

PRIMERJAVA NAPREDNIH 3D-TEHNOLOGIJ ZA SKENIRANJE PRI NADZORU KVALITETE INDUSTRIJSKIH IZDELKOV

Jakob Fabjan, Adela Pišmo, Vesna Pungerčar, Slavko Arh

Izvleček:

3D-skeniranje je nekontaktna tehnologija, s katero lahko fizični objekt pretvorimo v digitalni model, kar industriji omogoča obratni inženiring in nadzor kakovosti (preverjanje skladnosti s predpisi). Vendar imajo te napredne tehnike določene omejitve: če ima na primer predmet izvrtine ali če so poškodbe skrite v notranjosti, jih s temi metodami ne moremo zaznati. Takšne informacije pa so ključnega pomena za napovedovanje trajnosti materiala in odkrivanje skritih napak (razpoke, vključki, nehomogenost materiala). Zato se naša raziskava osredotoča na primerjavo treh različnih tehnik za zajem tridimenzionalnih podatkov industrijskega izdelka iz aluminija: 3D-skeniranje s strukturirano svetlobo, 3D-skeniranje z lasersko svetlobo in skeniranje z uporabo računalniške tomografije (CT). Cilj je bil primerjati posamezne tehnike glede na natančnost izdelave v primerjavi s CAD-modelom in glede na količino in kakovost informacij, ki jih posamezna tehnika omogoča. Pri tem smo upoštevali, ali tehnika omogoča analizo zunanjih geometrijskih lastnosti materialov in drugih pomembnih značilnosti. Rezultati raziskave kažejo, da je kombinacija 3D-skeniranja skupaj s CT-analizo smiselna za preverjanje visoke kakovosti in boljše napovedi življenjske dobe industrijskega izdelka.

Ključne besede:

3D-skeniranje s strukturirano svetlobo, 3D-skeniranje z lasersko svetlobo, CT-skeniranje, kontrola kvalitete

1 Uvod

Eden izmed pomembnih ciljev industrijske proizvodnje je nadzor kakovosti. Kot navaja avtor Mitra v svoji monografiji [1], je kontrola kakovosti definirana kot: »Sistem, ki vzdržuje želeno raven kakovosti s preverjanjem povratnih informacij o izdelku/storitvi in implementaciji popravilnih aktivnosti ...«. Ena od povratnih informacij o industrijski proizvodnji je dimenzija njenega končnega izdelka. To pomeni, da morajo biti dimenzije izdelkov med procesom kontrole izmerjene z različnimi merilnimi napravami.

Pogosto se uporablja koordinatni merilni sistem (CMM), pri katerem merilna konica določi položaj z dotikom merjenega izdelka, potem ko se premakne

iz vnaprej določenega položaja po natančno predpisani poti. Najbolj točni CMM dosega točnost tudi pod 1 μm [2]. Ključne slabosti CMM so, da so izmerjeni le položaji določenih točk, tako da meritev ne zajema oblike preostale površine. Za vsako obliko izdelka je potrebno pripraviti nov program merjenja. Mehki merjenci (pene, gume, ...) se ob dotiku deformirajo, kar povzroči popačenje meritve. Izvajanje meritev s CMM je počasno v primerjavi z brezkontaktnim merjenjem, kjer lahko npr. s 3D-skenerjem zajamemo tudi več milijonov točk na sekundo. CMM so nepremični, zato je potrebno izdelek dostaviti do naprave.

Kot alternativa CMM se uporabljajo optični 3D-skenerji. Za merjenje izdelkov, manjših od 10 m, se uporabljata dva tipa optičnih skenerjev, in sicer 3D-skener s strukturirano svetlobo in 3D-skener z laserskimi žarki.

3D-skenerji s strukturirano svetlobo na izdelek projicirajo različne progaste svetlobne vzorce. Ti se zaradi različnih oddaljenosti točk na merjencu od skenerja popačijo. Kamere to popačitev zajamejo na slike. Na podlagi več slik (pri vsaki se projicira drugačen vzorec) se lahko določi, kje v prostoru se nahaja posamezna točka na izdelku. Iz vsakega zor-

Jakob Fabjan, Adela Pišmo, mag., doc. dr. Vesna Pungerčar, univ. dipl. inž., dr. Slavko Arh, univ. dipl. inž., vsi Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto



© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-6.16>

nega kota se mora tako zajeti več slik. Pri tem pa se zajamejo vrednosti vseh delov predmeta, ki so znotraj merskega območja. Glavne pomanjkljivosti 3D-skenerjev s strukturirano svetlobo so njihova občutljivost na barvo in odbojnost površine izdelka ter občutljivost na svetlobo iz okolice. Kot rešitev prve pomanjkljivosti se pogosto uporablja posebno razpršilo za 3D-skeniranje, ki prekrije površino izdelka s tanko plastjo belega prahu.

3D-skenerji z laserskimi žarki delujejo na principu triangulacije. Na podlagi poznavanja kota in razdalje med laserskim virom in kamero ter položaja laserske linije na sliki je mogoče določiti prostorski položaj točk na površini izdelka.

Rentgenska računalniška tomografija (CT) se je uveljavila kot ključna nekontaktna, nedestruktivna metoda v industrijskem meroslovju in medicinski diagnostiki, saj omogoča zajem podrobne notranje in zunanje geometrije kompleksnih objektov [3]. Prehod CT-tehnologije iz tradicionalnih radioloških aplikacij v visoko natančno dimenzijsko meroslovje omogoča njena sposobnost vizualizacije notranjih struktur, ki so nedostopne za taktilne ali optične merilne sisteme [4]. CMM merilni sistemi, ki še vedno veljajo za zlati standard pri merjenju zunanjih dimenzij, se pogosto izkažejo kot neustrezni pri ocenjevanju notranjih struktur [3]. V primerjavi s konvencionalnimi merilnimi sistemi ima CT številne prednosti, zlasti pri merjenju delov z visoko površinsko hrupostjo ali prisotnostjo votlin ter kompleksnih notranjih struktur [5]. Kljub temu delovanje CT-sistemov še vedno omejujejo različni dejavniki, kot so velikost vokslov (volumetrična enota v 3D-prostoru), artefakti zaradi utrjevanja spektra rentgenskega žarka (ang. beam hardening) ter negotovosti, povezane z algoritmi za določanje površin [6].

Inovativni pristopi danes vključujejo metode globokega učenja za avtomatizirano zaznavanje napak v CT volumskih podatkih. Takšni pristopi izkazujejo visoko odpornost na artefakte, kar odpira možnosti za avtomatizirane in linijsko integrirane CT-sisteme za nadzor kakovosti. [5]

Pomembno je poudariti, da industrijska uporaba CT-tehnologije ni omejena le na kovinske komponente. V gradbeništvu se je CT pokazal kot primerno orodje pri analizi povezanosti in porazdelitve por v poroznem asfaltu. Takšna analiza omogoča razvrščanje zračnih por v koristne in škodljive, kar neposredno vpliva na vodoprepustnost vozišča in njegovo konstrukcijsko stabilnost [7]. Ta široka uporabnost potrjuje vse večjo vlogo CT-skeniranja pri karakterizaciji materialov v različnih inženirskih panogah.

Izbira med CT-, 3D-skeniranjem in koordinatnimi merilnimi sistemi (CMM) je v veliki meri odvisna od zahtev po kakovosti meritev, točnosti in ekonomičnosti. Nižja ločljivost CT-skenerja pri zaznavanju površinske teksture in občutljivost na materialne lastnosti zahtevata dopolnjevanje z drugimi meril-

nimi metodami, kar omogoča bolj zanesljivo validacijo rezultatov [8].

3D- in CT-skeniranje danes predstavljata tehnologiji natančnega merjenja, saj sta prilagojeni izzivom sodobne proizvodnje in karakterizacije materialov. Z napredkom računalniških metod in razvojem standardov bo vloga teh tehnologij v procesih zagotavljanja kakovosti vse bolj ključna.

2 Metodologija

Naša raziskava se osredotoča na primerjavo treh različnih tehnik za zajem tridimenzionalnih podatkov industrijskega izdelka iz aluminija: 3D-skeniranje s strukturirano svetlobo, 3D-skeniranje z lasersko svetlobo in skeniranje z uporabo računalniške tomografije (CT). Cilj je bil primerjati posamezne tehnike glede na natančnost izdelave v primerjavi s 3D CAD-modelom ter glede na količino in kakovost informacij, ki jih posamezna tehnika omogoča.

Izbrani testni predmet je izdelan iz aluminija in je sestavljen iz dveh valjastih delov. Spodnji del je širši ($\Phi 60$ mm) in nižji (8 mm), v njem pa sta dve nasproti ležeči izvrtini. Zgornji del je ožji ($\Phi 32,8$ mm) in višji (32,9 mm) ter vsebuje natančno obdelane utore in odprtine. Njegova geometrijska oblika je zaradi izvrtin kompleksna, kar omogoča primerjavo med različnimi metodami skeniranja.

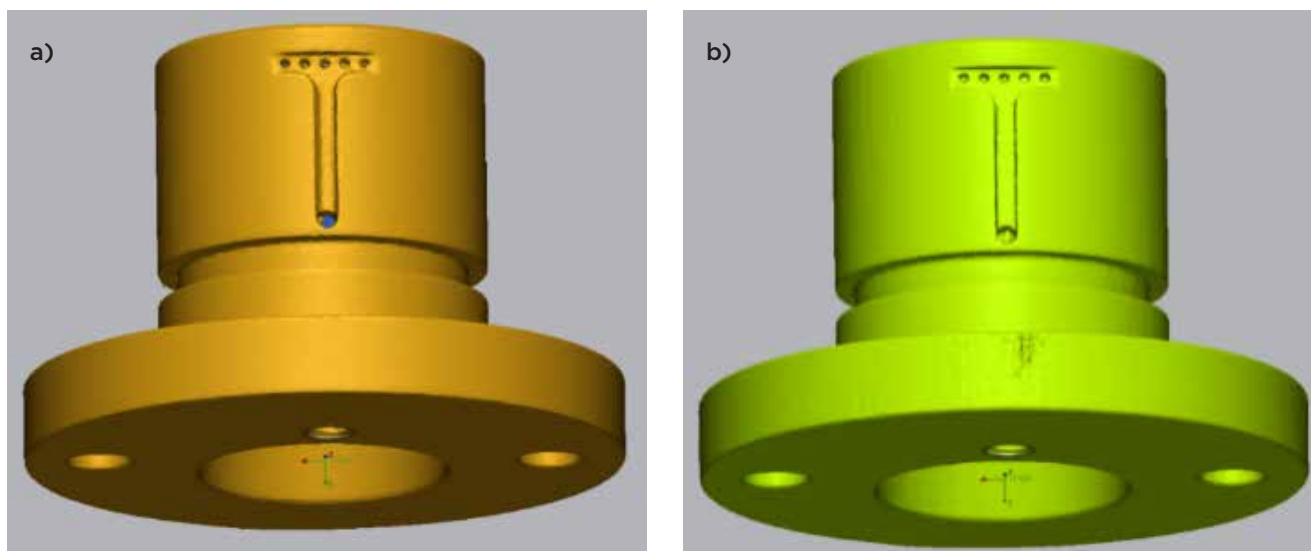
2.1 3D laserski skener

Za merjenje z laserskim skenerjem smo uporabili 3D-skener kanadskega podjetja CREAFORM, Me-traSCAN BLACK+™|Elite (točnost 25 μ m) in programsko opremo VXEelements 11. Pri skeniranju smo nastavili ločljivost 0,2 mm ter čas zaslonke 0,78 ms. Skeniranje smo izvedli v dveh delih. Najprej smo poskenirali izdelek z zgornje strani, nato smo ga obrnili za 180° in ga poskenirali še s spodnje strani. Oba skena smo nato umestili v skupni koordinatni sistem in ju združili v programu za zajem podatkov. Kot rezultat skeniranja smo iz programa izvozili mrežo v obliki stl datoteke (*slika 1a*).

2.2 3D-skener s strukturirano svetlobo

Pri skeniranju s strukturirano svetlobo smo uporabili skener južnokorejskega podjetja VYLO vrste RAPTOR 3D-X in programsko opremo za zajem podatkov 3D-XPartner. Pri skeniranju smo nastavili najnižjo možno resolucijo skeniranja (0,09 mm). Pred skeniranjem smo izdelek prekrili s skenirnim razpršilom, saj je njegova površina za skener s strukturirano svetlobo preveč odbojna. Ravno tako kot pri laserskem skeniranju smo skeniranje izvedli v dveh korakih.

Na *sliki 1b* je prikazan 3D-model po skeniranju s 3D-skenerjem s strukturirano svetlobo.



Slika 1 : Rezultat skeniranja s (a) 3D laserskim skenerjem in (b) 3D-skenerjem s strukturirano svetlobo

2.3 Računalniška tomografija (CT)

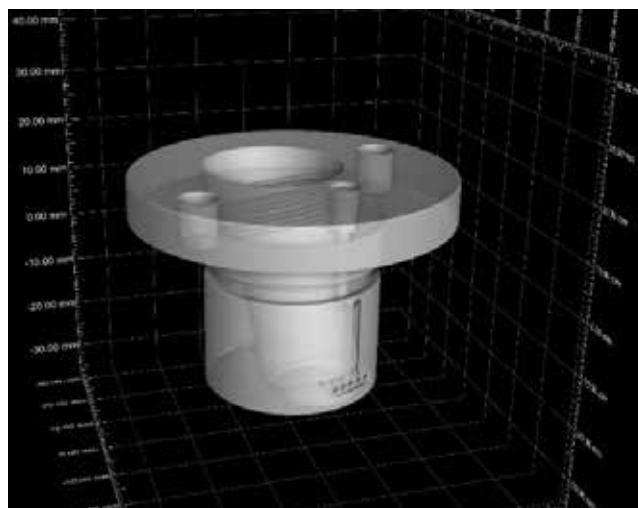
Za potrebe računalniške tomografije je bila uporabljena naprava Nikon Metrology XT V 160 (Belgija), za rekonstrukcije slik pa programska oprema CT Pro3D- (Nikon Metrology). Za nadaljnjo analizo podatkov in vizualizacijo je bil uporabljen VGSTUDIO MAX (Volume Graphics, Nemčija). Na *sliki 2* je prikazana namestitev vzorca v napravo med skeniranjem.



Slika 2 : Položaj vzorca v CT-skenerju

Testni predmet je med zajemanjem podatkov rotiral okoli horizontalne osi za 360°. Za vsako stopinjo rotacije so bile posnete štiri rentgenske slike. To je omogočilo izboljšano ostrino in povečano ločljivost skenirane slike. Parametri skeniranja – vključno z napetostjo (160 kV), tokom (69 μ A), povečavo (1.581), številom slik (5000) ter časom osvetlitve (354 ms / 2,82 fps) – so bili izbrani glede na fizikalne lastnosti materiala in kompleksnost oblike z namenom pridobiti čim bolj kakovostne prikaze notranjih struktur. Za doseg optimalne vizualizacije manjših detajlov je bila povečava prilagojena velikosti testnega predmeta, ustrezen čas osvetlitve pa je omogočil zmanjšanje šuma in izboljšanje kakovosti slike.

Za generiranje rentgenskih žarkov je bila uporabljena volframova tarča, medtem ko je 0,5-milimetrski bakreni filter služil kot sredstvo za izločanje nizkoenergijskih žarkov, ki bi zmanjšali kakovost posnetkov.



Slika 3 : Vizualni prikaz CT skeniranega modela

Slikovni podatki, pridobljeni z rentgenskim slikanjem, so bili združeni v 3D-model z uporabo programa CT Pro3D-. Določanje površin je potekalo v VGSTUDIO MAX, pri čemer je bila uporabljena napredna nastavitvev, ki temelji na sivinskih vrednostih posameznih vokslov. Pravilna opredelitev površine je bistvenega pomena za kasnejše meritve in primerjave. Vizualni prikaz končnega 3D-modela je prikazan na *sliki 3*.

Za primerjavo CAD-modela s CT skeniranim modelom je bil uporabljen modul Nominal/Actual Comparison v programu VGSTUDIO MAX.

3 Analiza rezultatov

Analizo rezultatov meritev zunanjih površin smo izvedli v programu Geomagic Control X 2023. 3. 0. Tu smo najprej izvedli okvirno (funkcija Initial Alignment) in nato še detajlno (funkcija Best Fit Alignment) poravnavo med CAD-modelom in izmerjenimi mrežami. Nato smo uporabili funkcijo, ki primerja odstopanje med izmerjenimi mrežami in CAD-modelom.

V *tabeli 1* so prikazane kvantitativne vrednosti odstopanj med izmerjenimi površinami in referenč-

nim CAD-modelom za vse tri uporabljene metode skeniranja. Ti podatki vključujejo minimalno in maksimalno odstopanje, povprečno vrednost, koren srednje kvadratne vrednosti (RMS) ter standardni odklon, kar omogoča celovito oceno natančnosti posamezne metode pri zajemu geometrije.

Treba pa je upoštevati, da je RAPTOR 3D-X bolj specializiran za skeniranje izdelkov tega velikostnega razreda (mersko območje do 300 mm), medtem ko lahko z MetraSCAN BLACK+™|Elite skeniramo tudi kose velikosti več metrov.

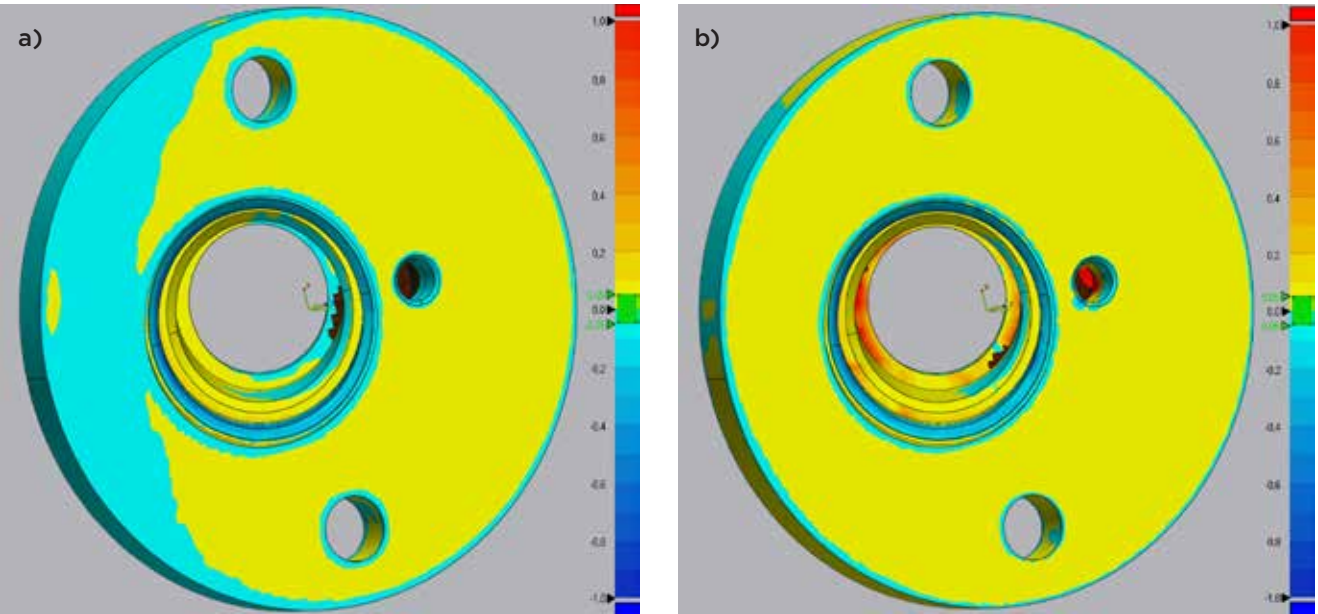
S *slike 4a* in *slike 4b* pa je razvidno, da imata oba optična skenerja težavo pri zajemanju sten globokih in ozkih izvrtin. Na skrajnih legah takih izvrtin, kjer skenerja še lahko zaznata točke, pride do največjih odstopanj (min. in max. v *tabeli 1*). Stene globokih ozkih izvrtin lahko tako zazna le CT-skener.

Na *slikah 4* in *5* bolj rdeče barve predstavljajo točke, katerih meritev je nad površino modela izdelka, bolj modre barve pa točke, katerih meritev je pod površino modela izdelka.

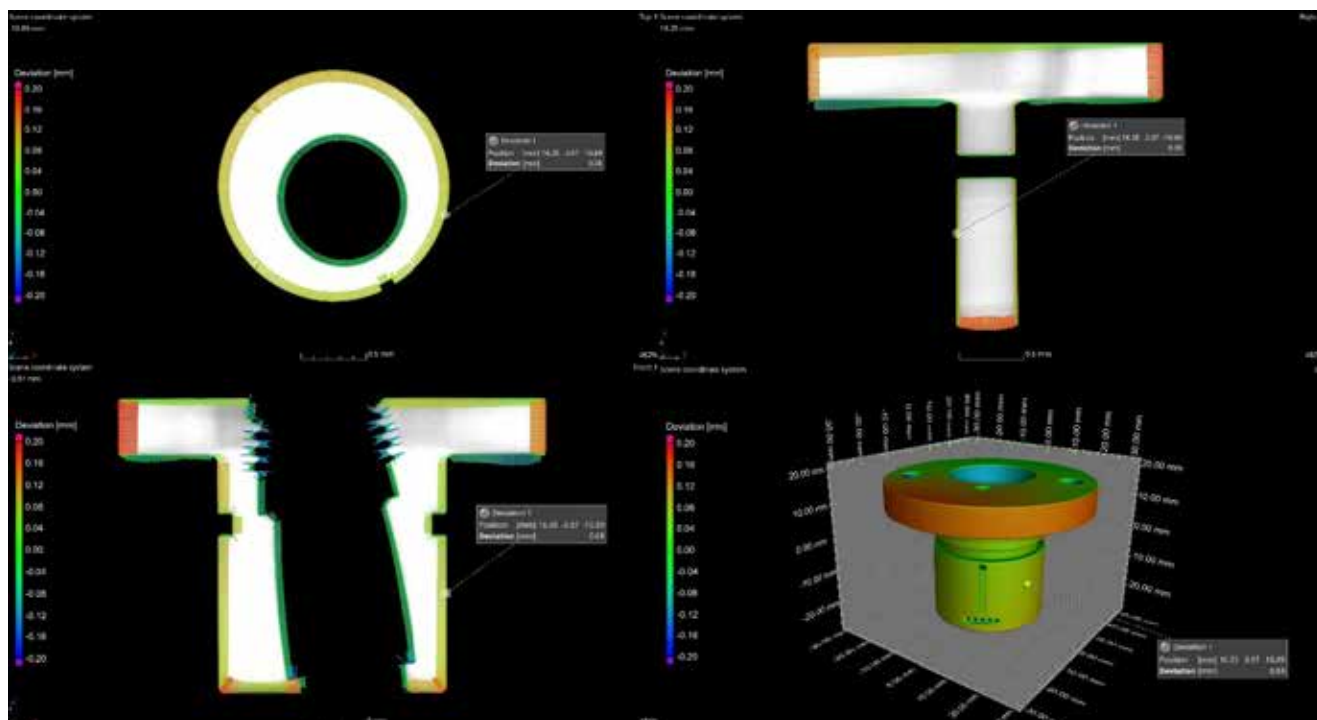
Na *sliki 5* so prikazani rezultati analize CT-skeniranja, pri čemer je prikazano tudi odstopanje za eno izmed toleriranih mer. V tem primeru je bila dopustna toleranca ±0,1 mm (cilinder spodaj), izmerjeno

Tabela 1 : Odstopanja površinskih meritev v mm

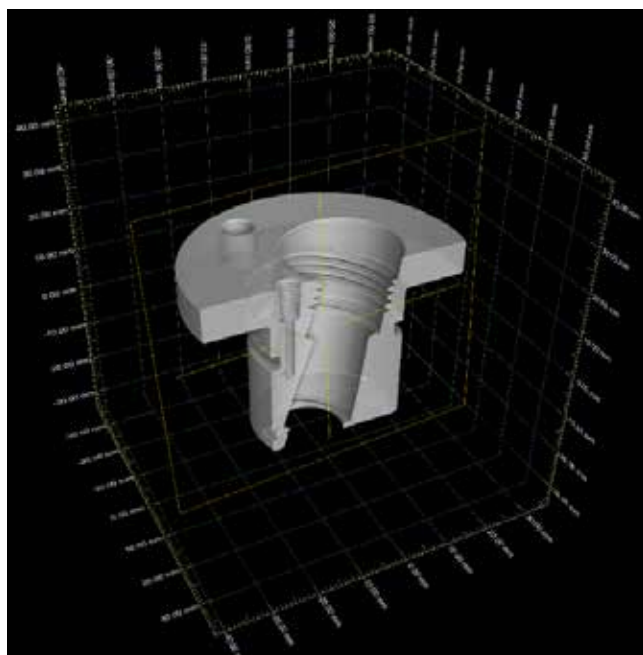
	Min.	Max.	Avg.	RMS	Std. Dev.
CT-skener	-0,6886	0,6872	0,0149	0,1095	0,1291
Strukturirana svetloba	-0,9622	0,9595	0,0036	0,0817	0,0816
Laserski skener	-1,6504	1,6523	0,0012	0,1765	0,1765



Slika 4 : Prikaz odstopanj pri: (a) strukturirani svetlobi, (b) laserskem



Slika 5 : Prikaz odstopanj, zaznanih pri CT-skeniranju



Slika 6 : Prikaz notranje geometrije izdelka (CT)

odstopanje pa je znašalo 0,08 mm, kar pomeni, da vrednost ostaja znotraj dovoljenega območja. Poleg zunanjih značilnosti so s CT-skeniranjem vidne tudi notranje strukture izdelka, kar je prikazano na sliki 6. Ta sposobnost natančne vizualizacije notranjih komponent je ključna prednost CT-tehnologije v primerjavi z optičnimi metodami, še posebej pri nadzoru kakovosti izdelkov z notranjimi votlinami ali kompleksnimi funkcionalnimi elementi. Če se

osredotočimo na spodnji del izdelka, natančneje na spodnji cilindar, je razvidno, da CT-skener izkazuje večja odstopanja v primerjavi s 3D-skenerjema. Glavni razlog za to so artefakti, ki nastajajo pri CT-skeniranju v območjih z večjo debelino materiala. Povečana absorpcija rentgenskih žarkov na debelejših delih vpliva na kakovost rekonstrukcije, kar vodi do manjše natančnosti v teh regijah. Kljub temu pa so izmerjena odstopanja še vedno v okviru dopustnih toleranc, kar potrjuje, da je metoda zanesljiva tudi pri kompleksnejših geometrijah.

4 Sklep

Primerjalna analiza treh naprednih metod – 3D laserskega skenerja, 3D-skenerja s strukturirano svetlobo in računalniške tomografije (CT) – je pokazala, da ima vsaka tehnologija svoje prednosti in omejitve, ki jih je treba upoštevati glede na specifične izdelke in merilnega namena.

3D-skener s strukturirano svetlobo je najbolj natančen pri zajemu zunanje geometrije manjših komponent, kar potrjujeta nizka RMS-vrednost in zelo dobra skladnost s CAD-modelom. 3D laserski skener kljub nekoliko višjim odstopanjem ponuja večjo prilagodljivost glede velikosti merjencev in hitrost zajema.

CT-skeniranje statistično ne dosega enake površinske natančnosti kot optični sistemi, vendar ga odlikuje sposobnost celostnega zajema notranjih struktur, kar je ključnega pomena pri analizi komponent

z notranjimi votlinami, izvrtinami ali potencialnimi defekti.

Optimalna izbira tehnologije 3D-skeniranja ni univerzalna, temveč mora temeljiti na konkretnih zahtevah aplikacije – vrsti izdelka, zahtevani natančnosti, dostopnosti površin ter potrebi po notranji analizi. Kombinacija CT in optičnih metod se tako izkaže kot učinkovit pristop za celostni nadzor kakovosti industrijskih komponent.

Viri

- [1] Mitra, A.: Fundamentals of Quality Control and Improvement, John Wiley & Sons, 2016.
- [2] Tehnične specifikacije proizvajalca, (<https://www.zeiss.co.in/metrology/systems/cmms/bridge-type-cmms/xenos.html>).
- [3] Villarraga-Gómez, H., Lee, C., Smith, S.T.: Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures, Precision Engineering 51(2018)3, str. 291-307.
- [4] Dach, E., Bergauer, B., Seidel, A., von Wilmsky, C., Adler, W., Lell, M., Wichmann, M., Matta, R.-E.: Impact of voxel size and scan time on the accuracy of three-dimensional radiological imaging data from cone-beam computed tomography, Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery 46(2018)12, str. 2190-2196.
- [5] Fuchs, P., Kröger, T., Garbe, C. S.: Defect detection in CT scans of cast aluminum parts: A machine vision perspective, Neurocomputing 453(2021)1, str. 85-96.
- [6] Liu, W., Chen, X., Zeng, W., Sun, W., Gorman, D., Wilson, A., Qi, Q., Scott, P., Jiang, X., Lou, S.: Comparison of X-ray computed tomography and coordinate-measuring system dimensional measurement for additive manufacturing parts using physical and simulation methods, Measurement 229(2024)1
- [7] Zhao, Y., Wang, X., Jiang, J., Zhou, L.: Characterization of interconnectivity, size distribution and uniformity of air voids in porous asphalt concrete using X-ray CT scanning images, Construction and Building Materials 213(2019)1, str. 182-193.
- [8] Gapinski, B., Wieczorowski, M., Marciniak-Podsadna, L., Dybała, B., Ziółkowski, G.: Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D-, Procedia Engineering 69(2014)1, str. 255-262.

Comparison of advanced 3d scanning technologies for quality control

Abstract:

3D scanning is a non-contact technology that can convert a physical object into a digital model, enabling the industry to perform reverse engineering and quality control (checking compliance with regulations). Advanced technologies such as 3D scanning are often used in quality control. However, these advanced techniques have certain limitations: for example, if an object has holes or if there is hidden damage inside, these methods cannot detect them. Such information is crucial for predicting the durability of a material and detecting hidden defects (cracks, presence of inclusions, material inhomogeneity). Therefore, our research focuses on comparing three different techniques for capturing three-dimensional data of an industrial aluminum product: 3D structured light scanning, 3D laser light scanning and scanning using computed tomography (CT). The aim was to compare individual techniques in terms of manufacturing accuracy compared to a CAD model and in terms of the amount and quality of information that each technique provides. In doing so, we considered whether the technique allows for the analysis of external geometric properties of materials and other important characteristics. The results of the research show that the combination of 3D scanning together with CT analysis makes sense for high-quality verification and better prediction of the service life of an industrial product.

Keywords:

3D scanning with structured light, 3D scanning with laser light, CT scanning, quality control

Zahvala

Raziskavo je sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) preko letnega delovnega programa Rudolfovega.