ovisi o gustoći i kvaliteti prikupljenog oblaka točaka, kao i o algoritmima naknadne softverske obrade koji taj oblak pretvaraju u konačnu poligonalnu mrežu.

Rezultati provedenih skeniranja potvrđuju visoku kvalitetu generiranih 3D modela, koji omogućuju detaljne virtualne inspekcije i izradu fizičkih replika bez potrebe za daljnjim rukovanjem originalnim artefaktima. Provedena analiza pokazala je da mjeriteljska priprema, koja uključuje primjenu matirajućeg premaza i referentnih točaka, ne narušava integritet osjetljivih arheoloških uzoraka, čime je potvrđena sigurnost i pouzdanost ove metode u praksi. Iako optički sustavi bilježe zatečeno stanje s vrlo visokom razinom detalja, proces pretvaranja fizičkog objekta u digitalni zapis ovisi o tehničkim mogućnostima samog senzora i primijenjenim algoritmima za obradu oblaka točaka.

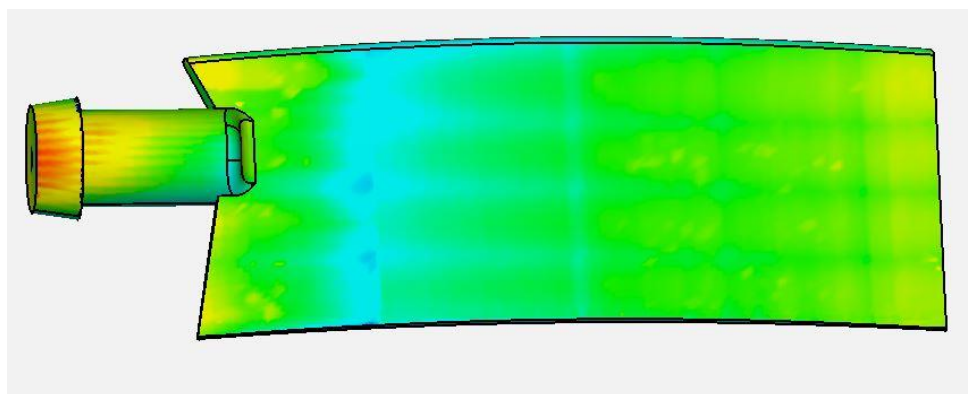
2.4.4 Optička dimenzijska inspekcija u inovativnim procesima investicijskog lijevanja

Investicijsko lijevanje (engl. *Investment casting*) tehnologija je koja omogućuje izradu metalnih dijelova složene geometrije, a modernizacija ovog procesa primjenom 3D ispisanih modela postala je sve učestalija. U ovakvim procesima postupak geometrijske inspekcije provodi se u nekoliko ključnih točaka kontrole, čime se prati dimenzijska točnost od početnog dizajna do gotovog proizvoda.

Proces u pravilu započinje izradom CAD modela i aditivnom proizvodnjom (3D ispisom) fizičkog modela, koji se zatim digitalizira i prostorno uspoređuje s referentnim CAD modelom radi analize odstupanja. Ukoliko model zadovoljava tolerancije, proces se nastavlja investicijskim lijevanjem kojim se dobiva konačni metalni odljevak. Dobiveni odljevak podvrgava se završnoj geometrijskoj inspekciji optičkim 3D skenerom kako bi se provjerila njegova konačna dimenzijska točnost.

S mjeriteljskog aspekta, ovakav industrijski zadatak predstavlja specifičan izazov zbog prisutnosti složenih slobodnih površina, poput aerodinamičkih krivulja lopatice. Dodatni izazov očituje se u praćenju dimenzija kroz različite proizvodne faze, gdje i proces 3D ispisa i naknadno toplinsko skupljanje metalnog odljevka unose vlastite geometrijske deformacije u konačni proizvod. Sposobnost optičkog mjernog sustava da precizno detektira i kvantificira

navedena odstupanja na kritičnim aerodinamičkim površinama konačnog aluminijskog odljevka vizualizirana je kromatskim mapama na slici 2.10.



Slika 2.10. Rezultati dimenzijske usporedbe 3D ispisanog modela s CAD modelom

Rezultati provedenih digitalizacija u ovakvim procesima jasno vizualiziraju odstupanja aerodinamičkih krivulja i potvrđuju dimenzijsku usklađenost s CAD modelom. Međutim, iako vizualizirana odstupanja služe za brzu i ranu detekciju nesukladnosti, pri mjeriteljskoj interpretaciji rezultata nužno je uzeti u obzir tehnička ograničenja optičke metode. Specifična softverska obrada podataka te potreba za nanošenjem matirajućeg premaza na visoko reflektirajuće metalne odljevke predstavljaju izvore mjerne nesigurnosti.

2.4.5 Sinteza rezultata analiziranih slučajeva primjene

Na temelju analiziranih slučajeva primjene može se zaključiti da su optički 3D mjerni sustavi sposoban i neizostavan alat. Njihova sposobnost brze, sigurne i beskontaktno digitalizacije omogućuje obuhvat vrlo kompleksnih i osjetljivih geometrija s razinom detalja koju tradicionalne metode ne mogu ostvariti. U industrijskim uvjetima to rezultira ranom detekcijom nesukladnosti, smanjenjem troškova dorade i značajnom optimizacijom cjelokupnog proizvodnog procesa, dok u arheologiji osigurava izradu vjernih digitalnih replika.

Ipak, unatoč dokazanim prednostima, praktična primjena u ovim zahtjevnim scenarijima ukazuje na tehnička ograničenja i nužnost fizičke te softverske intervencije u mjerni lanac. Specifična optička svojstva izvornih materijala i složenost površina redovito uvjetuju primjenu matirajućeg premaza radi smanjenja refleksije svjetla, dok dobivanje 3D modela zahtijeva primjenu poligonizacije pri pretvaranju oblaka točaka u STL mrežu. Razvidno je da kvaliteta i točnost prikupljenih prostornih podataka izravno ovise o tim parametrima, a upravo ti nužni

koraci u pripremi objekta i obradi podataka, uz samu hrapavost površine, predstavljaju ključne izvore mjerne nesigurnosti.

Kako bi se u praksi s potpunom sigurnošću moglo utvrditi koliko izmjereno odstupanje na najzahtjevnijim geometrijama proizlazi iz stvarne greške proizvodnje (primjerice 3D ispisa ili lijevanja), a koliko iz greške samog optičkog mjerenja, potrebno je poznavati mjernu nesigurnost mjernog sustava. Prepoznati tehnički izazovi i utjecajni parametri identificirani u ovim slučajevima primjene jasno opravdavaju nužnost provedbe sustavnog eksperimentalnog istraživanja. Oni će poslužiti kao čvrst temelj za postavljanje potpunog faktorskog plana pokusa, eksperimentalnu kvantifikaciju utjecaja navedenih parametara te razvoj sveobuhvatnog matematičkog modela mjerne nesigurnosti u eksperimentalnom dijelu ovog doktorskog rada.

2.5 Optički 3D mjerni sustavi u kontekstu industrije 4.0

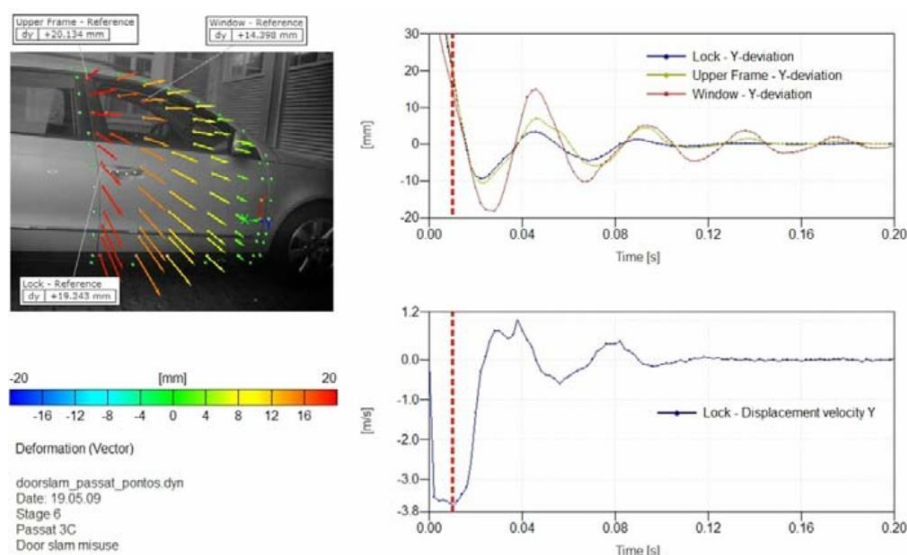
Industrija 4.0, često nazvana i četvrtom industrijskom revolucijom, predstavlja transformaciju proizvodnih procesa putem integracije naprednih digitalnih tehnologija. Jedna od ključnih karakteristika ovog razdoblja je potpuna digitalizacija i povezanost svih dijelova procesa, što omogućuje prikupljanje i analizu podataka u stvarnom vremenu. U tom kontekstu, zatvorena petlja proizvodnje (engl. *closed loop manufacturing*) integrira mjerne operacije izravno u proizvodni tok, osiguravajući besprijekoran prijenos informacija od dizajna do inspekcije [65]. Da bi takav sustav funkcionirao, upravljanje mjernim podacima (engl. *Measurement Data Management* – MDM) i primjena standarda poput Okvir za informaciju o kvaliteti (engl. *Quality Information Framework* – QIF) postaju imperativ za osiguravanje interoperabilnosti unutar pametnih tvornica [66].

Optički 3D mjerni sustavi igraju ključnu ulogu u ovoj transformaciji, omogućujući brza i beskontaktna mjerenja koja su postala standard u automobilske i zrakoplovne industriji [67]. Za razliku od tradicionalnih trokoordinatnih uređaja, optički skeneri mogu u kratkom vremenu prikupiti veliku gustoću podataka, što je neophodno za aditivnu proizvodnju i kontrolu složenih slobodnih oblika. Ipak, široka primjena ovih sustava i dalje se suočava s izazovima mjeriteljske sljedivosti i varijabilnosti optičkih svojstava površina materijala [68].

Brojna istraživanja provedena u okviru Industrije 4.0 dodatno rasvjetljavaju različite aspekte ove integracije. Istraživanja o spremnosti hrvatskih poduzeća identificiraju potrebu za jačom institucionalnom podrškom [69], dok se u sustavima fleksibilne proizvodnje naglašava uloga

dimenzijskih artefakata za stabilno donošenje odluka [70]. Također, integracija metrologije u digitalnu proizvodnju postavlja temelje za koncept „proizvodnje bez grešaka“ [67]. Za najzahtjevnije primjene, poput mikroproizvodnje, razvijaju se specifični modeli procesnih lanaca radi optimizacije ukupnih performansi [71].

Ovi sustavi mogu kontinuirano nadzirati kvalitetu procesa, omogućujući kraće vrijeme ciklusa i stvaranje potpuno automatiziranih proizvodnih ćelija. Na primjer, sustavi poput PONTOS i ARGUS koriste se za dinamičku fotogrametriju i automatsku analizu oblikovanja, pružajući sveobuhvatne podatke za usporedbu s inženjerskim modelima i kontrolu kvalitete [65]. Primjena sustava PONTOS u analizi dinamike deformacija prikazana je na slici 2.12.



Slika 2.11. Primjena sustava PONTOS u analizi dinamike vozila – prikaz deformacije karoserije prilikom zatvaranja vrata pomoću vektora pomaka i vremenskog odziva [65]

Međutim, implementacija optičkih sustava za mjerenje na proizvodnoj liniji (engl. *in-line*) nosi sa sobom izazove poput brzine obrade podataka i upravljanja velikim količinama podataka, što može predstavljati poteškoće u proizvodnom procesu. Razvoj naprednih algoritama za obradu podataka, uključujući metode strojnog učenja, može pomoći u rješavanju ovih problema, omogućujući bolje razumijevanje i automatsko segmentiranje podataka [67].

Unatoč izazovima, optički 3D mjerni sustavi predstavljaju ključnu tehnologiju u Industriji 4.0, omogućujući veću učinkovitost, preciznost i fleksibilnost u proizvodnim procesima. Oni omogućuju nadzor u stvarnom vremenu, smanjenje otpada i energetske učinkovitost, što su ključni čimbenici za održivu i konkurentnu proizvodnju u globalnom okruženju. [68].

Integracija optičkih mjernih sustava u procesne lance donosi niz prednosti, uključujući optimizaciju vremena, smanjenje troškova i poboljšanje kvalitete proizvoda. Ovi sustavi omogućuju brzu i točnu inspekciju, što je ključno za identificiranje i ispravljanje grešaka u ranim fazama proizvodnje, čime se smanjuju otpadi i povećava učinkovitost. Osim toga, optički mjerni sustavi podržani su naprednim sustavima za obradu podataka, koji omogućuju automatsko prikupljanje i prijenos podataka u sustave kontrole kvalitete. Ova digitalna povezanost i automatizacija omogućuju precizne i efikasne operacije na globalnoj razini, doprinoseći povećanju konkurentnosti proizvodnih poduzeća na svjetskom tržištu [72].

3. OSIGURAVANJE KVALITETE REZULTATA MJERENJA

U suvremenom mjeriteljstvu pojmovi sljedivost, umjeravanje i mjerna nesigurnost čine nerazdvojivu konceptualnu cjelinu koja omogućuje pouzdanu interpretaciju i osiguravanje kvalitete rezultata mjerenja. Polazišni koncept predstavlja mjeriteljska sljedivost, koja definira temeljni zahtjev da se rezultat mjerenja može povezati s referencijom, najčešće s definicijom jedinice Međunarodnog sustava (SI), putem neprekinutog lanca usporedbi, pri čemu svaka karika tog lanca doprinosi ukupnoj mjernoj nesigurnosti [73]. Pouzdanost mjernog rezultata ne može se procijeniti samo na temelju uspostavljene sljedivosti i provedenog umjeravanja, već se kvantificira mjernom nesigurnošću, koja opisuje rasipanje vrijednosti koje se mogu razumno pripisati mjerenoj veličini [73]. Takav pristup predstavlja temelj suvremenog mjeriteljstva i ključan je za osiguravanje usporedivosti i vjerodostojnosti rezultata mjerenja.

U kontekstu optičkih 3D mjernih sustava, primjena ovih koncepata dodatno je složena. Iako se optički skeneri sve više primjenjuju u industriji zbog svoje sposobnosti brzog prikupljanja velikog broja mjernih točaka i mjerenja složenih geometrija, uspostava pouzdane mjeriteljske sljedivosti njihovih rezultata i dalje predstavlja izazov. Rezultati optičkih mjerenja uvelike ovise o optičkim svojstvima površine, materijalu, geometrijskoj složenosti i algoritamskoj obradi podataka. Zbog toga se sljedivost kod optičkih sustava ne može promatrati kao univerzalno uspostavljen lanac, već kao proces koji je ovisan o konkretnom mjernom zadatku. U praksi se za verifikaciju performansi i uspostavu početne razine sljedivosti koriste referentni artefakti čije su geometrijske karakteristike određene s visokom točnošću, čime se ostvaruje veza s međunarodnim etalonima duljine. Međutim, prijenos sljedivosti s artefakta na stvarni objekt mjerenja nije jednoznačan, osobito kod složenih geometrija i optički zahtjevnih površina.

U takvim uvjetima pouzdana procjena mjerne nesigurnosti postaje ključni element u osiguravanju kvalitete rezultata mjerenja. Postoje određene smjernice i preporuke, poput normi VDI/VDE 2634-3:2008 [74] i ISO 15530-3 [75], koje omogućuju procjenu mjerne nesigurnosti, primjerice primjenom zamjenskog pristupa temeljenog na prijenosu sljedivosti s artefakta poznate nesigurnosti na objekt mjerenja. Međutim, zbog specifičnosti optičkih sustava, takvi pristupi ne obuhvaćaju u potpunosti sve relevantne utjecajne čimbenike i prilično je vremenski zahtjevan, zbog čega se rijetko koristi za osiguravanje sljedivosti preciznih industrijskih mjerenja [68] .

Sljedom navedenog, može se zaključiti da potpuni lanac mjeriteljske sljedivosti za optičke 3D mjerne sustave još uvijek nije u potpunosti uspostavljen, što ovo područje čini predmetom intenzivnih istraživanja. Ključni izazov pritom predstavlja razvoj metoda procjene mjerne nesigurnosti koje mogu obuhvatiti složene i međusobno ovisne utjecajne veličine.

Stoga je u ovom radu predložen integrirani pristup procjeni mjerne nesigurnosti koji kombinira analitičke, eksperimentalne i numeričke metode, uključujući i Bayesov pristup. Takav pristup omogućuje sveobuhvatniju i realističniju procjenu mjerne nesigurnosti te predstavlja korak prema uspostavi pouzdane mjeriteljske sljedivosti optičkih 3D mjernih sustava.

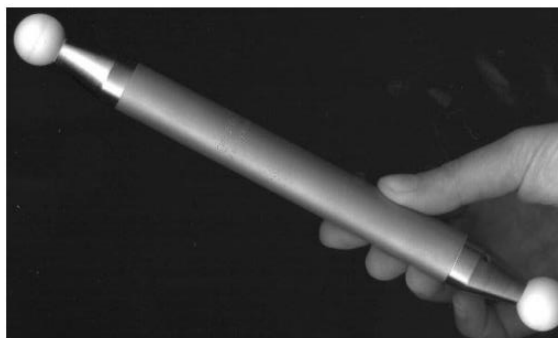
3.1 Artefakti u optičkim 3D mjernim sustavima

3.1.1 Uloga referentnih artefakata u uspostavljanju mjeriteljske sljedivosti

U području optičkog 3D mjeriteljstva, referentni artefakti služe kao tvarne mjere, odnosno mjerni etaloni koji omogućuju prijenos referentne vrijednosti u mjerni sustav. Sukladno Međunarodnom mjeriteljskom rječniku (fr. *Vocabulaire International de Métrologie* – VIM), mjerni etalon je ostvarenje definicije dane veličine, s iskazanom vrijednošću i mjernom nesigurnošću, koja se upotrebljava kao referencija [73]. Budući da su ovi artefakti prethodno umjereni (najčešće visoko preciznim trokoordinatnim mjernim uređajima), oni predstavljaju nezaobilazno polazište za uspostavljanje mjeriteljske sljedivosti optičkih sustava do međunarodnih etalona duljine. Ipak, važno je naglasiti da primjena umjerenog artefakta uspostavlja sljedivost samog mjernog sustava, ali ne osigurava automatski sljedivost konačnog rezultata mjerenja stvarnog predmeta, za što je nužna cjelovita procjena mjerne nesigurnosti.

U laboratorijskoj, ali i terenskoj praksi, razvijeni su različiti artefakti za specifične potrebe podešavanja i verifikacije točnosti mjernih sustava. Najčešće korišteni referentni artefakti uključuju:

- Mjerni štap s kuglama (engl. *bar ball*): Izrađen od stabilnog materijala s niskim koeficijentom toplinskog širenja, koristi se kao kompaktni prijenosni etalon za podešavanje i umjeravanje [76]. Kugle su posebno korisne za određivanje mjeriteljskih svojstava sustava zbog svoje jednostavne i jednoznačne geometrije [77]. Ovaj artefakt prikazan je na slici 3.1.



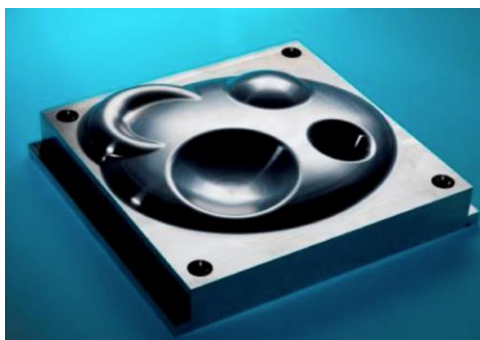
Slika 3.1. Mjerni štap s kuglama dužine 200 mm [77]

- Referentni artefakti u obliku nepravilnih tetraedara (slika 3.2.): Ovi su artefakti namjenski razvijeni za testiranje i verifikaciju različitih mjernih opsega komercijalnih sustava za mjerenje projiciranjem strukturiranog svjetla [78].



Slika 3.2. Artefakt u obliku tetraedra [78]

- Slobodno oblikovani (engl. *freeform*) referentni etaloni (slika 3.3.): Engleski nacionalni laboratorij za fiziku (NPL) razvio je novi slobodno oblikovani referentni etalon za verifikaciju optičkih 3D koordinatnih mjernih sustava. Ovaj artefakt je dizajniran tako da predstavlja izazov za skeniranje optičkim sustavima, dok ga je istovremeno moguće referentno proizvesti i mjeriti s pomoću visokopreciznog TMU-a [77]. Ovakvi umjerni objekti omogućuju dvostruku provjeru mjernog sustava: ispitivanje točnosti na jednostavnim geometrijskim elementima, te istovremeno ispitivanje točnosti pri skeniranju složenih, nepravilnih površina [68].



Slika 3.3. Slobodno oblikovani etalon [77]

- Pojedinačne kugle i ravne ploče: Kugle s potvrđenim (certificiranim) vrijednostima oblika i promjera često se koriste za ispitivanje pogreške oblika i veličine, dok se umjerene ravne ploče koriste za mjerenje ravnosti površine.

Podešavanje (ugađanje) optičkih 3D skenera, koje se temelji na fotogrametrijskim metodama, zahtijeva precizno geometrijsko podešavanje kamera (u praksi često nazivano i geometrijskim umjeravanjem), pri čemu su standardni postupci razvijeni i unaprijeđeni kroz godine [79]. Verifikacija performansi optičkih 3D sustava nakon takvog podešavanja obuhvaća provjeru različitih mjeriteljskih svojstava, poput pogreške mjernog senzora, pogreške u razmaku kugli i pogreške mjerenja ravnosti. Upravo u tu svrhu, propisani standardi i smjernice, poput VDI/VDE 2634 i ISO 10360-8, definiraju temeljne testove prihvatljivosti koji su neophodni za dokazivanje prikladnosti sustava te međusobnu usporedbu različitih uređaja u industrijskom okruženju [78]. Ovi standardi i smjernice zahtijevaju upotrebu osnovnih geometrijskih oblika (sadržanih na prethodno navedenim artefaktima) te omogućuju procjenu točnosti mjernog sustava na temelju poznatih dimenzijskih i optičkih svojstava tih referentnih objekata [80]. Primjer referentnog artefakta usklađenog sa smjernicom VDI/VDE 2634 prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4. VDI/VDE 2634 kompatibilni artefakt [68]

Kombinacija ovih artefakata i normiranih metoda omogućuje ne samo početno podešavanje optičkih 3D sustava, već osigurava i njihovu kontinuiranu verifikaciju, što je ključno za postizanje točnosti, preciznosti i pouzdanosti u industrijskim primjenama. Međutim, budući da takva normirana verifikacija koristi idealizirane artefakte i ne obuhvaća u potpunosti sve specifične izvore nesigurnosti prisutne pri skeniranju stvarnih industrijskih predmeta složene geometrije, uspostavljena sljedivost mjernog sustava mora biti nadograđena. Da bi se sljedivost i pouzdanost osigurala za svaki pojedinačni mjerni zadatak u praksi, osim umjeravanja mjernog instrumenta, nužna je daljnja sveobuhvatna eksperimentalna i matematička procjena mjerne nesigurnosti, što izravno opravdava metodologiju primijenjenu u nastavku ovog rada.

3.1.2 Podešavanje mjernog sustava primjenom umjerne ploče

U svakodnevnoj industrijskoj i laboratorijskoj praksi primjene optičkih 3D skenera, postupak koji mjeritelj provodi na uređaju neposredno prije početka mjerenja često se kolokvijalno i pogrešno naziva "umjeravanjem". Međutim, u strogom mjeriteljskom smislu, a sukladno Međunarodnom mjeriteljskom rječniku, potrebno je jasno razlučiti pojmove umjeravanja i podešavanja mjernog sustava [73].

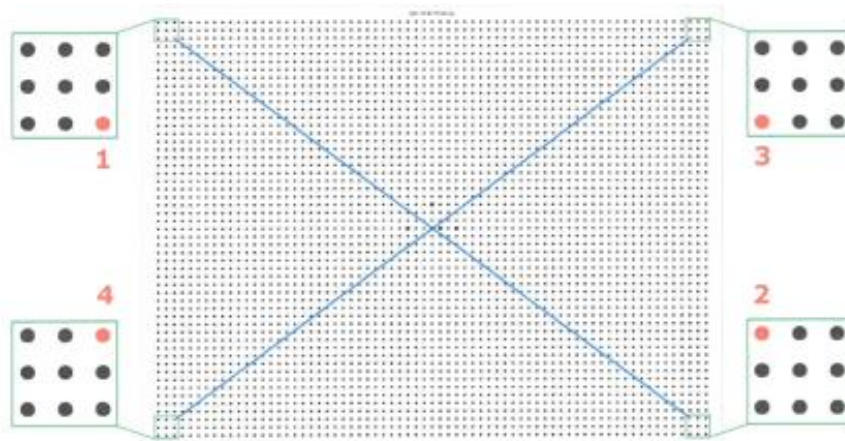
Umjeravanje (engl. *calibration*) predstavlja postupak kojim se uspoređuje točno poznata vrijednost referentnog etalona s vrijednošću koju izmjeri sam mjerni uređaj, pri čemu se u obzir uzimaju i njihove pripadajuće mjerne nesigurnosti. Nasuprot tome, radnje koje operater provodi na optičkom 3D skeneru kako bi sustav ispravno mjerio se nazivaju podešavanjem mjernog sustava (engl. *adjustment of a measuring system*). VIM definira podešavanje kao skup radnji koje se provode na mjernome sustavu kako bi se njegova očitavanja uskladila sa stvarnim, točno poznatim vrijednostima veličine koja se mjeri [73]. Kod optičkih sustava sa strukturiranim svjetlom, to podešavanje podrazumijeva snimanje referentnog objekta radi izračuna i aktivne korekcije unutarnjih (optičkih nesavršenosti leća) i vanjskih (međusobnog prostornog položaja kamera i projektora) parametara sustava.

Ovaj postupak podešavanja sustava ATOS provodi se primjenom specifičnih referentnih artefakata koji, prema mjeriteljskom rječniku, predstavljaju tvarne mjere u obliku umjernih ploča. U ovom istraživanju primijenjena je certificirana umjerna ploča proizvođača GOM (slika 3.5.), tipa CP40/320 [81, 82].



Slika 3.5. GOM umjerna ploča [82]

Ploča je izrađena od aluminija i na sebi sadrži optičke kružne markere raspoređene u strogo definiranoj rešetkastoj mrežnoj strukturi (slika 3.6.). Markeri smješteni u središtu kalibracijske ploče izvedeni su s većim promjerom od ostalih. Ova razlika u promjeru ključna je jer omogućuje programskom paketu GOM automatsko prepoznavanje tipa ploče, kao i nedvosmisleno definiranje ishodišta (ishodišne točke) i orijentacije lokalnog koordinatnog sustava same ploče [82].



Slika 3.6. Raspored optičkih kružnih markera na umjernoj ploči [82]

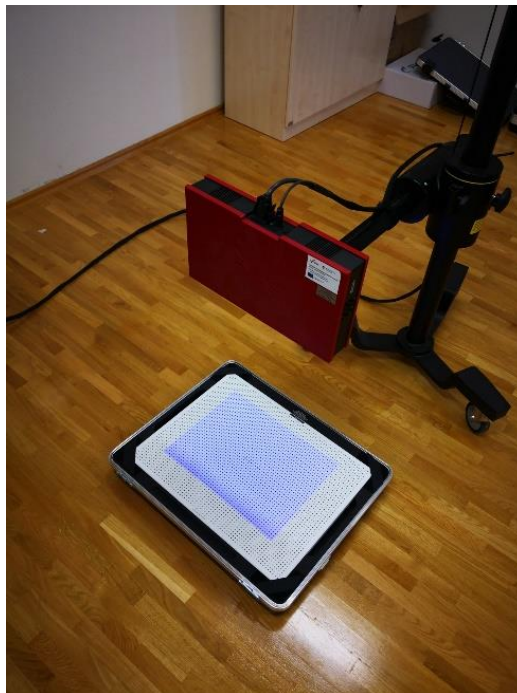
Iako sam optički 3D skener podliježe podešavanju, mjeriteljska sljedivost cjelokupnog procesa osigurava se činjenicom da je primijenjena referentna ploča CP40/320 prethodno umjerena, čime ona preuzima ulogu radnog etalona. Prijenos sljedivosti za korištenu ploču ostvaren je kroz strogo definiran i neprekinut mjeriteljski lanac opisan u njezinu certifikatu (umjernici) [82]:

- Polazište (Primarni/Sekundarni etalon): Lanac započinje međunarodnim etalonima za jedinicu duljine (metar).
- Referentno mjerenje (TMU): Trokoordinatni mjerni uređaj koristi se za umjeravanje glavnog referentnog artefakta u laboratoriju proizvođača uz poznatu mjernu nesigurnost rezultata mjerenja.
- Prijenos na radni etalon: Pomoću tog glavnog referentnog artefakta provodi se standardizirani „GOM Acceptance test“, kojim se zatim umjerava svaka pojedinačna komercijalna ploča, pa tako i ploča CP40/320 korištena u ovom istraživanju.

Rezultat je udaljenost i pozicija središnjih točaka markera na ploči. Proširena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja, navedena u umjernici, uz faktor pokrivanja $k = 2$ (što odgovara razini povjerenja od približno 95 %), iznosi:

$$U = 0,85 \text{ } \mu\text{m} + 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot L \text{ (} L \text{ u mm)} \quad (3.1)$$

Sam postupak podešavanja mjernog sustava u praksi se temelji na smjernicama VDI/VDE 2634, dio 3 [74]. Postupak se sastoji od niza fotogrametrijskih snimanja umjerne ploče iz različitih, točno propisanih kutova i udaljenosti, kako bi sustav prikupio dovoljno prostornih informacija za preračunavanje orijentacije leća (slika 3.7.).



Slika 3.7. Proces umjeravanja optičkog 3D mjernog sustava

S obzirom na to da se optički mjerni sustavi oslanjaju na preciznu geometriju leća i senzora, oni su osjetljivi na temperaturne promjene okoline koje mogu uzrokovati mikrometerska toplinska širenja ili skupljanja nosive strukture, što izravno utječe na žarište i točnost skenera. Zbog toga je strogo pravilo dobre mjeriteljske prakse da se prije postupka podešavanja mora izvršiti aklimatizacija i zagrijavanje senzora u trajanju od približno 20 minuta, kako bi se postigla radna termalna stabilnost opreme.

Uz stabilizaciju samog senzora, kritičan parametar tijekom podešavanja je i termalno ponašanje same umjerne ploče. Prema podacima iz certifikata [82], materijal ploče CP40/320 je aluminij čiji koeficijent toplinskog širenja iznosi točno $22,67 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Kako bi se spriječilo da toplinsko širenje same ploče unese sustavnu pogrešku u mjerni sustav, stvarna temperatura okoline (odnosno ploče) kontinuirano se prati i upisuje u programski paket prilikom podešavanja. Softver potom, koristeći certificirani koeficijent toplinskog širenja, matematički kompenzira i korigira referentne udaljenosti između markera na ploči. Tek ovim objedinjavanjem certificiranih dimenzija, termalne kompenzacije i fotogrametrijskog niza snimanja, mjerni sustav se smatra ispravno podešenim i spremnim za pouzdana dimenzijska mjerenja.

3.2 Mjerna nesigurnost

3.2.1 Utjecajni parametri kod mjerenja optičkim 3D mjernim sustavom

Mjerenje optičkim 3D mjernim sustavima uključuje niz parametara koji mogu značajno utjecati na točnost i preciznost rezultata. Za potpuno razumijevanje sposobnosti ovih sustava, potrebno je primijeniti sustavni pristup koji obuhvaća analizu svih mogućih utjecaja na proces mjerenja.

Suvremeni optički 3D mjerni sustavi sastoje se od nekoliko ključnih komponenti koje izravno uvjetuju kvalitetu dobivenih podataka:

- **Hardver:** Ovi parametri obuhvaćaju sve tehničke aspekte skenera, uključujući performanse optičkih leća, senzora i sustava rasvjete. Pogreške mogu nastati zbog optičkih aberacija (pogrešaka) i nedovoljno preciznog podešavanja senzora. Redovito održavanje i podešavanje ovih komponenti primjenom referentnih artefakata ključno je za minimiziranje pogrešaka [68, 76]. Tehnička unaprjeđenja, poput naprednih algoritama za podešavanje komponenata triangulacijskih senzora [73], te implementacija metoda za korekciju gibanja kod integriranih robotskih mjernih sustava

[84], pokazala su se ključnima za postizanje niske mjerne nesigurnosti na razini hardvera.

- Softver: Algoritmi integrirani u mjerni sustav zaduženi za rekonstrukciju površina, obradu oblaka točaka i upravljanje mrežama (engl. *meshes*) imaju značajan utjecaj na konačni rezultat. Ključni softverski aspekti uključuju poligonizaciju i interpolaciju [68, 76]. Svaka faza digitalne obrade može unijeti nesigurnost, osobito ako algoritmi nisu optimizirani za specifične uvjete mjerenja. Zbog toga se danas razvijaju napredne matematičke metode, poput metode stohastičke nesigurnosti točaka, koje omogućuju precizniju analizu i filtriranje slučajnih pogrešaka unutar samog softvera [85].
- Predmet mjerenja: Svojstva površine objekta, kao što su dimenzije, geometrija, materijal, hrapavost, te dodatni tretmani površine (npr. nanošenje matirajućeg premaza) [8], igraju presudnu ulogu u točnosti mjerenja. Za razliku od klasičnih trokoordinatnih mjernih uređaja, rezultati optičkih skenera ovise upravo o materijalu i optičkim svojstvima površine [68]. Površine koje su visoko reflektirajuće, prozirne ili tamne često uzrokuju pogreške, čineći ih "nekooperativnim" za optičke sustave [8, 86]. Koliko je materijal presudan za osiguravanje mjeriteljske sljedivosti dokazuju i specifični industrijski slučajevi: pri mjerenju mekih kalupa od zelenog pijeska (koje TMU ne može mjeriti), sljedivost se mora prenositi posredno, korištenjem posebno razvijenih tvrdih referentnih uzoraka (npr. od furanskog pijeska) koji posjeduju identična optička svojstva kao i stvarni mjerni predmet [87, 88].
- Okoliš: Uvjeti u radnom okruženju u kojem se mjerenje provodi mogu imati znatan utjecaj na rezultate. Temperatura, vibracije, ambijentalno osvjetljenje i prisutnost prašine izravno utječu na performanse skenera. Promjene temperature su osobito kritične jer uzrokuju toplinsko rastezanje materijala mjerenog predmeta i samog uređaja, dok prašina može ometati optičke senzore [76]. Održavanje strogo kontroliranih okolišnih uvjeta pokazalo se kao temeljni preduvjet za uspješnu i pouzdanu integraciju optičkih mjerenja u zahtjevne industrijske procesne lance [70].
- Mjeritelj (operator): Unatoč visokom stupnju automatizacije, stručnost i sposobnost operatera i dalje značajno utječu na rezultate mjerenja. Na temelju provedenih istraživanja, utvrđeno je da kvalifikacije i iskustvo mjeritelja pri postavljanju uzorka i odabiru parametara izravno determiniraju kvalitetu konačnog 3D modela, čak i uz korištenje istog skupa podataka i softvera. Dodatno, ljudski faktori poput stresa i

ergonomskih uvjeta rada mogu generirati nepredviđene varijabilnosti i doprinijeti ukupnoj mjernoj nesigurnosti [80].

3.2.2 Metode procjene mjerne nesigurnosti

Kako bi se prethodno identificirani utjecajni parametri uspješno kvantificirali, a konačna ukupna varijabilnost mjernog procesa znanstveno ocijenila, nužno je provesti sustavnu procjenu mjerne nesigurnosti. Prema Međunarodnom mjeriteljskom rječniku, mjerna nesigurnost definira se kao nenegativni parametar koji opisuje rasipanje vrijednosti veličine koje se na temelju upotrijebljenih podataka pridružuju mjerenoj veličini [73]. Ona predstavlja ključni pokazatelj kvalitete mjernih rezultata, temelj je za ocjenjivanje sukladnosti sa specifikacijama te je neophodna za uspostavljanje neprekinutog lanca mjeriteljske sljedivosti do međunarodnih etalona [89–91].

S obzirom na to da su suvremeni optički 3D skeneri složeni mjerni sustavi, procjena mjerne nesigurnosti zahtijeva postavljanje adekvatnog mjernog modela. Budući da složeni sustavi često onemogućuju pouzdanu primjenu samo jedne, tradicionalne metode za rješavanje takvog modela, u suvremenom se dimenzijskom mjeriteljstvu sve češće primjenjuju integrirani pristupi [91, 92]. Oslanjajući se na suvremena mjeriteljska saznanja, procjena mjerne nesigurnosti u ovom se doktorskom radu provodi primjenom sveobuhvatnog hibridnog pristupa koji objedinjuje četiri komplementarne metodologije: empirijsku metodu supstitucije, analitičku GUM metodu, Monte Carlo simulaciju te Bayesovu analizu.

- Supstitucijska metoda

Supstitucijska metoda, usklađena sa smjernicama norme ISO 15530-3, predstavlja empirijski pristup procjeni mjerne nesigurnosti. Uz procjenu mjerne nesigurnosti samog umjerenoga referentnog objekta, ova se metoda izravno temelji na eksperimentalnom utvrđivanju ponovljivosti mjernog postupka. Ta se komponenta nesigurnosti određuje statističkom analizom (standardnom devijacijom) niza ponovljenih mjerenja pri kojima radni predmet mijenja položaj u mjernom prostoru. Također, metoda zahtijeva osiguravanje specifičnih uvjeta poput sličnosti dimenzija, geometrije, materijala, toplinskih svojstava i optičkih karakteristika mjerene površine u odnosu na stvarni predmet mjerenja, kako bi se cjelovito obuhvatili svi relevantni izvori nesigurnosti i osigurala točnost i pouzdanost rezultata [68]. Efikasnost ovog pristupa dokazana je u

industrijskoj praksi pri rješavanju problema skeniranja materijala koje nije moguće mjeriti taktilnim uređajima, gdje se sljedivost i nesigurnost uspješno prenose supstitucijom uzoraka [88]. U okviru ovog doktorskog rada, supstitucijska metoda provedena je snimanjem namjenski dizajniranih ispitnih uzoraka izrađenih od konstrukcijskog čelika oznake S235 te usporedbom dobivenih optičkih rezultata s referentnim vrijednostima dobivenim trokoordinatnim mjernim uređajem. Glavni razlog primjene ove metode u radu je njena sposobnost da obuhvati cjelokupnu stvarnu varijabilnost proizvodnog i mjernog procesa. Supstitucijskom metodom procijenjena je mjerna sposobnost sustava pri skeniranju industrijskih objekata, uključujući stvarne varijacije u samoj proizvodnji predmeta (engl. *part to part variation*).

- GUM metoda

GUM metoda predstavlja općeprihvaćeni međunarodni standard za vrednovanje mjernih podataka. Metodologija se temelji na zakonu o propagaciji (prijenosu) nesigurnosti, koji koristi aproksimaciju mjernog modela pomoću razvoja u Taylorov red prvog stupnja, linearizirajući model oko točke najbolje procjene ulaznih veličina [93]. Unatoč svojoj širokoj primjeni, ova metodologija ima ograničenja jer pretpostavlja linearnost modela i normalnu (simetričnu) razdiobu izlazne veličine. Kod izrazito nelinearnih funkcija i asimetričnih razdioba, analitički pristup temeljen na GUM-u može generirati interval pokrivanja koji obuhvaća fizikalno nemoguće, negativne vrijednosti [94]. U ovom radu, analitička GUM metoda bit će korištena za dobivanje detaljnog matematičkog modela mjerenja optičkim 3D sustavom. Razlog primjene ove metode je taj što ona omogućuje jasan i detaljan pregled svih pojedinačnih izvora pogrešaka. Takvom matematičkom raščlambom (koja se u mjeriteljstvu naziva bilancom nesigurnosti) može se točno izračunati koji utjecajni parametar najviše povećava ukupnu pogrešku mjerenja. Prepoznavanje tog glavnog uzroka nesigurnosti ključno je za optimizaciju i poboljšanje procesa optičkog 3D skeniranja.

- Monte Carlo simulacija

Kako bi se prevladala matematička ograničenja linearizacije karakteristična za analitičku metodu, preporučuje se primjena metode Monte Carlo. Umjesto propagacije isključivo parametara razdiobe, MCS se temelji na propagaciji cjelokupnih funkcija gustoće vjerojatnosti ulaznih veličina [91]. Ovaj se proces provodi numerički: iz

definiranih ulaznih razdioba generira se veliki broj slučajnih uzoraka, čime se formira empirijska razdioba rezultata, koja služi kao aproksimacija stvarne razdiobe mjerene veličine [89]. Primjenom ove metode ispravno se generiraju asimetrične razdiobe koje daju realističan i pouzdan interval pokrivanja, ne narušavajući fizikalna ograničenja [94]. U ovom istraživanju, Monte Carlo simulacija provest će se generiranjem velikog broja iteracija nad postavljenim matematičkim modelom optičkog 3D mjernog sustava. Svrha izvođenja simulacijske metode je izravna numerička validacija razvijenog analitičkog modela.

- Bayesova analiza

Uz analitičke i numeričke metode, sve značajniju ulogu u modernom mjeriteljstvu ima Bayesova analiza. Kao odgovor na potrebu za unaprjeđenjem postojećih metoda izračuna mjerne nesigurnosti, novija istraživanja detaljno analiziraju Bayesov okvir u kojem se kombiniranjem priornih informacija i novih mjernih podataka generira ažurirana, posteriorna razdioba vjerojatnosti [89, 90]. Metoda kombinira prethodno poznavanje parametara (priorna razdioba) s novim, eksperimentalno prikupljenim podacima (funkcija vjerodostojnosti, engl. *likelihood*) kako bi generirala ažuriranu, posteriornu razdiobu. U eksperimentalnom dijelu ovog rada, Bayesova metoda primijenit će se korištenjem Markovljevog lanca Monte Carlo (engl. *Markov Chain Monte Carlo* – MCMC) algoritama za definiranje posteriornih razdioba ključnih geometrijskih značajki skeniranog objekta. Svrha uvođenja Bayesove metode u ovaj rad je omogućiti precizan izračun vjerojatnosti da se stvarna dimenzija skeniranog industrijskog objekta nalazi unutar zadanih tolerancijskih granica. Umjesto da mjerni rezultat prikaže samo kao jedan broj s rasponom pogreške, ovakav pristup industrijskom korisniku optičkog skenera daje točan postotak rizika donošenja pogrešne odluke, što predstavlja neophodan alat za integraciju mjernih sustava u napredne procese kontrole kvalitete.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

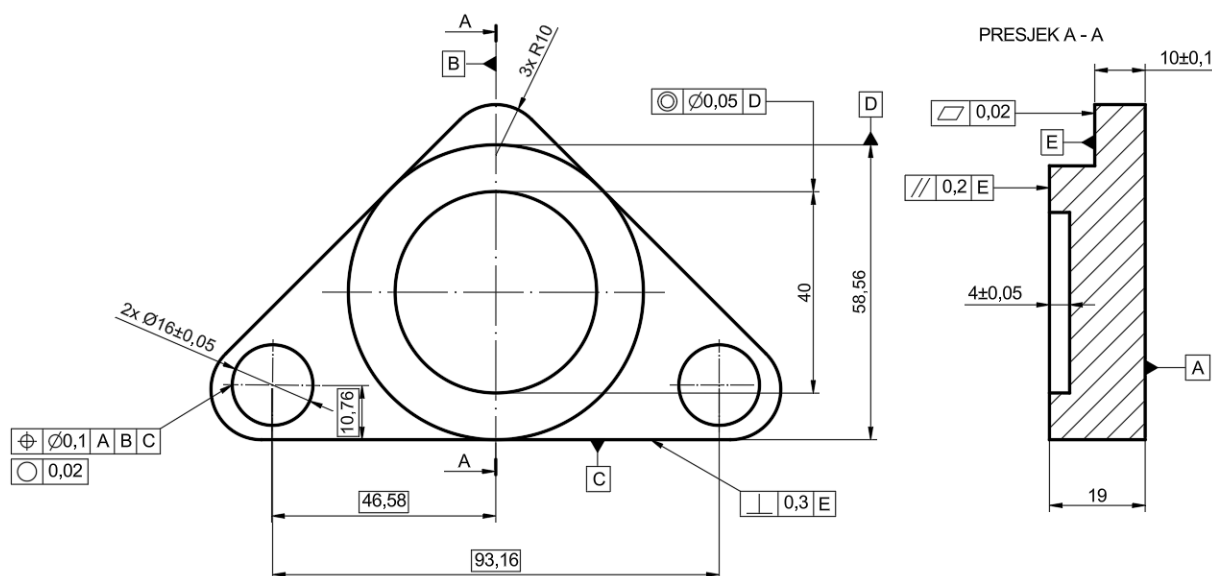
4.1 Mjerenje optičkim 3D mjernim sustavom

Sveobuhvatni postupak ispitivanja optičkim 3D mjernim sustavom strukturiran je u pet glavnih faza. Prvi korak obuhvaća definiranje i izradu samih ispitnih uzoraka. Zatim slijedi podešavanje mjernog sustava, kojim se osigurava dimenzijska točnost i pouzdanost mjernih podataka. Sljedeća faza je priprema predmeta mjerenja, nakon čega se provodi samo 3D skeniranje radi prikupljanja prostornih podataka o geometriji predmeta. Završni korak predstavlja naknadna obrada podataka (engl. *postprocessing*), u kojoj se prikupljeni podaci analiziraju i obrađuju kako bi se dobili rezultati mjerenja.

4.1.1 Ispitni uzorci

Za potrebe ovog istraživanja namjenski su dizajnirana i izrađena dva ispitna uzorka istih nazivnih dimenzija, ali s različitom hrapavošću površine. Uzorci su izrađeni od konstrukcijskog čelika oznake S235 (prema normi EN 10025-2). Odabir ovog materijala temelji se na njegovoj velikoj zastupljenosti u industrijskoj proizvodnji, dobroj obradivosti odvajanjem čestica te zadovoljavajućoj dimenzijskoj i toplinskoj stabilnosti, što ga čini prikladnim za provođenje metroloških ispitivanja.

Geometrija ispitnih uzoraka odabrana je s ciljem simulacije kompleksnih industrijskih dijelova. Namjenski je projektirana tako da objedinjuje različite geometrijske elemente: ravne plohe, valjkaste provrte i vanjske cilindre. Ovakav oblik uzorka nužan je kako bi se omogućila sveobuhvatna analiza mjernog sustava, odnosno kako bi se na istom uzorku mogle mjeriti i dimenzijske značajke (promjeri, osni razmak) i geometrijske karakteristike (kružnost, koncentričnost, ravnost, paralelnost i okomitost). Točne dimenzije i geometrija ispitnog uzorka definirane su tehničkom skicom (slika 4.1.).



Slika 4.1. Tehnička skica ispitnog uzorka s dimenzijama

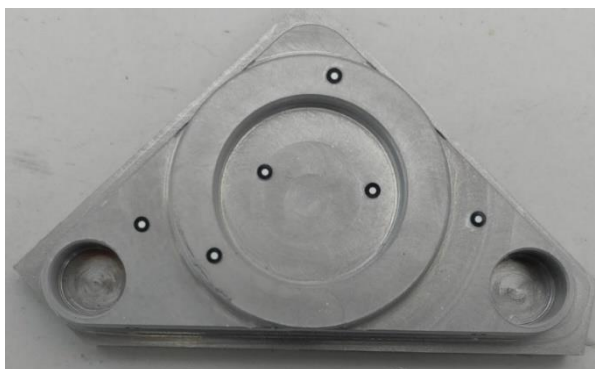
Nakon definiranja geometrije, uzorci su fizički izrađeni postupkom glodanja uz računalom podržano numeričko upravljanje (engl. *Computer Numerical Control* –CNC) pri čemu su ciljane varijacije u hrapavosti površine postignute pažljivom prilagodbom brzine posmaka i brzine rezanja tijekom strojne obrade. Hrapavost površine i hrapavost provrta izmjereni su korištenjem uređaja Mitutoyo Surftest SJ-210, a rezultati su prikazani u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Vrijednosti hrapavosti (R_a) i pripadne standardne devijacije na objektima mjerenja

	Objekt 1 ($R_a / \mu\text{m}$)	Objekt 2 ($R_a / \mu\text{m}$)
Površina	$0,812 \pm 0,095$	$0,336 \pm 0,038$
Provrta	$2,540 \pm 0,280$	$2,140 \pm 0,239$

Nakon izrade uzoraka i mjerenja njihove hrapavosti, pristupilo se pripremi za optičko 3D skeniranje. Ova priprema je neophodan korak jer osigurava da je objekt u potpunosti prilagođen mjernom postupku. Priprema je obuhvatila dva ključna koraka: postavljanje referentnih točaka (markera) na površinu objekta i nanošenje premaza za matiranje površine.

Referentne točke služe za povezivanje pojedinačnih slika snimljenih tijekom skeniranja, omogućujući stvaranje cjelovitog 3D modela objekta. Iako nema strogih pravila za pozicioniranje referentnih točaka, važno je osigurati njihov dovoljan broj kako bi se omogućilo snimanje objekta iz svih potrebnih kutova. Fizički izgled gotovog ispitnog uzorka prikazan je na slici 4.2.



Slika 4.2. Fizički ispitni uzorak pripremljen za mjerenje

Nakon postavljanja markera uslijedilo je matiranje površine. Za matiranje je korišten „Helling 3D Anti-Glare Spray“, alkoholne baze, s gustoćom od $0,78 \text{ g/cm}^3$. Korištene su dvije varijante ovog premaza: u boci i u tekućini. Tekuća varijanta nanosila se s pomoću pištolja i kompresora, dok se sprej u boci nanosio standardnim postupkom raspršivanja. Nakon nanošenja sloja premaza, referentne točke su pažljivo očišćene kako bi se uklonio sloj premaza s njihove površine, jer bi u protivnom bio onemogućen njihov pravilan pronalazak i prepoznavanje tijekom skeniranja. Pritom je važno naglasiti da, iako je primjena matirajućeg premaza nužna za provođenje 3D skeniranja, ona stvara novi mikrosloj koji mijenja originalna površinska svojstva objekta, uključujući i njegovu hrapavost. Budući da ova promjena u mikrogeometriji i ukupnoj geometriji površine može izravno utjecati na točnost mjerenja, metoda nanošenja premaza definirana je kao jedan od ključnih utjecajnih faktora čiji je doprinos ukupnoj mjernoj nesigurnosti detaljno analiziran u eksperimentalnom dijelu rada.

4.1.2 Postupak 3D skeniranja

3D skeniranje je složen postupak kojim se fizički objekt pretvara u digitalni format putem prikupljanja prostornih podataka beskontaktnim snimanjem. Temeljno načelo ovog postupka zasniva se na tehnologiji strukturiranog svjetla, optičke triangulacije i fotogrametrije. Ova metoda omogućava precizno skeniranje geometrije objekta i generira oblak točaka koji se zatim pretvara u poligonalnu mrežu. Takvi modeli imaju široku industrijsku primjenu, uključujući dimenzijska mjerenja, povratno inženjerstvo, aditivnu proizvodnju te digitalno arhiviranje.

3D skeniranje se može provoditi različitim tipovima skenera, koji se općenito dijele na kontaktne i beskontaktno sustave. U industrijskim primjenama, beskontaktni optički 3D skeneri, kao što je ATOS sustav, vrlo su popularni zbog svoje brzine, točnosti i sposobnosti

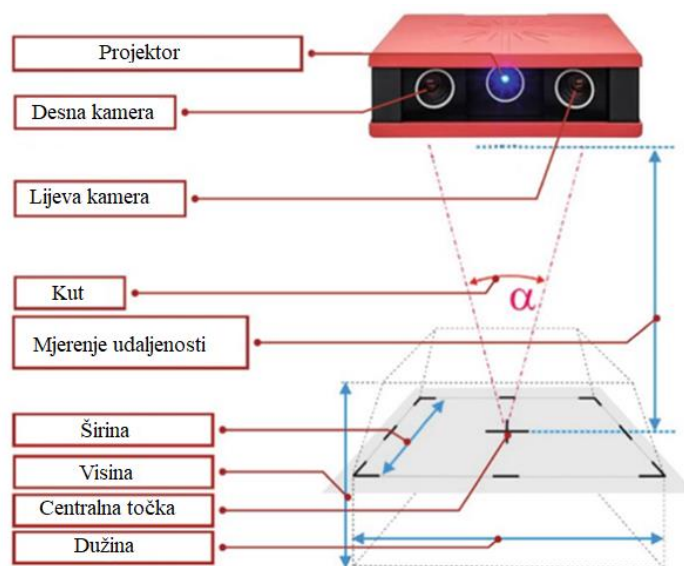
prikupljanja podataka bez fizičkog dodira s objektom. Ovi skeneri koriste tehnologiju projekcije resa (engl. *fringe projection*) u kombinaciji s LED plavim svjetlom kako bi precizno zabilježili površinske detalje objekta [1, 10].

U ovom istraživanju korišten je ATOS Core 300, optički 3D skener proizvođača GOM, koji je dizajniran za visoko precizno skeniranje malih i srednje velikih objekata. ATOS sustav koristi tehnologiju projekcije resa, gdje projektor emitira plavo svjetlo u obliku resa na površinu objekta, a kamere bilježe deformacije tih resa kako bi stvorile oblak točaka. Ovaj oblak točaka predstavlja precizan digitalni prikaz geometrije objekta. U tablici 4.2. su prikazane osnovne karakteristike ATOS Core 300 skenera.

Tablica 4.2. Osnovne karakteristike ATOS Core 300 skenera [95]

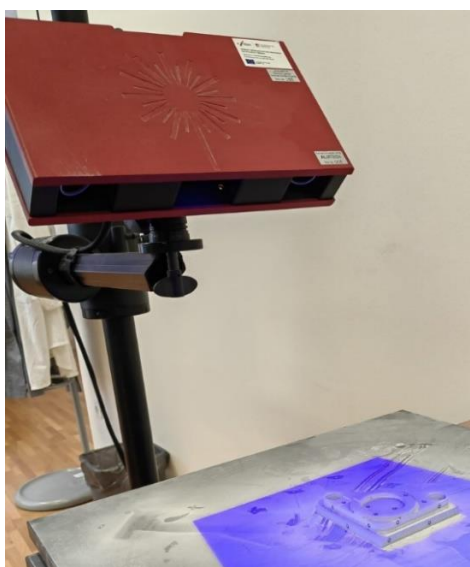
Mjerno područje	300 mm x 230 mm
Radna osni razmak	440 mm
Razmak između točaka	0,12 mm
Dimenzije senzora	361 mm x 205 mm x 64 mm
Radna temperatura	+5 °C do +40 °C

ATOS Core 300 sastoji se od projektora, dviju kamera i upravljačke jedinice (slika 4.3.). Ključni aspekt ovog sustava je mjerni volumen, koji se definira izborom odgovarajuće leće. Mjerni volumen određuje veličinu područja koje se može skenirati. Za male objekte, ATOS Core 300 nudi visoku točnost, prema proizvođaču, s mogućnošću mjerenja 3D koordinata s preciznošću od +/- 10 µm. Mjerni volumen može varirati ovisno o potrebama, s minimalnim dimenzijama od 180 mm × 140 mm × 140 mm i maksimalnim dimenzijama od 300 mm × 230 mm × 230 mm.



Slika 4.3. ATOS core mjerni koncept [48]

Sam postupak mjerenja u ovom istraživanju započeo je postavljanjem senzora i pozicioniranjem ispitnog uzorka unutar mjernog volumena. Sustav je povezan s računalom opremljenim programskim paketom GOM Scan. Uzorak je pažljivo centriran unutar mjernog polja kako bi se osiguralo optimalno snimanje iz svih potrebnih kutova. Nakon hardverske pripreme, u softveru je definiran novi mjerni projekt te su odabrani parametri skeniranja, uključujući postavke kvalitete, vrijeme ekspozicije kamera i provjeru temperature senzora, što predstavlja preduvjet za osiguravanje mjeriteljske pouzdanosti. Postavka mjernog sustava i uzorka neposredno prije skeniranja prikazana je na slici 4.4.



Slika 4.4. Postupak skeniranja optičkim 3D mjernim sustavom

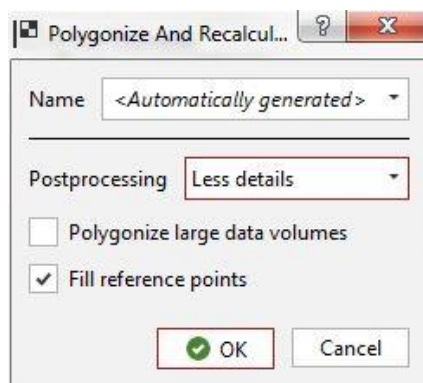
Tijekom samog postupka, uzorak se digitalizira iz različitih pozicija i kutova. Početna pozicija odabire se tako da sustav prepozna i registrira najveći mogući broj referentnih točaka (markera). Te točke imaju ključnu ulogu u procesu usklađivanja (spajanja) pojedinačnih snimaka u jedinstveni koordinatni sustav; svako sljedeće skeniranje mora obuhvatiti najmanje tri zajedničke referentne točke s prethodnog snimka kako bi softver točno definirao relativni položaj objekta u prostoru. Projekcijom plavog svjetla na površinu objekta i snimanjem refleksije i deformacije resa dvjema kamerama generira se gusti oblak točaka koji predstavlja konačni digitalni zapis geometrije, spreman za daljnju obradu.

4.1.3 Naknadna obrada podataka

Naknadna obrada podataka (engl. *postprocessing*) u postupku optičkog 3D mjerenja predstavlja ključnu fazu u kojoj se sirovi podaci prikupljeni tijekom skeniranja transformiraju u upotrebljive 3D modele i precizno definirane geometrijske značajke. Ova faza obuhvaća niz tehničkih postupaka, uključujući generiranje 3D modela, konstrukciju zamjenskih geometrijskih elemenata te njihovu mjeriteljsku analizu.

Za potrebe ovog istraživanja korišten je programski paket GOM Inspect Professional, alat za inspekciju i analizu 3D podataka. Jedna od ključnih funkcija softvera je poligonizacija (engl. *polygonization*), koja omogućava pretvorbu oblaka točaka dobivenih skeniranjem u poligonalnu mrežu, stvarajući time detaljan 3D model objekta.

Softver nudi različite opcije poligonizacije, uključujući izbor razine detalja. U ovom su istraživanju korištene dvije varijante poligonizacije: jedna s višom i jedna s nižom razinom detalja, kako bi se ispitala razlika u utjecaju rezolucije mreže na rezultate mjerenja. Ovakav pristup omogućio je analizu potencijalnih varijacija u točnosti mjerenja ovisno o odabranom stupnju detalja, što je ključno za razumijevanje utjecaja parametara naknadne obrade na rezultate. Sučelje s postavkama funkcije poligonizacije prikazano je na slici 4.5.



Slika 4.5. Prikaz funkcije poligonizacije u programskom paketu

Kvaliteta konačnog 3D modela uvelike ovisi o načinu obrade sirovih podataka dobivenih skeniranjem. Postupkom poligonizacije definiraju se konture i površine objekta, a ovisno o primijenjenoj razini detalja, generiraju se modeli različite mjeriteljske pouzdanosti. U tablici 4.3. grafički su prikazane karakteristike koje proizlaze iz triju faza obrade: sirovih podataka, poligonizacije s nižom razinom detalja te poligonizacije s višom razinom detalja.

Tablica 4.3. Usporedba karakteristika 3D modela

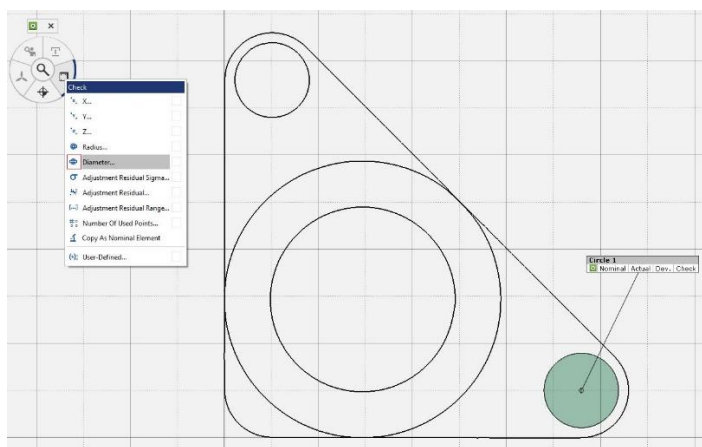
3D model		
Sirovi podaci	Poligonizacija (niža razina detalja)	Poligonizacija (viša razina detalja)
Nepravilnosti	Pojednostavljena geometrija	Veći broj poligona
Šum	Glatke konture	Jasne konture
Greške	Izgubljeni detalji	Vidljivi detalji

Nakon generiranja 3D modela uslijedila je faza određivanja značajki koje su bile predmet analize u ovom radu. Analizirano je ukupno sedam dimenzijskih i geometrijskih karakteristika: promjer, osni razmak, kružnost, koncentričnost, ravnost, paralelnost i okomitost. Određivanje navedenih veličina zahtijevalo je prethodnu konstrukciju odgovarajućih zamjenskih geometrijskih elemenata (poput ravnina i kružnica) na samom 3D modelu. Ovaj je korak kritičan jer izravno mjerenje na modelu nije moguće bez jasnog definiranja idealnih referentnih elemenata.

Navedeni postupci temeljili su se na interpolaciji podataka unutar 3D modela, što je omogućilo precizno definiranje potrebnih značajki. Korištene su dvije matematičke metode interpolacije: Gaussian Best Fit (Gaussova metoda najmanjih kvadrata) i Chebyshev Best Fit (Čebiševljeva metoda – metoda minimalne zone).

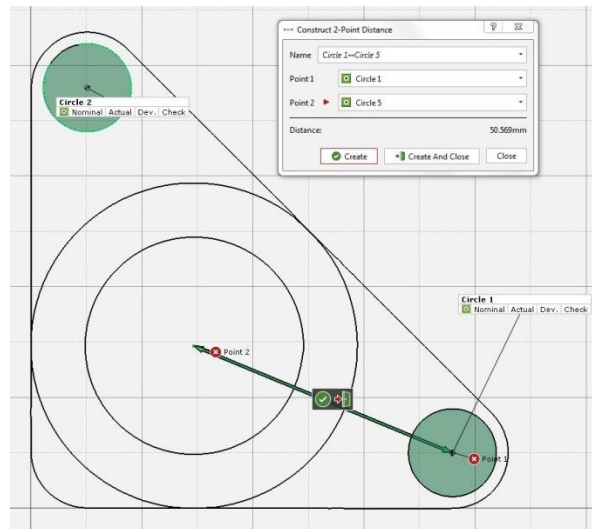
Detalji postupaka mjerenja za pojedine značajke obuhvaćali su sljedeće korake:

- Promjer: Prvo je izrađen presjek skeniranog objekta korištenjem funkcije "Construct Section". Nakon odabira ravnine i područja presjeka, kreiran je obris kružnice, na kojem je s pomoću funkcije "Construct Circle" interpolirana kružnica. Sukladno planu pokusa, za interpolaciju su naizmjenično korištene Gaussova metoda i Čebiševljeva metoda, dok je u kasnijoj procjeni mjerne nesigurnosti primijenjena isključivo Gaussova metoda. Mjerenje promjera izvršeno je s pomoću funkcije "Diameter" unutar GD&T izbornika (slika 4.6.).



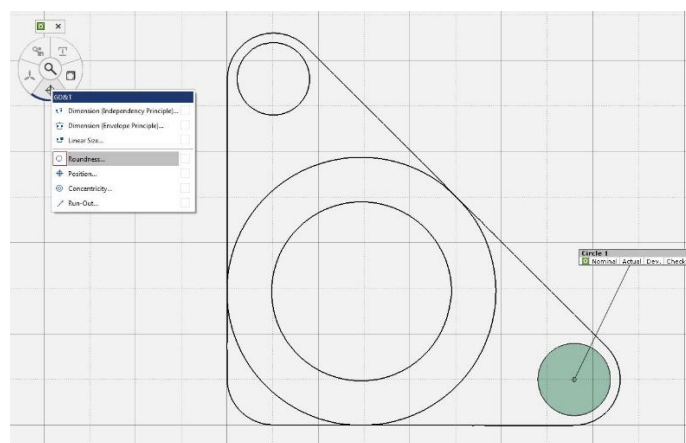
Slika 4.6. Prikaz mjerenja promjera

- Osni razmak: Za mjerenje osnovog razmaka između dviju konstruiranih kružnica korištena je funkcija "Measuring Distance". Osni razmak je mjerena odabirom dviju kružnica i primjenom odgovarajuće metode mjerenja (slika 4.7.).



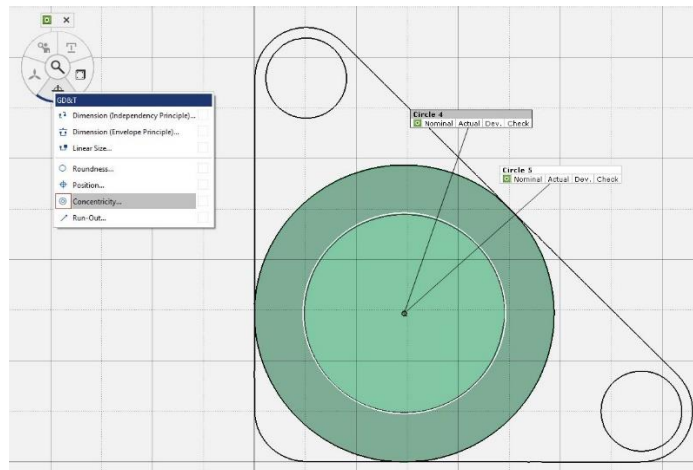
Slika 4.7. Prikaz mjerenja osnovnog razmaka

- Kružnost: Mjerenje kružnosti provedeno je na već konstruiranim kružnicama s pomoću funkcije "Roundness" unutar GD&T izbornika. Sukladno planu pokusa, za interpolaciju su naizmjenično korištene Gaussova metoda i Čebiševljeva metoda, dok je u kasnijoj procjeni mjerne nesigurnosti, prema zahtjevima ISO standarda za odstupanja oblika, primijenjena isključivo Čebiševljeva metoda (slika 4.8.).



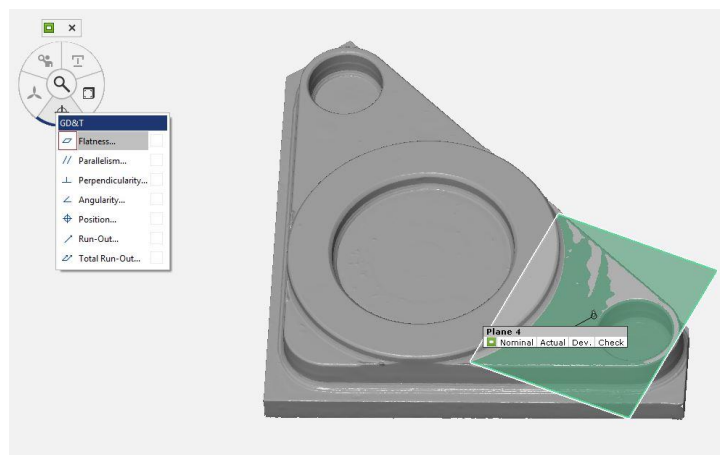
Slika 4.8. Prikaz mjerenja kružnosti

- Koncentričnost: Mjerenje koncentričnosti između dviju kružnica provedeno je korištenjem funkcije "Concentricity" iz GD&T izbornika. Pritom je, sukladno tehničkoj skici uzorka (slika 4.1), kao referentna baza (D) definiran vanjski kružni prsten ($\varnothing 58,56$ mm), dok je tolerirani element bio unutarnji glavni provrt ($\varnothing 40$ mm). Time je utvrđeno odstupanje središta unutarnjeg provrta u odnosu na os baze D (slika 4.9).



Slika 4.9. Prikaz mjerenja koncentričnosti

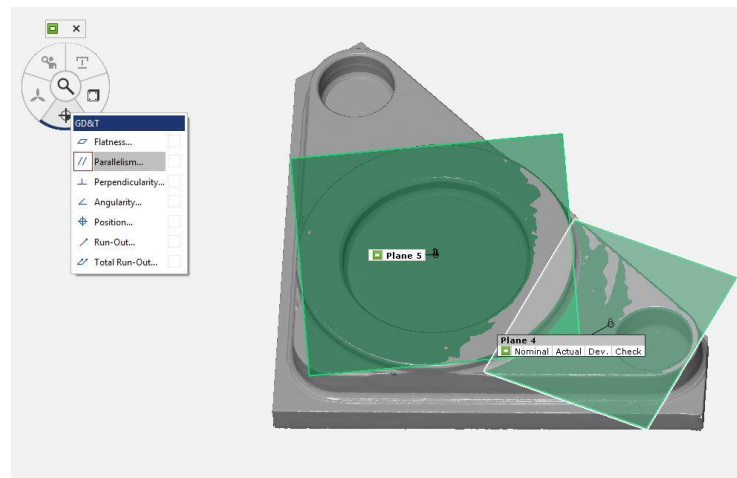
- **Ravnost:** Ravnost površine izmjerena je nakon konstruiranja ravnine s pomoću funkcije "Construct Plane". Sukladno planu pokusa, za interpolaciju su naizmjenično korištene Gaussova metoda i Čebiševljeva metoda, dok je u kasnijoj procjeni mjerne nesigurnosti, prema zahtjevima ISO standarda za odstupanja oblika, primijenjena isključivo Čebiševljeva metoda. Nakon toga, funkcija "Flatness" unutar GD&T izbornika korištena je za određivanje ravnosti te ravnine (slika 4.10.).



Slika 4.10. Prikaz mjerenja ravnosti

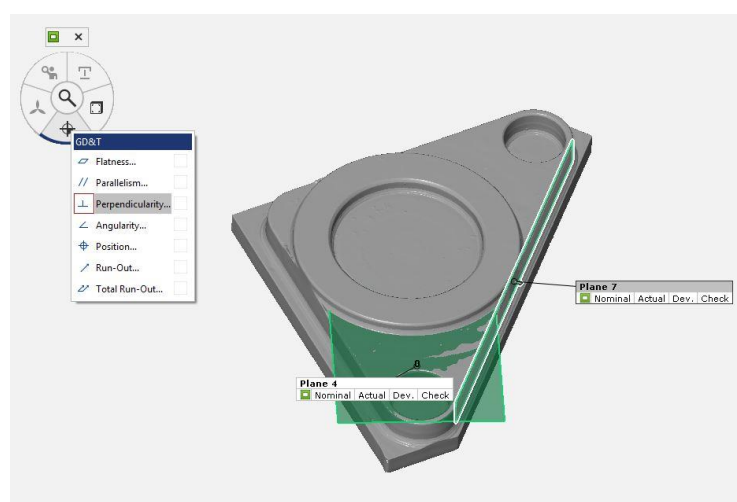
- **Paralelnost:** Mjerenje paralelnosti provedeno je korištenjem funkcije "Parallelism" unutar GD&T izbornika. Pritom je, sukladno mjeriteljskim pravilima za ocjenjivanje značajki orijentacije te tehničkoj skici uzorka (slika 4.1.), jedna konstruirana ravnina jasno definirana kao referentna baza (A) dok je druga ravnina (gornja površina uzorka) definirana kao tolerirani element. Sukladno planu pokusa, za interpolaciju ovih ravnina

naizmjenično su korištene Gaussova metoda i Čebiševljeva metoda, dok je u kasnijoj procjeni mjerne nesigurnosti primijenjena isključivo Gaussova metoda (slika 4.11.).



Slika 4.11. Prikaz mjerenja paralelnosti

- Okomitost: Mjerenje okomitosti provedeno je korištenjem funkcije "Verticality" unutar GD&T izbornika. Pritom je, sukladno mjeriteljskim pravilima za ocjenjivanje značajki orijentacije te tehničkoj skici uzorka (slika 4.1.), jedna konstruirana ravnina jasno definirana kao referentna baza (E), dok je druga ravnina (najduža bočna ploha uzorka) definirana kao tolerirani element. Sukladno planu pokusa, za interpolaciju ovih ravnina naizmjenično su korištene Gaussova metoda i Čebiševljeva metoda, dok je u kasnijoj procjeni mjerne nesigurnosti primijenjena isključivo Gaussova metoda (slika 4.27.).



Slika 4.12. Prikaz mjerenja okomitosti

4.2 Određivanje utjecajnih faktora

Jedan od ciljeva istraživanja bio je precizno identificirati i kvantificirati utjecaj specifičnih faktora koji su izravno povezani s karakteristikama mjerenih objekata i parametrima korištenog softvera. Tako je omogućeno dubinsko razumijevanje kako ti faktori utječu na mjerenja, i posljedično, na kvalitetu rezultata.

U ovom dijelu istraživanja nisu razmatrani utjecaji faktora poput mjeritelja, hardvera ili okolišnih uvjeta. Razlog tome je što je sva mjerenja napravio isti operater u kontroliranim laboratorijskim uvjetima koristeći isti mjerni uređaj. Takav pristup eliminira varijabilnost koja bi mogla nastati uslijed promjena u operativnom postupku ili okolišnim uvjetima, omogućujući usmjerenost na one faktore koji su izravno povezani s mjerljivim karakteristikama samih objekata ili postavkama softvera. Faktori vezani uz karakteristike mjerenih objekata, poput hrapavosti površine i upotrebe premaza za matiranje, odabrani su zbog njihovog potencijalnog utjecaja na preciznost mjerenja. S druge strane, softverski faktori kao što su poligonizacija i interpolacija odabrani su zbog njihove uloge u digitalnoj obradi podataka, koja može značajno utjecati na konačnu kvalitetu 3D modela.

Rezultati analize provedenih mjerenja procijenjeni su koristeći analizu varijance. Ova metoda omogućuje statističku procjenu značajnosti utjecaja svakog faktora.

4.2.1 Plan pokusa

Sva mjerenja u ovom istraživanju proveo je isti operater koristeći isti mjerni uređaj u laboratorijskim uvjetima, čime je osigurano kontrolirano okruženje. Takav pristup osigurava da su faktori povezani s okolišnim uvjetima, hardverom i samim operaterom eliminirani iz razmatranja kao potencijalni izvori varijabilnosti u rezultatima mjerenja. Time se pažnja usmjerava na analizu specifičnih faktora koji izravno utječu na točnost i pouzdanost rezultata mjerenja. U ovom eksperimentu razmatrane su dvije glavne kategorije utjecajnih faktora: faktori vezani uz mjerene objekte i faktori povezani sa softverskim parametrima koji se koriste tijekom obrade podataka. Unutar prve kategorije, istraženi su utjecaji hrapavosti površine i upotrebe premaza za matiranje. Unutar druge kategorije, analiziran je utjecaj postavki poligonizacije i interpolacije na rezultate mjerenja.

Hrapavost površine je odabrana kao utjecajni faktor zbog svog značajnog utjecaja na kvalitetu skeniranih podataka. Različiti stupnjevi hrapavosti korišteni su kako bi se ispitao njihov utjecaj na točnost mjerenja.

Premaz za matiranje korišten je kao drugi utjecajni faktor vezan uz mjerene objekte. Premazi za matiranje primjenjuju se na površinu objekta kako bi se smanjila refleksija. Međutim, primjena premaza može promijeniti površinska svojstva objekta, utječući na točnost i vjerodostojnost mjerenja.

Unutar softverskih postavki, poligonizacija i interpolacija su identificirane kao ključni faktori koji izravno utječu na digitalnu reprezentaciju skeniranog objekta. Poligonizacija je proces pretvaranja oblaka točaka, dobivenih skeniranjem, u poligonalne mreže koje predstavljaju površinu objekta u 3D modelu. Ovaj postupak je važan za generiranje točnih 3D modela, jer postavke poligonizacije mogu značajno utjecati na razinu detalja i preciznost modela. U ovom istraživanju, ispitani su različiti stupnjevi poligonizacije kako bi se utvrdilo kako promjene u broju poligona i detaljnosti mreže utječu na rezultate mjerenja.

Interpolacija je drugi ključni softverski faktor koji se odnosi na generiranje geometrijskih značajki. U ovom istraživanju korištene su dvije različite metode interpolacije, "Gaussian Best Fit" i "Chebyshev Best Fit", kako bi se usporedili njihovi učinci na geometriju i preciznost mjerenja.

U ovom istraživanju primijenjen je potpuni faktorski plan pokusa s četiri kategorijska faktora na dvije razine, kako bi se omogućilo sustavno ispitivanje njihovog utjecaja na proces mjerenja. Odabrani utjecajni faktori i pripadajuće vrijednosti koje će se primijeniti u provedbi pokusa su: hrapavost površine (manja i veća hrapavost), način nanošenja matirajućeg premaza (sprej u boci i pištolj za prskanje), poligonizacija (manje i više detalja) te metoda interpolacije (algoritmi Gaussian Best Fit i Chebyshev Best Fit). Plan pokusa kreiran je korištenjem softvera Design Expert 12, koji je korišten za generiranje redoslijeda mjerenja i uvjeta ispitivanja, što je prikazano u tablici 4.4.

Tablica 4.4. Redoslijed mjerenja prema planu pokusa

R.B.	Hrapavost (Ra)	Premaz	Poligonizacija	Interpolacija
1.	Veća hrapavost	Sprej u boci	Više detalja	Chebyshev
2.	Manja hrapavost	Sprej u boci	Više detalja	Gaussian
3.	Veća hrapavost	Pištoltj	Manje detalja	Chebyshev
4.	Manja hrapavost	Sprej u boci	Manje detalja	Chebyshev
5.	Veća hrapavost	Sprej u boci	Više detalja	Gaussian
6.	Manja hrapavost	Pištoltj	Više detalja	Gaussian
7.	Veća hrapavost	Sprej u boci	Manje detalja	Gaussian
8.	Manja hrapavost	Pištoltj	Manje detalja	Chebyshev
9.	Manja hrapavost	Sprej u boci	Manje detalja	Gaussian
10.	Veća hrapavost	Pištoltj	Manje detalja	Gaussian
11.	Manja hrapavost	Pištoltj	Manje detalja	Gaussian
12.	Manja hrapavost	Pištoltj	Više detalja	Gaussian
13.	Veća hrapavost	Sprej u boci	Manje detalja	Chebyshev
14.	Manja hrapavost	Sprej u boci	Više detalja	Chebyshev
15.	Veća hrapavost	Pištoltj	Više detalja	Chebyshev
16.	Manja hrapavost	Pištoltj	Više detalja	Chebyshev

U skladu s principima potpunog faktorskog plana, broj provedenih mjerenja određuje se prema broju faktora ($N = 2^k$), gdje je k broj faktora. U ovom slučaju, s četiri analizirana faktora (hrapavost površine, premaz za matiranje, poligonizacija i interpolacija), proveden je po jedan ciklus mjerenja za svaku kombinaciju (bez ponavljanja), što je rezultiralo s ukupno 16 mjerenja. Kako bi se eliminirao potencijalni utjecaj sustavnih pogrešaka i vanjskih faktora tijekom vremena, redoslijed izvođenja ovih mjerenja bio je u potpunosti randomiziran uz pomoć softvera Design Expert 12.

Svi faktori u ovom eksperimentu tretirani su kao kategorijski faktori, pri čemu je svaki faktor imao dvije razine. Numeričke vrijednosti hrapavosti površine nisu bile ključne u ovom istraživanju, već je fokus bio na razlikovanju između različitih stupnjeva hrapavosti korištenih objekata.

4.2.2 Rezultati mjerenja

U skladu s prethodno definiranim redoslijedom mjerenja i eksperimentalnim uvjetima prikazanim u tablici 4.4., ukupno je provedeno 16 mjerenja, a rezultati su predstavljeni u tablici 4.5. Redci u tablici odgovaraju redoslijedu mjerenja, dok stupci predstavljaju geometrijske karakteristike koje su mjerene. Analizirane geometrijske karakteristike uključuju promjer, osni razmak, kružnost, koncentričnost, ravnost, paralelnost i okomitost. Tablica 4.5. prikazuje numeričke vrijednosti izmjerenih geometrijskih karakteristika za svaki pojedinačni

eksperimentalni ciklus. Ove vrijednosti pružaju kvantitativni uvid u varijacije mjerenja pod različitim uvjetima, omogućujući daljnju analizu i usporedbu kako bi se identificirali ključni faktori koji utječu na točnost i pouzdanost mjerenja. Svaki unos u tablici predstavlja izmjerenu vrijednost određene geometrijske karakteristike za specifičan ciklus mjerenja. Na primjer, vrijednost promjera varira od 39,24 mm do 39,57 mm, dok se kružnost kreće od 0,04 mm do 0,44 mm, ovisno o specifičnim uvjetima mjerenja. Pritom je važno naglasiti da ovako značajna varijacija u dimenzijama (poput promjera) primarno proizlazi iz stvarnih fizičkih razlika između dvaju ispitnih uzoraka. Naime, budući da su različiti stupnjevi hrapavosti postignuti primjenom različitih režima glodanja pri CNC obradi, očekivano je i neizbježno da su sami predmeti poprimili fizički različite dimenzije i geometrijske karakteristike. Ove varijacije ilustriraju osjetljivost mjernih rezultata na promjene u eksperimentalnim faktorima poput hrapavosti površine, premaza za matiranje, postavki poligonizacije i interpolacije. Rezultati u tablici 4.5. također pružaju osnovu za daljnje statističke analize, kao što je analiza varijance, koja se koristila za procjenu značajnosti utjecaja svakog faktora na pojedine geometrijske karakteristike.

Tablica 4.5. Rezultati mjerenja

R.B.	Promjer / mm	Osni razmak / mm	Kružnost / mm	Koncentričnost / mm	Ravnost / mm	Paralelnost / mm	Okomitost / mm
1.	39,245	93,155	0,09	0,02	0,07	0,14	0,31
2.	39,493	93,159	0,08	0,03	0,12	0,16	0,48
3.	39,284	93,243	0,17	0,09	0,06	0,09	0,34
4.	39,531	93,137	0,05	0,06	0,03	0,11	0,34
5.	39,242	93,155	0,09	0,04	0,07	0,14	0,31
6.	39,330	93,193	0,44	0,03	0,10	0,14	0,31
7.	39,269	93,137	0,04	0,09	0,03	0,09	0,31
8.	39,553	93,238	0,20	0,14	0,08	0,12	0,43
9.	39,522	93,148	0,05	0,06	0,04	0,12	0,36
10.	39,313	93,230	0,20	0,07	0,07	0,10	0,34
11.	39,549	93,229	0,24	0,15	0,10	0,13	0,43
12.	39,573	93,206	0,28	0,15	0,12	0,18	0,43
13.	39,286	93,137	0,04	0,09	0,03	0,09	0,31
14.	39,507	93,158	0,08	0,04	0,09	0,14	0,37
15.	39,312	93,199	0,42	0,03	0,10	0,14	0,31
16.	39,557	93,206	0,26	0,02	0,12	0,18	0,43

4.2.3 ANOVA analiza

Za statističku analizu rezultata eksperimentalnih mjerenja korišten je softver Design Expert 12, koji je omogućio razvoj modela za opisivanje utjecaja ulaznih faktora na izmjerene geometrijske karakteristike. Valjanost tih modela procijenjena je s pomoću p -vrijednosti, koeficijenta determinacije (engl. *R-squared*), te analize normalnog rasporeda reziduala. Analiza varijance korištena je kako bi se utvrdila statistička značajnost utjecaja pojedinih faktora. Ovakav pristup optimizaciji mjernih parametara u 3D mjeriteljstvu pokazao se učinkovitim i u srodnim istraživanjima; primjerice, Razumić [92] primjenom analize varijance uspješno identificira dominantne utjecaje parametara skeniranja na rezultate analize topografije površine.

Tablica 4.6. prikazuje rezultate ANOVA analize za različite geometrijske karakteristike, uključujući promjer, osni razmak, kružnost, koncentričnost, ravnost, paralelnost i okomitost. U tablici su navedene p -vrijednosti koje ukazuju na statističku značajnost utjecaja pojedinih faktora na izmjerene karakteristike. P -vrijednost manja od 0,05 ukazuje na statistički značajnu razliku u srednjim vrijednostima utjecajnih faktora, što sugerira da ti faktori značajno utječu na rezultat mjerenja. Svi modeli prikazani u tablici pokazuju p -vrijednosti ispod 0,05, što upućuje na značajan utjecaj na izmjerene geometrijske karakteristike.

Tablica 4.6. Rezultati p -vrijednosti ANOVA analize

R.B.	Geometrijska karakteristika	Model	Hrapavost (R_a)	Premaz	Poligonizacija	Interpolacija
1.	Promjer	< 0,001	< 0,001	0,002	0,510	0,820
2.	Osni razmak	< 0,001	0,630	< 0,001	0,310	0,800
3.	Kružnost	< 0,001	0,340	< 0,001	< 0,001	0,550
4.	Koncentričnost	0,035	0,260	0,150	0,008	0,340
5.	Ravnost	< 0,001	0,009	< 0,001	< 0,001	0,200
6.	Paralelnost	< 0,001	< 0,001	0,016	< 0,001	0,120
7.	Okomitost	0,001	< 0,001	0,090	0,540	0,350

Rezultati ANOVA analize ukazuju na to da utjecajni faktori imaju varijabilan utjecaj ovisno o specifičnoj geometrijskoj karakteristici koja se mjeri. P -vrijednosti omogućuju identifikaciju značajnosti svakog pojedinog faktora na mjerene karakteristike. Konkretno, analiza pokazuje da premaz za matiranje značajno utječe na pet geometrijskih karakteristika, dok poligonizacija i hrapavost površine imaju značajan utjecaj na četiri karakteristike. Nasuprot tome, interpolacija nije pokazala značajan utjecaj na mjerene rezultate kod svih analiziranih geometrijskih karakteristika.

Detaljnija analiza otkriva da premaz za matiranje utječe na promjer, osni razmak, kružnost, ravnost i paralelnost (r. b. 1, 2, 3, 5 i 6 iz Tablice 4.6), dok poligonizacija pokazuje značajan utjecaj na kružnost, koncentričnost, ravnost i paralelnost (r. b. 3, 4, 5 i 6). Hrapavost površine, s druge strane, utječe na rezultate mjerenja promjera, ravnosti, paralelnosti i okomitosti (r. b. 1, 5, 6 i 7). Ovi rezultati upućuju na to da različiti faktori utječu na specifične geometrijske karakteristike objekta, što je ključno za optimizaciju proizvodnih procesa i osiguravanje kvalitete proizvoda u kontekstu industrije 4.0.

U tablici 4.7. prikazane su R^2 vrijednosti. Najveće R^2 vrijednosti, kao što su 0,98 za promjer, 0,93 za kružnost i 0,95 za paralelnost, ukazuju na visok stupanj korelacije između mjerenih varijabli i odabranih modela. Ove visoke R^2 vrijednosti potvrđuju dobru prediktivnu sposobnost modela za odgovarajuće geometrijske karakteristike. S druge strane, R^2 vrijednost od 0,58 za koncentričnost sugerira da odabrani model objašnjava približno 58 % varijabilnosti u koncentričnosti, što ukazuje na umjeren stupanj korelacije između modela i stvarnih mjerenja. Slično tome, za osni razmak, ravnost i okomitost, s R^2 vrijednostima od 0,87, 0,89 i 0,77, implicira se da modeli pružaju dobro, ali ne savršeno, poklapanje za ove karakteristike.

Tablica 4.7. Rezultati R^2

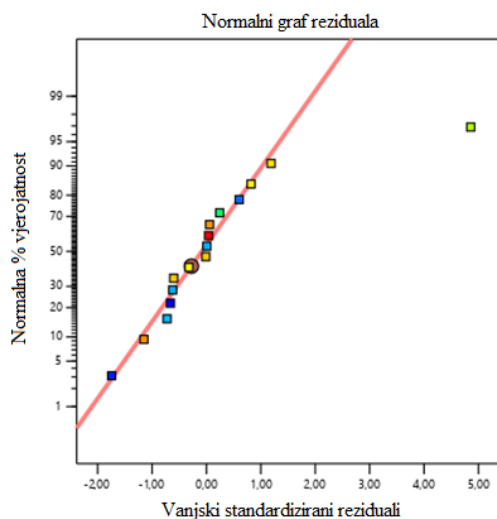
Geometrijska karakteristika	R^2
Promjer	0,98
Osni razmak	0,87
Kružnost	0,93
Koncentričnost	0,58
Ravnost	0,89
Paralelnost	0,95
Okomitost	0,77

Vrijednosti između 50 % i 90 % sugeriraju umjerenu do visoku povezanost, ali i dalje postoji određena varijabilnost koju modeli ne obuhvaćaju u potpunosti. Iako R^2 vrijednosti za koncentričnost, osni razmak, ravnost i okomitost nisu iznad 90 %, one ipak ukazuju na značajan stupanj korelacije, što upućuje na to da su odabrani modeli relativno učinkoviti u objašnjavanju varijabilnosti ovih geometrijskih karakteristika.

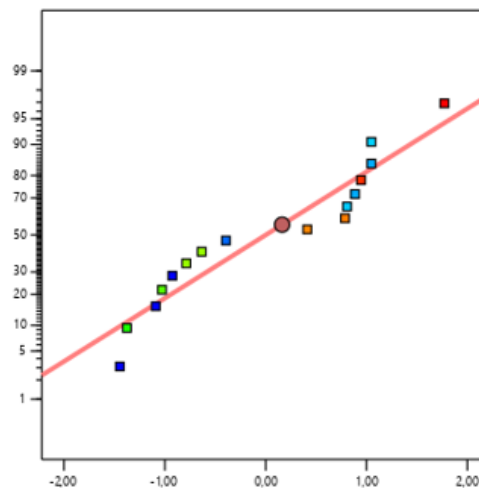
Normalni probabilistički grafovi reziduala za promatrane geometrijske karakteristike prikazani su na slici 4.13. Ovi dijagnostički grafovi koriste se za provjeru pretpostavke normalne raspodjele reziduala, što predstavlja jedan od osnovnih uvjeta za primjenu analize varijance.

Ako reziduali slijede približno linearan raspored duž referentnog pravca, može se zaključiti da je pretpostavka normalnosti zadovoljena.

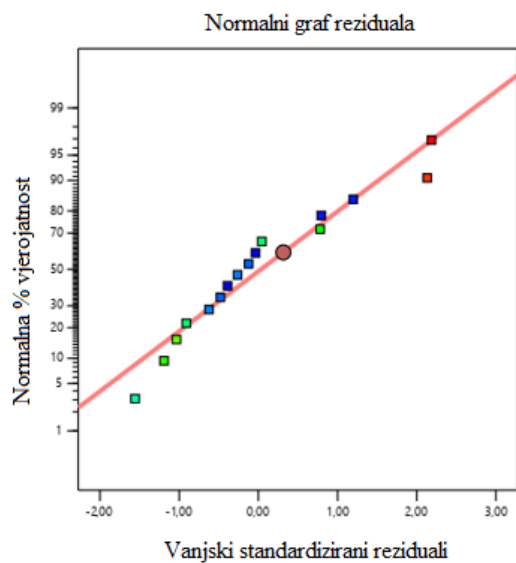
a) Promjer



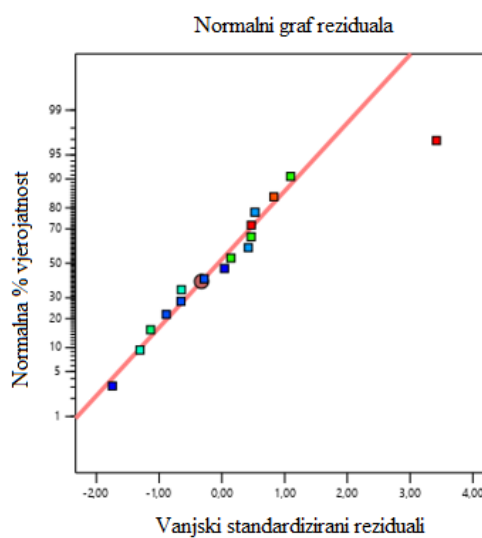
b) Osni razmak

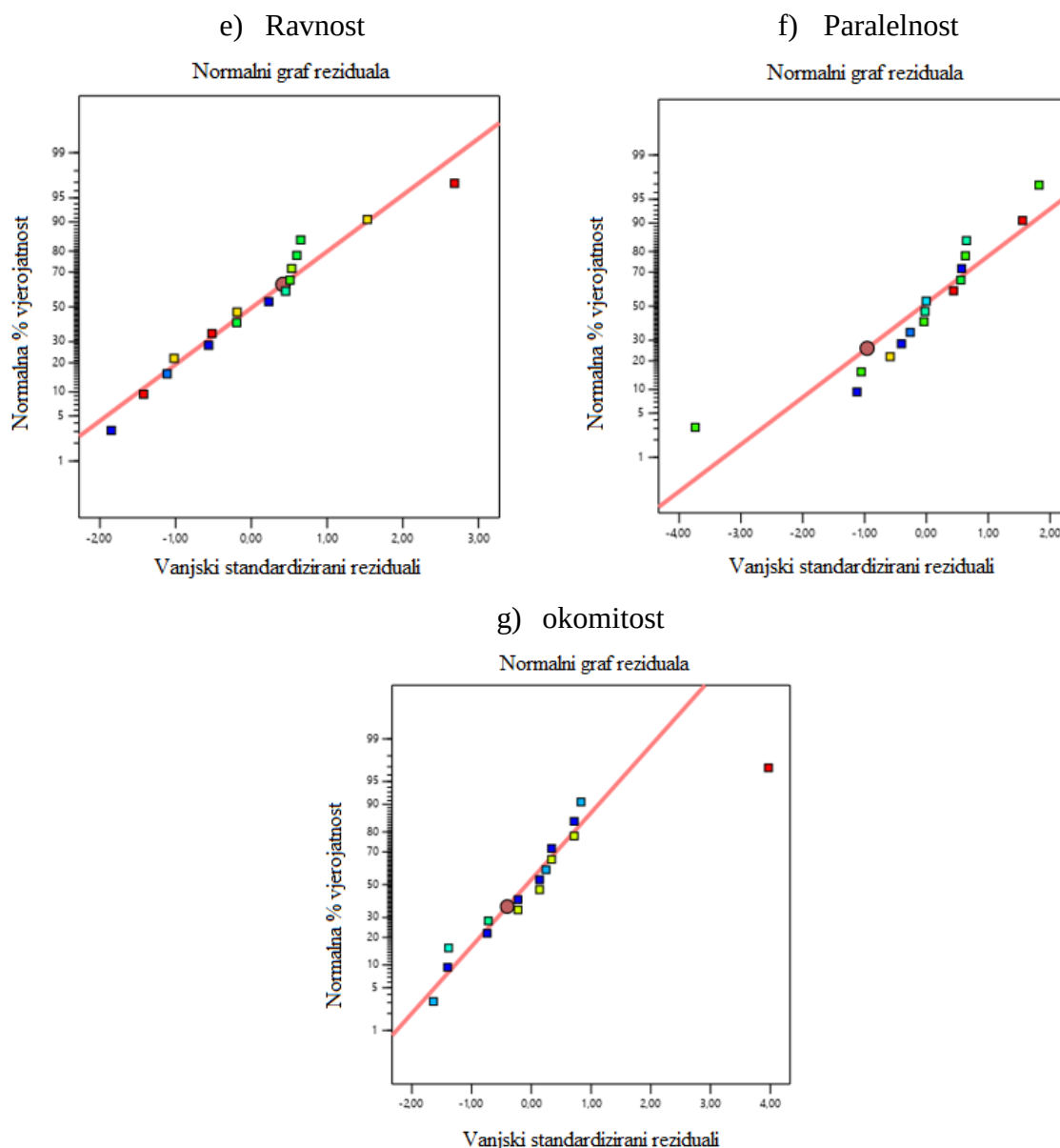


c) Kružnost



d) Koncentričnost





Slika 4.13. Normalni probabilistički grafik: a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost

Analiza dobivenih grafova pokazuje da se reziduali za promjer, osni razmak, kružnost, ravnost i paralelnost raspoređuju približno uz referentni pravac, bez izraženih sustavnih odstupanja, što upućuje na približno normalnu raspodjelu podataka. Manja odstupanja pojedinih točaka prisutna su na krajevima razdiobe, što je uobičajeno kod eksperimentalnih istraživanja s relativno ograničenim brojem mjerenja. S druge strane, kod koncentričnosti i okomitosti uočljivo je pojedinačno odstupanje jedne točke od linearnog trenda, što može biti posljedica izolirane pogreške tijekom mjerenja ili lokalne varijacije u eksperimentalnom postupku.

Međutim, s obzirom na to da se radi o pojedinačnim odstupanjima, njihov utjecaj na ukupnu raspodjelu reziduala i rezultate statističke analize može se smatrati zanemarivim.

Na temelju prikazanih dijagnostičkih grafova može se zaključiti da pretpostavka normalne raspodjele reziduala nije narušena te da su zadovoljeni osnovni statistički uvjeti za primjenu ANOVA metode u analizi utjecaja promatranih faktora na rezultate mjerenja geometrijskih karakteristika.

5. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI

U ovom istraživanju primijenjen je hibridni pristup procjeni mjerne nesigurnosti, koji kombinira različite metode s ciljem dobivanja sveobuhvatnije i pouzdanije analize. Standardizirani postupak temeljen na GUM vodiču poslužio je za teorijsku procjenu mjerne nesigurnosti kroz analitičko kombiniranje pojedinačnih izvora nesigurnosti. S druge strane, primjena norme ISO 15530-3:2011 omogućila je procjenu nesigurnosti u realnom, industrijskom kontekstu, gdje se koriste referentni artefakti i eksperimentalni podaci. Uz to je provedena Monte Carlo simulacija, koja daje statistički prikaz širenja nesigurnosti putem numeričkog modeliranja velikog broja slučajnih ponavljanja. Dodatno, Bayesova metoda omogućila je uključivanje priornih informacija i analizu razdioba vjerojatnosti, čime je obogaćena interpretacija rezultata. Kombiniranjem ovih pristupa dobiven je sveobuhvatan uvid u ponašanje mjernog sustava, čime se potvrđuje vrijednost hibridne metodologije u suvremenoj metrologiji.

5.1 Procjena mjerne nesigurnosti prema ISO 15530-3

Procjena proširene mjerne nesigurnosti u ovom istraživanju provedena je koristeći standardizirani postupak za trokoordinatne mjerne sustave, u skladu s ISO 15530-3:2011 [96], [97]. ISO 15530-3 je tehnička specifikacija koja koristi supstitucijsku metodu za procjenu mjerne nesigurnosti, posebno u optičkim 3D mjernim sustavima. Ova metoda omogućuje prijenos nesigurnosti mjerenja s umjerenog referentnog dijela na stvarni radni komad, uzimajući u obzir sličnost dimenzija i oblika između dva objekta. Metoda se temelji na statističkoj procjeni mjernih pogrešaka u odnosu na umjerne vrijednosti referentnog dijela [98].

Proračun mjerne nesigurnosti prema ISO 15530-3 uključuje četiri glavna doprinosa nesigurnosti: nesigurnost povezana s umjeravanjem (u_{cal}), nesigurnost postupka mjerenja (u_p), nesigurnost zbog sustavne pogreške (u_b) i nesigurnost povezana s materijalom i proizvodnim varijacijama (u_w). Ovi doprinosi se kombiniraju s pomoću zakona propagacije nesigurnosti kako bi se izračunala ukupna standardna nesigurnost. Proširena mjerna nesigurnost dobila se proširivanjem ukupne standardne nesigurnosti faktorom pokrivanja prema formuli:

$$U = k \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2} \quad (5.1)$$

Standardna nesigurnost u_{cal} određena je iz proširene nesigurnosti referentnog mjerenja U_{cal} , primjenom faktora pokrivanja k .

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k} \quad (5.2)$$

Standardna nesigurnost povezana s mjernim postupkom određena je na temelju 10 ponovljenih mjerenja te je izračunata prema sljedećem izrazu:

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5.3)$$

gdje n označava broj mjerenja (u ovom slučaju $n = 10$), Y_i predstavlja rezultat mjerenja, a $\bar{Y}$ je srednja vrijednost rezultata mjerenja.

Prema tehničkoj specifikaciji ISO 15530-3, sustavna pogreška (b) određena je eksperimentalno kao razlika između srednje vrijednosti niza ponovljenih mjerenja umjerenog predmeta (etalona) i njegove referentne umjerene vrijednosti:

$$b = \bar{y} - x_{cal} \quad (5.4)$$

gdje su:

$\bar{y}$ – aritmetička sredina rezultata mjerenja etalona na optičkom sustavu

x_{cal} – umjerena vrijednost etalona (referentna vrijednost).

U ovom radu primijenjena je supstitucijska metoda s korekcijom rezultata, sukladno preporukama GUM-a i ISO 15530-3 [91, 97]. To znači da je rezultat mjerenja (Y) korigiran za iznos utvrđene sustavne pogreške (b):

$$Y = y - b \quad (5.5)$$

Budući da je sustavna pogreška uklonjena računskim putem, ona više ne doprinosi izravno mjernoj nesigurnosti. Umjesto toga, komponenta u_b predstavlja standardnu mjernu nesigurnost povezanu s provedenom korekcijom. Ova nesigurnost proizlazi primarno iz nesigurnosti poznavanja koeficijenta toplinskog rastezanja referentnog predmeta (etalona) te temperaturnih

uvjeta tijekom procesa korekcije. Materijal referentnog predmeta je čelik (koeficijent toplinskog rastezanja iznosi $12 \cdot 10^{-6} \pm 2 \text{ K}^{-1}$), a pretpostavljena je razlika temperature od 3°C u odnosu na referentnu temperaturu. Vrijednost u_b izračunata je prema:

$$u_b = (T - 20^\circ\text{C}) \cdot u_{\alpha b} \cdot L \quad (5.6)$$

gdje su:

T – srednja temperatura tijekom mjerenja ($^\circ\text{C}$)

$u_{\alpha b}$ – standardna nesigurnost koeficijenta toplinskog rastezanja referentnog predmeta (K^{-1})

L – izmjerena duljina (mm).

Parametar $u_{\alpha b}$ procijenjen je na temelju granica raspona koeficijenta rastezanja materijala etalona uz pretpostavku pravokutne razdiobe ($a/\sqrt{3}$). Ovakvim pristupom osigurano je da je doprinos sustavne pogreške minimiziran, a preostala nesigurnost (u_b) realno odražava točnost procesa korekcije.

Standardna mjerna nesigurnost povezana s materijalom i varijacijama proizvodnje (u_w) u ovom je radu procijenjena kao kombinirana nesigurnost dvaju nezavisnih doprinosa: nesigurnosti uslijed temperaturnih utjecaja (u_{wt}) i nesigurnosti uslijed varijabilnosti proizvodnog procesa (u_{wp}). Materijal predmeta je čelik (koeficijent toplinskog rastezanja iznosi $12 \cdot 10^{-6} \pm 2 \text{ K}^{-1}$), a pretpostavljena je razlika temperature od 3°C u odnosu na referentnu temperaturu. Ukupna nesigurnost predmeta izračunata je prema izrazu:

$$u_w = \sqrt{u_{wt}^2 + u_{wp}^2} \quad (5.7)$$

Prva komponenta, u_{wt} , odnosi se na nesigurnost koja proizlazi iz razlike u koeficijentima toplinskog rastezanja između referentnog i mjerenog predmeta te temperaturnih varijacija tijekom mjerenja. Izračunata je analitički prema formuli:

$$u_{wt} = (T - 20^\circ) \cdot u_{\alpha} \cdot L \quad (5.8)$$

gdje je T srednja temperatura tijekom mjerenja, u_{α} nesigurnost koeficijenta toplinskog rastezanja materijala predmeta, a L mjerena duljina.

Druga komponenta, u_{wp} , određena je eksperimentalno kako bi se obuhvatio utjecaj stvarnih varijacija "od dijela do dijela" (engl. *part to part variation*). Iako norma ISO 15530-3:2011 za pouzdane statističke zaključke preporučuje najmanje 20 mjerenja, u industrijskoj se praksi taj zahtjev često prilagođava zbog objektivnih ograničenja [90, 97]. Naime, procjena mjerne nesigurnosti supstitucijskom metodom iziskuje veći broj ponavljanja procesa mjerenja, što predstavlja znatno vremensko i finansijsko opterećenje. Stoga je u ovom istraživanju korišten uzorak od 10 predmeta kao optimalan kompromis između statističke pouzdanosti i izvedivosti eksperimenta. Takav se uzorak smatra adekvatnom aproksimacijom komponente u_{wp} kojom se osigurava da se stvarni utjecaj varijabilnosti predmeta ne zanemari u ukupnom proračunu mjerne nesigurnosti. Ovaj doprinos obuhvaća nesigurnosti koje proizlaze iz nesavršenosti proizvodnog procesa (poput varijacija u hrapavosti površine i pogreškama oblika) te utjecaja okoline (vibracije, lokalni toplinski gradijenti) na interakciju optičkog senzora s realnom površinom predmeta. Iznos u_{wp} određen je kao standardna devijacija navedenih mjerenja:

$$u_{wp} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5.9)$$

gdje je n broj mjerenja, Y_i rezultat mjerenja, a $\bar{Y}$ srednja vrijednost rezultata mjerenja.

Ovakvim pristupom osigurano je da procijenjena nesigurnost (u_{wp}) ne bude samo teorijska (toplinska), već da realno odražava sposobnost mjernog sustava u stvarnim uvjetima serijske proizvodnje. Primjerice, pri procjeni mjerne nesigurnosti optičkih 3D mjernih sustava, nesigurnost rezultata mjerenja može se odrediti primjenom umjerenih referentnih predmeta koji imaju iste dimenzije i svojstva kao i sam predmet mjerenja. U slučaju kada se rezultat mjerenja ne korigira za sustavnu pogrešku, navedena pogreška u potpunosti doprinosi ukupnoj mjernoj nesigurnosti [98].

Navedena metoda osobito je prikladna za serijsku proizvodnju predmeta malih i srednjih dimenzija, kod kojih je za potrebe procjene mjerne nesigurnosti moguće proizvesti i umjeriti referentni predmet. Iako navedena metoda pojednostavljuje procjenu mjerne nesigurnosti, njezina je primjena otežana pri mjerenju predmeta velikih dimenzija, kod kojih razlike između referentnog predmeta i predmeta mjerenja mogu dovesti do dodatnih nesigurnosti [98].

Za potrebe procjene nesigurnosti mjernog postupka, provedeno je deset ponovljenih mjerenja pod identičnim uvjetima, koji obuhvaćaju primjenu matirajućeg premaza, hrapavost površine i softverske postavke. Kako bi se osigurali jednaki eksperimentalni uvjeti, za mjerenja su odabrani predmeti s manjom hrapavošću, dok je matirajući premaz nanošen upotrebom pištolja. Postavka poligonizacije "više detalja" i interpolacija "Gaussian best fit" odabrani su na temelju prethodnih iskustava, kako bi se osigurali optimalni uvjeti za postizanje visoke točnosti i pouzdanosti rezultata mjerenja. Navedeni parametri pažljivo su odabrani na temelju dosadašnjih praksi, s ciljem osiguravanja visoke mjerne sposobnosti sustava. Rezultati mjerenja (srednja vrijednost i standardna devijacija) prikazani su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Rezultati srednje vrijednosti i standardnih devijacija mjerenja

Geometrijska karakteristika	Srednja vrijednost $\bar{x}/\text{mm}$	Standardna devijacija s/mm
Promjer	15,83	0,025
Osni razmak	93,15	0,021
Kružnost	0,16	0,005
Koncentričnost	0,05	0,041
Ravnost	0,09	0,008
Paralelnost	0,16	0,009
Okomitost	1,23	0,028

Proširena mjerna nesigurnost (U) izračunata je prema formuli (5.1), pri čemu se uzimaju u obzir doprinosi nesigurnosti povezane s umjeravanjem u_{cal} , postupkom mjerenja u_p , sustavnim pogreškama u_b i varijabilnošću proizvodnog procesa u_w . Svaka od ovih komponenti mjerne nesigurnosti izračunata je korištenjem odgovarajućih matematičkih izraza navedenih u formulama (5.2) do (5.9). Rezultati su prikazani u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Rezultati mjernih nesigurnosti prema ISO 15530-3:2011

Geometrijska karakteristika	u_{cal} mm	u_p mm	u_b mm	u_w mm	Proširena mjerna nesigurnost – U/mm
Promjer	0,0009	0,0261	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,0171	0,0625
Osni razmak	0,0010	0,0201	0,0001	0,0251	0,0643
Kružnost	0,0009	0,0031	$1,8 \cdot 10^{-7}$	0,0284	0,0571
Koncentričnost	0,0009	0,0418	$5,8 \cdot 10^{-8}$	0,0227	0,0951
Ravnost	0,0009	0,0090	$9,7 \cdot 10^{-8}$	0,0236	0,0505
Paralelnost	0,0009	0,0106	$1,8 \cdot 10^{-7}$	0,0502	0,1026
Okomitost	0,0009	0,0291	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,1825	0,3696

Analizom doprinosa pojedinih komponenti mjerne nesigurnosti u tablici 5.2., uočava se dominantan utjecaj komponente u_w (nesigurnost predmeta mjerenja) kod složenih

geometrijskih karakteristika, posebice kod okomitosti ($u_w = 0,1825$ mm) i paralelnosti ($u_w = 0,0502$ mm). Visok iznos ove komponente izravna je posljedica primijenjene metodologije propisane normom ISO 15530-3:2011 (Točka 7.3.4), gdje je u_w određen eksperimentalno na temelju 10 različitih uzoraka iz serijske proizvodnje. Time ova komponenta ne odražava samo nesigurnost mjernog uređaja, već obuhvaća i stvarne varijacije proizvodnog procesa. To objašnjava zašto je proširena nesigurnost (U) za okomitost (0,3696 mm) višestruko veća od nesigurnosti za promjer (0,0625 mm). S druge strane, komponenta u_b (nesigurnost sustavne pogreške) u svim je slučajevima svedena na zanemarivu vrijednost (red veličine 10^{-5} do 10^{-4} mm). Ovo potvrđuje učinkovitost primijenjene supstitucijske metode s korekcijom rezultata gdje je sustavna pogreška uklonjena, a preostali u_b predstavlja samo nesigurnost uzrokovanu toplinskim utjecajima na etalon.

5.2 Proračun mjerne nesigurnosti prema GUM

Proračun mjerne nesigurnosti prema smjernicama GUM (engl. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) opća je metoda analitičke procjene mjerne nesigurnosti primjenjiva u širokom spektru mjeriteljskih situacija. U kontekstu ovog istraživanja, GUM metoda primijenjena je kao komplementaran pristup uz normu ISO 15530-3:2011, koja se temelji na korištenju trokoordinatnog mjernog uređaja kao referentnog etalona. Proračun mjerne nesigurnosti prema smjernicama GUM proveden je kako bi se procijenila ukupna mjerna nesigurnost u kontekstu specifičnih uvjeta i utjecajnih faktora koji su prethodno identificirani i analizirani u ovom radu. U poglavlju 3.2 detaljno su opisani svi relevantni utjecajni faktori koji mogu značajno utjecati na točnost i preciznost rezultata mjerenja optičkim 3D mjernim sustavima. Ovi faktori obuhvaćaju tehničke aspekte hardvera, algoritme softvera, karakteristike predmeta mjerenja, uvjete okoline te stručnost operatera.

U ovom istraživanju razmatrani su ključni utjecajni faktori koji su mogli značajno utjecati na rezultate mjerenja, uključujući hrapavost površine, način nanošenja premaza, te softverske postavke poput poligonizacije. Ovi faktori su identificirani kao kritični jer su prema prethodnoj analizi (ANOVA), pokazali značajan utjecaj na točnost i preciznost mjerenja. Interpolacija, koja je također bila inicijalno razmatrana, izostavljena je iz daljnje analize jer su rezultati pokazali da nema značajan utjecaj na rezultate mjerenja.

Što se tiče utjecaja hardvera, on je također bio obuhvaćen analizom, jer su različite hardverske komponente, poput optičkih senzora i sustava rasvjete, ključne za preciznost mjerenja. Utjecaj

okoliša bio je prvenstveno usmjeren na temperaturu, koja može značajno utjecati na dimenzijsku stabilnost predmeta mjerenja. Umjeravanje skenera na temperaturi okoline osigurava minimalan utjecaj temperature na hardver, dok je utjecaj vibracija neutraliziran integriranom funkcijom koja automatski detektira smetnje i privremeno zaustavlja proces skeniranja sve do uspostave stabilnih uvjeta. Osvjetljenje, atmosferski tlak i prisutnost prašine imali su zanemariv utjecaj zahvaljujući kontroliranim uvjetima laboratorija i upotrebi projektor s plavim svjetlom.

Utjecaj mjeritelja, iako svaki operater prolazi specijaliziranu obuku prilikom kupnje optičkog 3D mjernog sustava, uzet je u obzir. Sva mjerenja u ovom istraživanju provela je ista osoba, osim kod analize utjecaja mjeritelja gdje je i drugi operater obavio mjerenja.

Za izračun mjerne nesigurnosti prema GUM metodologiji korištena je sljedeća formula:

$$U = k \cdot \sqrt{\sum u_i^2} \quad (5.10)$$

gdje je:

U – proširena mjerna nesigurnost

k – faktor pokrivanja ($k = 2$)

u_i – standardne nesigurnosti povezane s identificiranim utjecajnim faktorima.

U ovom slučaju, identificirani utjecajni faktori koji doprinose ukupnoj mjernoj nesigurnosti uključuju: umjeravanje, hrapavost površine objekta, poligonizaciju, primjenu matirajućeg premaza, temperaturu, hardver i mjeritelja.

Pri definiranju standardnih mjernih nesigurnosti za pojedine utjecajne veličine, metoda procjene i oblik razdiobe odabrani su na temelju raspoloživih informacija i fizikalne prirode svakog pojedinog izvora pogreške. Iako se u klasičnoj mjeriteljskoj praksi velik broj utjecaja aproksimira normalnom razdiobom (Tip A), takav pristup može dovesti do prepojednostavljivanja mjernog modela. U stvarnim uvjetima optičkog 3D skeniranja, pogreške uzrokovane karakteristikama površine (hrapavost) i softverskim algoritmima (poligonizacija) ne slijede nužno normalnu razdiobu. Stoga je u ovaj mjerni model uvedena kombinacija procjena A i B vrste, čime su u proračun, uz normalne, uključene i pravokutne te trokutaste

razdiobe. Pregled odabranih funkcija gustoće vjerojatnosti i primijenjenih formula za izračun standardnih nesigurnosti (u) prikazan je u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Zbirni prikaz metoda procjene i funkcija gustoće vjerojatnosti za utjecajne faktore

Utjecajni faktor	Metoda procjene	Funkcija gustoće vjerojatnosti (razdioba)
Umjeravanje	Tip B	Normalna
Hrapavost površine	Tip B	Pravokutna
Poligonizacija	Tip B	Trokutasta
Premaz za matiranje	Tip B	Trokutasta
Temperatura	Tip B	Pravokutna
Hardver	Tip A	Normalna
Mjeritelj	Tip A	Normalna

5.2.1 Standardna nesigurnost povezana s hrapavosti

Standardna nesigurnost povezana s hrapavošću površine predstavlja jedan od ključnih faktora koji utječu na točnost optičkih 3D mjernih sustava. U ovom istraživanju, utjecaj hrapavosti površine na mjernu nesigurnost ispitan je kroz seriju mjerenja provedenih na objektima s različitim stupnjem hrapavosti. Mjerenja su provedena na dva uzorka s različitim stupnjem hrapavosti: jedan uzorak je imao manju hrapavost, dok je drugi uzorak bio s većom hrapavošću. Za svaki od ovih uzoraka, provedeno je pet ponovljenih mjerenja uz zadržavanje svih ostalih parametara konstantnima.

Prilikom procjene standardne mjerne nesigurnosti povezane s hrapavošću površine primijenjena je procjena B vrste uz pretpostavku pravokutne razdiobe. Iz provedenih mjerenja na uzorcima s različitim stupnjem hrapavosti moguće je pouzdano odrediti granice intervala varijacije rezultata (odnosno najveće i najmanje izmjereno odstupanje). Budući da nisu dostupna specifična saznanja o raspodjeli vjerojatnosti unutar tih granica, niti se može opravdano pretpostaviti da su pogreške grupirane isključivo oko središnje vrijednosti, pretpostavlja se da je svaka vrijednost pogreške unutar procijenjenog intervala jednako moguća. Ovakav je pristup u potpunosti sukladan smjernicama Vodiča za procjenu mjerne nesigurnosti (GUM) [93] kada su raspoložive samo gornja i donja granica odstupanja.

Standardna nesigurnost povezana s hrapavošću površine (u_{hrap}) izračunata je prema formuli:

$$u_{hrap} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (5.11)$$

gdje varijabla a ne označava parametar hrapavosti površine, već sukladno GUM metodologiji predstavlja poluširinu procijenjenog intervala rasipanja rezultata (određenu kao polovica razlike između najveće i najmanje izmjerene vrijednosti mjerene geometrijske karakteristike). S obzirom na to da su u eksperimentu korištena dva uzorka s različitom hrapavošću, za konačnu procjenu standardne nesigurnosti uzeta je veća vrijednost izračunata za uzorak s većom hrapavošću.

U tablici 5.4. su prikazani rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala (a) i mjerne nesigurnosti povezane s hrapavošću (u_{hrap}) kod mjerenja različitih geometrijskih karakteristika.

Tablica 5.4. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala i mjerne nesigurnosti povezane s hrapavošću

Geometrijska karakteristika	Sr. vrijednost $\bar{x}/\text{mm}$	Poluširina intervala a/mm	u_{hrap} mm
Promjer	15,888	0,015	0,0087
Osni razmak	93,134	0,015	0,0087
Kružnost	0,070	0,010	0,0058
Koncentričnost	0,060	0,015	0,0087
Ravnost	0,042	0,010	0,0057
Paralelnost	0,126	0,025	0,0144
Okomitost	1,782	0,135	0,0779

5.2.2 Standardna nesigurnost povezana s poligonizacijom

Poligonizacija je proces pretvaranja oblaka točaka, dobivenih tijekom skeniranja, u poligonalne mreže koje definiraju površinu mjerene geometrije. Ovaj proces izravno utječe na razinu detalja i točnost konačnog 3D modela, a različite postavke poligonizacije mogu rezultirati varijacijama u prikazu geometrijskih značajki objekta.

U ovom istraživanju, utjecaj poligonizacije na mjernu nesigurnost ispitan je kroz seriju mjerenja provedenih uz primjenu dvaju različitih stupnjeva poligonizacije: manje detaljne i više detaljne poligonizacije. Za svaki stupanj poligonizacije, provedeno je pet ponovljenih mjerenja uz zadržavanje svih ostalih parametara konstantnima.

Prilikom procjene standardne mjerne nesigurnosti povezane s poligonizacijom primijenjena je procjena B vrste uz pretpostavku trokutaste razdiobe. Poligonizacija je softverski algoritam koji aproksimira oblak točaka u mrežu poligona nastojeći minimizirati odstupanja od stvarnih izmjerenih koordinata. Zbog prirode ovakvih optimizacijskih algoritama, najveća je vjerojatnost da će se pogreške aproksimacije većinom grupirati oko središnje vrijednosti, dok su najveća odstupanja na samim granicama procijenjenog intervala algoritamski moguća, ali znatno rjeđa. Zbog takve centralne tendencije, trokutasta razdioba vjernije opisuje ovaj utjecaj od pravokutne ili normalne razdiobe.

Standardna nesigurnost povezana s poligonizacijom (u_{pol}) izračunata je prema formuli:

$$u_{\text{pol}} = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (5.12)$$

gdje je a poluširina procijenjenog intervala (određena kao polovica razlike između najveće i najmanje izmjerene vrijednosti). Kao konačna vrijednost standardne nesigurnosti uzeta je veća vrijednost dobivena iz mjerenja s manje detaljnom poligonizacijom, budući da taj pristup generira veće varijacije u rezultatima mjerenja.

U tablici 5.5. su prikazani rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala (a) i mjerne nesigurnosti povezane s poligonizacijom (u_{pol}) kod mjerenja različitih geometrijskih karakteristika.

Tablica 5.5. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala i mjerne nesigurnosti povezane s poligonizacijom

Geometrijska karakteristika	Sr. vrijednost $\bar{x}/\text{mm}$	Poluširina intervala a/mm	u_{pol} mm
Promjer	16,085	0,008	0,0033
Osni razmak	93,134	0,015	0,0061
Kružnost	0,210	0,010	0,0041
Koncentričnost	0,226	0,020	0,0082
Ravnost	0,060	0,010	0,0041
Paralelnost	0,130	0,065	0,0265
Okomitost	1,356	0,020	0,0082

5.2.3 Standardna nesigurnost povezana s premazom za matiranje

Primjena premaza za matiranje površine objekta tijekom optičkog 3D mjerenja predstavlja ključni korak u osiguravanju dosljednosti refleksije svjetla s površine objekta, čime se postiže

kvalitetnije i preciznije snimanje geometrijskih značajki. Međutim, sama primjena premaza može utjecati na geometriju površine objekta, što može rezultirati varijacijama u mjerenju i time doprinijeti ukupnoj mjernoj nesigurnosti.

U ovom istraživanju, utjecaj premaza na mjernu nesigurnost ispitan je kroz seriju mjerenja provedenih s različitim metodama primjene premaza. Provedeno je pet mjerenja s nanošenjem premaza s pomoću spreja u boci i pet mjerenja s nanošenjem premaza s pomoću pištolja, dok su svi ostali faktori ostali konstantni. Ove metode nanošenja razlikuju se po načinu distribucije premaza na površinu objekta, što može utjecati na debljinu i ravnomjernost premaza, a time i na točnost mjerenja.

Prilikom procjene standardne mjerne nesigurnosti povezane s premazom primijenjena je procjena B vrste uz pretpostavku trokutaste razdiobe. Prilikom nanošenja premaza na objekt mjerenja, operater nastoji postići optimalnu i ravnomjernu debljinu sloja. Većina tretirane površine imat će debljinu nanosa blisku idealnoj središnjoj vrijednosti. Međutim, ovisno o tehnici nanošenja, na pojedinim mikrolokacijama može doći do stanjivanja ili prekomjernog nakupljanja premaza (posebice u kutovima i prijelazima). Budući da su takva odstupanja rjeđa u odnosu na ravnomjerno prekrivena područja, trokutasta razdioba optimalno opisuje rasipanje pogreške uzrokovane debljinom sloja premaza.

Standardna nesigurnost povezana s primjenom premaza (u_{premazi}) izračunata je prema formuli:

$$u_{\text{premazi}} = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (5.13)$$

gdje varijabla a ne označava fizičku debljinu nanesenog sloja premaza, već sukladno GUM metodologiji predstavlja poluširinu procijenjenog intervala rasipanja rezultata (određenu kao polovica razlike između najveće i najmanje izmjerene vrijednosti mjerene geometrijske karakteristike). Za procjenu mjerne nesigurnosti uzeta je veća vrijednost standardne nesigurnosti dobivena za metodu nanošenja premaza koja je pokazala veća odstupanja u rezultatima.

U tablici 5.6. su prikazani rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala (a) i mjerne nesigurnosti povezane sa premazom (u_{premazi}) kod mjerenja različitih geometrijskih karakteristika.

Tablica 5.6. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, poluširine intervala i mjerne nesigurnosti povezane sa premazom

Geometrijska karakteristika	Sr. vrijednost $\bar{x}/\text{mm}$	Poluširina intervala a/mm	u_{premaz} mm
Promjer	16,082	0,015	0,0061
Osni razmak	93,134	0,015	0,0061
Kružnost	0,222	0,020	0,0082
Koncentričnost	0,116	0,015	0,0061
Ravnost	0,062	0,001	0,0041
Paralelnost	0,112	0,020	0,0082
Okomitost	1,242	0,150	0,0612

5.2.4 Standardna nesigurnost povezana s temperaturom

Temperatura okoline ima značajan utjecaj na rezultate mjerenja prilikom korištenja optičkih 3D mjernih sustava. Promjene temperature mogu uzrokovati toplinsko rastezanje ili skupljanje mjernog objekta, što može dovesti do odstupanja u izmjeranim vrijednostima geometrijskih karakteristika. S obzirom na osjetljivost mjernih sustava na temperaturne varijacije, potrebno je procijeniti standardnu nesigurnost povezanu s temperaturom kako bi se osigurala točnost mjerenja.

Utjecaj temperature na dimenzijska mjerenja modeliran je linearnom jednadžbom toplinske ekspanzije:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (5.14)$$

gdje je L izmjerena duljina, α koeficijent toplinskog rastezanja materijala, a ΔT odstupanje temperature predmeta od referentne temperature (20 °C). Materijal predmeta je čelik (koeficijent toplinskog rastezanja iznosi $12 \cdot 10^{-6} \pm 2 \text{ K}^{-1}$), a pretpostavljena je razlika temperature od 3 °C u odnosu na referentnu temperaturu.

Primjenom Zakona širenja mjerne nesigurnosti (GUM), ukupna temperaturna nesigurnost (u_{temp}) određena je na temelju dviju nezavisnih ulaznih veličina: nesigurnosti poznavanja koeficijenta toplinskog rastezanja (u_{α}) i nesigurnosti određivanja temperature predmeta (u_T).

Standardna nesigurnost koeficijenta toplinskog rastezanja opisuje nepouzdanost u poznavanju točnog iznosa koeficijenta toplinskog rastezanja materijala predmeta. Budući da su najčešće poznate samo granice intervala unutar kojih se nalazi stvarna vrijednost koeficijenta (prema specifikacijama proizvođača materijala ili literaturnim podacima), pretpostavljena je

pravokutna razdioba vjerojatnosti. Standardna mjerna nesigurnost u_α izračunata je prema izrazu:

$$u_\alpha = \frac{a_\alpha}{\sqrt{3}} \quad (5.15)$$

gdje je:

- a_α – poluširina intervala tolerancije koeficijenta toplinskog rastezanja (K^{-1}).

Standardna nesigurnost temperature predmeta (u_T) predstavlja kombiniranu nesigurnost koja obuhvaća netočnost mjernog lanca i varijabilnost uvjeta okoline. U ovom radu, u_T je izračunata kao korijen zbroja kvadrata triju nezavisnih doprinosa:

1. Nesigurnost mjernog instrumenta ($u_{T,inst}$): Proizlazi iz specifikacija točnosti korištenog termometra / senzora.
2. Vremenska varijacija temperature ($u_{T,vrem}$): Odnosi se na oscilacije temperature zraka u mjernom volumenu tijekom trajanja procesa skeniranja (klimatizacijski ciklusi).
3. Nesigurnost aklimatizacije ($u_{T,aklim}$): Predstavlja procijenjenu razliku između temperature zraka i stvarne temperature središta predmeta uslijed nepotpune toplinske stabilizacije.

Za sve tri komponente pretpostavljena je pravokutna razdioba vjerojatnosti, s obzirom na to da su poznate samo granice varijacija. Ukupna standardna nesigurnost temperature izračunata je prema izrazu:

$$u_T = \sqrt{u_{T,inst}^2 + u_{T,vrem}^2 + u_{T,aklim}^2} \quad (5.16)$$

Odnosno, razrađeno po komponentama:

$$u_T = \sqrt{\left(\frac{a_{inst}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_{vrem}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_{aklim}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (5.17)$$

gdje su a_{inst} , a_{vrem} i a_{aklim} poluširine procijenjenih intervala za svaku navedenu komponentu.

Konačna standardna mjerna nesigurnost uzrokovana temperaturom (u_{temp}) izračunata je primjenom koeficijenata osjetljivosti na prethodno definirane komponente u_{α} i u_T . Prema GUM metodologiji, izraz glasi:

$$u_{\text{temp}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta L}{\partial \alpha} \cdot u_{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta L}{\partial T} \cdot u_T\right)^2} \quad (5.18)$$

Uvrštavanjem parcijalnih derivacija, dobiva se konačna formula korištena u ovom radu:

$$u_{\text{temp}} = L \cdot \sqrt{[(T_{\text{sred}} - 20) \cdot u_{\alpha}]^2 + (\alpha \cdot u_T)^2} \quad (5.19)$$

gdje su:

L – izmjerena duljina [mm]

T_{sred} – srednja temperatura predmeta tijekom mjerenja

α – nominalni koeficijent toplinskog rastezanja materijala

u_{α} – Standardna mjerna nesigurnost povezana s koeficijentom toplinskog rastezanja

u_T – kombinirana standardna nesigurnost temperature.

U tablici 5.7. su prikazani rezultati u_{temp} kod mjerenja različitih geometrijskih karakteristika.

Tablica 5.7. Rezultati mjerne nesigurnosti povezane s temperaturom

Geometrijska karakteristika	$u_{\text{temp}} / \text{mm}$
Promjer	$2,67 \cdot 10^{-4}$
Osnj razmak	$1,55 \cdot 10^{-3}$
Kružnost	$1,83 \cdot 10^{-6}$
Koncentričnost	$1,49 \cdot 10^{-6}$
Ravnost	$9,99 \cdot 10^{-7}$
Paralelnost	$1,67 \cdot 10^{-6}$
Okomitost	$1,66 \cdot 10^{-5}$

5.2.5 Standardna nesigurnost povezana s hardverom

Optički 3D mjerni sustavi, poput onih korištenih u ovom istraživanju, sastavljeni su od složenih hardverskih komponenti koje mogu značajno utjecati na točnost i preciznost rezultata mjerenja. Standardna nesigurnost povezana s hardverom odnosi se na nesigurnosti koje proizlaze iz tehničkih karakteristika i performansi samog mjernog sustava.

U ovom istraživanju, utjecaj hardvera na mjernu nesigurnost ispitan je kroz seriju mjerenja provedenih koristeći dva različita optička 3D skenera: ATOS Core 300 i ATOS Compact Scan. Provedeno je po pet mjerenja s oba skenera, dok su svi ostali faktori, uključujući uvjete okoline, predmet mjerenja i softverske postavke, ostali konstantni. Ova dva skenera razlikuju se u tehničkim specifikacijama, uključujući rezoluciju, veličinu mjernog volumena, te preciznost senzora i leća. Ove razlike mogu utjecati na točnost i pouzdanost mjerenja, što je posebno važno pri analizi složenih geometrijskih karakteristika.

Prilikom procjene standardne mjerne nesigurnosti povezane s hardverom primijenjena je procjena A vrste (Tip A) uz pretpostavku normalne razdiobe, budući da se rasipanje rezultata određuje statističkom analizom niza ponovljenih mjerenja.

Standardna nesigurnost povezana s hardverom (u_{hard}) izračunata je prema formuli:

$$u_{\text{hard}} = \frac{s_{\text{hard}}}{\sqrt{n}} \quad (5.20)$$

gdje je s_{hard} standardna devijacija rezultata mjerenja, a n broj mjerenja. Za procjenu mjerne nesigurnosti uzeta je veća vrijednost standardne nesigurnosti dobivena za korištenjem ATOS Compact scan sustava koja je pokazala veća odstupanja u rezultatima.

U tablici 5.8. su prikazani rezultati u_{hard} kod mjerenja različitih geometrijskih karakteristika.

Tablica 5.8. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, standardne devijacije i mjerne nesigurnosti povezane s hardverom

Geometrijska karakteristika	Sr. vrijednost $\bar{x}/\text{mm}$	St. devijacija s/mm	u_{hard} mm
Promjer	16,032	0,0084	0,0084
Osni razmak	93,129	0,0069	0,0069
Kružnost	0,220	0,0158	0,0158
Koncentričnost	0,102	0,0109	0,0109
Ravnost	0,064	0,0114	0,0084
Paralelnost	0,080	0,0071	0,0071
Okomitost	1,270	0,1198	0,1198

5.2.6 Standardna nesigurnost povezana s mjeriteljem

Utjecaj mjeritelja, odnosno operatera koji upravlja mjernim sustavom, jedan je od potencijalnih izvora varijabilnosti u mjerenjima, osobito kod sustava koji zahtijevaju ručne intervencije, određene subjektivne procjene ili vizualno pozicioniranje objekta. Iako je u ovom istraživanju mjerna procedura strogo definirana, a svi postupci automatizirani u najvećoj mogućoj mjeri, procjena utjecaja mjeritelja provedena je kako bi se kvantificirao i taj izvor nesigurnosti.

U svrhu analize standardne nesigurnosti povezane s mjeriteljem, dvoje različitih operatera proveli su mjerenja istog objekta, uz zadržavanje svih ostalih uvjeta konstantnima (skener, postavke softvera, osvjetljenje, položaj objekta). Svaki je mjeritelj proveo po pet mjerenja, a varijabilnost između njihovih rezultata uzeta je kao pokazatelj nesigurnosti vezane uz ljudski faktor.

Prilikom procjene standardne mjerne nesigurnosti povezane s mjeriteljem primijenjena je procjena A vrste (Tip A) uz pretpostavku normalne razdiobe, budući da se rasipanje rezultata određuje statističkom analizom niza ponovljenih mjerenja.

Standardna nesigurnost povezana s mjeriteljem (u_{mjer}) izračunata je prema formuli:

$$u_{\text{mjer}} = \frac{s_{\text{mjer}}}{\sqrt{n}} \quad (5.21)$$

gdje je s_{mjer} veća zabilježena standardna devijacija rezultata mjerenja proizašla iz usporedbe dvaju različitih mjeritelja, a n broj ponovljenih mjerenja po mjeritelju. U tablici 5.9. su prikazani rezultati u_{mjer} kod mjerenja različitih geometrijskih karakteristika.

Tablica 5.9. Rezultati srednje vrijednosti rezultata mjerenja, standardne devijacije i mjerne nesigurnosti povezane s mjeriteljem

Geometrijska karakteristika	Sr. vrijednost $\bar{x}/\text{mm}$	St. devijacija s/mm	u_{mjer} mm
Promjer	16,10	0,0015	0,0015
Osni razmak	93,13	0,0011	0,0018
Kružnost	0,11	0,0019	0,0019
Koncentričnost	0,09	0,0035	0,0035
Ravnost	0,06	0,0024	0,0024
Paralelnost	0,11	0,0031	0,0031
Okomitost	1,14	0,0056	0,0056

5.2.7 Rezultati proširene mjerne nesigurnosti

U okviru ovog istraživanja, cjelokupni proces procjene mjerne nesigurnosti temelji se na matematičkom modelu koji opisuje utjecaj identificiranih faktora na rezultat mjerenja. Ovaj model, formuliran u skladu sa smjernicama GUM, predstavlja kvantitativnu relaciju između pojedinačnih standardnih nesigurnosti i ukupne proširene mjerne nesigurnosti mjernog sustava.

Kako bi se omogućio detaljan uvid u strukturu mjerne nesigurnosti i identificirali dominantni izvori pogrešaka za svaku analiziranu geometrijsku karakteristiku, pojedinačni doprinosi standardnih mjernih nesigurnosti prikazani su zbirno u tablici 5.10.

Tablica 5.10. Zbirni prikaz doprinosa standardnih mjernih nesigurnosti

Geometrijska karakteristika	u_{cal} mm	u_{hrap} mm	u_{pol} mm	u_{premaz} mm	u_{temp} mm	u_{hard} mm	u_{mjer} mm
Promjer	0,0004	0,0087	0,0033	0,0061	0,0003	0,0084	0,0015
Osni razmak	0,0004	0,0087	0,0061	0,0061	0,0015	0,0069	0,0018
Kružnost	0,0004	0,0058	0,0041	0,0082	0,0000	0,0158	0,0019
Koncentričnost	0,0004	0,0087	0,0082	0,0061	0,0000	0,0109	0,0035
Ravnost	0,0004	0,0058	0,0041	0,0041	0,0000	0,0114	0,0024
Paralelnost	0,0004	0,0144	0,0265	0,0082	0,0000	0,0071	0,0031
Okomitost	0,0004	0,0779	0,0082	0,0612	0,0000	0,1198	0,0056

Analizom podataka iz tablice 5.10. uočava se jasna razlika u izvorima nesigurnosti ovisno o složenosti mjerene značajke. Najizraženiji doprinosi evidentirani su kod složenih geometrijskih tolerancija, posebice kod okomitosti, gdje dolazi do značajnog skoka vrijednosti nesigurnosti povezanih s fizičkom interakcijom sustava i predmeta. Konkretno, doprinosi hardvera (0,1198 mm), hrapavosti (0,0779 mm) i premaza (0,0612 mm) višestruko nadmašuju ostale faktore. Ovakva raspodjela sugerira da je točnost mjerenja okomitosti primarno limitirana fizičkim

ograničenjima senzora pri snimanju područja ograničene vizualne dostupnosti (poput kutnih prijelaza) i kvalitetom pripreme površine, dok softverski parametri imaju sekundaran značaj. Nasuprot tome, kod mjerenja paralelnosti dominantan utjecaj preuzima proces poligonizacije (0,0265 mm), što ukazuje na to da je ova značajka osjetljivija na algoritamski način pretvaranja oblaka točaka u mrežu.

Za razliku od mjerenja koja ovise o jednom dominantnom faktoru, kod jednostavnih značajki poput promjera i osnog razmaka primjetna je ravnomjernija raspodjela utjecaja. Kod ovih značajki ne postoji jedan izolirani uzrok nesigurnosti, već je ona rezultat kumulativnog djelovanja više manjih faktora u procesu određivanja osi.

U svim analiziranim slučajevima doprinosi temperaturne nesigurnosti i nesigurnosti umjeravanja zanemarivi u odnosu na ostale faktore. Ovi podaci potvrđuju da su uvjeti okoline u laboratoriju bili stabilni te da je postupak temperaturne kompenzacije uspješno proveden, čime je eliminiran značajan dio sustavnih pogrešaka koji bi inače utjecao na rezultat.

Na temelju prethodno analiziranih doprinosa, izračunata je ukupna sastavljena standardna nesigurnost prema formuli (5.22), a zatim i proširena mjerna nesigurnost. Proširena mjerna nesigurnost izračunata je formulom (5.23), pri čemu je korišten faktor pokrivanja $k = 2$, što odgovara razini pouzdanosti od približno 95 %. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 5.11.

$$u = \sqrt{(u_{\text{cal}}^2 + u_{\text{hrap}}^2 + u_{\text{pol}}^2 + u_{\text{premaz}}^2 + u_{\text{temp}}^2 + u_{\text{hard}}^2 + u_{\text{mjer}}^2)} \quad (5.22)$$

$$U = k \cdot \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_{\text{hrap}}^2 + u_{\text{pol}}^2 + u_{\text{premaz}}^2 + u_{\text{temp}}^2 + u_{\text{hard}}^2 + u_{\text{mjer}}^2} \quad (5.23)$$

Tablica 5.11. Rezultati proširene mjerne nesigurnosti prema GUM-u

Geometrijska karakteristika	U / mm
Promjer	0,0280
Osni razmak	0,0285
Kružnost	0,0385
Koncentričnost	0,0353
Ravnost	0,0285
Paralelnost	0,0645
Okomitost	0,3116

Analizom rezultata proširene mjerne nesigurnosti (U), izračunatih prema GUM metodologiji (Tablica 5.11.), vidljiva je korelacija između složenosti geometrijske karakteristike i razine

nesigurnosti. Najniže vrijednosti zabilježene su kod osnovnih dimenzijskih značajki, poput promjera ($U = 0,0280$ mm), osnog razmaka ($U = 0,0285$ mm) i ravnosti ($U = 0,0285$ mm). Ovi rezultati, koji se kreću u uskom rasponu od 28 do 28,5 μm , potvrđuju da analitički GUM model procjenjuje kako optički sustav s visokom pouzdanošću određuje linearne dimenzije i planarne značajke. Niska razina nesigurnosti kod ovih značajki izravna je posljedica činjenice da se radi o oblicima kod kojih se softverskom obradom (npr. Gaussian best-fit metodom) kroz veliki broj snimljenih točaka provlači idealna geometrija. Takav postupak usrednjavanja učinkovito minimizira utjecaj slučajnih pogrešaka (šuma), a s obzirom na to da su ove površine geometrijski lako dostupne senzoru bez zaklanjanja, i utjecaji sustavnih pogrešaka hardvera svedeni su na minimum.

Nasuprot tome, znatno više vrijednosti nesigurnosti evidentirane su za tolerancije međusobnog položaja i orijentacije, pri čemu se posebno ističe okomitost s proširenom mjernom nesigurnošću od $U = 0,3116$ mm. Ova vrijednost nadmašuje nesigurnosti osnovnih dimenzijskih značajki, a razlog leži u kumulativnom prijenosu pogrešaka specifičnom za ovu vrstu tolerancije. Detaljnim uvidom u strukturu doprinosa prikazanu u tablici 5.10., vidljivo je da je okomitost jedina analizirana značajka kod koje tri nezavisna izvora nesigurnosti istovremeno poprimaju vrijednosti veće od 0,05 mm: utjecaj premaza, hardvera i hrapavosti.

Ovakva raspodjela doprinosa ukazuje na fizikalne uzroke problema. Visok doprinos nesigurnosti premaza sugerira da prilikom pripreme predmeta dolazi do neravnomjernog nakupljanja matirajućeg sredstva u kutnim prijelazima (spoj dviju okomitih ploha), što fizički deformira geometriju koju senzor snima. Paralelno s tim, visok doprinos hardvera i hrapavosti ukazuje na to da optički senzor nailazi na ograničenja pri digitalizaciji geometrija koje zaklapaju pravi kut, gdje je otežano precizno definiranje sjecišta ravnina zbog ograničene geometrijske dostupnosti mjernom volumenu. Ovi podaci potvrđuju da je za smanjenje mjerne nesigurnosti kod mjerenja okomitosti ključna stroga kontrola fizičke pripreme površine i optimizacija strategije skeniranja kako bi se osigurala što bolja pokrivenost kutnih područja.

Razlog za ovako visoke nesigurnosti kod navedenih tolerancija orijentacije i međusobnog položaja, posebice okomitosti, leži u njihovoj definiciji i načinu na koji se određuju. Za razliku od jednostavnih dimenzija koje se mjere na jednom geometrijskom elementu, tolerancije međusobnog položaja poput paralelnosti i okomitosti definiraju odnos između dvaju ili više odvojenih geometrijskih elemenata. Svaka nesigurnost u definiranju pojedinog elementa (npr.

referentne ravnine ili osi cilindra) propagira se i akumulira u konačnom izračunu njihovog međusobnog odnosa.

Ova analiza potvrđuje da model mjerne nesigurnosti prema GUM-u omogućuje detaljnu identifikaciju kritičnih točaka mjernog procesa. Jasno se razlikuje razina pouzdanosti mjerenja ovisno o složenosti geometrijske značajke, pri čemu su tolerancije međusobnog položaja, a posebno okomitost, identificirane kao metrološki najzahtjevnije. Utvrđeni dominantan utjecaj fizičke pripreme površine (premaz, hrapavost) kod složenih geometrija sugerira da se najznačajnije smanjenje mjerne nesigurnosti može postići optimizacijom tih parametara i strategije skeniranja, a ne isključivo naknadnim softverskim korekcijama.

5.3 Monte Carlo simulacija

Kako bi se provela validacija i komplementarna analiza rezultata dobivenih analitičkim pristupom prema GUM smjernicama, u ovom istraživanju primijenjena je i numerička metoda procjene mjerne nesigurnosti, Monte Carlo simulacija. Ovaj pristup, formaliziran u dokumentu JCGM 101:2008 pod punim nazivom Vrednovanje mjernih podataka – Dopuna 1. Uputama za procjenu mjerne nesigurnosti – Prijenos razdioba uporabom metode Monte Carlo (engl. *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the 'Guide to the expression of uncertainty in measurement' — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*) [100], omogućuje propagaciju cjelokupnih funkcija gustoće vjerojatnosti ulaznih veličina kroz mjerni model, čime se prevladavaju neka od ograničenja analitičke metode, posebice u slučaju složenih ili nelinearnih modela.

Simulacija je implementirana u programskom jeziku Python, uz korištenje znanstvene biblioteke NumPy za generiranje slučajnih brojeva i statističku obradu. Ovakav pristup programiranju simulacija u novijim se mjeriteljskim istraživanjima [92] pokazao kao pouzdan alat za evaluaciju nesigurnosti. Uz to, kako u svom radu ističe Bošnjaković [89], glavna snaga MCS-a pri validaciji analitičkog modela leži u tome što omogućava pouzdano formiranje intervala pokrivanja bez nametanja ograničenja na oblik razdiobe izlaznog mjernog rezultata. Mjerni model definiran je kao suma pojedinačnih doprinosa nesigurnosti, gdje ukupna pogreška predstavlja zbroj pogrešaka proizašlih iz svakog identificiranog izvora nesigurnosti. U model je uključeno sedam ključnih izvora nesigurnosti koji su prethodno identificirani i kvantificirani kao standardne mjerne nesigurnosti (u_i). Pri definiranju funkcija gustoće vjerojatnosti za ulazne veličine, oblik razdiobe odabran je na temelju raspoloživih informacija i stanja znanja o svakom

pojedinom izvoru nesigurnosti. Za nesigurnosti povezane s hardverom, mjeriteljem i umjeravanjem etalona pretpostavljena je normalna razdioba, s obzirom na to da su te vrijednosti dobivene statističkom obradom eksperimentalnih podataka ili su izvedene iz certifikata o umjeravanju. Za utjecaj temperature i hrapavosti površine primijenjena je pravokutna razdioba, s obzirom na to da su za te parametre poznate samo granice intervala varijacije, bez specifičnih saznanja o raspodjeli vjerojatnosti unutar tih granica. Konačno, za utjecaje poligonizacije i primjene premaza pretpostavljena je trokutasta razdioba, budući da priroda tih procesa ukazuje na veće grupiranje pogrešaka oko središnjih vrijednosti. Ukupan broj iteracija u simulaciji postavljen je na $M = 1\,000\,000$, što osigurava statističku stabilnost rezultata te omogućuje pouzdanu aproksimaciju izlazne razdiobe vjerojatnosti ukupne pogreške.

Provođenjem simulacije generiran je skup od 1 000 000 vrijednosti ukupne pogreške, čime je formirana empirijska funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine. Standardno odstupanje tog skupa podataka predstavlja standardnu mjernu nesigurnost (u_c) dobivenu Monte Carlo metodom. Proširena mjerna nesigurnost (U_{MC}) izračunata je izravnim određivanjem granica intervala koji obuhvaća 95 % generiranih vrijednosti izlazne empirijske razdiobe.

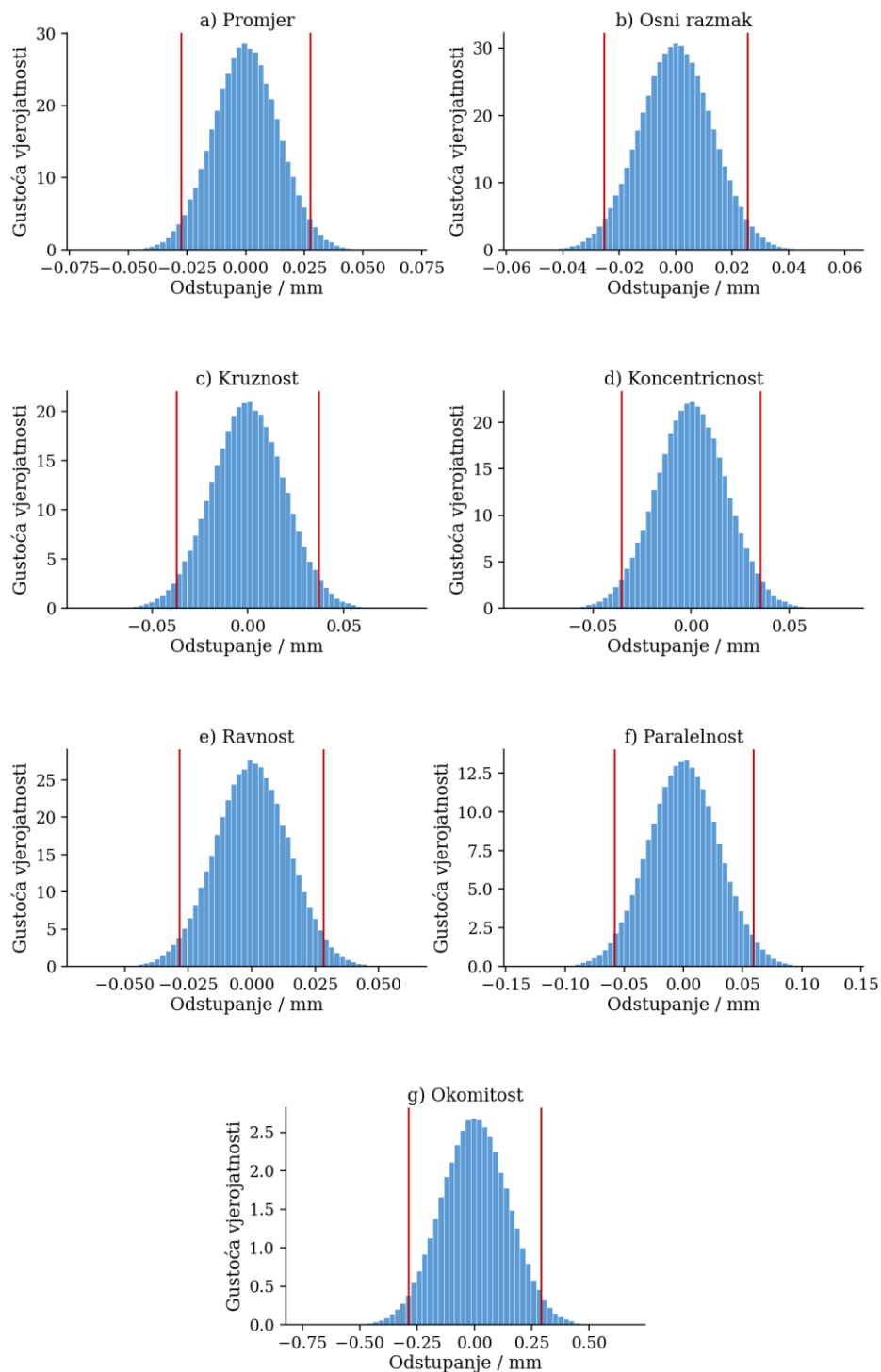
Rezultati dobiveni provođenjem Monte Carlo simulacije s 1 000 000 iteracija sažeti su u tablici 5.12. Za svaku od sedam analiziranih geometrijskih karakteristika prikazane su ukupne standardne mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti.

Tablica 5.12. Rezultati Monte Carlo simulacije

Geometrijska karakteristika	u_c / mm	U_{MC} / mm
Promjer	0,0140	0,0272
Osni razmak	0,0143	0,0277
Kružnost	0,0193	0,0377
Koncentričnost	0,0176	0,0344
Ravnost	0,0142	0,0279
Paralelnost	0,0322	0,0623
Okomitost	0,1557	0,3034

Grafički prikazi na slici 5.1. pružaju vizualni uvid u eksperimentalnu funkciju gustoće vjerojatnosti simuliranih odstupanja za svaku geometrijsku karakteristiku. Svi histogrami pokazuju simetričnu, zvonoliku formu koja odgovara normalnoj razdiobi. Sredina svake razdiobe nalazi se na vrijednosti nula, što potvrđuje da je matematički model centriran, odnosno da su utvrđene sustavne pogreške prethodno korigirane. Prema tome, simulacija prikazuje isključivo rasipanje rezultata uslijed mjerne nesigurnosti. Širina razdiobe na histogramima

izravno je proporcionalna procijenjenoj mjernoj nesigurnosti, pri čemu širi histogrami (primjerice kod okomitosti) vizualno demonstriraju veću osjetljivost te značajke na varijabilnost ulaznih parametara.



Slika 5.1. Funkcija gustoće vjerojatnosti: a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost

Numerički rezultati se slažu s onima dobivenim analitičkim GUM pristupom za sve karakteristike. Kao i kod GUM analize, najviše vrijednosti nesigurnosti i ovdje su zabilježene kod složenih tolerancija međusobnog položaja. Ovdje se posebno ističe okomitost s proširenom mjernom nesigurnošću od 0,3034 mm, te paralelnost s iznosom od 0,0623 mm. Ovakve vrijednosti, posebice kod okomitosti, posljedica su propagacije i zbrajanja nesigurnosti iz više izvora.

Monte Carlo simulacija uspješno je validirala rezultate dobivene analitičkim GUM pristupom, potvrđujući ispravnost postavljenog matematičkog modela. Minimalna odstupanja između analitičkih i simuliranih vrijednosti potvrđuju da GUM model adekvatno opisuje mjerni proces. Iako metoda nije otkrila neočekivana odstupanja, pružila je vrijedan vizualni i statistički uvid u prirodu ukupne pogreške mjerenja, potvrđujući normalnu raspodjelu izlaznih rezultata.

5.4 Bayesova metoda

Kao napredni pristup procjeni mjerne nesigurnosti, u ovom je istraživanju primijenjena Bayesova metoda. Za razliku od klasičnog pristupa koji nesigurnost tretira kao mjeru rasipanja rezultata ponovljenih mjerenja, Bayesov pristup definira nesigurnost kao mjeru stupnja vjerovanja o vrijednosti mjerene veličine. Ovaj pristup omogućuje formalno integriranje prethodnog znanja o sustavu (engl. *prior*) s informacijama dobivenim iz novih eksperimentalnih podataka (engl. *likelihood*), čime se generira ažurirana, posteriorna razdioba vjerojatnosti za svaki nepoznati parametar modela.

Analiza je provedena u programskom jeziku Python, korištenjem biblioteke za probabilističko programiranje PyMC, koja omogućuje fleksibilnu definiciju i rješavanje složenih statističkih modela. Za vizualizaciju i dijagnostiku rezultata korištena je biblioteka ArviZ.

U Bayesovom modelu, svakom nepoznatom parametru dodjeljuje se priorna (prethodna) razdioba vjerojatnosti koja odražava prethodno znanje o tom parametru prije uzimanja u obzir konkretnih mjernih podataka. Za pojedinačne komponente nesigurnosti korištene su informativne priorne razdiobe. Za svaku komponentu definirana je skraćena normalna razdioba (engl. *Truncated Normal*). Ova razdioba je odabrana jer standardna nesigurnost, kao ni standardno odstupanje, fizikalno ne može biti negativna vrijednost.

Struktura Bayesovog modela postavljena je na sljedeći način:

- Priorna razdioba za komponente nesigurnosti (u_i): Za pojedinačne izvore nesigurnosti (umjeravanje, hrapavost, poligonizacija, premaz, temperatura, hardver, mjeritelj) korištene su informativne priorne razdiobe. Budući da standardna nesigurnost fizikalno ne može poprimiti negativnu vrijednost, odabrana je skraćena normalna razdioba (engl. Truncated Normal) s donjom granicom nula. Očekivana vrijednost ove razdiobe postavljena je na iznos procijenjen temeljem prikupljenog predznanja o svakom pojedinom utjecajnom faktoru, dok je njezina standardna devijacija (σ) postavljena na 30 % te vrijednosti radi osiguravanja manje informativnosti priora. Ovakvim pristupom modelu je omogućeno da uvaži prethodna mjeriteljska saznanja o sustavu, ali mu je ostavljena fleksibilnost varijacije svakog pojedinog doprinosa unutar realnih granica.
- Priorna razdioba za odstupanje stvarne vrijednosti (μ): Za sustavnu komponentu pogreške definirana je manje informativna normalna razdioba centrirana oko nule. Njezina standardna devijacija postavljena je na iznos maksimalnog očekivanog tehničkog odstupanja mjernog sustava za svaku karakteristiku.
- Deterministički izračun kombinirane nesigurnosti i funkcija vjerodostojnosti: Kombinirana standardna nesigurnost u_c definirana je kao deterministička varijabla unutar modela, izračunata prema zakonu propagacije nesigurnosti (korijen zbroja kvadrata pojedinačnih u_i komponenti). Veza između parametara modela i eksperimentalnih podataka ostvarena je kroz funkciju vjerodostojnosti (engl. *likelihood*), koja je definirana kao normalna razdioba s parametrima μ i u_c .

Za rješavanje modela i uzorkovanje iz posteriorne razdiobe korišten je algoritam Markovljev lanac Monte Carlo. Za svaku karakteristiku pokrenuta su 4 neovisna lanca uzorkovanja, pri čemu je ciljana stopa prihvatanja prijedloga postavljena na 0,90 kako bi se osigurala stabilnost uzorkovanja. Svaki lanac generirao je 3000 uzoraka nakon inicijalne faze prilagodbe od 1000 iteracija, čime je ukupno dobiveno 12 000 posteriornih uzoraka po parametru. Na temelju tog skupa uzoraka izračunati su posteriorna srednja vrijednost i 95%-tni interval najviše gustoće (engl. *Highest Density Interval* – HDI) kao mjera Bayesovog intervala pokrivanja.

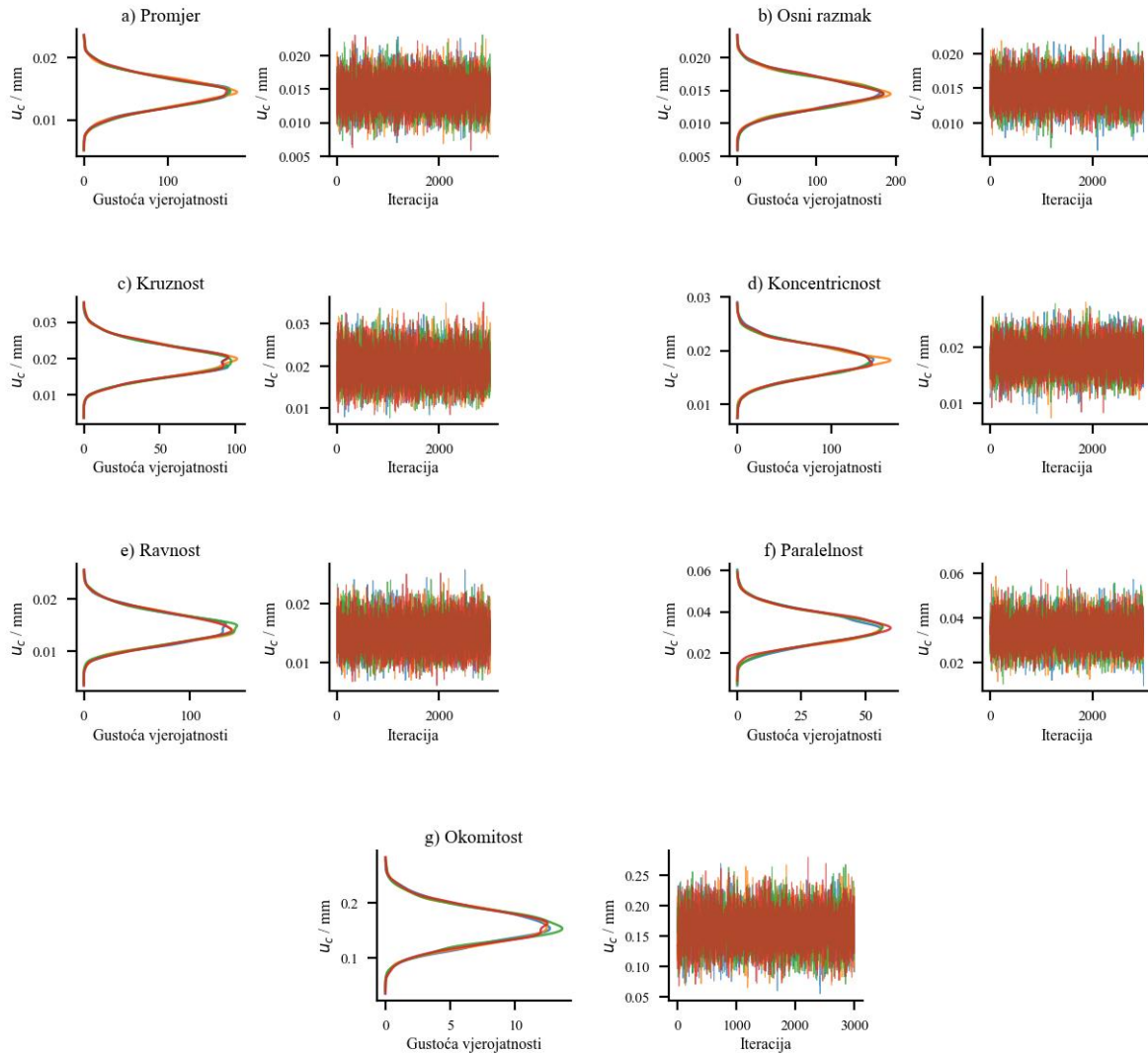
Ključni numerički rezultati dobiveni iz posteriorne razdiobe sažeti su u tablici 5.13. Tablica za svaku značajku prikazuje procijenjenu srednju vrijednost parametara te interval najviše gustoće (uz razinu pouzdanosti $P = 95\%$, koji predstavlja najuži interval unutar kojeg se vrijednost parametra nalazi s 95 % vjerojatnosti).

Tablica 5.13. Rezultati Bayesove procjene mjerne nesigurnosti za geometrijske karakteristike

Geometrijska karakteristika	Standardna nesigurnost u_c / mm	Interval pokrivanja za u_c (95 %) / mm
Promjer	0,0144	[0,099, 0,019]
Osni razmak	0,0147	[0,011, 0,019]
Kružnost	0,0195	[0,012, 0,027]
Koncentričnost	0,0181	[0,013, 0,023]
Ravnost	0,0145	[0,009, 0,020]
Paralelnost	0,0325	[0,020, 0,046]
Okomitost	0,1587	[0,101, 0,220]

Rezultati prikazani u tablici 5.13. sukladni su procjenama dobivenim GUM i MCS analizama. Najmanje vrijednosti standardne mjerne nesigurnosti u_c procijenjene su za promjer (0,0144 mm) i ravnost (0,0145 mm), što potvrđuje da je mjerni sustav najprecizniji kod jednostavnih linearnih i plošnih značajki. S druge strane, okomitost se ponovno ističe kao najkritičnija značajka s procijenjenom standardnom nesigurnošću od 0,1570 mm i najširim intervalom pokrivanja [0,109, 0,223] mm, što je izravna posljedica dominantnog utjecaja više izvora nesigurnosti koji se propagiraju kroz mjerni model.

Prije interpretacije konačnih rezultata Bayesove analize, nužno je verificirati ispravnost i pouzdanost provedenog MCMC uzorkovanja. U tu svrhu koriste se dijagnostički dijagrami konvergencije lanaca (engl. *trace plots*). Na slici 5.2. prikazane su putanje lanaca za procjenu kombinirane standardne mjerne nesigurnosti (u_c) za svih sedam analiziranih geometrijskih karakteristika.



Slika 5.2. Prikaz putanja četiri lanca za kombiniranu standardnu mjernu nesigurnost u_c : a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost

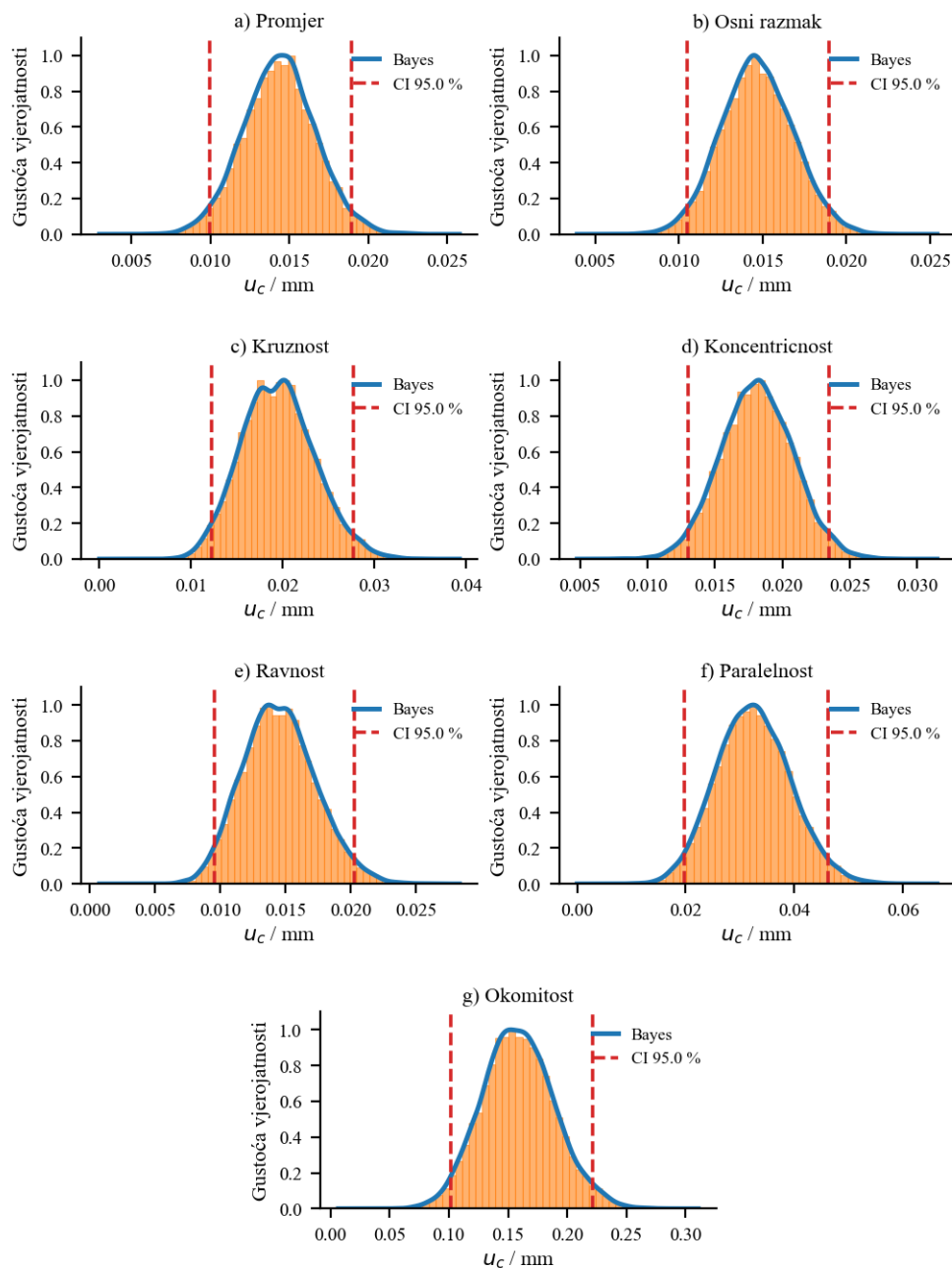
Svaki panel na slici 5.2. podijeljen je u dva komplementarna grafička prikaza. Lijevi graf prikazuje procijenjene funkcije gustoće posteriorne razdiobe parametra u_c , dobivene neovisnim izvođenjem četiriju lanaca uzorkovanja (prikazanih različitim bojama). Vizualnom inspekcijom vidljivo je gotovo savršeno preklapanje krivulja sva četiri lanca za svaku geometrijsku karakteristiku. Takvo podudaranje ukazuje na to da su svi lanci uspješno konvergirali prema istoj stacionarnoj ciljnoj razdiobi, što predstavlja temeljni preduvjet za valjanost rezultata dobivenih MCMC algoritmom.

Desni graf unutar svakog panela prikazuje vrijednosti uzorkovanog parametra u_c kroz iteracije za svaki pojedini lanac. Za sve promatrane karakteristike, od osnovnih dimenzija do složenih

geometrijskih tolerancija, grafovi iteracija pokazuju uredan i stabilan izgled bez vidljivih trendova, periodičnih oscilacija ili sustavnih pomaka. Ovakvo ponašanje, koje vizualno nalikuje na stacionarni "bijeli šum", potvrđuje da je algoritam optimalno i ravnomjerno istražio prostor parametara.

Na temelju provedene dijagnostike može se zaključiti da je MCMC algoritam stabilan te da je uzorkovanje uspješno provedeno. Stacionarni karakter trace dijagrama i preklapanje posteriornih gustoća pružaju nedvojben vizualni dokaz da su dobivene posteriorne razdiobe za mjernu nesigurnost pouzdane i u potpunosti primjenjive za daljnju interpretaciju i izračun intervala pokrivanja.

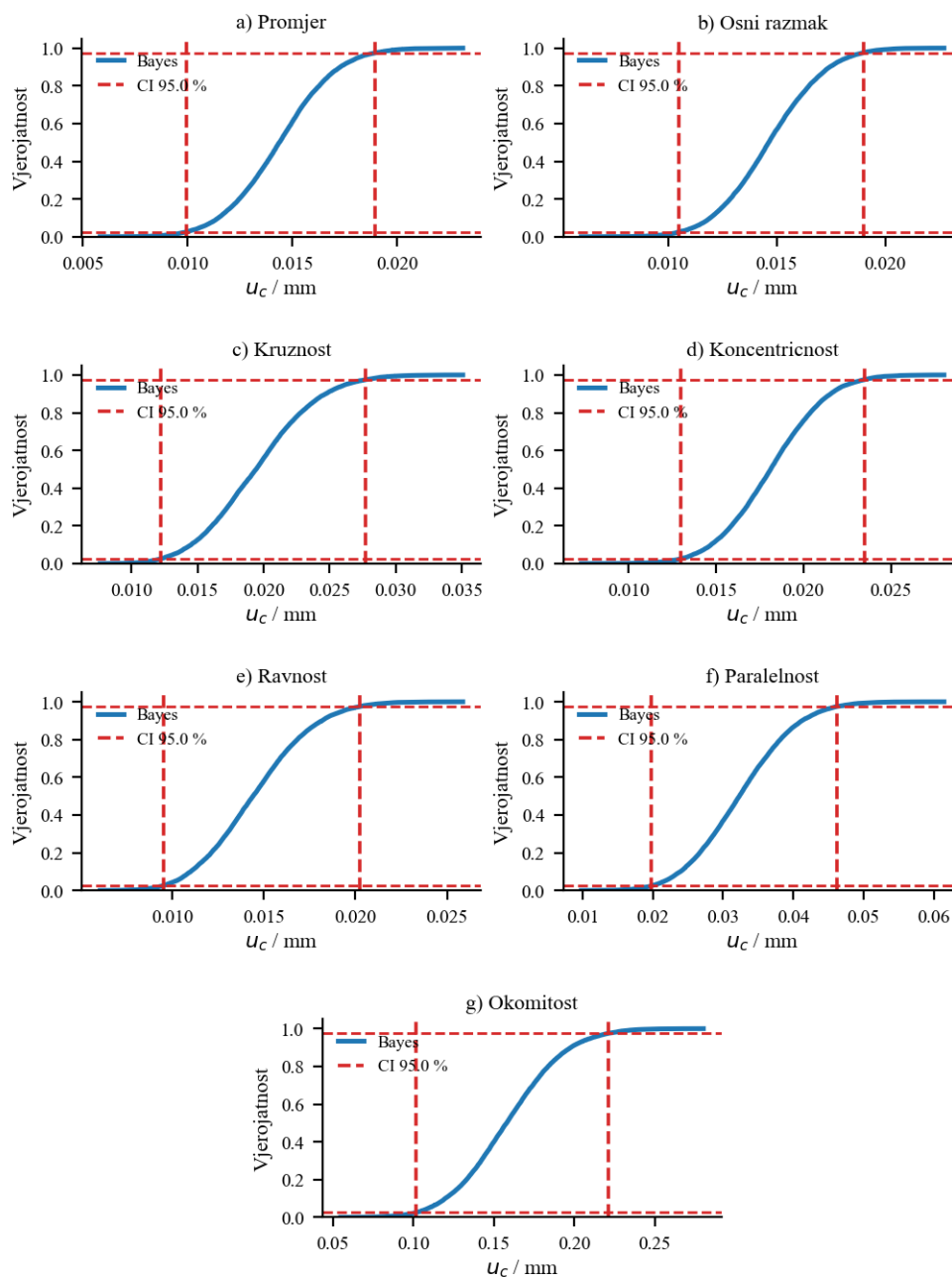
Glavni rezultati Bayesove analize prikazani su na slici 5.3. koja za svaku geometrijsku karakteristiku prikazuje posteriornu funkciju gustoće vjerojatnosti kombinirane standardne mjerne nesigurnosti u_c . Svaki dijagram sadrži normalizirani histogram posteriornih uzoraka dobivenih MCMC uzorkovanjem (narančaste trake) te odgovarajuću krivulju procjene gustoće jezgrom (engl. *Kernel Density Estimation* – KDE), prikazanu plavom linijom i označenu kao "Bayes". Crvenim isprekidanim vertikalnim linijama označene su granice 95 %-tnog Bayesovog intervala vjerodostojnosti (u legendi označeno kao CI 95.0 % – engl. *Credible Interval*), koji predstavlja raspon unutar kojeg se sa stupnjem vjerovanja od 95 % nalazi stvarna vrijednost kombinirane standardne mjerne nesigurnosti.



Slika 5.3. Posteriorne razdiobe za kombiniranu standardnu mjernu nesigurnost (u_c): a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost

Sve posteriorne razdiobe pokazuju simetričnu, zvonoliku formu koja odgovara normalnoj razdiobi, što potvrđuje da je MCMC algoritam generirao konzistentne i stabilne posteriorne uzorke. Uočava se da širina razdiobe izravno odražava veličinu procijenjene nesigurnosti. Karakteristike s manjom nesigurnošću (osni razmak i ravnost) imaju užu razdiobe, dok okomitost, kao najkritičnija karakteristika, pokazuje najširu posteriornu razdiobu.

Uz funkciju gustoće vjerojatnosti, za svaku analiziranu geometrijsku karakteristiku prikazana je i kumulativna funkcija razdiobe (engl. *Cumulative Distribution Function* – CDF) posteriorne razdiobe za parametar kombinirane standardne mjerne nesigurnosti u_c , što je prikazano na slici 5.4.



Slika 5.4. Kumulativne funkcije posteriornih razdioba za kombiniranu standardnu mjernu nesigurnost (u_c): a) promjer, b) osni razmak, c) kružnost, d) koncentričnost, e) ravnost, f) paralelnost, g) okomitost

Kumulativna funkcija razdiobe prikazuje vjerojatnost da stvarna vrijednost parametra ne prelazi određeni iznos na apscisi, a grafički je prikazana kao monotono rastuća S - krivulja u plavoj boji (u legendi označena kao Bayes). Na ordinati je prikazana kumulativna vjerojatnost u rasponu od 0,0 do 1,0.

Crvenim isprekidanim vertikalnim linijama označene su granice 95 %-tnog Bayesovog intervala vjerodostojnosti (u legendi označeno kao CI 95.0 %). Dodatno, horizontalne isprekidane linije na razinama kumulativne vjerojatnosti 0,025 i 0,975 vizualno potvrđuju da navedene vertikalne linije odgovaraju upravo tim kvantilima posteriorne razdiobe. Presjek horizontalnih i vertikalnih linija na S-krivulji definira granice intervala pokrivanja, što omogućuje njegovo izravno grafičko očitavanje bez potrebe za dodatnim analitičkim izračunima.

Ovakav grafički prikaz je koristan za dubinsku analizu stabilnosti i preciznosti mjernog procesa. Iako sve S-krivulje na panelima vizualno pokazuju sličan nagib, to je isključivo rezultat automatskog skaliranja apscise u programskom paketu radi optimizacije prikaza svake pojedine razdiobe. Stvarna mjera rasipanja i pouzdanosti očitava se u širini raspona vrijednosti na x-osi. Kod dimenzijskih značajki poput promjera i osnog razmaka, cjelokupna S-krivulja proteže se kroz uzak raspon vrijednosti (svega nekoliko mikrometara), što rezultira blisko postavljenim granicama intervala vjerodostojnosti te ukazuje na visoku pouzdanost same procjene mjerne nesigurnosti. S druge strane, kod okomitosti se S-krivulja proteže kroz širi raspon apscise, što ukazuje na znatno veće rasipanje posteriornih vrijednosti te širi interval vjerodostojnosti. Ovo je potpuno sukladno prethodno utvrđenoj većoj osjetljivosti te značajke na procesne utjecaje pri optičkom 3D skeniranju.

5.5 Usporedba rezultata procjene mjerne nesigurnosti

Za potpunu validaciju mjerne sposobnosti optičkog 3D mjernog sustava i njegovu pouzdanu integraciju u industrijske procese, provedena je sveobuhvatna procjena mjerne nesigurnosti. U tu svrhu, ovo istraživanje implementiralo je četiri priznate, ali suštinski različite metodologije. Radi jasnog i izravnog pregleda, u tablici 5.14. objedinjeni su rezultati proširene mjerne nesigurnosti (U) za svaku od metoda. Važno je napomenuti da Bayesova metoda primarno ne daje jednu, fiksnu vrijednost proširene nesigurnosti. Vrijednost U_B u tablici izračunata je množenjem srednje vrijednosti posteriorne razdiobe za u_c s faktorom pokrivanja $k = 2$, kako bi

se omogućila izravna numerička usporedba s rezultatima drugih metoda (GUM i MCS) te s eksperimentalnom ISO metodom.

Tablica 5.14. Usporedba procijenjene proširene mjerne nesigurnosti različitim metodama

Geometrijska karakteristika	ISO 15530-3 (U) mm	GUM (U) mm	MCS (U_{MC}) mm	Bayes (U_B) mm
Promjer	0,0625	0,0280	0,0272	0,0288
Osni razmak	0,0643	0,0285	0,0277	0,0294
Kružnost	0,0571	0,0385	0,0377	0,0390
Koncentričnost	0,0951	0,0353	0,0344	0,0362
Ravnost	0,0505	0,0285	0,0279	0,0290
Paralelnost	0,1026	0,0645	0,0623	0,0650
Okomitost	0,3696	0,3116	0,3034	0,3174

Usporedbom vrijednosti prikazanih u tablici 5.14, uočava se usklađenost između triju modelom baziranih metoda (GUM, MCS i Bayes). Kod najsloženijih značajki poput okomitosti, sve metode ukazuju na značajnu nesigurnost (0,3034 – 0,3174) mm, čime se nedvojbeno potvrđuje da je mjerenje geometrijskih odnosa na rubovima predmeta, uz prisutnost premaza, najkritičnija točka ovog mjernog sustava.

Analitički GUM pristup, numerička Monte Carlo simulacija i Bayesova analiza daju gotovo identične rezultate proširene nesigurnosti za sve analizirane geometrijske karakteristike. Primjerice, za kritičnu značajku okomitosti, procijenjene vrijednosti su 0,3116 mm (GUM), 0,3034 mm (MCS) i 0,3174 mm (Bayes), što predstavlja malo međusobno odstupanje. Ovako slaganje različitih pristupa pruža potvrdu ispravnosti i valjanosti razvijenog matematičkog modela. To ukazuje da je analitički model ispravno identificirao i kvantificirao dominantne izvore nesigurnosti koji potječu od samog mjernog procesa.

Nasuprot tome, usporedba s eksperimentalnom procjenom prema normi ISO 15530-3:2011 otkriva zanimljivu razliku, ovisno o složenosti značajke. Za jednostavnije dimenzije poput promjera, ISO 15530-3 metoda daje osjetno veće vrijednosti proširene nesigurnosti (0,062 mm) u odnosu na ostale pristupe ($\approx$ 0,028 mm). Ova razlika ne upućuje na nedostatak ovih pristupa, već na fundamentalnu razliku u obuhvatu nesigurnosti. Proračun prema normi ISO 15530-3 uključuje komponentu nesigurnosti predmeta (u_w), koja je u ovom istraživanju procijenjena mjerenjem deset različitih uzoraka iz serije. Time ova metoda, osim nesigurnosti samog mjernog sustava, obuhvaća i stvarne varijacije u proizvodnom procesu, koje su kod jednostavnih dimenzija dominantne. S druge strane, GUM model i iz njega izvedene simulacije

teže izolirati i kvantificirati nesigurnost koja potječe isključivo od mjernog procesa (skeniranja i obrade podataka).

Stoga se može zaključiti da modelom bazirane metode (GUM, MCS, Bayes) daju jasan uvid u mjernu sposobnost samog optičkog sustava. S druge strane, metoda prema normi ISO 15530-3 predstavlja referentni standard za procjenu ukupne mjerne nesigurnosti specifičnog mjernog zadatka. Ona daje sveobuhvatnu i realnu procjenu varijabilnosti u stvarnoj industrijskoj kontroli kvalitete jer, za razliku od navedenog GUM modela, obavezno obuhvaća i stvarne varijacije proizvodnog procesa na uzorcima. U tom kontekstu, visoka usklađenost između GUM, Monte Carlo i Bayesovog pristupa potvrđuje pouzdanost razvijenog modela u procjeni sposobnosti samog optičkog skenera. S druge strane, norma ISO 15530-3 ostaje referentna metoda za validaciju cjelokupnog mjernog procesa jer izravno obuhvaća i stvarne varijacije proizašle iz proizvodnje predmeta.

6. MEĐULABORATORIJSKA USPOREDBA

Međulaboratorijska usporedba mjerenja predstavlja ključni metodološki pristup za procjenu točnosti i pouzdanosti različitih mjernih sustava u industriji i istraživačkom okruženju. Ovakve usporedbe omogućuju evaluaciju mjerne sposobnosti laboratorija te osiguravaju usklađenost rezultata s međunarodnim standardima.

Cilj ovog istraživanja bio je analizirati rezultate mjerenja dobivene u tri laboratorija koji koriste tri različita mjerna sustava. Svaki laboratorij primjenjuje sustav prilagođen specifičnim svakodnevnim zahtjevima:

- Laboratorij 1: Mjerni sustav ATOS Core 300 koristi se unutar Razvojno inovacijskog centra, s primarnom primjenom u digitalizaciji objekata i povratnom inženjerstvu.
- Laboratorij 2: ATOS Compact Scan implementiran je u industrijskom okruženju, gdje služi za kontrolu kvalitete lijevanih proizvoda.
- Laboratorij 3: Kao vodeći laboratorij za dimenzijska mjerenja u Hrvatskoj, koristi ATOS 5 za napredne industrijske aplikacije.

Mjerenje s pomoću trokoordinatnog mjernog uređaja odabrano je kao referentna metoda zbog njegove visoke točnosti i široke primjene u dimenzijskoj metrologiji. Rezultati taktilnih mjerenja poslužili su kao osnovica za usporedbu s podacima dobivenim optičkim 3D mjernim sustavima.

Optički mjerni sustavi odabrani za ovo istraživanje razlikuju se po tehničkim specifikacijama, kao što su rezolucija, točnost i mjerni volumen. Sustav ATOS 5, kao predstavnik najnovije generacije, ističe se brzinom skeniranja i preciznošću u snimanju složenih geometrijskih oblika te reflektivnih površina.

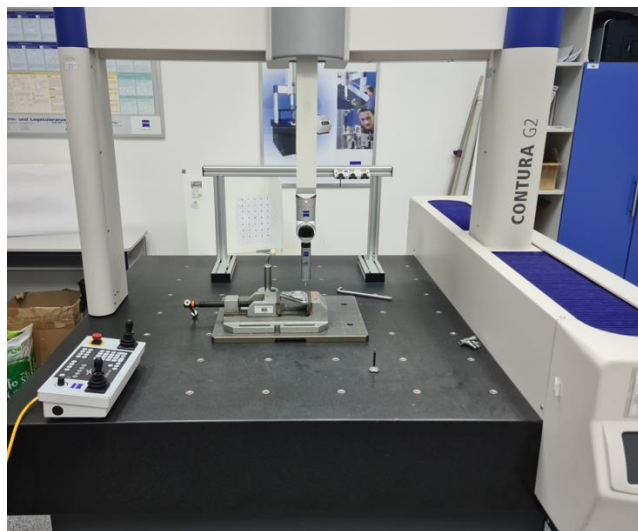
Poseban naglasak stavljen je na statističku analizu izmjerenih podataka radi objektivne procjene točnosti i međusobne kompatibilnosti sustava. Za procjenu su korištena dva komplementarna statistička pokazatelja:

- *z*-vrijednost (engl. *z-score*), kojom se kvantificira odstupanje rezultata laboratorija u odnosu na referentnu vrijednost.

- Faktor slaganja (E_n), koji ocjenjuje kompatibilnost rezultata uzimajući u obzir i njihove pripadajuće mjerne nesigurnosti.

6.1 Metodologija ispitivanja

Međulaboratorijska ispitivanja provedena su između tri laboratorija korištenjem tri različita optička 3D mjerna sustava na istom predmetu mjerenja. Uz to, provedena su mjerenja na trokoordinatnim mjernim uređajem kako bi se kvantificirala odstupanja optičkih mjerenja u odnosu na taktilna referentna mjerenja. Predmet mjerenja sadržavao je sedam ključnih karakteristika: promjer, osni razmak između dva provrta, kružnost, koncentričnost, ravnost, paralelnost i okomitost. Taktilna mjerenja izvedena su trokoordinatnim mjernim uređajem Zeiss CONTURA G2 RDS (slika 6.1.). Ovaj uređaj, opremljen VAST XXT sondom, osigurava duljinsku točnost od $1,9 + L/330 \mu\text{m}$. Mjerenja su provedena u kontroliranim uvjetima (20 ± 1) °C, a svako mjerenje ponovljeno je tri puta kako bi se dobila srednja vrijednost.

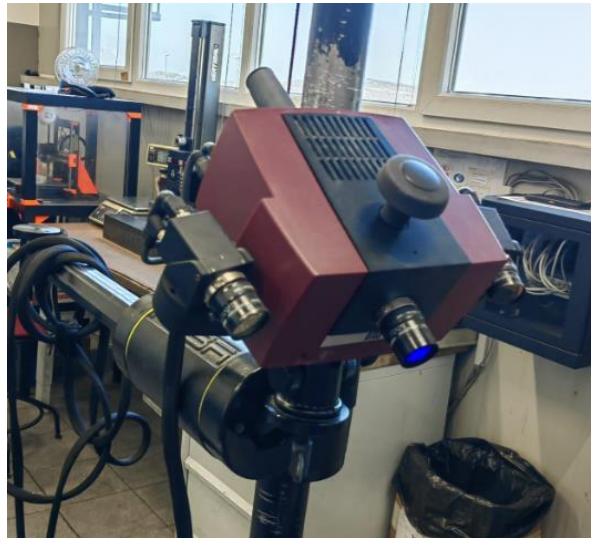


Slika 6.1. Trokoordinatni mjerni uređaj Zeiss CONTURA G2

Optički mjerni sustavi korišteni u ispitivanju uključuju:

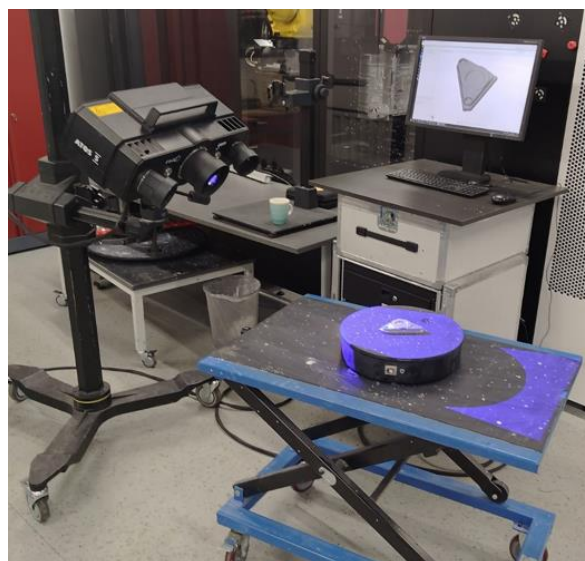
- ATOS Core 300: Sustav temeljen na principu strukturirane plave svjetlosti, dizajniran za digitalizaciju malih i srednjih objekata. Razlučivost od 0,12 mm te mogućnost mjerenja 3D koordinata s preciznošću od $\pm 10 \mu\text{m}$ (prema specifikaciji proizvođača) omogućuje precizno mjerenje geometrijskih značajki, dok je primjena usmjerena na laboratorijske uvjete i zadatke poput povratnog inženjerstva i kontrole kvalitete.

- ATOS Compact Scan (slika 6.2.): Kompaktan i fleksibilan sustav za snimanje kompleksnih oblika i inspekciju industrijskih proizvoda. Strukturirana svjetlost osigurava visoku razinu preciznosti (prema proizvođaču , dok prenosivost omogućuje primjenu u industrijskim uvjetima, posebice u kontroli kvalitete lijevanih dijelova.



Slika 6.2. Optički 3D skener: ATOS Compact scan

- ATOS 5 (slika 6.3.): Sustav najnovije generacije s naprednim mogućnostima brzog snimanja i obrade podataka. Visokoosjetljivi senzori i optimizirani izvor svjetlosti omogućuju točno mjerenje složenih geometrija i reflektivnih površina. Namijenjen je zahtjevnim industrijskim primjenama, uključujući inspekciju velikih i preciznih dijelova.



Slika 6.3. Optički 3D skener: ATOS 5

U cilju procjene mjerne sposobnosti i kompatibilnosti rezultata između triju laboratorija, provedena je statistička analiza u skladu sa smjernicama norme HRN ISO 13528:2023 „Statističke metode pri ispitivanju sposobnosti putem međulaboratorijske usporedbe“ [101]. Analiza se temelji na primjeni z-vrijednosti, koja omogućuje standardiziranu kvantitativnu evaluaciju odstupanja rezultata pojedinog laboratorija u odnosu na referentnu vrijednost. Specifičnost ovog istraživanja leži u načinu određivanja kriterija prihvatljivosti. S obzirom na ograničen broj sudionika ($n = 3$), standardna devijacija za ocjenu sposobnosti (σ_{pt}) nije određena statistički iz rasipanja rezultata sudionika, već je definirana prema načelu „prikladnosti za svrhu“ (engl. *fitness for purpose*), sukladno točki 8.1 norme HRN ISO 13528:2023 [101]. Kao mjera ciljane točnosti postavljena je standardna mjerna nesigurnost (u_c), prethodno procijenjena razvijenim Bayesovim modelom. Ovakvim pristupom izravno se validira teoretski model: uspješnost laboratorija ocjenjuje se prema tome postižu li točnost koju model predviđa.

Referentna vrijednost (x_{ref}) za svaku značajku određena je mjerenjem na trokoordinatnom mjernom uređaju. Uz z-vrijednost, za ocjenu kompatibilnosti, uzimajući u obzir i mjerne nesigurnosti ostvarene u laboratorijima, korišten je i faktor slaganja, čija je detaljna metodologija izračuna prikazana u nastavku poglavlja.

Prema kriterijima norme HRN ISO 13528:2023 [101], interpretacija z-vrijednosti provodi se na sljedeći način:

- $|z| \leq 2,0$ – Rezultat se smatra zadovoljavajućim. To znači da odstupanje laboratorija leži unutar očekivanog raspona definiranog Bayesovim modelom (približno 95 % razina pokrivenosti).
- $2,0 < |z| < 3,0$ – Rezultat se smatra upitnim (signal upozorenja).
- $|z| \geq 3,0$ – Rezultat se smatra nezadovoljavajućim (akcijski signal), što ukazuje na potencijalnu nesukladnost u mjernom postupku ili sustavu.

Ovi kriteriji usklađeni su i s pravilima Hrvatske akreditacijske agencije (HAA) za ispitivanja sposobnosti, čime se osigurava relevantnost rezultata u nacionalnom mjeriteljskom okviru.

Matematički, z-vrijednost za svaki laboratorij (i) izračunava se prema formuli:

$$z = \frac{x_i - x_{\text{ref}}}{\sigma_{\text{pt}}} \quad (6.1)$$

gdje je:

x_i – rezultat mjerenja pojedinog laboratorija

x_{ref} – referentna vrijednost dobivena TMU mjerenjem

σ_{pt} – standardna devijacija za ocjenu sposobnosti, određena kao u_c (Bayes).

Uz z -vrijednost, koja evaluira izvedbu isključivo na temelju odstupanja od referentne vrijednosti, za potpunu ocjenu mjerne sposobnosti nužno je uzeti u obzir i procijenjenu mjernu nesigurnost. U tu svrhu korišten je faktor slaganja (normirano odstupanje), koji testira kompatibilnost mjernog rezultata s referentnom vrijednošću unutar granica njihovih navedenih nesigurnosti.

Faktor slaganja se izračunava prema formuli:

$$E_n = \frac{x_i - x_{\text{ref}}}{\sqrt{U(x_i)^2 + U(x_{\text{ref}})^2}} \quad (6.2)$$

gdje je:

x_i – rezultat mjerenja pojedinog laboratorija

x_{ref} – referentna vrijednost dobivena TMU mjerenjem

$U(x_i)$ – proširena mjerna nesigurnost rezultata laboratorija ($k = 2$)

$U(x_{\text{ref}})$ – proširena mjerna nesigurnost referentne vrijednosti ($k = 2$). Ova vrijednost određena je izračunom standardne nesigurnosti primjenom zakona o propagaciji nesigurnosti. Standardna nesigurnost izračunata je kao korijen zbroja kvadrata dviju komponenti: standardne mjerne nesigurnosti samog referentnog trokoordinatnog mjernog uređaja (prema deklariranoj točnosti - $1,9 + L/330$) te standardne nesigurnosti ponovljivosti (određena iz niza ponovljenih mjerenja referentnog predmeta na TMU-u). Konačni iznos dobiven je množenjem sastavljene standardne nesigurnosti s faktorom proširenja $k = 2$.

Kriteriji za vrednovanje izvedbe prema faktoru slaganja su:

- $|E_n| \leq 1$ – Zadovoljavajuće (kompatibilno). Razlika između rezultata laboratorija i reference nalazi se unutar očekivanog raspona definiranog njihovim mjernim nesigurnostima. Ovo potvrđuje da je procijenjena nesigurnost realna i valjana.
- $|E_n| > 1$ – Nezadovoljavajuće (nekompatibilno). Odstupanje je veće nego što to predviđaju procijenjene nesigurnosti. To ukazuje na postojanje neprepoznate sustavne pogreške ili na to da je mjerna nesigurnost podcijenjena.

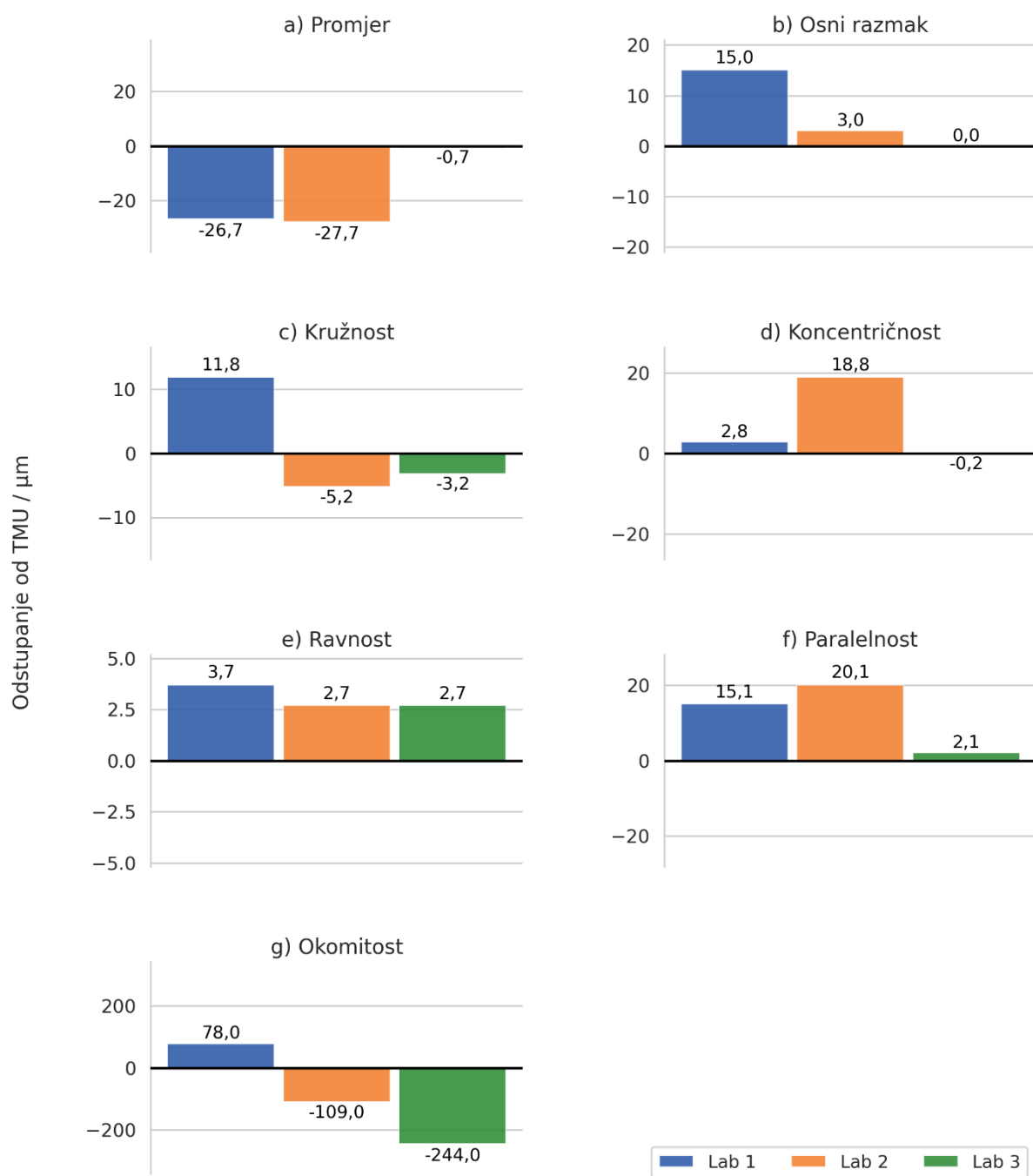
6.2 Rezultati međulaboratorijskih mjerenja

Rezultati međulaboratorijske usporedbe za svih sedam analiziranih geometrijskih karakteristika prikazani su na slici 6.4. Radi objektivne evaluacije točnosti mjernih sustava, na dijagramu nisu prikazane apsolutne izmjerene vrijednosti, već odstupanja srednjih vrijednosti rezultata svakog laboratorija (x_{lab}) u odnosu na referentnu vrijednost (x_{ref}) dobivenu umjeravanjem na trokoordinatnom mjernom uređaju.

Na dijagramu, nulta linija (os apscisa) predstavlja referentnu vrijednost. Stupci iznad ili ispod nulte linije kvantificiraju iznos sustavnog odstupanja pojedinog mjernog sustava od referentne vrijednosti.

Analizom objedinjenog prikaza uočava se jasna razlika u mjeriteljskoj sposobnosti sustava ovisno o vrsti značajke:

- Linearne dimenzije i jednostavne značajke (Promjer, Osni razmak, Ravnost): Odstupanja su mala i nalaze se u uskom rasponu od nule do najviše tridesetak mikrometara (primjerice, maksimalno odstupanje promjera iznosi $-27,7 \mu\text{m}$, dok su odstupanja ravnosti kod svih sustava manja od $4 \mu\text{m}$). Ovo potvrđuje visoku točnost optičkih sustava pri mjerenju osnovnih dimenzijskih značajki. Posebno valja istaknuti Laboratorij 3 (ATOS 5), čija su odstupanja kod osnovnog razmaka i promjera gotovo zanemariva u odnosu na referentne vrijednosti TMU-a.
- Složene tolerancije međusobnog položaja (Okomitost): Kod složenijih značajki, napose okomitosti, evidentna su značajno veća odstupanja koja sežu od $78,0 \mu\text{m}$ do $-244,0 \mu\text{m}$. Ovakvo rasipanje rezultata u potpunosti je u skladu s prethodno provedenim procjenama mjerne nesigurnosti (GUM, MCS i Bayesova metoda).



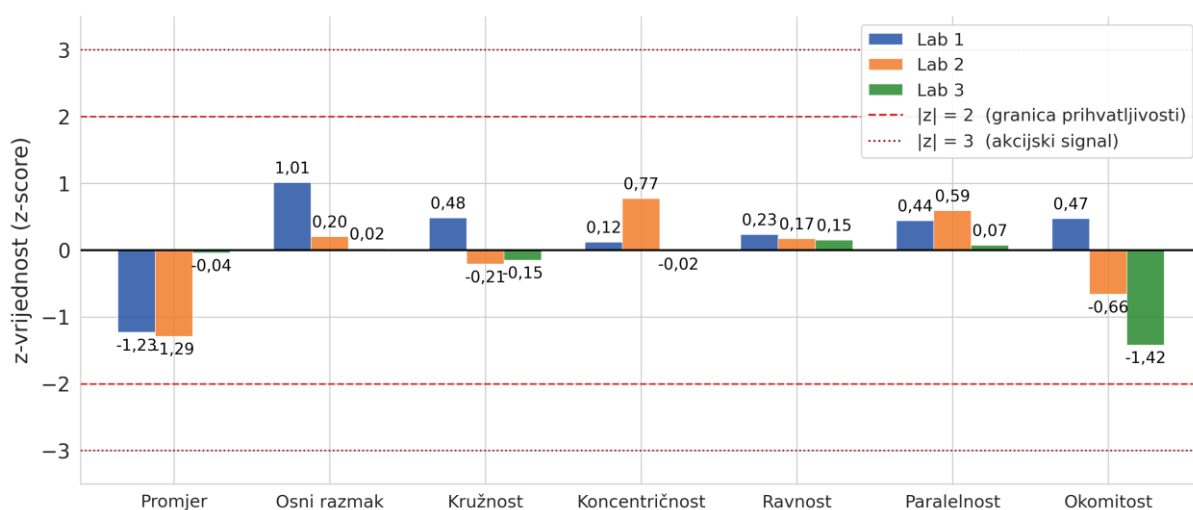
Slika 6.4. Odstupanje od TMU: a) mjerenje promjera, b) mjerenje osnog razmaka, c) mjerenje kružnosti, d) mjerenje koncentričnosti, e) mjerenje ravnosti, f) mjerenje paralelnosti, g) mjerenje okomitosti

6.2.1 Rezultati z-vrijednosti

Rezultati z-broja za sva tri laboratorija za pojedine geometrijske karakteristike prikazani su u Tablici 6.1 i na Slici 6.5. Rezultati pokazuju da su rezultati mjerenja sva tri laboratorija međusobno kompatibilni, budući da su za sve analizirane geometrijske karakteristike apsolutne vrijednosti z-broja ($|z|$) manje od 2.

Tablica 6.1. Izračunate z-vrijednosti za analizirane geometrijske karakteristike

	z-vrijednost		
	Laboratorij 1	Laboratorij 2	Laboratorij 3
Promjer	-1,23	-1,29	-0,04
Osni razmak	1,01	0,20	0,02
Kružnost	0,48	-0,21	-0,15
Koncentričnost	0,12	0,77	-0,02
Ravnost	0,23	0,17	0,15
Paralelnost	0,44	0,59	0,07
Okomitost	0,47	-0,66	-1,42



Slika 6.5. Grafički prikaz z-vrijednosti

Prikazani rezultati z-vrijednosti ukazuju na sljedeće zaključke o mjeriteljskoj sposobnosti analiziranih sustava:

1. Rezultati, za sva tri laboratorija i sve analizirane značajke, nalaze se unutar granica prihvatljivosti $|z| \leq 2,0$. To potvrđuje da niti jedan mjerni sustav ne pokazuje značajno

odstupanje koje bi prelazilo granice očekivane točnosti definirane Bayesovim modelom. Sustavi se ponašaju predvidljivo unutar postavljenih okvira.

2. Činjenica da su z-vrijednosti prihvatljive čak i za najzahtjevniju značajku okomitosti ukazuje na to da je σ_{pt} postavljen realno. Analiza potvrđuje da su velika odstupanja kod okomitosti inherentno svojstvo ovog tipa optičkih mjerenja (kako je model i predvidio kroz visoki u_c), a ne rezultat grube pogreške operatera ili neispravnosti uređaja.

3. Lab 3 (ATOS 5) pokazuje najbolju usklađenost s referencom (z-vrijednosti najbliže nuli) kod promjera, osnog razmaka, kružnosti, koncentričnosti, ravnosti i paralelnosti, što je očekivano s obzirom na napredniju tehnologiju senzora.

Analiza z-vrijednosti potvrđuje da su odstupanja mjerenja unutar definiranih kriterija prihvatljivosti u odnosu na postavljene ciljeve. Međutim, za konačnu potvrdu jesu li procijenjene mjerne nesigurnosti svakog laboratorija valjane (tj. jesu li realno procijenjene ili podcijenjene/precijenjene), nužno je provesti analizu primjenom faktora slaganja, koja slijedi u nastavku.

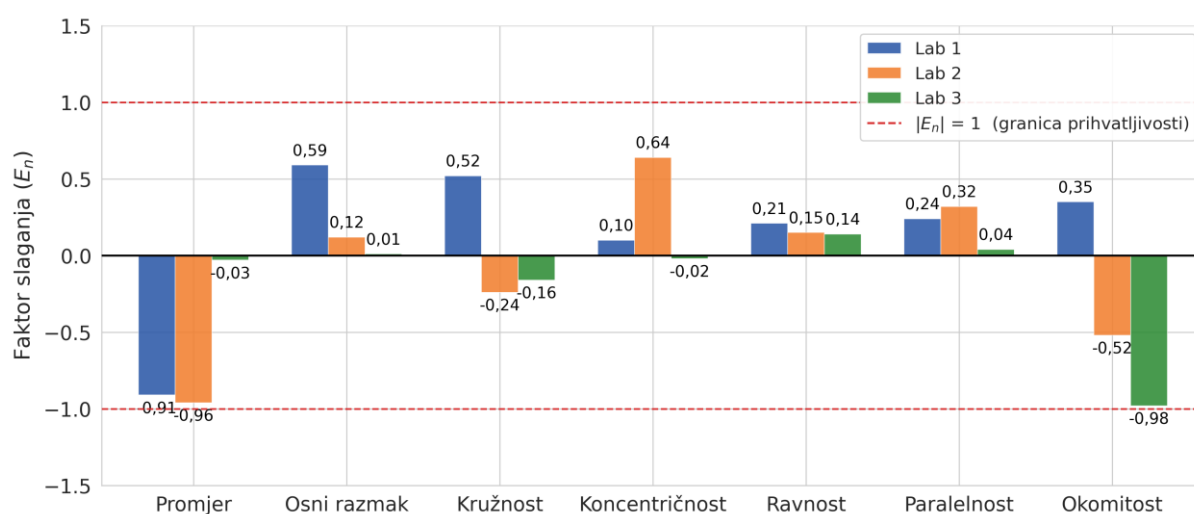
6.2.2 Rezultati faktora slaganja

Nakon evaluacije izvedbe mjernih sustava putem z-vrijednosti, provedena je analiza kompatibilnosti rezultata primjenom faktora slaganja. Dok z-vrijednost ocjenjuje samo točnost u odnosu na postavljeni cilj, faktor slaganja vrednuje rezultat uzimajući u obzir proširene mjerne nesigurnosti i sudionika i reference.

Za potrebe ove analize korištene su mjerne nesigurnosti procijenjene GUM metodom u prethodnom poglavlju (Tablica 5.10.). Međutim, kako bi procjena bila primjenjiva na specifične uvjete svakog sudionika, komponenta nesigurnosti povezana s hardverom (koja je u modelu opća) zamijenjena je stvarnom eksperimentalnom standardnom devijacijom ponovljenih mjerenja za svaki pojedini laboratorij. Ostale komponente modela (hrapavost, premaz, temperatura, itd.) zadržane su kao konstante proizašle iz modela. Rezultati su prikazani u tablici 6.2. i na slici 6.6.

Tablica 6.2. Rezultat analize kompatibilnosti (faktor slaganja)

	E_n		
	Laboratorij 1	Laboratorij 2	Laboratorij 3
Promjer	-0,91	-0,96	-0,03
Osni razmak	0,59	0,12	0,01
Kružnost	0,52	-0,24	-0,16
Koncentričnost	0,10	0,64	-0,02
Ravnost	0,21	0,15	0,14
Paralelnost	0,24	0,32	0,04
Okomitost	0,35	-0,52	-0,98



Slika 6.6. Grafički prikaz faktora slaganja

Rezultati prikazani u tablici 6.2. i na slici 6.6. pokazuju visoku razinu kompatibilnosti između mjerenja provedenih u tri laboratorija i referentnih vrijednosti.

- Potpuna validacija modela: Za sve analizirane značajke i sve laboratorije, vrijednost faktora slaganja je manja ili jednaka 1,0 ($|E_n| \leq 1$). Prema kriterijima norme HRN ISO 13528 [101], to znači da su rezultati zadovoljavajući. Ovo je empirijski dokaz da GUM model generira realne i pouzdane procjene mjerne nesigurnosti koje uspješno pokrivaju stvarna odstupanja u praksi.
- Kritične značajke: Čak i kod osnovne značajke poput promjera, stariji mjerni sustavi (Laboratorij 1 i Laboratorij 2) pokazuju izrazito velika apsolutna odstupanja faktora slaganja (-0,91 i -0,96). Ipak, rezultat se smatra prihvatljivim ($|E_n| \leq 1$), što ukazuje da je model ispravno procijenio rizike mjerenja tim sustavima. S druge strane, ukupno

najveće apsolutno odstupanje u cijeloj analizi zabilježeno je kod najsloženije značajke, okomitosti, i to za Laboratorij 3 (-0,98). Ovakav raspon E_n vrijednosti kod okomitosti (0,35 do -0,98) potvrđuju da je velika procijenjena nesigurnost ($U \approx 0,31$ mm) bila opravdana i nužna kako bi se pokrila stvarna odstupanja procesa.

- Rezultati Lab 3: Laboratorij 3 (ATOS 5) pokazuje E_n vrijednosti najbliže nuli za većinu značajki, što potvrđuje da kombinacija naprednog hardvera i modelom procijenjene nesigurnosti daje pouzdane mjeriteljske rezultate.

6.2.3 Sinteza rezultata međulaboratorijske usporedbe

Provedena međulaboratorijska usporedba na tri različita optička mjerna sustava (GOM ATOS Core 300, Compact Scan i ATOS 5) omogućila je eksperimentalnu provjeru valjanosti razvijenog teorijskog modela mjerne nesigurnosti u realnim uvjetima. Sintezom rezultata statističke analize (z-vrijednosti i faktora slaganja) mogu se izvesti tri ključna zaključka:

1. Potvrda valjanosti GUM modela: Činjenica da su za sve analizirane značajke E_n vrijednosti bile manje od 1 predstavlja snažan dokaz da GUM model ispravno procjenjuje mjernu nesigurnost. Iako su apsolutna odstupanja kod okomitosti bila visoka, model je predvidio visoku nesigurnost, čime je E_n ostao unutar granica prihvatljivosti. Time je potvrđeno da model generira realne, a ne idealizirane granice nesigurnosti.

2. Uspješnost primjene načela „prikladnosti za svrhu“: Korištenje modelirane nesigurnosti (u_c , Bayes) kao kriterija za ocjenu sposobnosti (σ_{pt}) pokazalo se opravdanim. Ovim pristupom dokazano je da su analizirani optički sustavi sposobni za provedbu mjerenja unutar tolerancija koje predviđa model, čime se zadovoljava kriterij prikladnosti za svrhu (engl. *fitness for purpose*) definiran normom HRN ISO 13528:2023.

3. Tehnološki napredak i točnost: Iako su svi sustavi zadovoljili kriterije kompatibilnosti, rezultati Laboratorija 3 (ATOS 5) pokazali su značajno manja odstupanja od referentnih vrijednosti (približno nula za linearne dimenzije). To ukazuje da napredniji hardver i algoritmi najnovije generacije senzora gotovo u potpunosti eliminiraju slučajne pogreške. S druge strane, fizički utjecaji poput nanošenja premaza ostaju neizbježan izvor sustavnih odstupanja kod geometrijskih tolerancija, no valjanost razvijenog modela očituje se upravo u tome što je te utjecaje ispravno kvantificirao.

7. RASPRAVA

Analiza odabranih industrijskih slučajeva primjene potvrdila je široku funkcionalnost optičkih 3D mjernih sustava u praksi. U području povratnog inženjerstva, pokazano je da optičko skeniranje omogućuje izradu preciznih digitalnih modela i za objekte bez dostupne tehničke dokumentacije, čime se osigurava pouzdana geometrijska rekonstrukcija. U industrijskoj kontroli kvalitete, skener je primijenjen za evaluaciju alata za izradu voštanih modela, pri čemu je omogućena pravovremena detekcija odstupanja i korekcija procesa. U arheološkom kontekstu, beskontaktna digitalizacija osjetljivih predmeta omogućila je detaljnu dokumentaciju bez ugrožavanja integriteta artefakata, dok su dobiveni 3D modeli poslužili i za potrebe očuvanja i prezentacije. Kod ispitivanja inovativnog proizvodnog koncepta temeljenog na aditivnoj tehnologiji, 3D skeniranje omogućilo je praćenje geometrijskih promjena tijekom procesa i potvrdu izvedivosti zamjene tradicionalnih uzoraka onima izrađenima 3D ispisom. Kroz sve navedene primjene, jasno je pokazano da optički sustavi omogućuju brzo i precizno mjerenje objekata složene geometrije. Istodobno, ova je analiza uspješno poslužila svojoj primarnoj svrsi – identifikaciji ključnih mjeriteljskih izazova u realnim uvjetima (poput utjecaja refleksije, nužnosti primjene matirajućeg premaza i složenosti obrade oblaka točaka). Upravo su ti identificirani izazovi iz prakse predstavljali izravan poticaj i temelj za postavljanje i provedbu glavnog eksperimentalnog dijela ovog istraživanja.

Dobiveni rezultati potvrđuju postavljenu hipotezu istraživanja. Analizom utjecajnih faktora identificirani su i kvantificirani parametri koji značajno utječu na rezultate optičkog 3D mjerenja objekata složene geometrije. Time je potvrđeno da je moguće odrediti dominantne izvore odstupanja i njihov utjecaj na točnost i preciznost rezultata mjerenja. Procjena mjerne nesigurnosti provedena je hibridnim pristupom koji uključuje četiri komplementarne metodologije: eksperimentalnu metodu prema normi ISO 15530-3, analitički pristup prema GUM smjernicama, Monte Carlo simulaciju i Bayesovu metodu. Primjenom više metoda omogućena je međusobna provjera rezultata i pouzdanija kvantifikacija nesigurnosti mjerenja.

Izvorni znanstveni doprinos doktorskog rada očituje se u razvoju metodologije za objektivnu procjenu mjerne sposobnosti optičkih 3D mjernih sustava pri mjerenju objekata složene geometrije. Poseban doprinos predstavlja integracija više metoda procjene mjerne nesigurnosti u jedinstven hibridni pristup te njegova primjena u vrednovanju obnovljivosti i usporedivosti rezultata kroz međulaboratorijsku usporedbu.

Analiza utjecajnih faktora u optičkom 3D mjerenju omogućila je nova saznanja u području parametara koji izravno utječu na točnost rezultata. U prvoj fazi istraživanja ciljano su ispitani faktori vezani uz fizičku pripremu objekta i softversku obradu podataka. Pritom su određene varijable, poput karakteristika hardverske opreme, stručnosti operatera te okolišnih uvjeta (osvjetljenje, temperatura, vibracije), zadržane konstantnima kako bi se omogućila izolirana evaluacija odabranih parametara i njihovo kvantitativno vrednovanje metodom analize varijance. Dobiveni rezultati pokazali su da neki faktori, poput načina matiranja površine (nanošenja premaza) i razine poligonizacije, imaju izražen utjecaj na mjernu točnost, dok su drugi, primjerice interpolacijski algoritam, imali zanemariv učinak. Iako su utjecaji hardvera, operatera i okoline u ovom koraku bili fiksirani, oni nisu zanemareni, već su naknadno kvantificirani i integrirani u sveobuhvatni model mjerne nesigurnosti. Time su provedeni pokusi dali pouzdane zaključke o dominantnim izvorima pogrešaka, dok cjelokupni matematički model osigurava primjenjivost rezultata u širem operativnom i industrijskom kontekstu.

Kao eksperimentalni temelj i praktični referentni okvir, primijenjena je metoda prema normi ISO 15530-3. Kroz ponovljena mjerenja referentnog objekta, kao i mjerenje uzorka od deset različitih predmeta iz iste serijske proizvodnje, obuhvaćena je ukupna nesigurnost mjernog postupka te stvarna varijabilnost proizvodnje, bez potrebe za analitičkim modeliranjem svakog pojedinačnog izvora nesigurnosti. Rezultati ove analize jasno pokazuju kako mjerna nesigurnost značajno varira ovisno o složenosti mjerene geometrijske karakteristike.

Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti kreću se u rasponu od 0,0505 mm do 0,3696 mm, ovisno o vrsti mjerene geometrijske karakteristike. Za tolerancije oblika dobivene su vrijednosti u rasponu od 0,0505 mm do 0,0571 mm (ravnost i kružnost). Za osnovne dimenzije, poput promjera i osnog razmaka, vrijednosti se kreću do 0,0643 mm. Kod složenijih geometrijskih karakteristika, koje uključuju odnose između više elemenata, vrijednosti mjerne nesigurnosti kreću se u rasponu od 0,0951 mm do 0,3696 mm (koncentričnost, paralelnost i okomitost).

Uz eksperimentalni pristup, primijenjen je i analitički pristup u skladu s GUM smjernicama, pri čemu je procjena mjerne nesigurnosti provedena kombiniranjem standardnih nesigurnosti identificiranih utjecajnih veličina. U model su, uz faktore vezane uz objekt i softver, uključeni i doprinosi koji potječu od umjeravanja, temperaturnih varijacija, hardvera te samog mjeritelja. Svakom od tih faktora dodijeljena je odgovarajuća standardna nesigurnost, a njihovom kombinacijom, primjenom zakona o propagaciji nesigurnosti, procijenjena je ukupna proširena

mjerna nesigurnost (U). Prednost ovog pristupa leži u mogućnosti detaljne analize doprinosa svakog pojedinog izvora pogreške. Rezultati dobiveni ovim modelom jasno pokazuju da se vrijednosti nesigurnosti grupiraju u prepoznatljive razine koje ovise o složenosti mjerene značajke: niske za jednostavne dimenzije i planarnost, umjerene za karakteristike oblika i visoke za tolerancije međusobnog položaja. Najniže vrijednosti zabilježene su za promjer ($U = 0,0280$ mm), osni razmak ($U = 0,0285$ mm) i ravnost ($U = 0,0285$ mm), što potvrđuje visoku pouzdanost sustava pri određivanju jednostavnih linearnih i dimenzijskih karakteristika. S druge strane, visoke vrijednosti nesigurnosti procijenjene su za tolerancije međusobnog položaja, s najvećim iznosima za paralelnost ($U = 0,0645$ mm) i okomitost ($U = 0,3116$ mm). Ovakav ishod direktna je posljedica prirode tih značajki, koje se definiraju odnosom dvaju ili više odvojenih geometrijskih elemenata, zbog čega se nesigurnosti pojedinačnih elemenata kumuliraju. Detaljnija analiza nesigurnosti otkriva da je kod okomitosti visok iznos primarno rezultat zbroja triju najznačajnijih doprinosa: utjecaja premaza, hardvera i hrapavosti površine. Time analitički pristup ne samo da kvantificira ukupnu nesigurnost, već i precizno locira metrološki najzahtjevnije aspekte mjernog procesa.

Izravna usporedba rezultata dobivenih GUM i ISO 15530-3 metodama omogućuje dodatnu analizu. Obje metode sukladno identificiraju okomitost kao karakteristiku s najvišom mjernom nesigurnosti, što potvrđuje opću usklađenost u procjeni koji su mjerni zadaci metrološki najzahtjevniji. Međutim, detaljnija usporedba otkriva da eksperimentalna ISO 15530-3 metoda redovito daje više vrijednosti proširene nesigurnosti u usporedbi s analitičkim GUM modelom, kako kod jednostavnih dimenzija, tako i kod složenijih tolerancija međusobnog položaja (npr. kod okomitosti $U_{\text{GUM}} = 0,3116$ mm, $U_{\text{ISO}} = 0,3696$ mm). Ova razlika ne upućuje na nedostatak GUM modela, već se pripisuje fundamentalnoj razlici u metodologiji, posebice uključivanju komponente nesigurnosti predmeta mjerenja u_w kod eksperimentalne metode. Budući da se ta komponenta određuje mjerenjem deset različitih uzoraka, ona neizbježno obuhvaća i stvarne varijacije u proizvodnom procesu. Nasuprot tome, GUM model razvijen u ovom radu teži izolirati izvore nesigurnosti koji potječu isključivo od mjernog sustava, zbog čega daje manju vrijednost nesigurnosti za jednostavne dimenzije.

Kako bi se analitički model, razvijen prema GUM smjernicama, dodatno ispitao i numerički validirao, provedena je Monte Carlo simulacija. Ovaj pristup, temeljen na propagaciji cjelokupnih razdioba vjerojatnosti umjesto samo njihovih parametara, služi kao provjera GUM-ovih matematičkih pretpostavki. Rezultati simulacije pokazali su visoku razinu podudarnosti s

GUM procjenama za sve karakteristike, čime je potvrđena ispravnost i primjenjivost razvijenog analitičkog modela.

Osim numeričke potvrde, MCS je pružio i vizualni uvid u prirodu rasipanja rezultata kroz generirane histograme. Svi histogrami pokazuju simetričnu, zvonoliku formu koja odgovara normalnoj (Gaussovoj) razdiobi, što je u potpunom skladu s teorijskim postavkama. Sredina svake razdiobe, smještena na vrijednosti nula, vizualno potvrđuje da je definirani mjerni model ispravno centriran, odnosno da su utvrđene sustavne pogreške prethodno korigirane te da simulacija prikazuje isključivo rasipanje rezultata uslijed mjerne nesigurnosti. Širina razdioba na histogramima, koja je izravno proporcionalna procijenjenoj nesigurnosti, dodatno je potvrdila da su tolerancije međusobnog položaja poput okomitosti i paralelnosti metrološki najzahtjevnije.

U istraživanju je primijenjena i Bayesova statistička analiza. Ova metoda definira nesigurnost kao stupanj vjerovanja koji se formalno ažurira na temelju prikupljenih mjernih podataka. Vrijednosti dobivene Bayesovom analizom pokazuju slaganje s procjenama dobivenim analitičkim (GUM) i simulacijskim (MCS) metodama, čime se dodatno osnažuje povjerenje u razvijeni model nesigurnosti. Iako obje napredne numeričke metode (MCS i Bayes) nadilaze ograničenja klasičnog analitičkog GUM pristupa time što rezultiraju cjelovitim razdiobama vjerojatnosti i iz njih izvedenim intervalima, ključna i jedinstvena prednost Bayesovog pristupa leži u formalnoj integraciji prethodnog znanja. Bayesov model omogućuje da se priorno znanje o mjernom sustavu matematički integrira s novim eksperimentalnim podacima, čime se procesom učenja stvara ažurirana, posteriorna razdioba. Takav probabilistički okvir predstavlja najpotpuniji opis stanja znanja o mjernom procesu jer izravno kvantificira stupanj sigurnosti u dobivene rezultate, izražavajući nesigurnost kroz precizno definirane Bayesove intervale vjerodostojnosti.

Uspoređujući rezultate procjene mjerne nesigurnosti dobivene svim primijenjenim metodama, uočavaju se značajne razlike ovisno o složenosti mjerene karakteristike. Veće vrijednosti mjerne nesigurnosti kod geometrijskih tolerancija, osobito koncentričnosti, paralelnosti i okomitosti, mogu se objasniti činjenicom da te značajke ovise o većem broju izmjerenih točaka i osjetljivije su na lokalne pogreške oblaka točaka. Za razliku od dimenzijskih značajki poput promjera ili osnog razmaka, geometrijske tolerancije predstavljaju izvedene parametre čija se vrijednost određuje matematičkom aproksimacijom većeg broja mjernih podataka te su stoga osjetljivije na šum, poligonizaciju i lokalne površinske nepravilnosti. Ovakav ishod direktna je

posljedica prirode tih značajki, koje se definiraju odnosom dvaju ili više odvojenih geometrijskih elemenata, zbog čega se nesigurnosti pojedinačnih elemenata kumuliraju.

Metoda ISO 15530-3 temelji se na eksperimentalnoj usporedbi s referentnim artefaktom te daje procjenu nesigurnosti koja uključuje ukupni učinak mjernog procesa. Nasuprot tome, GUM pristup omogućuje analitičko razlaganje pojedinačnih izvora nesigurnosti i njihovu kvantifikaciju. Monte Carlo simulacija služi za numeričku validaciju razvijenog modela, dok Bayesova metoda omogućuje probabilističku interpretaciju rezultata i uključivanje prethodnih informacija u procjenu nesigurnosti. Razlika između rezultata dobivenih prema normi ISO 15530-3 i rezultata dobivenih primjenom GUM, Monte Carlo i Bayesovog pristupa može se objasniti uključivanjem komponente nesigurnosti predmeta mjerenja u_{wp} u eksperimentalnoj metodi. Iako se usporedbom s referentnim artefaktom i primjenom odgovarajućih korekcija značajan dio sustavnih odstupanja uklanja, procjena prema ISO 15530-3 i dalje obuhvaća stvarnu varijabilnost dijelova unutar proizvodnog procesa. Posljedica toga su veće vrijednosti procijenjene mjerne nesigurnosti u odnosu na GUM, Monte Carlo i Bayesov pristup, koji su primarno usmjereni na modeliranje i kvantifikaciju izvora nesigurnosti povezanih s mjernim sustavom. Stoga se veće vrijednosti nesigurnosti dobivene prema normi ISO 15530-3 mogu tumačiti kao realističnija procjena ukupne nesigurnosti mjerenja u proizvodnim uvjetima, dok modelni pristupi omogućuju detaljniju analizu pojedinačnih doprinosa nesigurnosti i optimiranje mjernog procesa.

Međulaboratorijska usporedba rezultata triju neovisnih laboratorija, opremljenih različitim optičkim 3D skenerima, u odnosu na referentna taktilna mjerenja potvrdila je visoku razinu obnovljivosti i usporedivosti optičkih sustava u praksi. Dok se u standardnim shemama ispitivanja sposobnosti za ocjenu prihvatljivosti primarno koristi z-vrijednost (koja je ovdje potvrdila visoku točnost opreme, posebice najsuvremenijeg sustava ATOS 5), ona ne pruža informaciju o valjanosti same procijenjene mjerne nesigurnosti. Stoga je, kao ključni iskorak za verifikaciju, u analizu uključen faktor slaganja prema smjernicama norme HRN ISO 13528:2023. Korištenjem vrijednosti nesigurnosti dobivenih razvijenim analitičkim GUM modelom pri izračunu faktora slaganja, ostvareni su rezultati $|E_n| \leq 1$ za sve mjerene značajke, čime je izravno dokazano da teorijski model generira realne i pouzdane granice nesigurnosti. Iako su kod pojedinih složenih značajki (poput okomitosti) uočene očekivane varijacije koje naglašavaju važnost dosljedne primjene usuglašenih protokola i utjecaj tehničkih karakteristika opreme, ukupni rezultati nedvojbeno potvrđuju operativnu vjerodostojnost optičkih 3D sustava.

Ovakva eksperimentalna i analitička potvrda predstavlja značajan doprinos uspostavljanju mjeriteljske sljedivosti, čime se izravno olakšava brza i sigurna integracija optičkih skenera u napredne automatizirane procese Industrije 4.0.

S obzirom na postavljenu hipotezu, znanstveni doprinos rada ne očituje se samo u jednom izoliranom segmentu, već upravo u jedinstvenoj kombinaciji navedenih metoda. Konkretno, znanstveni doprinos očituje se u razvoju hibridnog modela za procjenu mjerne nesigurnosti koji objedinjuje pristupe prema ISO 15530-3, GUM-u, Monte Carlo simulaciji i Bayesovoj analizi, te u njegovoj eksperimentalnoj validaciji kroz međulaboratorijsku usporedbu.

Poseban doprinos rada predstavlja razvoj i validacija sveobuhvatnog pristupa procjeni mjerne nesigurnosti optičkih 3D mjernih sustava koji uzima u obzir stvarne uvjete mjerenja, karakteristike mjerenog objekta, parametre obrade podataka i korištenu mjernu opremu. Takav pristup omogućuje sudionicima budućih međulaboratorijskih usporedbi dosljednu i mjeriteljski utemeljenu procjenu mjerne nesigurnosti, što do sada nije bilo jednoznačno definirano za optičke 3D mjerne sustave. Dosadašnje usporedbe rezultata mjerenja optičkih 3D mjernih sustava u pravilu su se temeljile prvenstveno na analizi z-vrijednosti, pri čemu se ocjenjivala podudarnost rezultata mjerenja. U ovom radu evaluacija je proširena primjenom faktora slaganja, koji uz rezultat mjerenja uključuje i procijenjenu mjernu nesigurnost svakog sudionika. Time je omogućena znatno potpunija procjena usporedivosti rezultata.

Usporedbom rezultata i metodologije ovog istraživanja s dosadašnjim spoznajama, jasno se ističe iskorak u vrednovanju optičkih 3D mjernih sustava. Naime, dok u nedavnom istraživanju Kortaberria i suradnici [99] ističu kako za optičke 3D sustave trenutačno ne postoje pouzdani numerički simulacijski modeli, zbog čega se vrednovanje mjernih rezultata i dalje temelji isključivo na eksperimentalnoj primjeni norme ISO 15530-3. Ovaj doktorski rad izravno rješava taj prepoznati nedostatak razvojem cjelovitog analitičkog modela prema GUM smjernicama. Nadalje, dok se u srodnim istraživanjima (npr. Dumitrache i suradnici [96]) tek konstatiraju odstupanja pri mjerenju složenih geometrija, u ovom su radu stvarni uzroci tih pogrešaka izravno kvantificirani ANOVA-om i integrirani u analitički proračun mjerne nesigurnosti. Kako u recentnom pregledu tehnologije ističu Sanchez-Torres i suradnici [10], za kritične industrijske primjene neophodna je izravna usporedba optičkih sustava s trokoordinatnim mjernim uređajima kako bi se uistinu validirali teorijski proračuni. Upravo je taj ključni zahtjev ispunjen u ovom radu jer je procijenjena GUM nesigurnost izravno iskorištena kao kriterij ciljane točnosti pri izračunu faktora slaganja u međulaboratorijskoj usporedbi prema referentnom

TMU uređaju. Kako bi se dodatno prevladala deterministička ograničenja analitičkog pristupa i dobio što potpuniji probabilistički uvid, u radu je primijenjena i Bayesova metoda koja spaja teorijsko predznanje sa stvarnim eksperimentalnim podacima skenera. Slične napredne statističke metode nedavno su dokazale svoju nužnost i u srodnim doktorskim istraživanjima za procjenu nesigurnosti složenih mjernih sustava (Horvatić Novak za CT [91], Razumić za AFM [92] te Bošnjaković [89]). Integracijom ovih pristupa dokazano je da hibridni model generira pouzdane granice nesigurnosti, čime se uspješno premošćuju isključivo eksperimentalni nedostaci te potvrđuje spremnost optičkih 3D sustava za napredne procese kontrole kvalitete.

Pouzdanost dobivenih rezultata potvrđena je međusobnom konzistentnošću GUM, Monte Carlo i Bayesove metode te njihovom dodatnom provjerom kroz međulaboratorijsku usporedbu. Pritom veće vrijednosti mjerne nesigurnosti prema ISO 15530-3 ne predstavljaju neslaganje metoda, nego upućuju na širi obuhvat te metode, osobito uključivanje varijabilnosti stvarnih dijelova. Stoga se rezultati pojedinih modela trebaju promatrati komplementarno: ISO 15530-3 daje realističnu i konzervativnu procjenu ukupne nesigurnosti u proizvodnim uvjetima, dok GUM, Monte Carlo i Bayesova metoda omogućuju razumijevanje, validaciju i optimiranje samog mjernog procesa.

Potrebno je naglasiti da su rezultati dobiveni na optičkom 3D sustavu temeljenom na strukturiranom svjetlu (ATOS Core 300) te da se ne mogu bez dodatne validacije izravno generalizirati na sve optičke mjerne sustave. Različite generacije senzora, mjerne konfiguracije, algoritmi rekonstrukcije i softverska rješenja mogu dovesti do drukčijih vrijednosti pojedinih komponenti mjerne nesigurnosti. Dodatno, istraživanje je provedeno na unaprijed definiranim ispitnim uzorcima i geometrijskim značajkama koje predstavljaju tipične industrijske slučajeve primjene, no ne obuhvaćaju cjelokupan raspon geometrija, materijala i površinskih svojstava koji se pojavljuju u industrijskoj praksi. Posebice se rezultati ne mogu izravno prenijeti na objekte s izrazito reflektirajućim, transparentnim ili višematerijalnim površinama bez dodatnih ispitivanja.

Također, značajan dio eksperimentalnih istraživanja proveden je u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, pri čemu nisu obuhvaćeni svi utjecaji koji se mogu pojaviti u stvarnim proizvodnim okruženjima, poput promjenjivih okolišnih uvjeta, dugoročne stabilnosti opreme ili automatiziranih mjernih postupaka.

Iako su rezultati međulaboratorijske usporedbe pokazali visoku razinu usporedivosti mjerenja, broj uključenih laboratorija i mjernih sustava bio je ograničen. Stoga bi dodatna validacija na većem broju optičkih sustava i u širem rasponu industrijskih uvjeta dodatno potvrdila opću primjenjivost razvijenog pristupa.

8. ZAKLJUČAK

Optička 3D mjerenja složenih geometrijskih objekata od iznimne su važnosti u suvremenoj industriji, posebno u kontekstu digitalne transformacije i paradigme Industrije 4.0. Sve šira primjena ovih sustava u područjima kao što su precizno inženjerstvo, automobilska industrija, biomedicina te očuvanje kulturne baštine naglašava potrebu za pouzdanim i točnim mjerenjima. Međutim, složenost geometrije objekata i raznolikost materijala uvjetuju pojavu brojnih izazova u mjeriteljstvu. Upravo je ta problematika motivirala ovo istraživanje te je prepoznata potreba za analizom ograničenja i mogućnosti optičkih 3D mjernih sustava, kao i za razvojem metodologija koje osiguravaju njihovu preciznost i pouzdanost pri mjerenju objekata složene geometrije.

Cilj provedenog istraživanja bio je utvrditi sposobnost mjerenja objekata složene geometrije optičkim 3D mjernim sustavom te procijeniti iznos najmanje mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja. U skladu s tim ciljem, postavljena je hipoteza da je moguće utvrditi i kvantificirati parametre koji značajno utječu na točnost i preciznost rezultata mjerenja objekata složene geometrije optičkim 3D mjernim sustavom te razviti matematički model mjernog sustava u cilju procjene mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja.

Sintezom provedenih analiza ostvarena je jasna i izravna veza između dobivenih rezultata, potvrđene hipoteze i konačnog znanstvenog doprinosa rada. Eksperimentalnim rezultatima nedvojbeno su identificirani i kvantificirani dominantni izvori odstupanja pri optičkom 3D mjerenju složenih geometrija te je uspješno razvijen i validiran hibridni model mjerne nesigurnosti, čime je u potpunosti potvrđena postavljena hipoteza istraživanja. Iz tako dokazane hipoteze izravno proizlazi izvorni znanstveni doprinos ove disertacije, koji se očituje u razvoju cjelovite metodologije za objektivnu procjenu mjerne sposobnosti optičkih 3D mjernih sustava. Originalnost tog doprinosa leži upravo u integraciji komplementarnih pristupa procjeni mjerne nesigurnosti u jedinstven hibridni model te njegovoj uspješnoj praktičnoj primjeni pri vrednovanju obnovljivosti i usporedivosti kroz međulaboratorijsku usporedbu.

Teorijski dio rada pružio je širok pregled tehnologija i metoda optičkog 3D mjerenja, postojećih standarda i smjernica za osiguravanje mjeriteljske sljedivosti te usporedbu optičkih tehnika s klasičnim mjernim sustavima. Dodatno, u okviru teorijskog dijela provedena je i detaljna analiza mjerne sposobnosti kroz odabrane industrijske slučajeve primjene. Kroz četiri reprezentativna scenarija (povratno inženjerstvo, metrološku validaciju alata sa složenom

unutarnjom geometrijom, dokumentiranje arheoloških artefakata te kontrolu u hibridnim aditivno-ljevačkim procesima) identificirani su specifični mjeriteljski izazovi u realnim radnim uvjetima. Analiza ovih praktičnih primjera jasno je ukazala na tehnička ograničenja optičkih metoda te na nužnost fizičke i softverske intervencije u mjerni lanac (posebice primjene matirajućeg premaza i procesa poligonizacije). Upravo su ti prepoznati izazovi iz industrijske prakse poslužili kao izravan poticaj i postavili čvrst temelj za provedbu sustavnog eksperimentalnog dijela ovog istraživanja.

Slijedom navedenog, u eksperimentalnom dijelu istraživanja provedena je identifikacija i kvantifikacija ključnih parametara koji određuju točnost optičkih mjerenja. Mjerenja su izvedena na namjenski dizajniranom ispitnom uzorku složene geometrije, uz sustavno variranje odabranih parametara mjernog procesa kroz faktorski plan pokusa. Analiza dobivenih podataka izvršena je primjenom statističke metode analize varijance, kako bi se utvrdio i kvantificirao utjecaj pojedinih faktora na odstupanja kod niza dimenzijskih i geometrijskih značajki. Dobiveni rezultati nedvosmisleno su pokazali koji faktori dominantno utječu na točnost optičkog skeniranja. Primjerice, primjena matirajućeg premaza (odnosno metoda njegovog nanošenja) istaknula se kao statistički najznačajniji faktor koji uzrokuje varijacije u rezultatima kod većine analiziranih karakteristika. Nadalje, postupak poligonizacije (odabir razine detalja pri generiranju 3D mreže) i površinska hrapavost samog objekta također su se pokazali bitnima. S druge strane, određeni algoritamski parametri naknadne obrade, poput primijenjene metode interpolacije, pokazali su se statistički beznačajnima za iznos odstupanja kod većine značajki. Ovakav ishod upućuje na jasan zaključak da fizička priprema i karakteristike samog objekta mjerenja te osnovna obrada oblaka točaka (poligonizacija) imaju prevladavajuću ulogu u nastanku mjernih pogrešaka. Ova spoznaja ima izravnu praktičnu vrijednost jer omogućuje korisnicima optičkih skenera da se usredotoče na kritične elemente mjernog postupka – poput kontrolirane i ujednačene pripreme površine objekta te odabira odgovarajuće razine poligonizacije, kako bi u industrijskim uvjetima osigurali najveću moguću točnost i pouzdanost rezultata.

Jedan od ključnih doprinosa ovog rada jest temeljita procjena mjerne nesigurnosti optičkih 3D mjernih sustava primjenom cjelovite hibridne metodologije. Prvi, eksperimentalni pristup slijedio je normu ISO 15530-3, čime je s pomoću umjerenog referentnog artefakta izvršena izravna eksperimentalna ocjena ukupne mjerne nesigurnosti u realnim uvjetima rada. Zatim je analitičkim GUM pristupom razvijen detaljan matematički model mjerenja u koji su uključeni

svi identificirani izvori nesigurnosti. Ispravnost tog analitičkog modela zatim je uspješno numerički validirana primjenom Monte Carlo simulacije, koja je pokazala visoku razinu podudarnosti s GUM procjenama. Bayesova metoda nije samo potvrdila iznose nesigurnosti, već je pružila cjelovitu probabilističku interpretaciju rezultata kroz posteriorne razdiobe i intervale vjerodostojnosti. Visoka razina usklađenosti između ove tri metode (GUM, MCS i Bayes) pruža snažnu potvrdu pouzdanosti razvijenog modela i konačnih vrijednosti mjerne nesigurnosti.

Provedena međulaboratorijska usporedba mjerenja dodatno je osnažila zaključke istraživanja, potvrdivši visoku razinu obnovljivosti i usporedivosti optičkih 3D sustava u različitim uvjetima. Uočeno je da su upravo karakteristike s najvišom procijenjenom mjernom nesigurnosti (poput okomitosti) pokazale i najveća apsolutna odstupanja među laboratorijima, čime je uspostavljena jasna veza između teorijskog modela nesigurnosti i praktičnih performansi sustava. Uspoređujući rezultate triju neovisnih laboratorija, svaki opremljen drugim modelom optičkog skenera, s referentnim taktilnim mjerenjima, pokazalo se da su odstupanja svih ispitivanih dimenzijskih značajki unutar prihvatljivih granica. Dobiveni rezultati, potvrđeni zadovoljavajućim z-vrijednostima, ukazuju da suvremeni optički mjerni sustavi, unatoč međusobnim razlikama u tehničkim karakteristikama, mogu davati usklađene i pouzdane rezultate usporedive s klasičnim metodama. Ipak, kod najsloženijih značajki zabilježena su veća izmjerena odstupanja, no upravo je uspješna primjena faktora slaganja potvrdila kompatibilnost rezultata, dokazavši da su ta odstupanja realna i u potpunosti pokrivena razvijenim matematičkim modelom. Sveukupno gledajući, međulaboratorijska studija potvrdila je vrijednost optičkog 3D skeniranja kao vjerodostojne mjerne tehnike u industrijskom okruženju, pri čemu su istaknuta područja na kojima je potrebna daljnja pažnja i optimizacija u samom mjernom postupku.

Rezultati istraživanja imaju izravnu primjenjivost za industrijske korisnike optičkih 3D mjernih sustava. Razvijena metodologija omogućuje pouzdaniji odabir parametara skeniranja, procjenu mjerne nesigurnosti u stvarnim uvjetima mjerenja te donošenje utemeljenih odluka o prihvatljivosti rezultata mjerenja. Time se smanjuje rizik pogrešne interpretacije rezultata, osobito pri kontroli kvalitete dijelova složene geometrije.

Unatoč dokazanim prednostima razvijene metodologije, potrebno je naglasiti da se dobiveni zaključci primarno odnose na optičke 3D sustave temeljene na tehnologiji strukturiranog svjetla

te na specifične uvjete obuhvaćene ovim istraživanjem, dok njihova šira primjenjivost na druge optičke tehnologije zahtijeva dodatnu eksperimentalnu potvrdu.

Na temelju dobivenih rezultata i uočenih ograničenja mogu se predložiti smjernice za buduća istraživanja i daljnji razvoj područja optičkog 3D mjeriteljstva. Preporučuje se proširenje eksperimentalnih studija na različite vrste optičkih skenera (primjerice, laserske i fotogrametrijske sustave) te usporedba njihovih mjeriteljskih sposobnosti u istim uvjetima mjerenja, uz prilagodbu i testiranje razvijenog matematičkog modela mjerne nesigurnosti na tim tehnologijama. Razvoj naprednih algoritama za obradu podataka, potencijalno temeljenih na metodama umjetne inteligencije, predstavlja obećavajuće područje za poboljšanje filtriranja šuma i prepoznavanja značajki u oblacima točaka, što bi moglo rezultirati još preciznijim 3D modelima. Nadalje, kako se optička mjerenja sve više integriraju u automatizirane proizvodne procese, bit će važno istražiti kako takve sustave učiniti otpornima na promjene uvjeta okoline u tvornici te omogućiti procjenu kvalitete i mjerne nesigurnosti u stvarnom vremenu tijekom proizvodnje. U konačnici, daljnja standardizacija postupaka i razvoj detaljnih smjernica (primjerice, proširenje postojećih ISO normi za specifične primjene optičkih skenera) olakšali bi širu primjenu ove tehnologije u praksi. Kontinuirani rad na navedenim područjima osigurat će da optički 3D mjerni sustavi u potpunosti dosegnu svoj potencijal kao precizan, pouzdan i učinkovit alat u modernoj industriji.

LITERATURA

- [1] Guerra MG, De Chiffre L, Lavecchia F, Galantucci LM. Use of Miniature Step Gauges to Assess the Performance of 3D Optical Scanners and to Evaluate the Accuracy of a Novel Additive Manufacture Process. *Sensors*. 2020;20:738. doi. 10.3390/s20030738.
- [2] Gaska A, Śladek J, Gaska P. Challenges for Uncertainty Determination in Dimensional Metrology Put by Industry 4.0 Revolution. In: Wang L, Majstorovic VD, Mourtzis D, Carpanzano E, Moroni G, Galantucci LM, editors. *Proceedings of the 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing Cham: Springer International Publishing*; 2020., p. 92-104. doi. 10.1007/978-3-030-46212-3_6.
- [3] Xu J, Ding L, Love PED. Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing. *Automation in Construction*. 2017;76:85-96. doi. 10.1016/j.autcon.2017.01.010.
- [4] Bräuer-Burchardt C, Kühmstedt P, Notni G. Improvement of Measurement Accuracy of Optical 3D Scanners by Discrete Systematic Error Estimation. In: Barneva RP, Brimkov VE, Tavares JMRS, editors. *Combinatorial Image Analysis. Cham: Springer International Publishing*; 2018., p. 202-15. doi. 10.1007/978-3-030-05288-1_16.
- [5] Haleem A, Gupta P, Bahl S, Javaid M, Kumar L. 3D scanning of a carburetor body using COMET 3D scanner supported by COLIN 3D software: Issues and solutions. *Materials Today: Proceedings*. 2021;39:331-7. doi. 10.1016/j.matpr.2020.07.427.
- [6] Haleem A, Javaid M. 3D scanning applications in medical field: A literature-based review. *Clinical Epidemiology and Global Health*. 2019;7:199-210. doi. 10.1016/j.cegh.2018.05.006.
- [7] Galushkin AA, Gonobobleva SL, Parfenov VA, Zhuravlev AA. Application of 3D Scanning for Documentation and Creation of Physical Copies of Estampages. *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material*. 2019;40:1-14. doi. 10.1515/res-2018-0010.
- [8] Mendricky R. Aspects affecting accuracy of optical 3D digitisation. *MM Science Journal*. 2018;2018:2267-75. doi. 10.17973/mmsj.2018_03_2017106.
- [9] Palousek D, Omasta M, Koutny D, Bednar J, Koutecky T, Dokoupil F. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials*. 2015;40:1-9. doi. 10.1016/j.optmat.2014.11.020.
- [10] Sanchez-Torres M, Hernández-Capuchin I, Ramírez-Fernández C, Clemente E, Sánchez-González JLJ, López-Martínez A. Recent advances in digital fringe projection

- profilometry (2022–2025): Techniques, applications, and metrological challenges—a review. *Metrology*. 2026;6:3. doi. 10.3390/metrology6010003.
- [11] Pereira JRM, De Lima E Silva Penz I, Da Silva FP. Effects of different coating materials on three-dimensional optical scanning accuracy. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019;11:1687814019842416. doi. 10.1177/1687814019842416.
- [12] Vagovský J, Buranský I, Görög A. Evaluation of measuring capability of the optical 3D scanner. *Procedia Engineering*. 2015;100:1198-206. doi. 10.1016/j.proeng.2015.01.484.
- [13] Afteni C, Paunoiu V, Afteni M, Teodor V. Using 3D scanning in assessing the dimensional accuracy of mechanically machined parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022;1235:012071. doi. 10.1088/1757-899x/1235/1/012071.
- [14] Kumar L, Shuaib M, Tanveer Q, Kumar V, Javaid M, Haleem A. 3 D scanner integration with product development. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018;7:220. doi. 10.14419/ijet.v7i2.13.11690.
- [15] Drvar N. Usporedba metoda za određivanje oblika i deformacija mehaničkih konstrukcija [magistarski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2004.
- [16] Batra V, Kumar V. Developments in three-dimensional scanning techniques and scanners. In: *Emerging Trends in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICETMIE 2019*. Singapore: Springer Singapore; 2020., p. 59-88.
- [17] Li F, Longstaff AP, Fletcher S, Myers A. Integrated tactile and optical measuring systems in three dimensional metrology. In: *Proceedings of the Queen's Diamond Jubilee Computing and Engineering Annual Researchers' Conference*. Huddersfield: University of Huddersfield; 2012., p. 1-6.
- [18] 18. Luthuli Z. Traceability of measurements in optical coordinate measuring machines [doctoral dissertation]. Stellenbosch: Stellenbosch University; 2020.
- [19] Jadayel M, Khameneifar F. Structured-light 3D scanning performance in offline and in-process measurement of 3D printed parts. *Procedia CIRP*. 2024;126:987-92. doi. 10.1016/j.procir.2024.08.372.
- [20] Cuesta E, Suarez-Mendez JM, Martinez-Pellitero S, Barreiro J, Alvarez BJ, Zapico P. Metrological evaluation of structured light 3D scanning system with an optical feature-based gauge. *Procedia Manufacturing*. 2017;13:526-33. doi. 10.1016/j.promfg.2017.09.078.
- [21] Verykokou S, Ioannidis C. An overview on image-based and scanner-based 3D modeling technologies. *Sensors*. 2023;23:596. doi. 10.3390/s23020596.

- [22] Hu J, Liu E, Yu J. Application of structural deformation monitoring based on close-range photogrammetry technology. *Advances in Civil Engineering*. 2021;2021:6621440. doi. 10.1155/2021/6621440.
- [23] Guan B, Su Z, Yu Q, Li Z, Feng W, Yang D, et al. Monitoring the blades of a wind turbine by using videogrammetry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2022;152:106901. doi. 10.1016/j.optlaseng.2021.106901.
- [24] Schweitzer W, Fukuda H, Thali M, Bolliger S, Ebert L. Mobile forensic photogrammetry in the field: conservative approach to non-collaborative surfaces. *Forensic Imaging*. 2024;38:200597. doi. 10.1016/j.fri.2024.200597.
- [25] Zhou L, Sun G, Li Y, Li W, Su Z. Point cloud denoising review: from classical to deep learning-based approaches. *Graphical Models*. 2022;121:101140. doi. 10.1016/j.gmod.2022.101140.
- [26] Brajlilić T, Tasić T, Drstvensek I, Valenta B, Hadzisteć M, Pogacar V, et al. Possibilities of using three-dimensional optical scanning in complex geometrical inspection. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 2011;57:826-33. doi. 10.5545/sv-jme.2010.152.
- [27] Kuş A. Implementation of 3D optical scanning technology for automotive applications. *Sensors*. 2009;9:1967-79. doi. 10.3390/s90301967.
- [28] Mendricky R, Sobotka J. Accuracy comparison of the optical 3D scanner and CT scanner. *Manufacturing Technology*. 2020;20:791-801. doi. 10.21062/mft.2020.120.
- [29] Kritikos M, Urminsky J, Buransky I. Comparison of optical scanner and computed tomography scan accuracy. In: *Digitizing Production Systems: Selected Papers from the International Symposium for Production Research 2021*; Online, Turkey, 07.-09.10.2021. Cham: Springer; 2021., p. 521-30. doi. 10.1007/978-3-030-90421-0_44.
- [30] Pätöprstý B, Vozár M, Hrušecký R, Buranský I. Comparison of optical 3D scanner and coordinate measurement system from the standpoint of macro-geometry measurement. *Journal of Measurements in Engineering*. 2024;12:99-107. doi. 10.21595/jme.2023.23533.
- [31] Abdel M, Ebrahim B. 3D laser scanners: history, applications, and future. Assiut: Assiut University; 2011.
- [32] Mohaghegh K, Yazdanbakhsh SA, Tiedje NS, De Chiffre L. Step-height measurements on sand surfaces: a comparison between optical scanner and coordinate measuring machine. In: *Proceedings of euspen's 16th International Conference & Exhibition*; Nottingham, United Kingdom, 30.05.-03.06.2016. Nottingham: euspen; 2016.

- [33] Żaba K, Gracz D, Trzepieciński T, Książek M, Sitek R, Tchórz A, et al. Application of X-ray computed tomography to identify defects in lost wax ceramic moulds for precision casting of turbine blades. *Materials*. 2024;17:5088. doi. 10.3390/ma17205088.
- [34] Dewulf W, Bosse H, Carmignato S, Leach R. Advances in the metrological traceability and performance of X-ray computed tomography. *CIRP Annals*. 2022;71:693-716. doi. 10.1016/j.cirp.2022.05.001.
- [35] Li J, Wang Y, Qu L, Wang M, Lv G, Su P. Study on dynamic scanning trajectory of large aerospace parts based on 3D scanning. *Aerospace*. 2024;11:515. doi. 10.3390/aerospace11070515.
- [36] Jecić S, Drvar N. The assessment of structured light and laser scanning methods in 3D shape measurements. In: Matejiček F, editor. *Extended Abstracts and Proceedings (CD-ROM Edition) of the 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics*; Bizovac, Hrvatska, 18.10.-20.10.2003. Zagreb: Hrvatsko društvo za mehaniku (HDM); 2003.
- [37] Tutsch R. Optical three-dimensional metrology with structured illumination. *Optical Engineering*. 2011;50:101507. doi. 10.1117/1.3578448.
- [38] Drvar N. *Optički postupak digitalizacije oblika projiciranjem kodiranog svjetla [doktorski rad]*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [39] Mendricky R. Determination of measurement accuracy of optical 3D scanners. *MM Science Journal*. 2016;2016:1565-72. doi. 10.17973/mmsj.2016_12_2016183.
- [40] Piperi E, Bodi I, Doumalin P, Kaçani J. Scanning, 3D GD&T inspection for automotive plastic elements. In: *9th International Textile Conference & 3rd International Conference on Engineering and Entrepreneurship 2021 Proceedings: 9th ITC & 3rd ICEE 2021*; Tirana, Albania, 2021
- [41] Hinz L, Metzner S, Müller P, Schulte R, Besserer H-B, Wackenrohr S, et al. Fringe projection profilometry in production metrology: a multi-scale comparison in sheet-bulk metal forming. *Sensors*. 2021;21:2389. doi. 10.3390/s21072389.
- [42] Wieczorowski M, Ruciński M, Koterak R. Application of optical scanning for measurements of castings and cores. *Archives of Foundry Engineering*. 2010;10:265-8.
- [43] Guo X, Shi Z, Yu B, Zhao B, Li K, Sun Y. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor. *Precision Engineering*. 2020;61:160-9. doi. 10.1016/j.precisioneng.2019.10.013.
- [44] Kurc K, Burghardt A, Gierlak P, Szybicki D. Non-contact robotic measurement of jet engine components with 3D optical scanner and UTT method. In: *Hanus R, Mazur D,*

- Kreischer C, editors. *Methods and Techniques of Signal Processing in Physical Measurements*. MSM 2018; 17.09.2018. Cham: Springer; 2019. doi. 10.1007/978-3-030-11187-8_12.
- [45] Marciniec A, Dziubek T, Budzik G, Grzelka M. Quality control and inspection of bevel gears of the aircraft gearbox utilizing the ATOS 3D scanner. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2015;19:261-6. doi. 10.5604/12314005.1137438.
- [46] Seno T, Ohtake Y, Kikuchi Y, Saito N, Suzuki H, Nagai Y. 3D scanning based mold correction for planar and cylindrical parts in aluminum die casting. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2015;2:96-104. doi. 10.1016/j.jcde.2014.12.004.
- [47] Soodmand E, Kluess D, Varady PA, Cichon R, Schwarze M, Gehweiler D, et al. Interlaboratory comparison of femur surface reconstruction from CT data compared to reference optical 3D scan. *BioMedical Engineering OnLine*. 2018;17. doi. 10.1186/s12938-018-0461-0.
- [48] Szafer D, Taylor JS, Pei A, De Ruijter V, Hosseini H, Chao S, et al. A simplified method for three-dimensional optical imaging and measurement of patients with chest wall deformities. *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques*. 2019;29:267-71. doi. 10.1089/lap.2018.0191.
- [49] Javaid M, Haleem A, Kumar L. Current status and applications of 3D scanning in dentistry. *Clinical Epidemiology and Global Health*. 2019;7:228-33. doi. 10.1016/j.cegh.2018.07.005.
- [50] Vogel AB, Kilic F, Schmidt F, Rübel S, Lapatki BG. Optical 3D scans for orthodontic diagnostics performed on full-arch impressions: completeness of surface structure representation. *Journal of Orofacial Orthopedics*. 2015;76:493-507. doi. 10.1007/s00056-015-0309-1.
- [51] Chan DC, Chung AH, Haines J, Yau ET, Kuo CC. The accuracy of optical scanning: influence of convergence and die preparation. *Operative Dentistry*. 2011;36(5):486-91. doi. 10.2341/10-067-L.
- [52] Molina A, Martin-de-las-Heras S. Accuracy of 3D scanners in tooth mark analysis. *Journal of Forensic Sciences*. 2015;60. doi. 10.1111/1556-4029.12598.
- [53] Wachowiak MJ, Karas BV. 3D scanning and replication for museum and cultural heritage applications. *Journal of the American Institute for Conservation*. 2009;48(2):141-58. doi. 10.1179/019713609804516992.

- [54] Das AJ, Murmann DC, Cohn K, Raskar R. A method for rapid 3D scanning and replication of large paleontological specimens. *Public Library of Science ONE*. 2017;12:e0179264. doi. 10.1371/journal.pone.0179264.
- [55] Bilušić M, Runje B. Use of optical three-dimensional (3D) measuring systems in archeology. In: *Međunarodna konferencija o materijalima MTECH 2021: korozija, toplinska obrada, ispitivanje materijala i tribologija: zbornik radova*; Šibenik, Hrvatska, 06.-09.10.2021. Zagreb: Hrvatsko društvo za zaštitu materijala; 2021., p. 331-8.
- [56] Jiang Q, Feng X, Gong Y, Song L, Ran S, Cui J. Reverse modelling of natural rock joints using 3D scanning and 3D printing. *Computers and Geotechnics*. 2016;73:210-20. doi. 10.1016/j.compgeo.2015.11.020.
- [57] Jiang Q, Yang B, Yan F, Liu C, Shi Y, Li L. New method for characterizing the shear damage of natural rock joint based on 3D engraving and 3D scanning. *International Journal of Geomechanics*. 2020;20. doi. 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001575.
- [58] Montalti A, Ferretti P, Santi GM. A cost-effective approach for quality control in PLA-based material extrusion 3D printing using 3D scanning. *Journal of Industrial Information Integration*. 2024;41:100660. doi. 10.1016/j.jii.2024.100660.
- [59] Helle RH, Lemu HG. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Materials Today: Proceedings*. 2021;45:5255-62. doi. 10.1016/j.matpr.2021.01.828.
- [60] Hale L, Linley E, Kalaskar DM. A digital workflow for design and fabrication of bespoke orthoses using 3D scanning and 3D printing, a patient-based case study. *Scientific Reports*. 2020;10(1):7028.
- [61] Li L, Yu F, Shi J, Shen S, Teng H, Yang J, et al. In situ repair of bone and cartilage defects using 3D scanning and 3D printing. *Scientific Reports*. 2017;7(1):9416.
- [62] Sagbas B, Boyacı TH, Durakbasa NM. Precision metrology for additive manufacturing. In: *Durakbasa N, Gencyilmaz M, editors. Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018; Vienna, Austria, 15.08.2018*. Cham: Springer; 2019., p. 324-32. doi. 10.1007/978-3-319-92267-6_28.
- [63] Bannink T, Bouman S, Wolterink R, Van Veen R, Van Alphen M. Implementation of 3D technologies in the workflow of auricular prosthetics: a method using optical scanning and stereolithography 3D printing. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2021;125:708-13. doi. 10.1016/j.prosdent.2020.03.022.

- [64] Javaid M, Haleem A, Pratap Singh R, Suman R. Industrial perspectives of 3D scanning: features, roles and its analytical applications. *Sensors International*. 2021;2:100114. doi. 10.1016/j.sintl.2021.100114.
- [65] Tyson J, Psilopoulos J, Schwartz E, Galanulis K. Optical metrology, the key to lean manufacturing. *SAE Technical Paper Series*. 2012. doi. 10.4271/2012-01-0185.
- [66] Emmer C, Hofmann TM, Schmied T, Stjepandić J, Strietzel M. A neutral approach for interoperability in the field of 3D measurement data management. *Journal of Industrial Information Integration*. 2018;12:47-56. doi. 10.1016/j.jii.2018.01.006.
- [67] Catalucci S, Thompson A, Piano S, Branson DT, Leach R. Optical metrology for digital manufacturing: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;120:4271-90. doi. 10.1007/s00170-022-09084-5.
- [68] Guerra MG, Lavecchia F, Galantucci LM. Artefacts used for testing 3D optical-based scanners. In: Wang L, Majstorovic V, Mourtzis D, Carpanzano E, Moroni G, Galantucci L, editors. *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*; Belgrade, Serbia, 01.-04.06.2020. Cham: Springer; 2020., p. 173-89. doi. 10.1007/978-3-030-46212-3_12.
- [69] Trstenjak M, Opetuk T, Pavković D, Zorc D. Industry 4.0 in Croatia – perspective and industrial familiarity with the (new) digital concept. In: Wang L, Majstorovic V, Mourtzis D, Carpanzano E, Moroni G, Galantucci L, editors. *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*; Belgrade, Serbia, 01.-04.06.2020. Cham: Springer; 2020., p. 345-55. doi. 10.1007/978-3-030-46212-3_26.
- [70] Carmignato S, De Chiffre L, Bosse H, Leach RK, Balsamo A, Estler WT. Dimensional artefacts to achieve metrological traceability in advanced manufacturing. *CIRP Annals*. 2020;69:693-716. doi. 10.1016/j.cirp.2020.05.009.
- [71] Basile V, Modica F, Rebaioli L, Surace R, Fassi I. Process chains for micro-manufacturing: modeling and case studies. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023;7:215. doi. 10.3390/jmmp7060215.
- [72] Bilušić M, Olivari L. Assessment of process chain suitability of the optical 3D measuring system by using influencing factors for measurement uncertainty. *Journal of Industrial Information Integration*. 2024;41:100654. doi. 10.1016/j.jii.2024.100654.
- [73] Zajednički odbor za upute u mjeriteljstvu (JCGM). *Međunarodni rječnik mjeriteljstva – osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM)*. Zagreb: Državni zavod za mjeriteljstvo; 2009.

- [74] VDI/VDE 2634 Blatt 3:2008-12. Optical 3D-measuring systems – multiple view systems based on area scanning. 2008.
- [75] ISO 15530-3:2011. Geometrical product specifications (GPS) — coordinate measuring machines (CMM): technique for determining the uncertainty of measurement. 2011.
- [76] Beraldin JA, Blais F, El-Hakim SF, Cournoyer L, Picard M. Traceable 3D imaging metrology: evaluation of 3D digitizing techniques in a dedicated metrology laboratory. In: Optical 3D Measurement Techniques; Zurich, Switzerland, 2007., p. 310-8.
- [77] Acko B, McCarthy M, Haertig F, Buchmeister B. Standards for testing freeform measurement capability of optical and tactile coordinate measuring machines. *Measurement Science & Technology*. 2012;23:094013. doi. 10.1088/0957-0233/23/9/094013.
- [78] Acko B, Klobucar R. Metrological approach for testing performance of optical 3D measurements systems. In: Majstorovic VD, Durakbasa N, editors. *Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue*; Belgrade, Serbia, 04.-07.06.2019. Cham: Springer; 2019., p. 47-61. doi. 10.1007/978-3-030-18177-2_5.
- [79] Bräuer-Burchardt C, Ölsner S, Kühmstedt P, Notni G. Comparison of calibration strategies for optical 3D scanners based on structured light projection using a new evaluation methodology. In: Remondino F, Shortis MR, editors. *Proceedings of SPIE Optical Metrology: Videometrics, range imaging, and applications XIV*; Munich, Germany, 2017. Bellingham: SPIE; 2017., p. 103320F. doi. 10.1117/12.2269971.
- [80] Beraldin JA, Mackinnon D, Cournoyer L. Metrological characterization of 3D imaging systems: progress report on standards developments. In: Larquier B, editor. *17th International Congress of Metrology*; Paris, France, 21.09.2015. Paris: EDP Sciences; 2015., p. 13003. doi. 10.1051/metrology/20150013003.
- [81] GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH. ATOS Core 300 – user manual. Braunschweig: GOM GmbH; 2016.
- [82] GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH. Proprietary calibration certificate: calibration panel CP40/320, serial no. CP40/320/52958. Braunschweig: GOM mbH; 2016.
- [83] Johannes S, Csencsics E, Schitter G. Analyzing error sources and error propagation in an optical scanning 3D triangulation sensor system. In: *Proceedings of SPIE Optical Engineering + Applications: Optical system alignment, tolerancing, and verification*

- XIV; San Diego, California, United States, 2022. Bellingham: SPIE; 2022., p. 122220I. doi. 10.1117/12.2632155.
- [84] Wertjanž D, Kern T, Csencsics E, Schitter G. Residual error correction for reducing the uncertainty of a sample-tracking robotic 3D measurement system. *IFAC-PapersOnLine*. 2023;56:4418-23. doi. 10.1016/j.ifacol.2023.10.1829.
- [85] Müller AM, Hausotte T. Analysis of the random measurement error of areal 3D coordinate measurements exclusively based on measurement repetitions. *Technisches Messen*. 2021;88:71-7. doi. 10.1515/teme-2020-0087.
- [86] Valinasab B, Rukosuyev M, Lee J, Ko J, Jun MBG. Improvement of optical 3D scanner performance using atomization-based spray coating. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*. 2015;24:23-30. doi. 10.7735/ksmte.2015.24.1.023.
- [87] Kamran M, Yazdanbakhsh A, Niels ST, De Chiffre L. Traceability of optical length measurements on sand surfaces. Nottingham, UK; 2016.
- [88] Yazdanbakhsh SA, Mohaghegh K, Tiedje NS, De Chiffre L. Traceability of optical 3D scanner measurements on sand mould in the production of quality castings. *Measurement Science & Technology*. 2021;32:084004. doi. 10.1088/1361-6501/abf707.
- [89] Bošnjaković A. Utjecaj različitih pristupa procjeni standardnih nesigurnosti na ukupnu mjernu nesigurnost [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2022.
- [90] Runje B, Horvatić Novak A, Keran Z. Impact of the quality of measurement results on conformity assessment. In: Katalinić B, editor. *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*; Zadar, Croatia, 24.-27.10.2018. Vienna: DAAAM International; 2018., p. 0051-5. doi. 10.2507/29th.daaam.proceedings.007.
- [91] Horvatić Novak A. Uspostavljanje sljedivosti kod računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [92] Razumić A. Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja na području mikroskopije atomskih sila u dimenzijskom nanomjeriteljstvu [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2024.
- [93] Joint Committee for Guides in Metrology. Guide to the expression of uncertainty in measurement – part 1: introduction. Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology; 2023.

- [94] Runje B, Horvatić A, Alar V, Medić S, Bošnjaković A. Examples of measurement uncertainty evaluations in accordance with the revised GUM. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;772:012008. doi. 10.1088/1742-6596/772/1/012008.
- [95] AIE - Advanced Intelligence Engineering. ZEISS ATOS Core – optical 3D scanner. Available from: <https://aie.com.vn/en/atos-core/> [cited 2026 March 09].
- [96] Dumitrache IA, Totu AG, Dumitrache AM, Vlăduț M. Uncertainty evaluation of CMM and optical 3D scanning in centrifugal rotor inspection. *Metrology*. 2026;6:12. doi. 10.3390/metrology6010012.
- [97] International Organization for Standardization. ISO 15530: geometrical product specifications (GPS) – coordinate measuring machines (CMM): technique for determining the uncertainty of measurement. Geneva: International Organization for Standardization; 2011.
- [98] Mohaghegh K, Yazdanbakhsh S, Tiedje NS, De Chiffre L. Traceability of height measurements on green sand molds using 3D-optical scanning. In: *Proceedings of the AFS Cast Expo and Metal Casting Conference 2016*; Minneapolis, USA, 16.-19.04.2016.
- [99] Kortaberria G, Mutilba U, Gomez S, Ahmed B. Three-dimensional point cloud task-specific uncertainty assessment based on ISO 15530-3 and ISO 15530-4 technical specifications and model-based definition strategy. *Metrology*. 2022;2:394-413. doi. 10.3390/metrology2040024.
- [100] Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 101:2008: evaluation of measurement data – supplement 1 to the 'Guide to the expression of uncertainty in measurement' – propagation of distributions using a Monte Carlo method. Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology; 2008. Available from: <https://www.bipm.org/doi/10.59161/JCGM101-2008> [cited 2026 May 29].
- [101] International Organization for Standardization. ISO 13528:2023: statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. Geneva: International Organization for Standardization; 2023.

ŽIVOTOPIS

Martin Bilušić rođen je 1988. godine u Šibeniku. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja, 2005. godine, osvaja prvo mjesto na državnom natjecanju iz Tehničke mehanike. Nakon završetka Tehničke škole u Šibeniku 2007. godine, smjer Računalni tehničar u strojarstvu, upisuje studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) Sveučilišta u Splitu. Studij završava 2012. godine, čime stječe akademski naziv magistra inženjera strojarstva. Po završetku studija profesionalnu karijeru započinje u realnom sektoru kao tehnolog pripreme proizvodnje. Od 2015. godine zaposlen je u Razvojno inovacijskom centru AluTech u Šibeniku. U okviru svog rada aktivno sudjeluje u pisanju i provedbi različitih znanstveno-istraživačkih projekata, te upravlja radom konstrukcijskog ureda s primarnim fokusom na 3D skeniranje, 3D ispis i povratno inženjerstvo. Voditelj je laboratorija za mehanička ispitivanja metala, koji je akreditiran prema zahtjevima međunarodne norme HRN EN ISO/IEC 17025, pri čemu upravlja cjelokupnim sustavom osiguravanja kvalitete laboratorija. Poslijediplomski doktorski studij upisao je 2015. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, smjer Znanstveno mjeriteljstvo u strojarstvu. Godine 2019. osniva startup tvrtku, a 2021. godine završava program Algebra startup inkubatora. Društveno je aktivan kao predsjednik udruge Znanstveni horizonti te kao potpredsjednik Društva inovatora „Faust Vrančić“ Šibenik. Autor je i koautor više znanstvenih radova te je izlagao na znanstvenim konferencijama. Aktivno se služi računalnim softverima za 3D modeliranje i dizajn te engleskim jezikom u usmenom i pismenom izražavanju.

BIOGRAPHY

Martin Bilušić was born in 1988 in Šibenik. During his high school education, in 2005, he won first place at the national competition in Technical Mechanics. After graduating from the Technical School in Šibenik in 2007, majoring as a Computer Technician in Mechanical Engineering, he enrolled in the mechanical engineering program at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture (FESB), University of Split. He completed his studies in 2012, earning the academic title of Master of Science in Mechanical Engineering. Upon graduation, he began his professional career in the private sector as a production preparation technologist. Since 2015, he has been employed at the Development and Innovation Center AluTech in Šibenik. As part of his work, he actively participates in writing and implementing various scientific research projects and managing the design office with a primary focus on 3D scanning, 3D printing, and reverse engineering. He is the head of the laboratory for mechanical testing of metals, which is accredited according to the requirements of the international standard HRN EN ISO/IEC 17025, where he manages the entire quality assurance system of the laboratory. In 2015, he enrolled in the postgraduate doctoral program at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, specializing in Scientific Metrology in Mechanical Engineering. In 2019, he founded a startup company, and in 2021, he completed the Algebra startup incubator program. He is socially active as the president of the "Znanstveni horizonti" association and as the vice president of the Innovators Society "Faust Vrančić" Šibenik. He is the author and co-author of several scientific papers and has presented at scientific conferences. He actively uses 3D modeling and design software and is proficient in English, both in speaking and writing.