

# Uporaba napredne 3D-merilne naprave v tehniki

Damir GRUGRAŠ, Luka ČERČE, Davorin KRAMAR, Franci PUŠAVEC

**Izvleček:** Najnovejša pridobitev Katedre za menedžment obdelovalnih tehnologij s Fakultete za strojništvo, Ljubljana, je visoko zmogljiv in precizen 3D-merilni mikroskop, ki omogoča 3D-meritve površin v realnih barvah in tako predstavlja korak naprej v smislu prehoda z običajnih 2D-meritev na 3D-meritve. Naprava omogoča merjenje poljubnih 3D-geometrij, hrapavosti površin (linijske, ISO 4258 in ISO 11562) in površinske (ISO 25178)), geometrij rezalnih orodij, obrabe rezalnih orodij itd. V tem prispevku sta predstavljena naprava in njen način delovanja, njena široka paleta uporabnosti pa je prikazana z različnimi študijami: (1) študija 3D-obrabe rezalnih orodij, (2) podrobna analiza hrapavosti površin in (3) prikaz uporabe naprave na drugih področjih zunaj strojništva.

**Ključne besede:** 3D-merilni mikroskop, 3D-obraba rezalnih orodij, površinska hrapavost, postranica

## ■ 1 Uvod

3D-meritve tehničnih površin so pomemben del preverjanja in kontrole lastnosti in funkcije materialov in tehničnih izdelkov. Takšne meritve so se tradicionalno izvajale z dotikalnimi napravami, v zadnjem desetletju pa postajajo vse bolj priljubljene tudi optične naprave. Čeprav imajo dotikalne naprave dolgoletno tradicijo pri merjenju površin in so dobro znane in sprejete tako v znanosti kot v industriji, so prav tako obremenjene z različnimi težavami, kot so npr. potreba po redni menjavi konic tipal, učinki glajenja zaradi geometrije tipal in dolgi merilni časi pri merjenju površin. Optične naprave lahko po drugi strani hitro premerijo večje površine, ne da bi se jih morale dotikati in jih pri tem poškodovati.

S takšno optično 3D-merilno napravo je opremljena tudi Katedra za menedžment obdelovalnih tehnologij s Fakultete za strojništvo v Ljubljani. Gre za visoko zmogljiv in precizen 3D-merilni mikroskop Ali-

cona InfiniteFocus SL, ki izkorišča majhno globino ostrenja optičnega sistema z vertikalnim skeniranjem, podatke o topografiji in barvi pa pridobiva s spreminjanjem gorišča. Za razliko od drugih optičnih tehnik ima dve glavni prednosti: (1) metoda ni omejena na koaksialno osvetlitev ali druge posebne tehnike osvetlitve, kar odpravlja nekatere omejitve glede največjega naklona, ki ga je še mogoče meriti, in (2) ta tehnologija daje pravo informacijo o barvi za vsako merilno točko [1].

V tem prispevku sta predstavljena naprava in njen način delovanja, njena široka paleta uporabnosti pa je prikazana na različnih primerih: (1) študija 3D-obrabe rezalnih orodij, (2) podrobna analiza hrapavosti površin in (3) prikaz uporabe naprave na drugih področjih izven strojništva.

## ■ 2 Predstavitev 3D-merilne naprave

### ■ 2.1 Način delovanja in tehnične specifikacije naprave

3D-merilni mikroskop Alicona InfiniteFocus SL deluje na principu spreminjanja gorišča po višini (ang. focus variation) [1]. Da pridobimo

celotno 3D-sliko površine, je potrebno merilni sistem pomikati v vertikalni smeri (Z-osi), kjer se na vsakem nivoju zabeležijo podatki o poziciji posameznih točk na površini. Torej: na vsakem nivoju zajamemo oz. shranimo pozicije tistih točk, ki so v gorišču. Premikanje v vertikalni smeri je izvedeno s preciznim mehanskim pozicioniranjem ali piezoelektričnim pozicionirnim sistemom. Ko je skeniranje opravljeno na vseh nivojih, se podatki računalniško obdelajo in dobimo 3D-sliko skenirane površine. Velikost skeniranega območja v smeri X in Y je odvisna od uporabljenega optičnega sistema oz. povečave objektiv, ki projicira svetlobo od objekta na CCD-senzor. Tudi natančnost naprave je neposredno povezana s povečavo objektiv, kakor je razvidno tudi s spodnje tabele s tehničnimi specifikacijami naprave. Skenirne naprave običajno omogočajo tudi skeniranje merjencev večjih dimenzij od delovnega območja objektiv, saj jih namestimo na precizno pozicionirno mizico. Ko naprava zaključí s skeniranjem objekta v zornem polju objektiv, se objekt na mizici v smeri X in Y premakne, tako da zajame novo območje na merjenem objektu. Vsi podatki se nato računalniško obdelajo in združijo v eno 3D-sliko objekta, ki je tako lahko mnogo večja od območja zornega polja objektiv [1, 2].

Damir Grugaš, univ. dipl. inž.,  
dr. Luka Čerče, univ. dipl. inž., izr.  
prof. dr. Davorin Kramar, univ.  
dipl. inž., izr. prof. dr. Franci Pušavec,  
univ. dipl. inž., vsi Univerza v  
Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

**Tabela 1.** Tehnične specifikacije naprave [2]

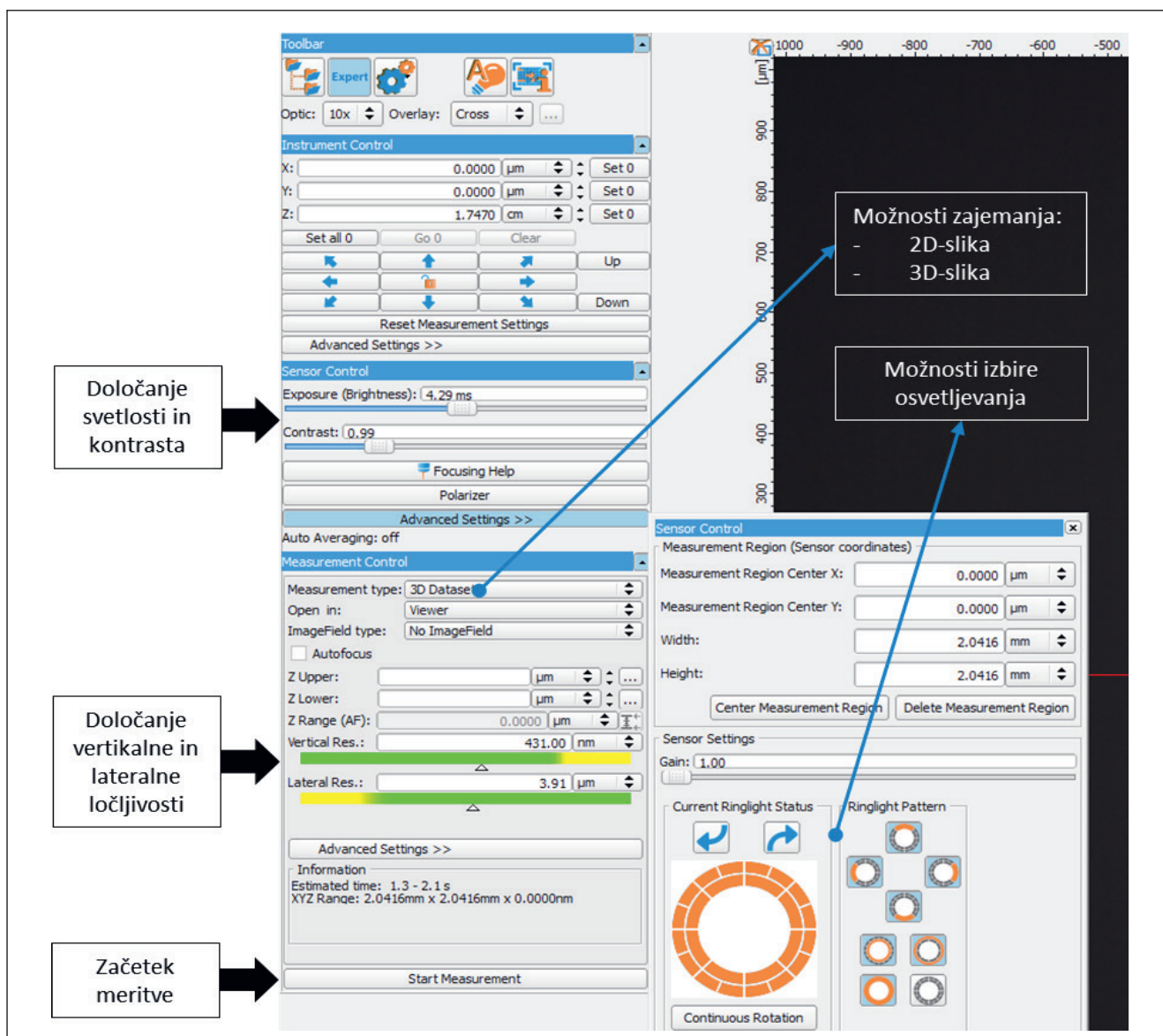
Povečava objektiva	5 x	10 x	20 x
Delovno območje (X, Y, Z) [mm]	50 x 50 x 155		
Delovno območje objektiva [mm]	4 x 4	2 x 2	1 x 1
Lateralna resolucija [ $\mu\text{m}$ ]	3,52	1,76	0,88
Vertikalna resolucija [nm]	510	100	50
Minimalna merljiva profilna hrapavost Ra [ $\mu\text{m}$ ]	–	0,3	0,15

## 2.2 Možnosti merjenja in analize podatkov

Glede na to, da 3D-merilna naprava deluje na principu spreminjanja gorišča po višini, torej brezdotično, smo pri zajemu podatkov do-

kaj neomejeni z obliko površine na določenem delu objekta, ki ga skeniramo. Če želimo skenirati celoten objekt, ga je potrebno ustrezno premakniti po vsakem zajetju 3D-podatkov, dokler ne zajamemo celotnega objekta.

Vse zajete podatke lahko nato združimo v celoto in pridobimo 3D-model celotnega objekta. Pri pripravi in izvajanju meritev moramo slediti naslednjemu protokolu: (i) očistiti površino merjenca, (ii) pritrditi merjenec na delovno mizo naprave, (iii) izbrati ustrezen objektiv glede na želeno natančnost meritve, (iv) prilagoditi smer in jakost osvetlitve, (v) prilagoditi programske nastavitve (svetlost in kontrast), (vi) izbrati območje meritve in definirati najvišjo in najnižjo pozicijo objektiva, znotraj katere se bo izvajala meritev in (vii) določiti vertikalno in lateralno ločljivost. Vse te nastavitve lahko zelo enostavno določimo/izberemo z uporabniškim vmesnikom, ki je prikazan na *sliki 1*.

**Slika 1.** Uporabniški vmesnik naprave

Ko smo ustregli vsem predstavljenim korakom protokola, lahko začnemo z izvajanjem meritve. Čas trajanja meritve je zelo odvisen od izbranih nastavitvev, velikosti merjenja in glede na željeno natančnost izbranega objektiva lahko traja nekaj minut ali celo nekaj ur.

Meritvi sledi dodatna analiza tridimenzionalno zajetih podatkov. Na voljo imamo naslednje analize: (i) linijska meritev hrapavosti po standardih ISO 4258 in ISO 11562, (ii) površinska meritev hrapavosti po standardu ISO 25178, (iii) profilna analiza na določenem delu zajete 3D-slike (npr. meritev radija konice orodja, meritev koraka navoja, meritev poljubne razdalje, ...), (iv) meritve 3D-oblike (npr. določitev volumna, ...) in (v) volumska primerjava različnih 3D-slik. Uporabnost nekaterih možnih analiz zajetih podatkov je prikazana v naslednjem poglavju 3.

### ■ 3 Študije primerov

#### ■ 3.1 Študija 3D-obrabe rezalnih orodij

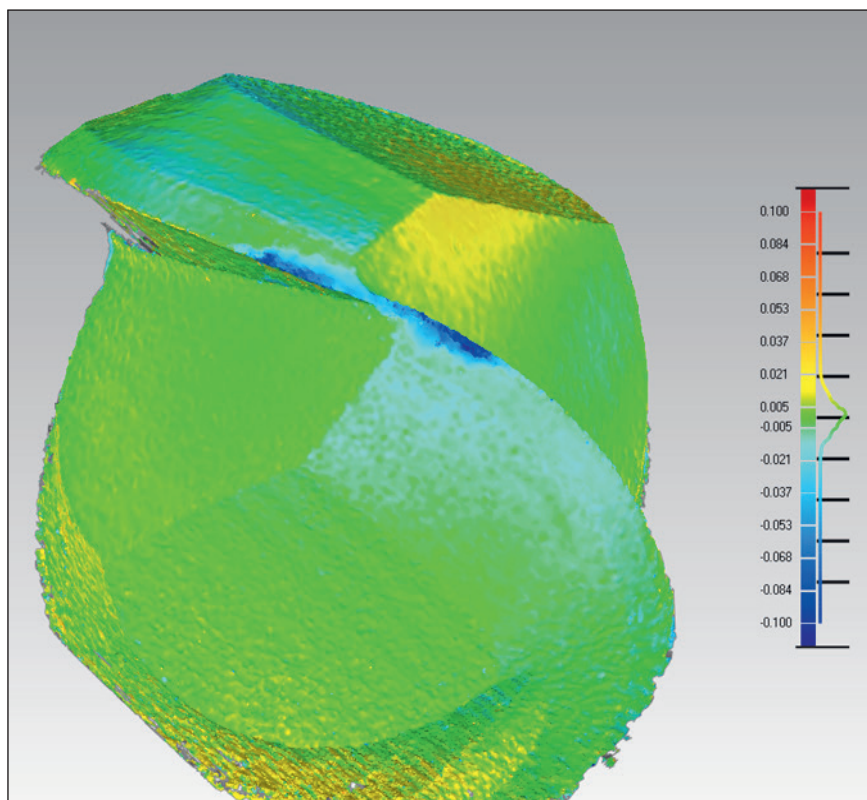
Rezalno orodje je med odrezavanjem obremenjeno tako mehansko s silami, ki so posledica deformacij pri nastajanju odrezkov in trenja med orodjem in obdelovancem, kot tudi termično, saj se pri tem razvija toplota, ki segreva orodje, odrezek in obdelovanec. Pri tem prihaja tudi do kemičnih procesov, saj so kontaktne površine čiste in tako kemično aktivne. Vse to pa se odraža na odnašanju delcev s površine orodja, torej na obrabi rezalnega orodja. Zaradi obrabe orodja pa se lahko poslabša kakovost obdelane površine, dobimo odstopke od zahtevane dimenzije, hkrati pa se povečajo rezalne sile in poraba moči [3, 4]. Zato se med procesom odrezavanja velikokrat spremlja/meri obraba orodja.

Merjenje obrabe je definirano po standardu ISO 3685:1993. Obraba pa se največkrat spremlja z meritvijo obrabe proste ploskve VB [mm]. Meritve se običajno izvajajo

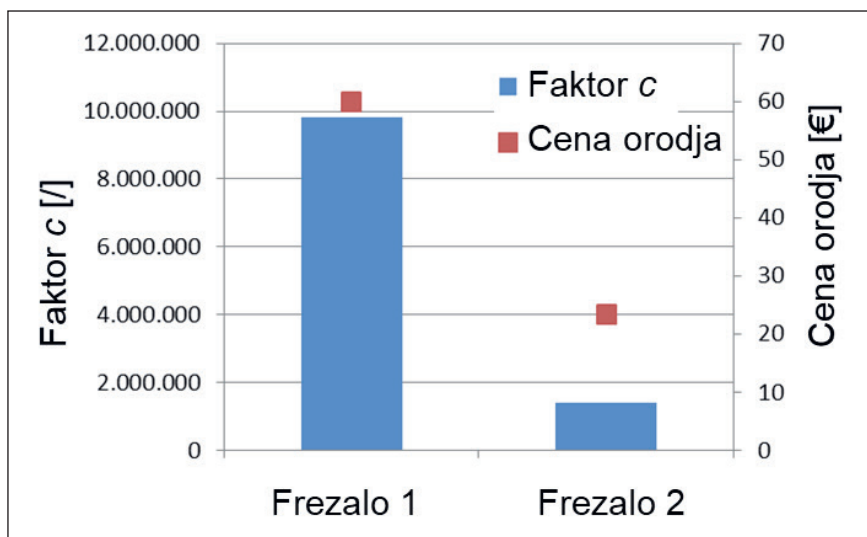
na navadnih orodjarskih mikroskopih. Odčitavanje velikosti obrabe VB pa je zelo subjektivno, saj iz 2D-slike težko ocenimo točno velikost obrabe. Meritve na orodjarskem mikroskopu postanejo še bolj nezanesljive, kadar želimo okarakterizirati obrabo na cepilni ploskvi, ki se pojavlja v obliki kotanje.

Zato smo v Laboratoriju za odrezavanje (LABOD) za karakterizacijo obrabe vpeljali novo cenilko obra-

be [4]. To je faktor  $c$ , ki je definiran kot razmerje med volumnom odrezanega materiala  $V_{cut,t}$  in volumsko obrabo orodja  $V_{wear,t}$  po enačbi (1). Volumen odrezanega materiala  $V_{cut,t}$  enostavno določimo z enačbo (2), v kateri  $MRR$  predstavlja volumski odvzem materiala v enoti časa (ang. *Material Removal Rate*),  $t$  pa čas. Za volumsko obrabo orodja  $V_{wear,t}$  pa je potrebna 3D-analiza novega in obrabljenega orodja (v tem prispevku je prikazana analiza dveh frezal: frezalo



Slika 2. Prikaz volumske obrabe frezal (primer obrabe na frezalu 2) [3]



Slika 3. Primerjava dveh frezal na osnovi faktorja  $c$  in cene orodja [3]

1 in frezalo 2), ki smo jo izvedli s pomočjo 3D-merilne naprave. Z nadaljnjo primerjavo novega in obrabljenega orodja pa dobimo volumsko razliko zajetih 3D-podatkov, ki predstavlja volumsko obrabo oz. količino materiala, ki je odstranjen z orodja (slika 2).

$$c = \frac{V_{cut,t}}{V_{wear,t}} \quad (1)$$

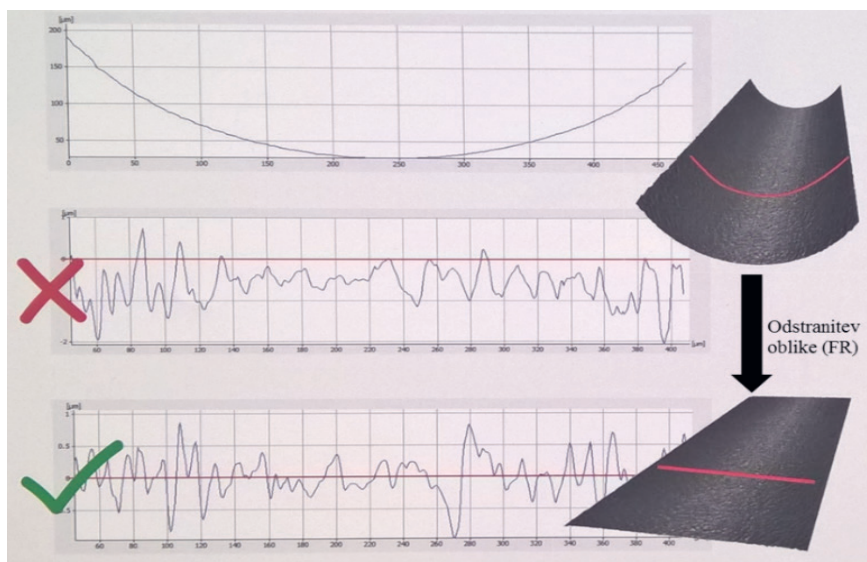
$$V_{cut,t} = MRR \cdot t \quad (2)$$

Na osnovi volumna odrezanega materiala in volumske obrabe orodja določimo faktor  $c$ , s pomočjo katerega lahko primerjamo učinkovitost posameznih orodij med seboj. Večja je vrednost faktorja  $c$ , učinkovitejše je orodje oz. orodje je odrezalo več materiala pri določeni volumski obrabi orodja. Celoten vpogled na učinkovitost orodij pa dobimo, če pri tem upoštevamo tudi ceno orodij, kakor prikazuje graf na sliki 3. Vidimo, da ima orodje frezalo 1 večji faktor  $c$  od frezala 2. Orodje je tudi dražje, vendar je cena frezala primerljiva z učinkovitostjo, kar pa ne velja za frezalo 2, ki je glede na faktor  $c$  predrago [3].

### 3.2 Detajlna analiza hrapavosti površin

V določenih primerih navadno linijsko (profilno) merjenje hrapavosti površin z navadnim profilometrom ne zadostuje več, pač pa je potrebna bolj detajlna študija z analizo površinske hrapavosti, ki nam daje bolj točen vpogled v celotno hrapavost površine.

Primer takšne meritve je prikazan na spodnji sliki, kjer je naročnik zahteval detajlno analizo celotne površine določenega strojnega dela, saj je želel iz nje sklepati na najustreznejše rezalne parametre pri frezanju merjenega kosa. Zato je bila pri meritvah namesto navadnega profilometra uporabljena 3D-merilna naprava, s katero smo zajeli celotno površino in pridobili 3D-obliko.



Slika 4. Prikaz funkcije Form Removal (FR)

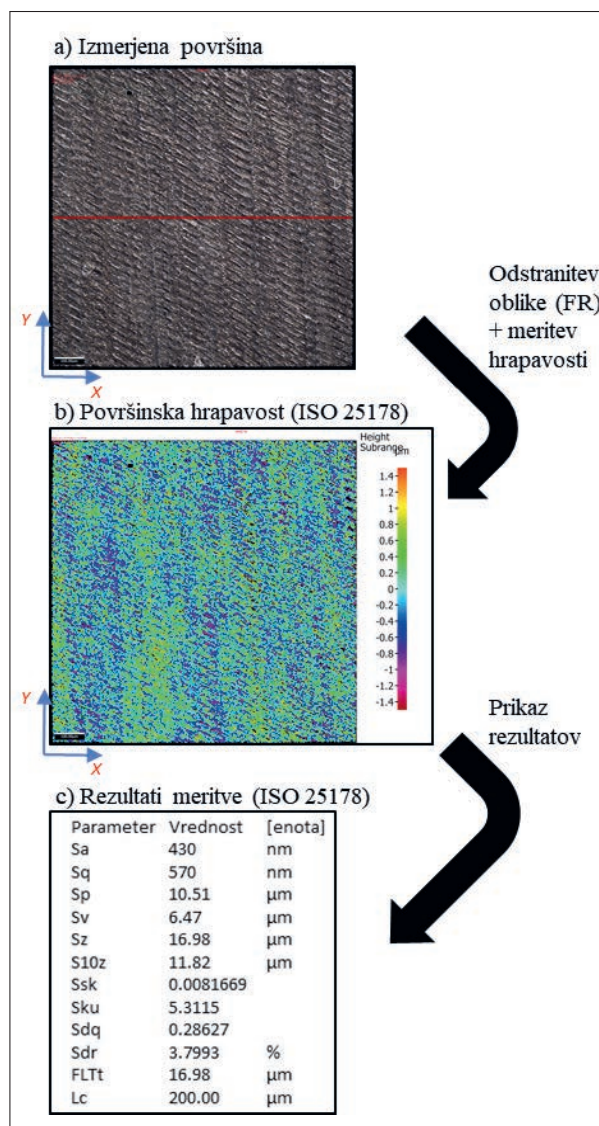
Za določitev točne površinske hrapavosti merjene površine pa je bilo potrebno izločiti značilno obliko merjene površine.

To se je izvedlo s pomočjo funkcije Form Removal (FR), ki iz merjene 3D-površine odstrani značilno obliko, ki bi negativno vplivala na natančnost meritev. Delovanje funkcije FR je prikazano na sliki 4. Iz merjene površine je s funkcijo FR možno odstraniti obliko parabole, polinoma poljubne stopnje, cilindra, stožca ali krogle.

Sledila je še analiza površinske hrapavosti po standardu ISO 25178 z različnimi parametri, ki popisujejo površinsko hrapavost (slika 5):

- $S_a$ : povprečna višina merjene površine,
- $S_q$ : standardna deviacija merjene površine,
- $S_p$ : najvišji vrh merjene površine,
- $S_v$ : najnižja dolina merjene površine,
- $S_z$ : maksimalna višina merjene površine,

- $S_{sk}$ : asimetričnost merjene površine in
- $S_{ku}$ : sploščenost merjene površine.



Slika 5. Prikaz korakov pri analizi površinske hrapavosti

### ■ 3.3 Uporabnost naprave na področju biologije

3D-merilno napravo je možno uporabljati tudi na področjih, ki niso neposredno povezana s strojništvom, kar dokazuje tudi spodnja slika postranice.

Postranice ali bibe spadajo v red rakov, v katerega uvrščamo okrog 7.000 danes živečih opisanih vrst, ki živijo večinoma v morjih in jih prepoznamo po bočno sploščenem telesu. Del njihovih nog je prilagojen za premikanje (plavanje, skakanje oz. hojo) in del za prehranjevanje [5].



Slika 6. 3D-model postranice

Postranica na spodnji sliki je bila uspešno skenirana, s 3D-merilno napravo je bila pridobljena njena celotna 3D-oblika. Pridobljeni 3D-model je primeren tudi za nadaljnjo uporabo (npr. 3D-tiskanje postranice v povečani obliki ipd.).

### ■ 4 Zaključek

V prispevku je predstavljena brezdotična 3D-merilna naprava Alicona InfiniteFocus SL, ki deluje na principu spreminjanja gorišča po višini. Raznovrstnost te naprave je predstavljena s tremi študijami: (1) študija 3D-obrabe rezalnih orodij, (2) anali-

za hrapavosti površin in (3) prikaz uporabnosti naprave na področju biologije. Iz študije (1) je razvidno, da lahko s pomočjo naprave povsem izključimo vpliv merilca in tako objektiviziramo meritve. V študiji (2) je pokazano, kako je za celovito karakterizacijo določenih problemov potrebna določitev celotne površinske hrapavosti. Zadnja študija (3) pa dokazuje, da je merilna naprava primerna za izvajanje različnih meritev, tudi na področjih zunaj strojništva.

### Viri

- [1] Danzl, R., Helml, F., Scherer, S.: Focus Variation – a Robust Technology for High Resolution Optical 3D Surface Metrology. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, 57(2011)3, str. 245–256.
- [2] LABOD: Alicona InfiniteFocus SL. Dostopno na: <http://lab.fs.uni-lj.si/labod/assets/alicona5.pdf>, ogled: 20.04.2017.
- [3] Rotar, V.: 3D merjenje obrabe vijčnih svedrov in krogelnih frezal. Magistrsko delo, Ljubljana, 2016.
- [4] Čerče, L.: Napovedovanje obstojnosti rezalnih orodij z upoštevanjem njihove prostorske obrabe. Doktorsko delo, Ljubljana, 2016.
- [5] Wikipedija: Postranica. Dostopno na: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Postranice>, ogled: 20.04.2017.

### Application of the Advanced 3D Measuring Device in Technology

**Abstract:** The Department for Management of Production Technologies at the Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana is equipped with a high-performance and precise 3D measuring microscope that enables 3D surface measurements in real colours, thus representing a step forward in terms of the transition from normal 2D measurements to 3D measurements. The device enables the measurement of any 3D geometries, surface roughness (profile (ISO 4258 and ISO 11562) and areal (ISO 25178)), cutting tool geometry, cutting tool wear, etc. In this paper, the device and its mode of operation are presented and its wide range of usability is shown in various studies: (1) a study of 3D cutting tool wear, (2) a detailed analysis of the surface roughness, and (3) application of the device in other fields outside mechanical engineering.

**Keywords:** 3D measuring microscope, 3D cutting tool wear, areal surface roughness, amphipoda