

Primeri nadzora oblike izdelkov na osnovi 3D-laserske profilometrije

Drago BRAČUN, Matija JEZERŠEK, Janez DIACI

Povzetek: S sistemi, ki delujejo na osnovi laserske profilometrije, je mogoče hitro in natančno zajeti tridimenzionalno (3D) obliko kompleksnih površin. Zajeto množico izmerjenih točk (»oblak točk«) neke površine je v nekaterih praktičnih aplikacijah potrebno analizirati in iz nje izločiti tiste geometrijske značilke, ki so pomembne z vidika presoje kakovosti testiranega izdelka. Te lahko potem predstavljajo osnovo za odločanje o tem, ali je kakovost preiskovanega izdelka ustrezna ali ne. Članek predstavlja tri primere razvoja sistemov za merjenje 3D-oblike izdelkov in algoritmov analize oblakov točk, pri katerih je bil ključni cilj ekstrakcija podatkov, uporabnih za nadzor kakovosti izdelkov. Poudarek je bil na možnosti uporabe za avtomatizirani nadzor kakovosti. Predstavljeni bodo primeri s področja varjenja, izdelave gumenotehničnih izdelkov in livarstva.

Ključne besede: laserska profilometrija, meritev, oblika izdelka, kontrola kvalitete,

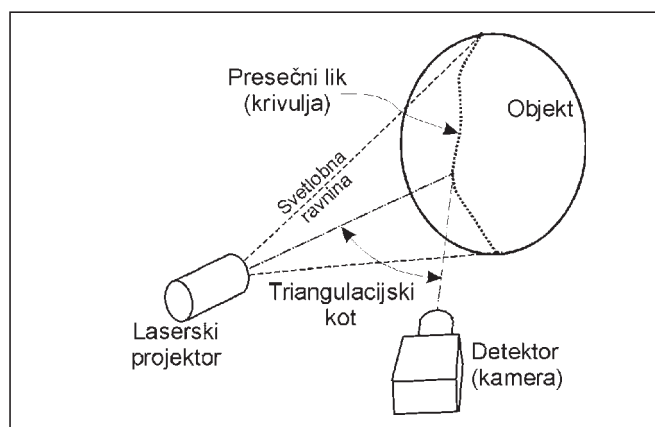
■ 1 Uvod

Pri nadzoru oblike izdelkov se v industrijski praksi pogosto uporabljajo vizualne in ročne metode [1]. Na koncu izdelovalnega postopka posebej usposobljeno osebje preveri določene predpisane mere izdelka in/ali stanje njegove površine ter izloči takšne, ki izkazujejo napake. Takšen pristop ni povsem idealen: potrebno je izurjeno osebje in dodatno delo, kar povzroča dodatne stroške, zanesljivost odkrivanja in izločanja neustreznih izdelkov pa ni 100-odstotna.

Članek predstavlja tri primere, ki kažejo, da lahko laserske merilne naprave na osnovi optične triangulacije predstavljajo ustrezno alternativo »vizualnim« in »ročnim« metodam.

Princip teh naprav lahko pojasnimo s pomočjo *slike 1*. Merjenec osvetlimo z laserskim žarkom, oblikovanim v

Dr. Drago Bračun, univ. dipl. inž.,
dr. Matija Jezeršek, univ. dipl.
inž., izr. prof. dr. Janez Diaci,
univ. dipl. inž., vsi Univerza v
Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1. Princip merjenja 3D-oblik z metodo laserske triangulacije

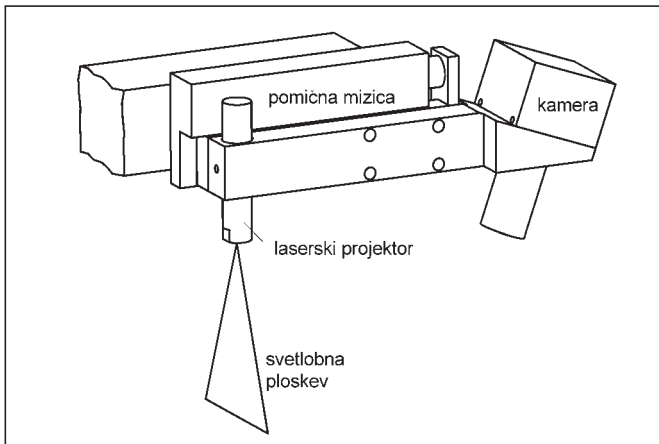
tanko svetlobno ravnino. Sliko osvetljene površine zajamemo s kamero, nameščeno pod (triangulacijskim) kotom glede na smer osvetljevanja. Na tako posneti sliki je viden svetlobni vzorec – tanek svetlobni profil. Z računalniško obdelavo zajete slike iz svetlobnega profila določimo profil površine. Za določitev 3D-oblike površine premikamo merjenec glede na svetlobno ravnino (ali obratno) z ustreznim računalniško krmiljenim pozicionirnim sistemom in med tem zajamemo množico profilov, ki jih nato pretvorimo v 3D-model površine [2].

Napravo torej v osnovi tvorijo laserski projektor svetlobne ploskve, videokamera z dovolj visoko ločljivostjo, natančen pozicionirni sistem in računalnik. Ključne razlike med posameznimi udejanjenji tega principa so predvsem v izbiri optične preslikave, ki ustreza

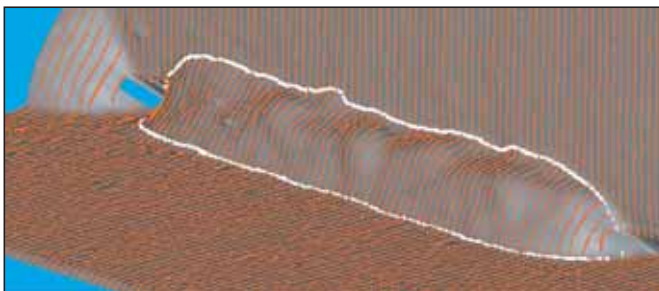
obliki in velikosti izdelka, ter v algoritmični obdelavi zajetih profilov oz. 3D-modelov. Ti nam omogočijo, da iz množice zajetih točk (»oblak točk«) izluščimo podatke (npr. predpisane mere), ki služijo za odločanje o tem, ali je izdelek ustrezen ali ne. Kot kažejo spodnji primeri, je na osnovi teh podatkov mogoče razviti tudi algoritme, ki omogočajo avtomatizirano odločanje o tem, ali je nek izdelek ustrezen ali ne.

■ 2 Nadzor talilnih zvarov

Laserski sistem za nadzor talilnih zvarov prikazuje *slika 2*. Merilni del



Slika 2. Laserski profilomer za nadzor talilnih zvarov



Slika 3. Povečana slika 3D-izmerkov zvara z vrisanimi izmerjenimi profili (temne črte)

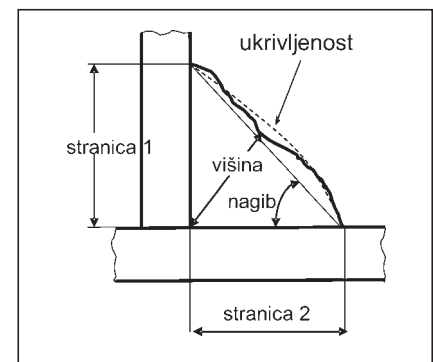
– sklop kamere in laserskega projektorja – je pritrjen na pomirno mizico, ki opravi t. i. »skeniranje« vzdolž zvara ter s tem izmero celotne površine zvara z okolico [3]. Slika 3 prikazuje primer izmerjenega kotnega zvara. Poleg same 3D-površine so na sliki vrisani tudi izmerjeni profili (sive konture) ter detektirana meja med zvarom in okoliško površino (bela kontura).

Merilnik izmeri do 80 profilov na sekundo z natančnostjo 0,1 mm. Razmak med dvema profiloma je nastavljiv v odvisnosti od hitrosti premikanja pomirne mizice in v danem primeru znaša 0,5 mm. Merilno območje profilomera je 80 × 80 × 55 mm (širina × višina × hod mizice). Sistem v realnem času ugotavlja parametre preseka zvara, kot so višina kotnega zvara, dolžini stranic 1 in 2 ter nagib in ukrivljenost (konkavnost/konveksnost) temena zvara (slika 4) [3]. Da izmeri te dimenzije, pa je kot osnova potrebna že omenjena določitev meje med površino zvara in okolico.

Postopki za določitev robu zvara so trije in se uporabljajo glede na dane možnosti. Prva možnost je primerjava 3D-meritve istega objekta pred zvarjenjem in po njem. Pri tem se najprej obe meritvi medsebojno poravnata, zvar pa je na tistem območju, kjer je razlika višin obeh površin večja od neke minimalne vrednosti. Pri drugem postopku je namesto izmerjene površine pred zvarjenjem uporabljena površina CAD-mo-

dela. Ves preostali postopek je enak prvemu. Kadar pa nimamo na voljo prvih dveh možnosti, se uporablja ekstrapolacija okoliške površine pod zvarom. Na tak način dobljena površina se zopet uporabi kot referenca za iskanje meje med zvarom in okolico.

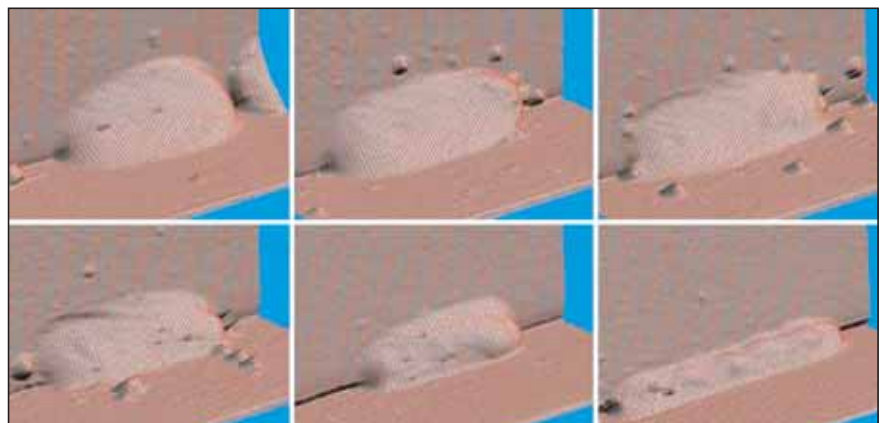
Kot primer uporabe sistema so na slikah 5 in 6 prikazane fotografije ter tridimenzionalne meritve nekaterih zvarov. Z zgornjih slik je razvidna visoka ločljivost merjenja. Poleg



Slika 4. Skica prereza zvara z oznakami geometrijskih značilk



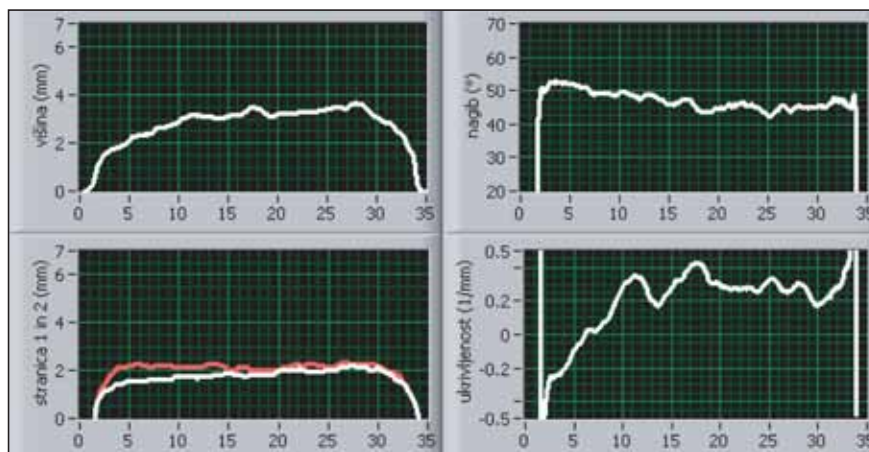
Slika 5. Fotografije talilnih zvarov, izdelanih v različnih režimih



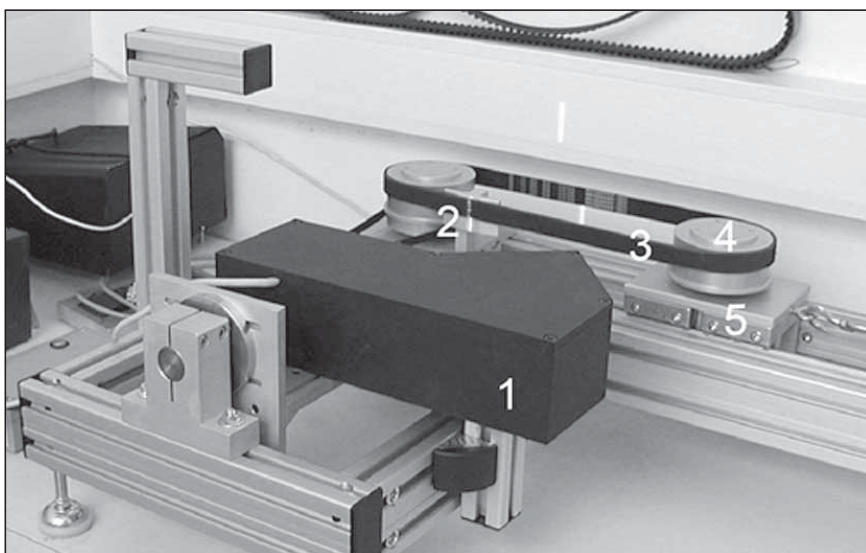
Slika 6. Računalniško generirane slike 3D-izmerkov zvarov s slike 3

samega zvara se namreč lepo vidijo tudi kapljice, ki so posledica izbrizgov taline. Tako je razvidno, da je sistem možno uporabiti tudi za nadzor izbrizgov oziroma kontrole poškodovanosti okoliške površine [4].

Slika 6 prikazuje dimenzije geometrijskih značilk (glej sliko 4) vzdolž zvara, ki je prikazan na sliki 3. Z diagramov na sliki 7 je razvidno, da presek zvara (višina in obe stranici) postopoma narašča z leve proti desni strani. Nadalje je razviden prehod iz negativne (konkavne) v pozitivno (konveksno) ukrivljenost zvara.



Slika 7. Primer rezultatov analize 3D-izmerkov zvara: potek geometrijskih značilk vzdolž zvara



Slika 8. Sistem za lasersko merjenje oblike jermenov: laserski profilmer (1), laserska črta (2) na površini jermena (3), jermenica (4), napenjalo jermena (5)

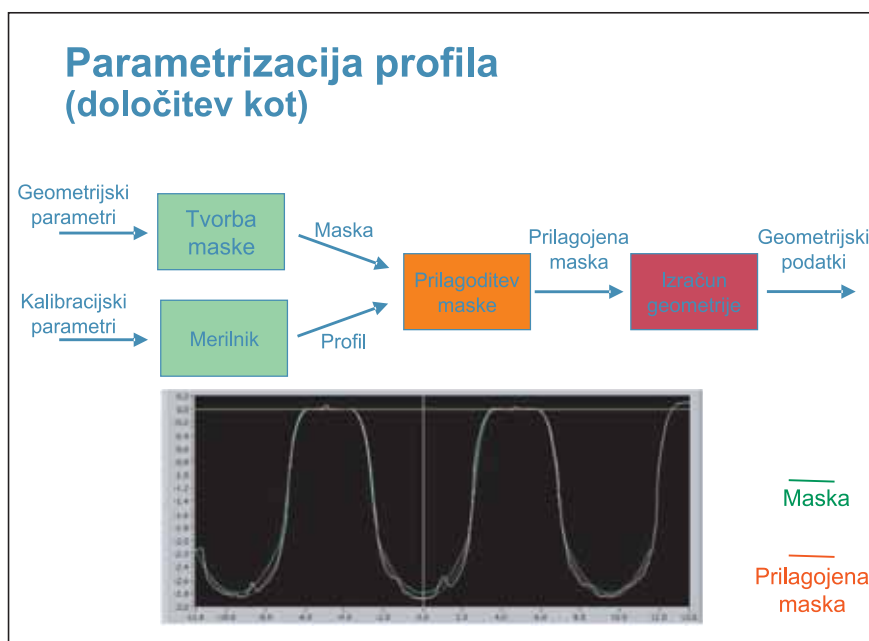
Smisel tridimenzionalnega merjenja je predvsem v samodejni in zanesljivi presoji kakovosti zvara. Ta temelji enako kot vizualna kontrola na oblikovnih kriterijih, ki jih mora vsak zvar izpolnjevati, sicer se izloči kot neustrezen.

3 Nadzor oblike pogonskih jermenov

Slika 8 prikazuje primer laserske merilne naprave, namenjene testiranju pogonskih jermenov. Triangulacijski merilnik, ki vsebuje laserski črtni projektor in digitalno videokamero, je vgrajen v robustno ohišje (slika 8, tč. 1), ki omogoča zanesljivo delovanje v industrijskem okolju. Merilno območje obsega 30 mm po širini in 15 mm po višini. V odvisnosti od

stanja površine merjenca (npr. strukture tekstila in optične odbojnosti) je natančnost merjenja med 0,02 in 0,07 mm [5].

V odvisnosti od oblike profila jermena in predvsem od velikosti zob lahko z eno meritvijo pomerimo površino od enega do treh zob. Za meritev 3D-oblike celotnega jermena je bil razvit mehatronski sistem (slika 8, tč. 4 in 5), ki sinhronizirano z merilnikom premika jermen. Njegova pogonska jermenica je fiksna, napenjalna pa pritrjena na vodila in se premika v odvisnosti od dolžine jermena. Med meritvijo je jermen obrnjen narobe, tako da teče preko jermenic in merilnega mesta po hrbtne strani, merilnik pa meri profile jermena z



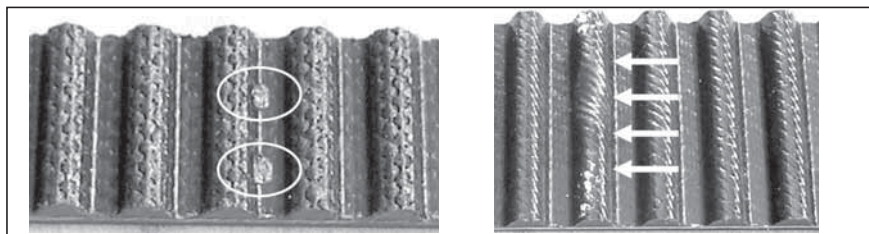
Slika 9. Ilustracija postopka parametrizacije zajetih profilov

zunanje strani. Pritrditev merilnika je nastavljiva, tako da lahko merimo profile jermena prečno ali vzdolžno glede na jermen. Meritev vodi osebni računalnik, ki sinhronizira vrtenje laserskega projektorja z zajemom slike z videokamero, izračunava izmerjene 3D-profile ter iz njih generira 3D-model površine.

Z analizo 3D-izmerkov dobimo dve vrsti podatkov:

- ključne mere profila zob, ki jih določa proizvodna dokumentacija (npr. širina in višina zoba, ...),
- podatke o integriteti površine (npr. tipične napake).

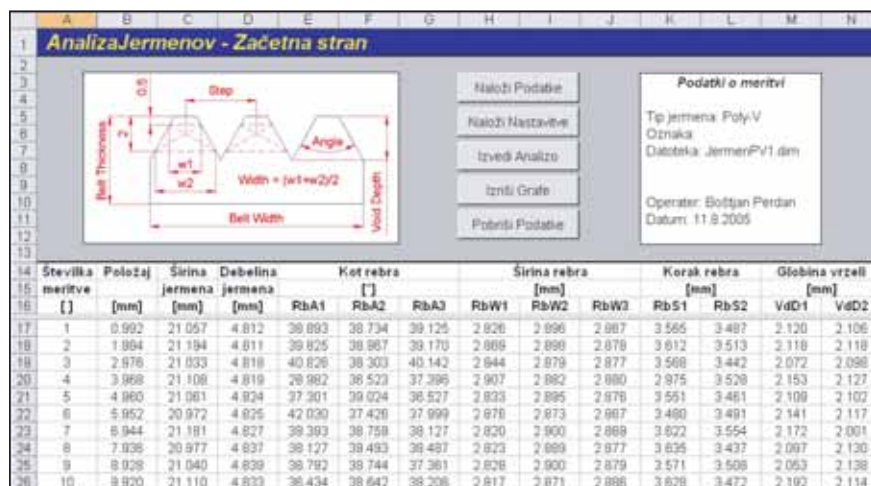
Slika 9 ilustrira postopek parametrizacije profila, s katerim določimo iz profila njegove ključne mere. Iz delavniške dokumentacije izdelamo masko profila, ki jo sestavljajo geometrijski primitivi (ravne črte, krožnice, krivulje, ...), določeni z ustreznimi nabori parametrov. Masko z ustreznim algoritmom prilagodimo izmerjenemu profilu. Iz prilagojene maske nato določimo iskane ključne mere profila.



Slika 11. Fotografiji jermenov s tipičnimi napakama: neizoblikovan zob (levo), poškodba kalupa (desno)

Postopek ponavljamo vzdolž celotne dolžine zoba in tako dobimo merilni protokol (slika 10), ki vsebuje ključne mere profila vzdolž celotnega jermena. Razvita programska oprema omogoča tudi statistične analize merilnih protokolov in označevanje mer, ki so v neskladju z zahtevami, ter položajev na jermenu, kjer se te nahajajo.

Poleg podatkov o dimenzijski oz. oblikovni ustreznosti nam naprava omogoča tudi odkrivanje površinskih napak. Tipična primera sta prikazana na sliki 11. Na levi strani je primer nepravilno izoblikovanega zoba, domnevno zaradi lokalno premajh-



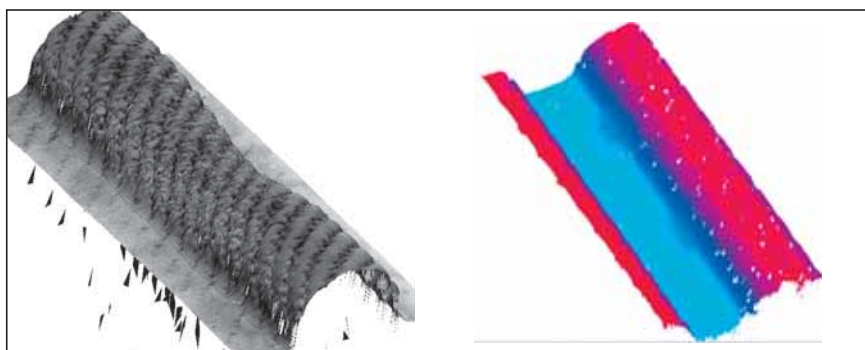
Slika 10. Primer rezultatov meritve rebričastega jermena

ne količine gumene zmesi oziroma premajhnega tlaka, zato se prekrivna tkanina ni prilagodila površini kalupa. Desni del slike 11 prikazuje jermen, pri katerem sta ob korenu enega od zob vidni dve izboklini, ki sta posledica zajed v kalupu. Ali je tovrstna napaka kritična ali ne, je odvisno od njenega položaja in velikosti.

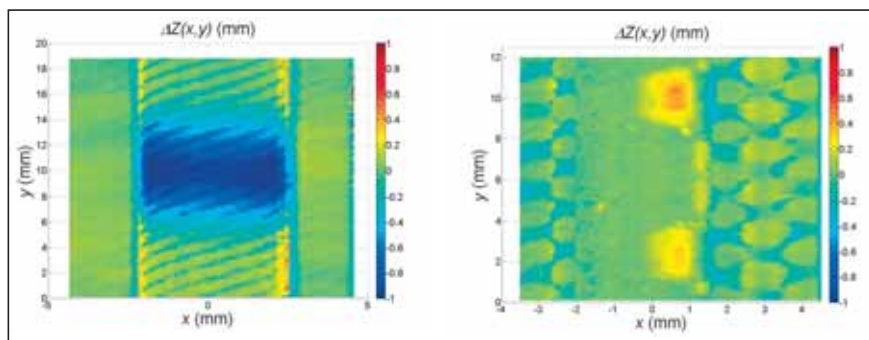
12 prikazuje primera takšnih odsekov, in sicer tista dva, ki ustrezata tistima deloma površine jermenov, ki sta prikazana na sliki 11.

Naslednji korak v obdelavi je določitev referenčne površine ZR(X,Y) jermena, to je površine, ki predstavlja jermen brez površinskih napak. Določimo jo iz zajetih 3D-izmerkov površine Z(X,Y), in sicer tako, da v bližnji okolici napake poiščemo del površine, za katerega ocenimo, da je brez napake. 3D-izmerke s tega dela površine uporabimo za tvorbo referenčne površine.

Razliko med izmerjeno in referenčno površino: $\Delta Z(X,Y) = Z(X,Y) - ZR(X,Y)$ imenujemo karta odstopkov (slika 13) in predstavlja osnovo za izračun številskih parametrov (npr. gabaritne mere napake, njena površina, prostornina, ...), ki jih uporabljamo za odločanje o tem, ali je izmerjena površina sprejemljiva ali ne. Algoritmi odločanja so trenutno še v fazi raziskav. Dosedanji rezultati pa so



Slika 12. Sliki 3D-izmerkov jermenov s tipičnimi napakama: neizoblikovan zob (levo), poškodba kalupa (desno)



Slika 13. Karti odstopkov jermenov s slike 11

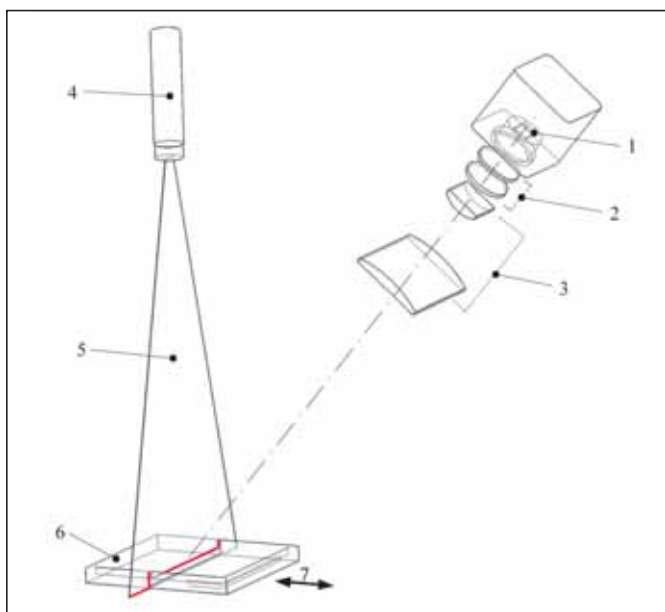
spodbudni in podpirajo domnevo, da je naprava, ki bi avtomatsko odkrivala površinske napake jermenov, realno izvedljiva [6].

■ 4 Nadzor oblike ulitkov

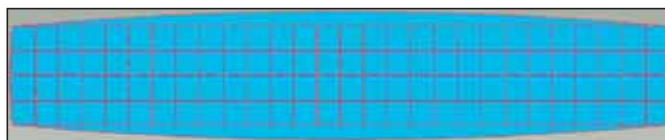
Pri tlačnem litju aluminija nastanejo različne površinske napake, kot so dvoslojnost, nezalitost ali hladni zvari [7]. So posledica nepravilne nastavitve procesa tlačnega litja, obrabe tlačnega orodja ali njegovega loma.

Klasična kontrola tlačno litih izdelkov oz. ulitkov je običajno vizualne narave in je prepuščena večšini delavca na stroju ter zato zelo subjektivna. V ta namen smo razvili novo metodo za nadzor kvalitete površin ulitkov.

Metoda sloni na principu merjenja 3D-oblike ulitka z merilnim sistemom na principu laserske triangulacije ter na analizi izmerkov po območjih interesa. Posebnost merilnega sistema (slika 15) je v uporabi cilindričnega



Slika 15. Shema sistema za nadzor oblike ulitkov: kamera (1), objektiv (2), Keplerjev daljnogled (3), laserski črtni projektor (4), laserska ravnina (5), merjenec (6), smer pomika merjenca (7)



Slika 16. Posamezno območje interesa razdelimo na $M \times N$ segmentov povprečne velikosti livarskih napak



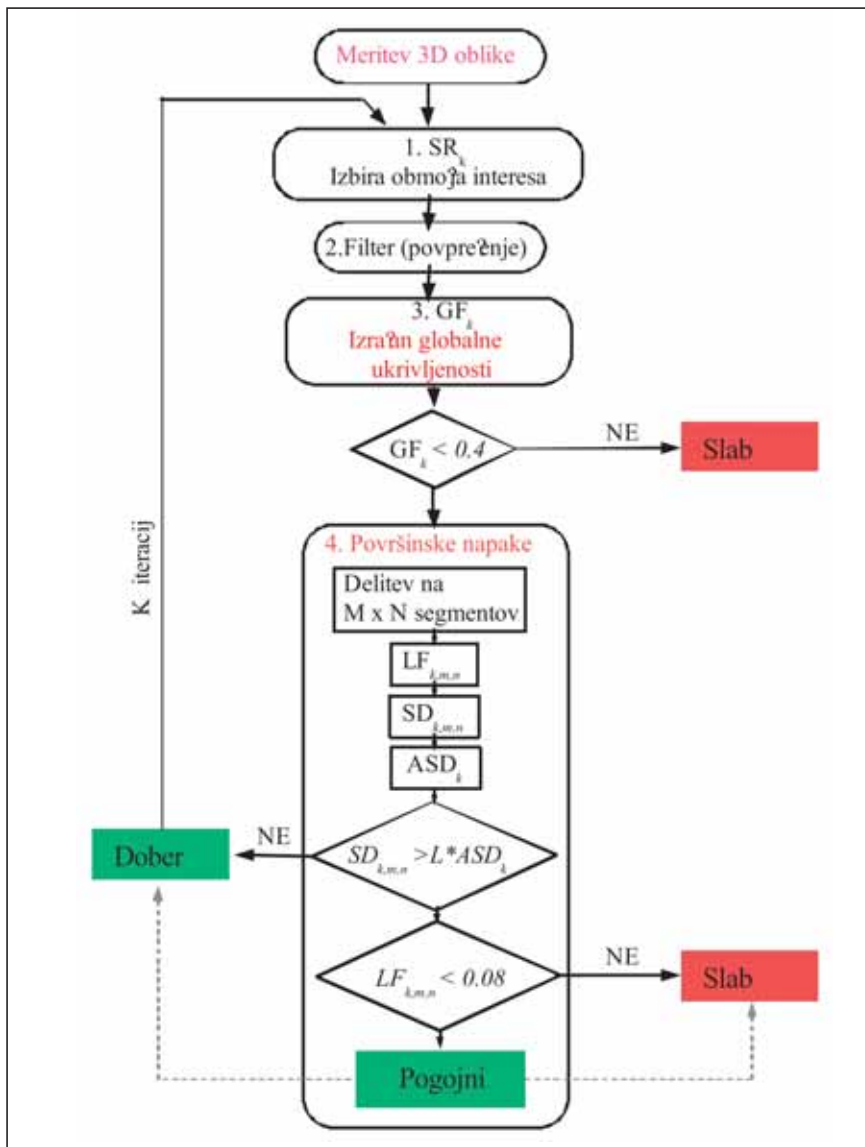
Slika 14. Fotografija merjenca: predmet nadzora je ravna ploskev po svetlečim pasom

mo kvaliteto površine ulitka, je globalna ukrivljenost GF posameznega OI. Pri iskanju površinskih napak OI razdelimo na majhne segmente (slika 16), katerih površina v povprečju ustreza velikosti livarskih napak (npr. 5×5 mm). Osnovna ideja segmentov je v ozkopasovnem filtriranju površine OI z namenom zaznave geometrijskih oblik v velikosti segmenta.

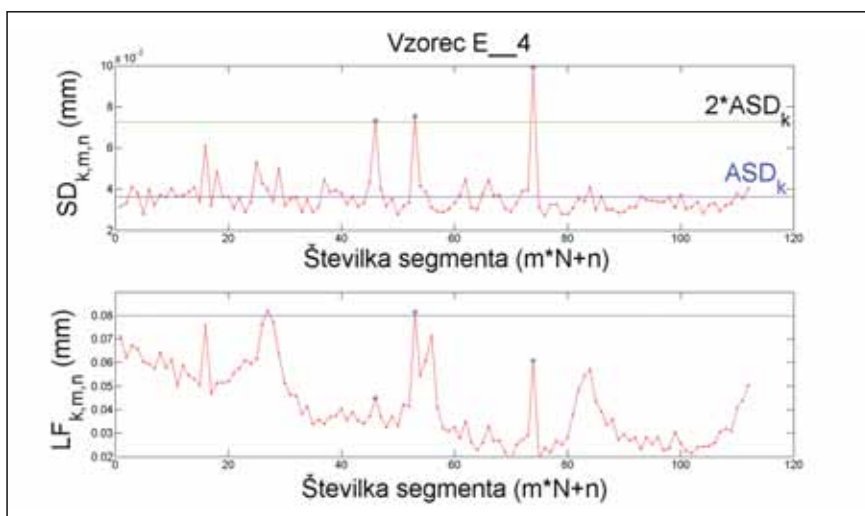
Vsak segment se nato analizira glede na lokalno ravnost (LF) in glede na povprečni raztros točk znotraj segmenta (SD). Slika 18 prikazuje spreminjanje parametrov SD in LF po celotnem OI. Kjer parametra prekoračita določene meje, zaznamo napako. Meje zaznave napak so eksperimentalno določene.

■ 5 Zaključek

Predstavljeni so trije primeri uporabe laserskih sistemov za merjenje 3D-oblike teles na področju nadzora kakovosti industrijskih (pol)izdelkov. Primeri kažejo, da množica izmerjenih točk (izmerkov) v 3D-prostoru, ki jih lahko hitro in natančno zajamejo ti sistemi, vsebuje bistvene oblikovne informacije, uporabne za nadzor kakovosti. S primernimi algoritmi je tako mogoče iz zajetih 3D-izmerkov določiti npr. oblikovne in dimenzijske značilke (npr. ključne mere), ki lahko služijo kot osnova za presojo kakovosti izdelkov. Mogoče je detektirati in klasificirati površinske napake. Primeri pa kažejo tudi to, da je na osnovi teh podatkov mogoče razviti algoritme, ki omogočajo avtomatizirano odločanje o tem, ali je nek izdelek ustrezen ali ne.



Slika 17. Algoritem avtomatiziranega nadzora oblike ulitka: najprej se preverja globalna ravnost (GF) zajete površine, nato se zaporedoma analizirajo segmenti površine glede na lokalno ravnost (LF) in povprečni raztros točk (SD)



Slika 18. Primer rezultata analize izdelka s površinskimi napakami: vrednosti parametrov SD in LF na nekaterih segmentih (oznake 'o') presegajo dopustne vrednosti

Literatura

- [1] Mix, P. E.: Introduction to Non-destructive Testing: A Training Guide, Wiley-Interscience, Hoboken (NJ), 2005, str. 575–638.
- [2] Bračun, D., Jezeršek, M., Diaci, J.: Triangulation model taking into account light sheet curvature, Meas. sci. technol., 2006, Vol. 17, No. 8, str. 2191–2196.
- [3] Jezeršek, M., Polajnar, I., Diaci, J.: Feasibility study of in-process weld quality control by means of scanning laser profilometry, v: Proceedings of SPIE, vol. 6616, 2007, 8 str.
- [4] Jezeršek, M. in ostali: Sprotno ugotavljanje preseka talilnih zvarov z uporabo laserske profilometrije, v: Dan varilne tehnike, Novo mesto, Društvo za varilno tehniko, 2005, str. 173–176.
- [5] Bračun, D., Perdan, B., Diaci, J.: Laserski merilni sistem za avtomatiziran nadzor oblike jermenov, v: Računalniška obdelava slik in njena uporaba v Sloveniji 2007, Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2007, str. 49–54.
- [6] Perdan, B., Bračun, D., Diaci, J.: Laserski profilomer za neporušitvene preiskave površine pogonskih jermenov, v: Uporaba sodobnih neporušitvenih metod v tehniki, Slovensko društvo za neporušitvene preiskave, Fakulteta za strojništvo, 2008, str. 157–163.
- [7] Gruden, V., Bračun, D., Možina, J.: Laser supported optical control of high pressure aluminium cast products, Stroj. vestn., 2008, Vol. 54, No. 1, str. 68–76.



Examples of using 3D laser profilometry to monitor product shape

Abstract: Systems based on the principle of laser profilometry can be employed to acquire the three-dimensional (3D) shape of complex surfaces rapidly and accurately. In some practical applications it is necessary to process and analyze the acquired set of measured points ("the cloud of points") in order to extract the geometrical surface parameters, which are important for judging the quality of the product under test. These parameters can be used as a basis for making the final decision about whether the quality of the product is adequate or not. The article presents three examples where novel laser systems were developed to measure the 3D shape of industrial products. The algorithms for processing and analyzing 3D clouds of points that have been developed with the aim to extract data that could be of use for quality control are discussed. The emphasis in the algorithm development has been put on their applicability in automated quality control.

In the first example, a system for the quality control of fusion welds is presented. It can sample a weld surface at a rate of up to 80 profiles per second, achieving a 0.1-mm accuracy. The developed software analyzes the captured cloud of points in real time, determining the characteristic shape parameters (length, width, height, cross-section, volume, starting position, etc.), which are subsequently used for the automated classification of the welds into acceptable and unacceptable. The software also detects surface defects, such as undercutting, holes or melt splash, etc.

The second example presents a system for the quality control of power transmission belts. The system acquires successive profiles of the belt under test with an overall accuracy of 0.02 mm. In order to measure a complete belt surface, the belt is translated in the longitudinal direction using pulleys driven by a micro-stepping motor. The captured collection of successive belt profiles is analyzed to extract two types of data: key dimensions of the belt profile as defined by the product documentation (e.g., tooth height and width for toothed belts) and data pertinent to the surface integrity (e.g., the presence of typical surface defects).

The third example examines a system for surface-quality assessment of safety-critical die-castings. The measurement system acquires surface profiles using anamorph optics, achieving an accuracy of 0.01 mm. The geometry-specific parameters (the flatness of the particular surface region, the statistical distribution of the measured points and the height of the surface defects) are calculated from the acquired surface data and then checked whether/how they fit within the tolerances specified in the technical documentation.

Key words: laser profilometry, measurement, product shape, quality assessment,



Združenje kovinske industrije



Parker Store

EVET NITRON SPARK

RECTUS
The connection... last solution!

H+P Center d.o.o., Ljubljana
Brnčičeva ul. 13, 1231 Črnuče

Tel.: 01/ 563 23 36, Fax: 01/ 561 24 71
www.h-pcenter.si, info@h-pcenter.si