

**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za strojništvo**

**Merjenje hrapavosti površin**  
**Poročilo laboratorijske vaje**

Rok oddaje: Četrtek, 7. 3. 2016

*Mentor: dr. Lucija Čoga*

Uroš R

15. junij 2016

---

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod in definicija naloge</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Meritve</b>	<b>4</b>
2.1	Meritve na stroju za kontaktno merjenje hrapavosti s konico . . . . .	4
2.2	Meritve na stroju za optično merjenje hrapavosti površine . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Izračuni</b>	<b>7</b>
3.1	Izračuni za meritve iz optičnega interferometra . . . . .	7
3.1.1	Izračun srednje linije profila . . . . .	7
3.1.2	Izračun srednjega absolutnega odstopka profila $R_a$ . . . . .	7
3.1.3	Izračun standardne deviacije profila $R_q$ . . . . .	7
3.1.4	Izračun parametra asimetričnosti $R_{sk}$ . . . . .	8
3.1.5	Izračun parametra sploščenosti $R_{ku}$ . . . . .	8
3.1.6	Grafična interpretacija rezultatov . . . . .	8
3.2	Izračuni za meritve iz kontaktnega merilnika . . . . .	13
3.2.1	Za želeno vrednost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$ . . . . .	13
3.2.2	Za želeno vrednost $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Zbirnik izračunanih in izmerjenih rezultatov</b>	<b>13</b>
4.1	Rezultati izmerjeni na kontaktnem merilniku . . . . .	13
4.2	Rezultati izračunani iz "raw" podatkov optičnega interferometra . . . . .	13
4.2.1	Rezultati razdeljenih podatkov . . . . .	13
4.2.2	Rezultati za celoten merilni razpon . . . . .	14
4.3	Rezultati izmerjeni na optičnem interferometru . . . . .	14
4.4	Relativni odstopki meritev . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Zaključek</b>	<b>16</b>
	<b>Literatura</b>	<b>17</b>

---

# 1. Uvod in definicija naloge

Tribologija je veda, ki se osredotoča na fizikalne pojave vezane na **površino** nekega elementa - geometrijskega telesa. Površina geometrijskega elementa v domeni klasičnega strojništva nastaja večinoma kot posledica nekega izdelovalnega postopka, zvrsti tehnoloških postopkov, ki tako ali drugače vplivajo na površino, prikazujejo sledeči odstavki [1]:

- Primarno oblikovanje (površina se formira običajno kot preslikava površine orodja na obdelovanec),
- preoblikovanje (površina se formira ob kontaktu orodje - obdelovanec),
- odrezovanje (površina se formira ob kontaktu orodje - obdelovanec),
- spajanje (vpliv toplote na makro-geometrijo in strukturo, netočnost postavitve elementov),
- toplotna obdelava (lahko vpliva na makro-geometrijo geometrijskega telesa, spremeni se struktura materiala neposredno pod površino),
- površinska obdelava (po definiciji spremeni topologijo površine).

Primarna težava, ki se pojavi pri opisovanju površin je, da so površinski defekti običajno bistveno manjši od gabaritnih dimenzij obravnavanega telesa. Prav tako, kot je že bilo nakazano površinski defekti izkazujejo kaotičnost v smislu narave več skal (makro-<sup>1</sup>, mikro-<sup>2</sup>, nano-<sup>3</sup> skala), navzdol so seveda omejeni z končno geometrijsko velikostjo atomov.

V ta namen površine pogosto popisujemo s parametri, ki izhajajo iz matematične statistike. Izkaže se, da je uporaba tovrstnih parametrov bolj praktična, saj v večini primerov ni aktualna detajlna topologija površine ampak samo osnovne lastnosti, npr. porazdelitev hrapavosti po normalni smeri <sup>4</sup>. Proti-primer temu je npr. lasersko punktiranje površine prikazano na sliki 5.

Za namen vaje so vnaprej izdelani valjčki približnega premera 20 mm in višine 8 mm, izdelani iz jekla 100Cr8, kaljeni na neznano trdoto.

Izvesti oz pojasniti je potrebno sledeče postopke:

1. Izmeriti hrapavost vzorcev na Kontaktnem tipalu s konico (Hommel),
2. s postopki brušenja in poliranja pripraviti površine z določeno vrednostjo parametra  $R_a$ ,
3. izbrana pripravljena vzorca izmeriti na Optičnem interferometru (Bruker),
4. na podlagi izmerjenih podatkov na Optičnem interferometru izračunati vrednosti parametrov  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$ , in  $R_{ku}$  za izbrana vzorca (za en izvožen profil),
5. komentirati razlike v izmerjenih vrednostih med kontaktnim tipalom s konico in optičnim interferometrom,
6. komentirati razlike med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi parametrov hrapavosti.

---

<sup>1</sup>skala večjih množic molekul - obstaja "kontinuum"

<sup>2</sup>skala molekul

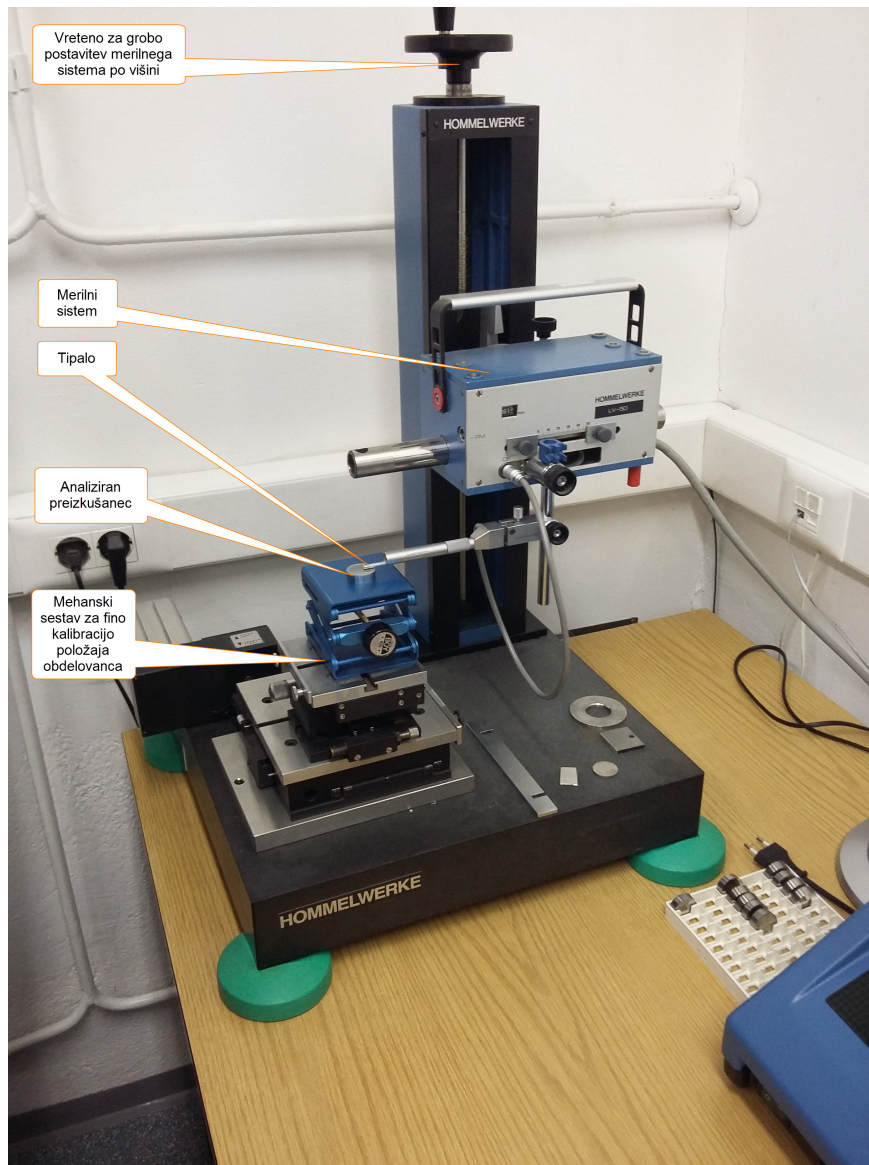
<sup>3</sup>skala atomov

<sup>4</sup>Tipični parametri za linijske izmerke so  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{sk}$  ...; za celotno topologijo pa so zamenjane osnovne črke - namesto  $R_a$  je  $S_a$  itd.[2], [3]

## 2. Meritve

### 2.1 Meritve na stroju za kontaktno merjenje hrapavosti s konico

Stroj je mehanske izvedbe - trda konica se giblje po površini ter preko sekundarnega merilnega sistema (LVDT, diferencialni induktor, interferometer ...) meri hrapavost na površini; paziti je potrebno, da preizkušavec ni iz premehklega materiala, saj v nasprotnem primeru lahko poškoduje površino. Merilnik je prikazan na sliki 1.



Slika 1: Dotikalni merilnik hrapavosti površine

### 2.2 Meritve na stroju za optično merjenje hrapavosti površine

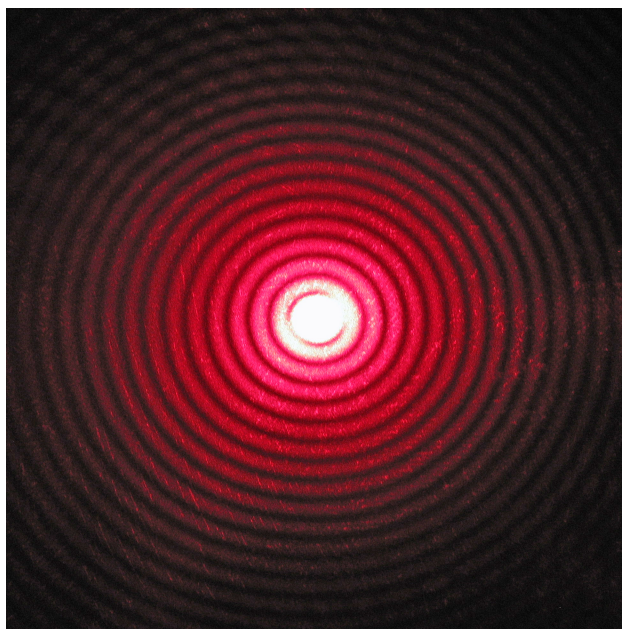
Tovrstni merilnik deluje na principu optičnega interferometra. Svetloba glede na točko odboja na površini interferira s sekundarnim odbojem žarka. Po interferenci je mogoče pri koherentnem, monokromatskem valovanju je mogoče preprosto opazovati interferenčne proge prikazane na sliki 2.

Zap. št. meritve	Zrnatost $\left[\frac{zrn}{in^2}\right]$	$R_a [\mu m]$	$R_q [\mu m]$
1	Kontrolni	0,179	-
2	$\in [400, 1200]$	$\in [0179, 0063]$	-
3	1200	0,032	-
4	1200	0,029	0,037
5	1200	0,027	0,034
6	1200	0,026	0,033

Tabela 1: Tabela izmerkov hrapavostnih parametrov s kontaktnim merjenjem glede na uporabljeno zrnatost brusnega papirja - želeni  $R_a = 0,03 \mu m$

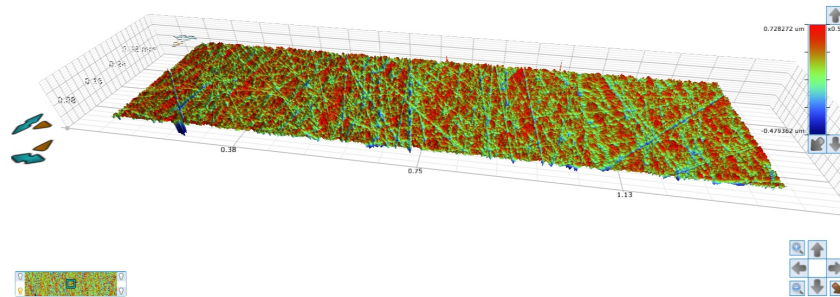
Zap. št. meritve	Zrnatost $\left[\frac{zrn}{in^2}\right]$	$R_a [\mu m]$	$R_q [\mu m]$
1	Kontrolni	0,119	-
2	600	0,09	-
3	800	0,088	-
4	1000	0,037	-
5	800	0,056	-
6	800	0,044	-
7	600	0,058	-
8	600	0,065	0,083
9	400	0,066	0,083
10	400	0,067	0,089
11	400	0,054	0,069
12	400	0,062	0,081

Tabela 2: Tabela izmerkov hrapavostnih parametrov s kontaktnim merjenjem glede na uporabljeno zrnatost brusnega papirja - želeni  $R_a = 0,07 \mu m$

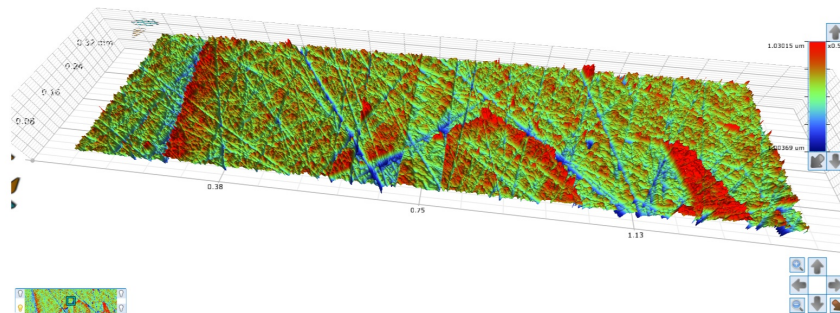


Slika 2: Interferenca laserskega žarka - projekcija na platno [4]

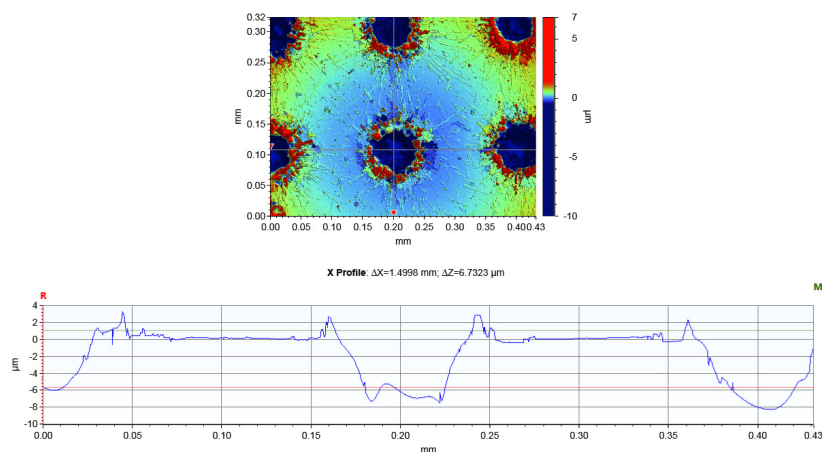
Slika površine prikazujeta sliki 3 in 4.



Slika 3: Izhodna slika meritve hrapavosti površine za  $R_a = 0,03 \mu\text{m}$



Slika 4: Izhodna slika meritve hrapavosti površine za  $R_a = 0,07 \mu\text{m}$



Slika 5: Lasersko punktiranje površine - slika površine in profil hrapavosti

Meritve so bile izdelane preko namenskega programa, izmerki so priloženi v datotekah *Profil003.csv* in *Profil007.csv*. Rezultate povzema tabela 6.

---

### 3. Izračuni

#### 3.1 Izračuni za meritve iz optičnega interferometra

Ker je obseg podatkov relativno velik (3731 diskretnih vrednosti) je potreba po avtomatizaciji procesa velika. Temu namenu služi program Matlab <sup>5</sup>. Postopek je moč opisati po sledeči shemi:

1. Filtriranje "raw" podatkov - odvzemanje vrednosti prve in zadnje dvanajestine podatkov (po standardu),
2. prikaz ter samokontrola,
3. transformacija podatkov - translacija za vrednost prvega izmerka,
4. razdelitev na 5 pod-območij,
5. izračun srednje linije - 1. statistični moment,
6. izračun srednjega absolutnega odstopka profila  $R_a$ ,
7. izračun standardne deviacije profila  $R_q$  - koren 2. statističnega momenta (koren variance),
8. izračun parametra asimetričnosti <sup>6</sup>  $R_{sk}$  - 3. statistični moment,
9. izračun parametra sploščenosti <sup>7</sup>  $R_{ku}$  - 4. statistični moment,
10. grafični prikaz podatkov.

Ker je nesmiselno vstavljati vseh 3731 podatkov v enačbo bodo navedeni samo prvi in zadnji izmerek ter rezultat pri meritvah s želeno hrapavostjo 0,03  $\mu\text{m}$ . Za želeno hrapavost 0,07  $\mu\text{m}$  bodo podani samo rezultati preračuna v tabeli. Izračun je bil izdelan v zapisu s plavajočo vejico z dvojno natančnostjo (64 bitov - efektivnih 16 decimalk). V poglavjih 3.1.1 do 3.1.5 so izračuni izdelani za celotno merilno območje, po enakem kopitu so izračuni izdelani za razdeljene izmerke, katerih rezultati so prikazani v tabelah 4 in 5.

##### 3.1.1 Izračun srednje linije profila

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i = \frac{0,038014 + \dots + 0,026618}{3731} = -2,1861 \cdot 10^{-4} \mu\text{m} \quad (1)$$

Pri čemer je  $z_i$  vektor izmerkov od referenčnega koordinatnega sistema <sup>8</sup>.

##### 3.1.2 Izračun srednjega absolutnega odstopka profila $R_a$

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i - m| = \frac{1}{3731} \cdot |0,038014 - (-2,1861 \cdot 10^{-4})| + \dots \\ + |0,026618 - (-2,1861 \cdot 10^{-4})| = 0,0289 \mu\text{m} \quad (2)$$

##### 3.1.3 Izračun standardne deviacije profila $R_q$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - m)^2} = \\ \sqrt{\frac{1}{3731} \cdot [(0,038014 - (-2,1861 \cdot 10^{-4}))^2 + \dots + (0,026618 - (-2,1861 \cdot 10^{-4}))^2]} = 0,0380 \mu\text{m} \quad (3)$$

---

<sup>5</sup>Verzija 2014b

<sup>6</sup>ang. *skewness*

<sup>7</sup>ang. *kurtosis*

<sup>8</sup>ang. *machine zero*

### 3.1.4 Izračun parametra asimetričnosti $R_{sk}$

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3 N} \sum_{i=1}^N (z_i - m)^3 =$$

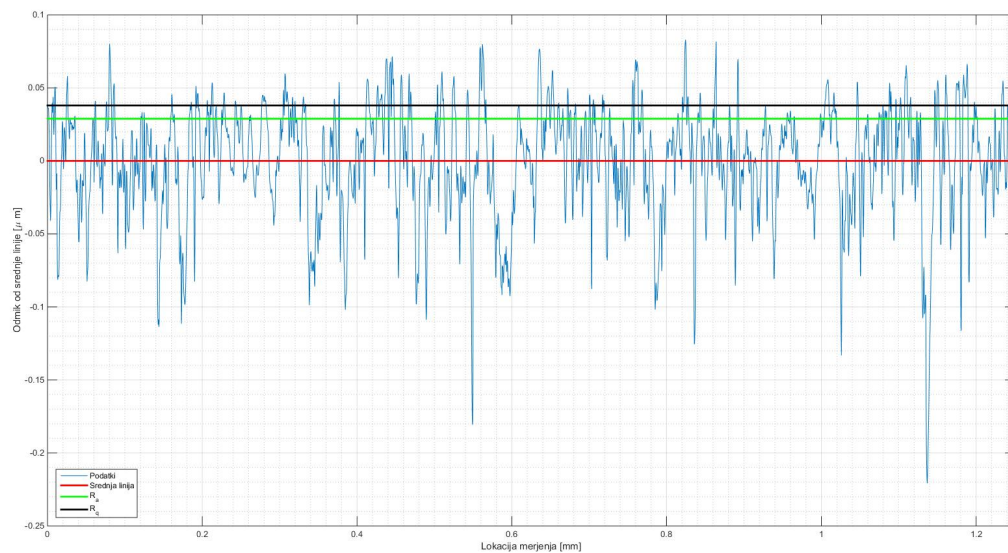
$$\frac{1}{0,0380^3 \cdot 3731} [(0,038014 - (-2,1861 \cdot 10^{-4}))^3 + \dots + (0,026618 - (-2,1861 \cdot 10^{-4}))^3] = -1,0898 \quad (4)$$

### 3.1.5 Izračun parametra sploščenosti $R_{ku}$

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4 N} \sum_{i=1}^N (z_i - m)^4 =$$

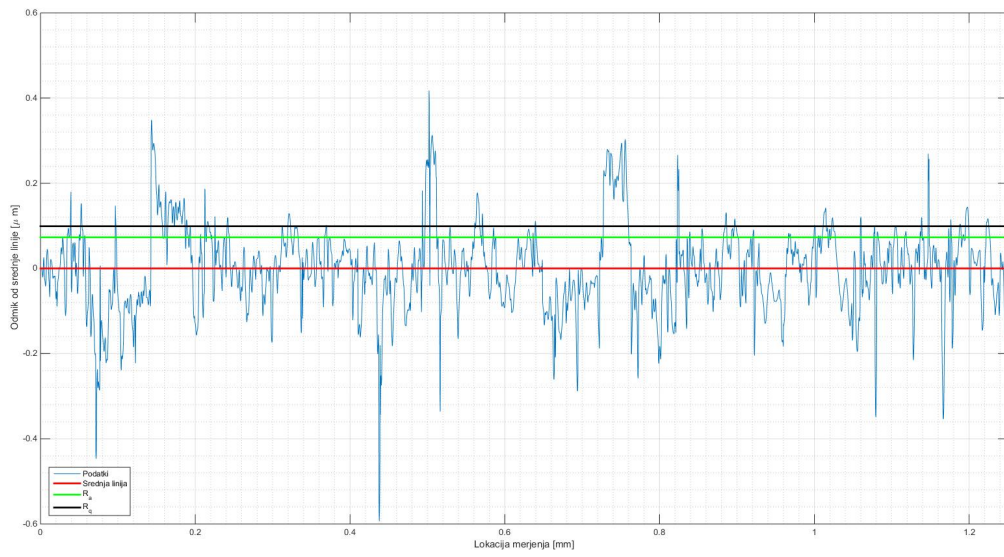
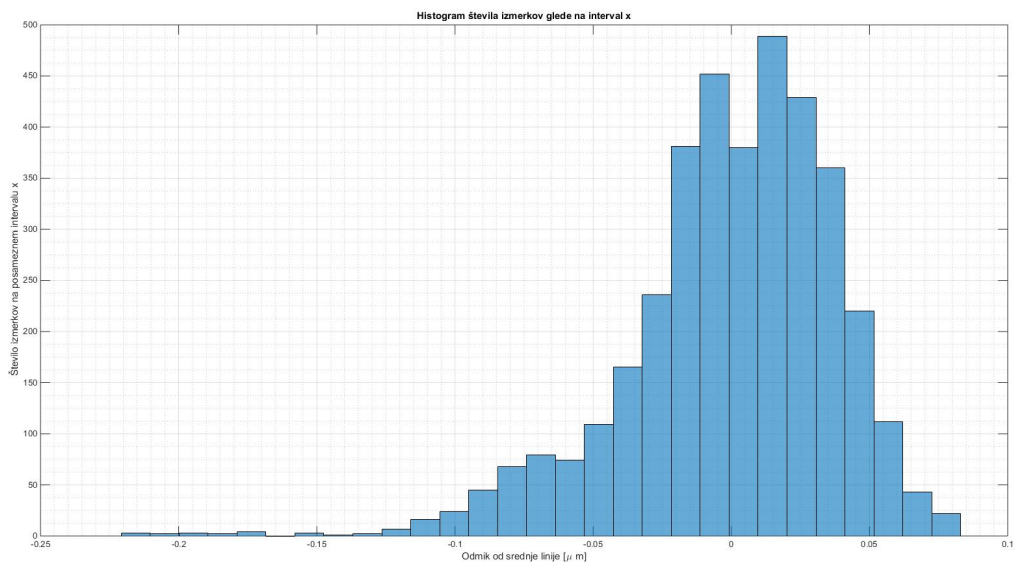
$$\frac{1}{0,0380^4 \cdot 3731} [(0,038014 - (-2,1861 \cdot 10^{-4}))^4 + \dots + (0,026618 - (-2,1861 \cdot 10^{-4}))^4] = 5,6090 \quad (5)$$

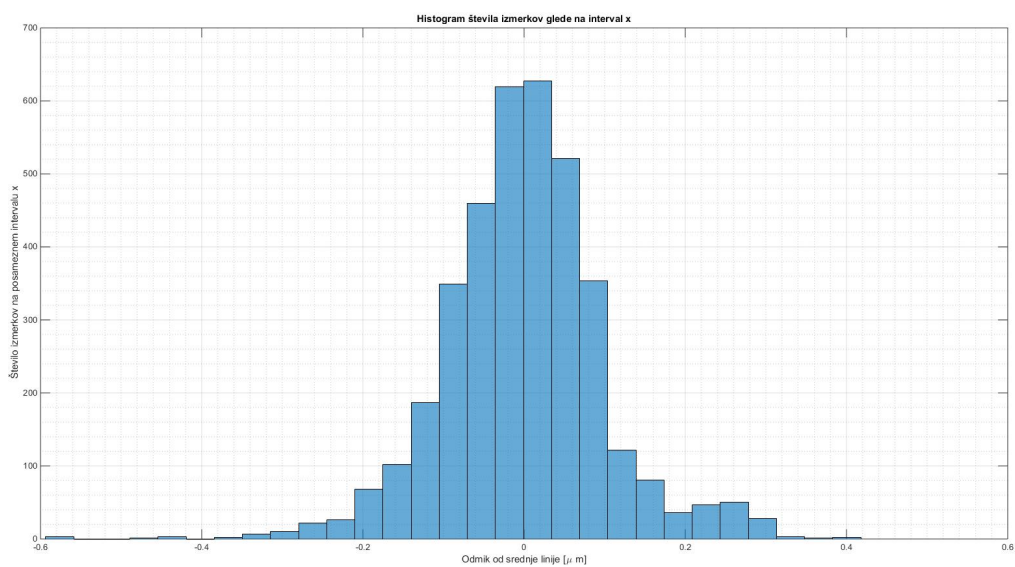
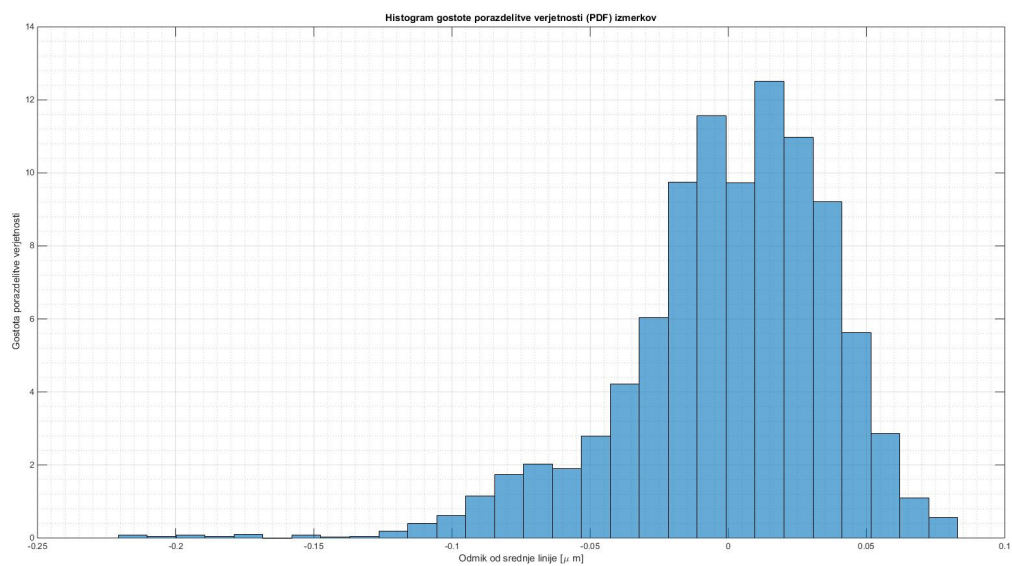
### 3.1.6 Grafična interpretacija rezultatov

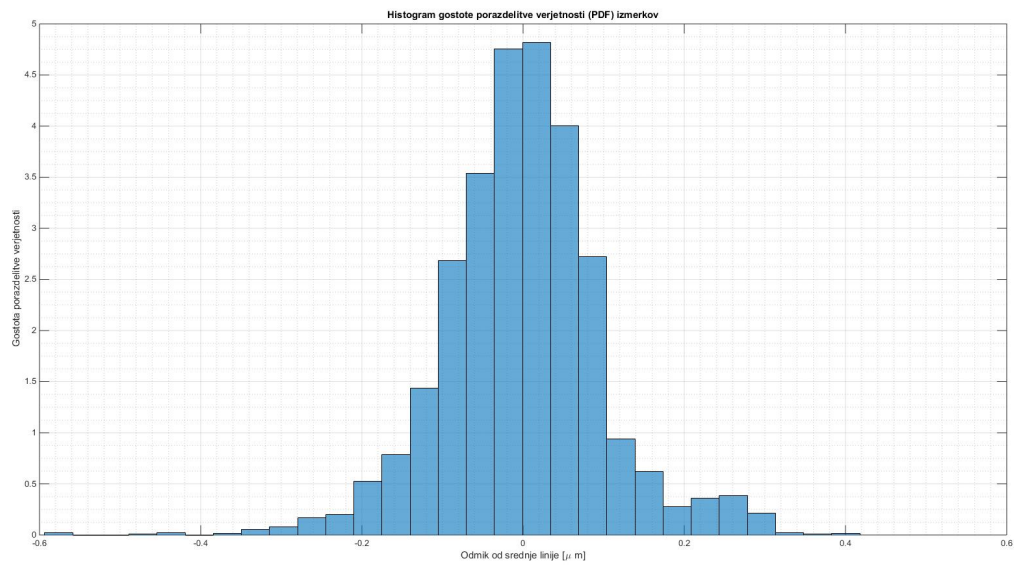
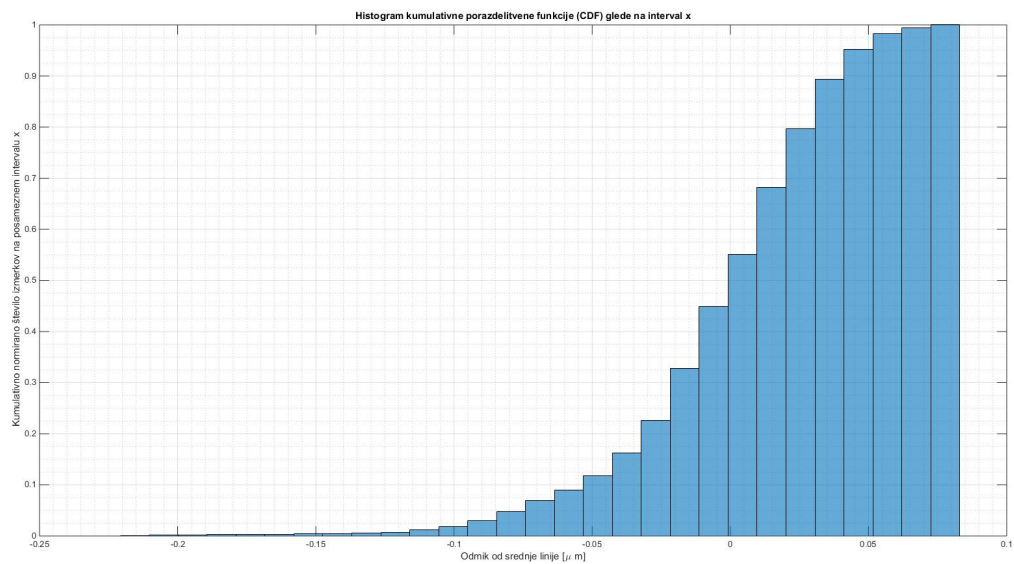


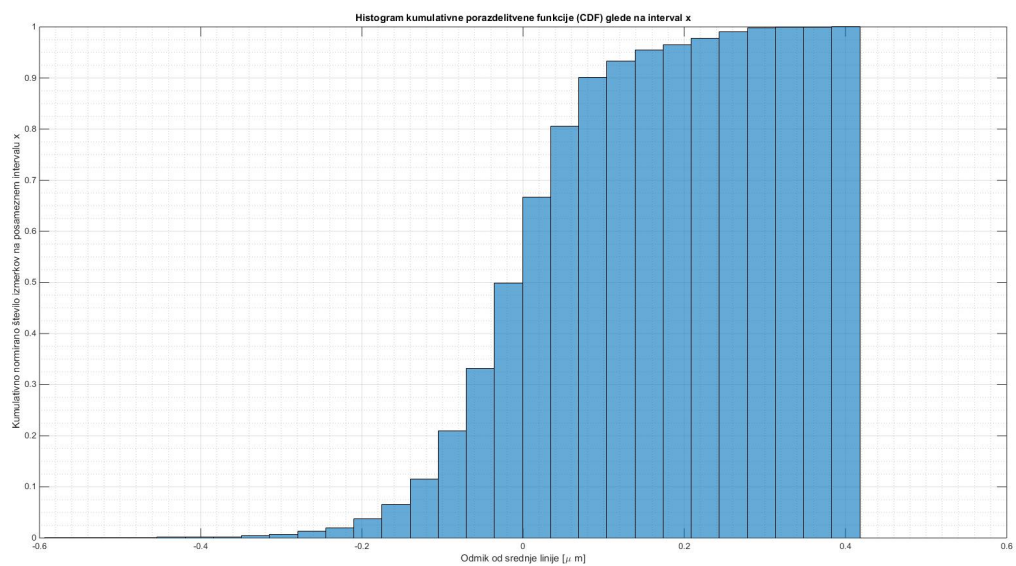
Slika 6: Podatki za želeno hrapavost  $0,03 \mu m$



Slika 7: Podatki za želeno hrapavost  $0,07 \mu\text{m}$ Slika 8: Histogram števila izmerkov v danih intervalih za želeno hrapavost  $0,03 \mu\text{m}$

Slika 9: Histogram števila izmerkov v danih intervalih za želeno hrapavost  $0,07 \mu\text{m}$ Slika 10: Histogram gostote porazdelitve verjetnosti za želeno hrapavost  $0,03 \mu\text{m}$

Slika 11: Histogram gostote porazdelitve verjetnosti za želeno hrapavost  $0,07 \mu\text{m}$ Slika 12: Histogram kumulativne porazdelitvene funkcije za želeno hrapavost  $0,03 \mu\text{m}$



Slika 13: Histogram kumulativne porazdelitvene funkcije za želeno hrapavost  $0,07 \mu\text{m}$

### 3.2 Izračuni za meritve iz kontaktnega merilnika

Za kontaktni merilnik so že podani končni rezultati dveh parametrov hrapavosti. Asimetričnosti in sploščenosti porazdelitve gostote verjetnosti izmerkov ni možno izračunati.

#### 3.2.1 Za želeno vrednost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$

$$\bar{R}_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{a_i} = \frac{0,029 + 0,027 + 0,026}{3} = 0,0273 \mu\text{m} \quad (6)$$

$$\bar{R}_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{q_i} = \frac{0,037 + 0,034 + 0,033}{3} = 0,0347 \mu\text{m} \quad (7)$$

#### 3.2.2 Za želeno vrednost $R_a = 0,07 \mu\text{m}$

$$\bar{R}_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{a_i} = \frac{0,065 + 0,066 + 0,067 + 0,054 + 0,062}{5} = 0,0628 \mu\text{m} \quad (8)$$

$$\bar{R}_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{q_i} = \frac{0,083 + 0,083 + 0,089 + 0,069 + 0,081}{5} = 0,0810 \mu\text{m} \quad (9)$$

## 4. Zbirnik izračunanih in izmerjenih rezultatov

### 4.1 Rezultati izmerjeni na kontaktnem merilniku

Hrapavostni parameter	Izračun za želeno vrednost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$	Izračun za želeno vrednost $R_a = 0,07 \mu\text{m}$
$\bar{R}_a [\mu\text{m}]$	<b>0,0273</b>	<b>0,0628</b>
$\bar{R}_q [\mu\text{m}]$	<b>0,0347</b>	<b>0,0810</b>

Tabela 3: Zbirna tabela preračunov za meritve na kontaktnem merilniku

### 4.2 Rezultati izračunani iz "raw" podatkov optičnega interferometra

#### 4.2.1 Rezultati razdeljenih podatkov

	1	2	3	4	5
$m [\mu\text{m}]$	-0.00092746	0.00060373	$-6.4162 \cdot 10^{-5}$	-0.00071617	$-1.296 \cdot 10^{-5}$
$R_a [\mu\text{m}]$	0.027104	0.029742	0.030378	0.024707	0.032492
$R_q [\mu\text{m}]$	0.034546	0.037201	0.039025	0.032802	0.045043
$R_{sk}$	-0.82098	-0.62007	-0.80148	-0.63906	-1.7882
$R_{ku}$	3.5881	2.9834	4.4688	4.2419	7.8393

Tabela 4: Rezultati statističnih momentov za želeno hrapavost  $0,03 \mu\text{m}$

	1	2	3	4	5
$m$ [ $\mu\text{m}$ ]	-0.0019885	-0.010028	0.013332	-0.011404	0.0025005
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.092816	0.056874	0.088907	0.064717	0.063373
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.11635	0.084402	0.1174	0.0846	0.084562
$R_{sk}$	-0.1068	-1.5461	0.6686	0.36052	-1.0697
$R_{ku}$	3.4925	12.78	3.4921	4.2797	5.4001

Tabela 5: Rezultati statističnih momentov za želeno hrapavost 0,07  $\mu\text{m}$ 

#### 4.2.2 Rezultati za celoten merilni razpon

Hrapavostni parameter	Izračun za želeno vrednost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$	Izračun za želeno vrednost $R_a = 0,07 \mu\text{m}$
$m$	-0,0002 $\mu\text{m}$	-0,0015 $\mu\text{m}$
$R_a$	<b>0,0289</b> $\mu\text{m}$	<b>0,0731</b> $\mu\text{m}$
$R_q$	<b>0,0380</b> $\mu\text{m}$	<b>0,0991</b> $\mu\text{m}$
$R_{sk}$	-1,0898	-0,0319
$R_{ku}$	5,6090	5,2812

Tabela 6: Zbirna tabela rezultatov statističnih momentov čez celoten merilni razpon

#### 4.3 Rezultati izmerjeni na optičnem interferometru

Tabela 7 predstavlja rezultate, ki jih poda software interferometra za večje merilno območje ( $\approx 4 \text{ mm}^2$ ). Ti izmerki so referenčni.

Hrapavostni parameter	Izmerek za želeno vrednost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$	Izmerek za želeno vrednost $R_a = 0,07 \mu\text{m}$
$R_a$	<b>0,0255</b> $\mu\text{m}$	<b>0,0747</b> $\mu\text{m}$
$R_q$	<b>0,0327</b> $\mu\text{m}$	<b>0,0955</b> $\mu\text{m}$
$R_{sk}$	-0,6246	-0,4991
$R_{ku}$	4,8000	4,5734

Tabela 7: Zbirna tabela referenčnih izmerkov za meritve na optičnem interferometru

#### 4.4 Relativni odstopki meritev

Odstopke posameznih merjenih veličin podaja tabela 8 in 9 v kateri je primerjava med referenčnimi vrednostmi, podanimi v tabeli 7 in rezultati v tabeli 3. Oceno relativnega pogreška podaja enačba 10.

$$e_r = \frac{|q - q_{ref}|}{q_{ref}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Hrapavostni parameter	Relativna napaka za želeno vrednost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$	Relativna napaka za želeno vrednost $R_a = 0,07 \mu\text{m}$
$R_a$	7,06 %	15,9 %
$R_q$	6,12 %	15,2 %

Tabela 8: Tabela relativnih odstopkov med posameznima tehnologijama merjenja

Odstopki tretjega in četrtega statističnega momenta podaja tabela . Primerjani sta referenčni rezultati v tabeli 7 in rezultati iz tabele 6, po enačbi 10.

Hrapavostni parameter	Relativna napaka za želeno vrednost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$	Relativna napaka za želeno vrednost $R_a = 0,07 \mu\text{m}$
$R_{sk}$	74,5 %	93,6 %
$R_{ku}$	16,9 %	15,5 %

Tabela 9: Tabela relativnih odstopkov med posameznimi tehnikami vrednotenja

## 5. Zaključek

Opazimo lahko, da obstajajo razlike med meritvami izvedenimi na kontaktnem merilniku hrapavosti in optičnem interferometru. Primarna dejstva, katera je potrebno upoštevati pri komentiranju so:

1. Na optičnem merilniku je bil narejena in analizirana samo ena linija hrapavostnega profila, pri mehanskem pa 3 oz. 4 izmerki,
2. Mehanski merilnik ima slabšo ločljivost kot optični - vpliv konice merilnika,
3. Obstoj filtriranja podatkov,

Dejstvo 1 zagovarja točnost mehanskega iz statistične ponovljivosti, dejstvo 2 pa optičnega. Filtriranje je obstajalo, vendar ga nismo posebej analizirali.

Meritve v tabeli 1 in 2 so po moji oceni irelevantne, namreč ni možno določiti kako točno bi vplivala zrnatost brusnega papirja na hrapavost površine. Za kvantitativno oceno bi bil potreben vsaj kontroliran in stacionaren povprečni stični tlak med telesoma (sila pritiska analiziranega objekta) ter kontrolo hitrosti pomika. Podrobne statistične analize (deviacija, PDF, CDF ...) pri kontaktnih merilnikih ni smiselno izdelati, namreč na voljo je zelo majhen vzorec izmerkov, iz katerih bi lahko dobili celo napačna predvidevanja o značilnostih površine.

Opazimo lahko zametek trenda pri relativni napaki med tehnologijama meritve - večja kot je hrapavost (širši kot je hrapavostni profil) večji so relativni odstopki, za potrditev tega dejstva pa bi potrebovali vsaj še eno ali dve meritvi pri različni hrapavosti. Kvantitativno so odstopki meritev pri bolj hrapavi površini relativno visoki, menim da vzrok tiči v popačenju profila zaradi geometrije tipala, namreč iz parametra deviacije hrapavostnega profila razvidno, da je pri večji hrapavosti približno 2,6-krat večji. Predlagam, da bi opravili brušenje na namenskem stroju ter opravili meritev na več različnih dotikalnih strojih; menim, da bi tako lahko potrdili, da napako predstavlja geometrija tipala.

Iz podatkov za celoten merilni razpon razberemo, da je standardna deviacija profila pričakovano večja pri meritvi z večjo hrapavostjo. Same številčne vrednosti (tabeli 6 in 7) od referenčnih odstopajo zelo malo - v povprečju je njihova natančnost velikostnega razreda 10 nm.

Bolj zanimiva sta tretji in četrti statistični moment. Če ju primerjamo v tabeli 6 in 7 opazimo, da so razlike precejšnje. Realno stanje govori, da je globalni maksimum krivulje gostote porazdelitve krajevno za srednjo aritmetično vrednostjo, drugače povedano, vrh grafa PDF je desno od srednje vrednosti. To razberem iz 3. statističnega momenta - t.j. *skewness*, oba izmerka pa govorita, da je maksimum na isti strani krivulje. Enako zgodbo nam pove tudi histogram na sliki 10, malo manj očitno pa tudi slika 11. Menim, da je to posledica obdelave - brusni papir s svojo strukturo povzroča v materialu raze oz. globeli, ki računsko pomenijo, da je več materiala na pozitivni strani srednje linije.

Četrti moment govori o sploščenosti vrha grafa PDF. Za normalno gostoto porazdelitve verjetnosti je ta vrednost enaka 3<sup>9</sup>. Rezultati govorijo, da je v primerjavi z Gaussovo porazdelitvijo dobljena porazdelitev v obeh primerih bolj ožja ter višja, kar implicira, da je kvaliteta obdelave v smislu doseganja srednje vrednosti dobra, povedano drugače, vrednosti v okolici srednje vrednosti se pojavljajo večkrat kot to predvideva normalna porazdelitev, povedano še drugače pomeni, da ima profil relativno enakomerno sled, obstajajo pa visoke raze in ozke globeli, kar bi tudi pričakovali pri tovrstnem postopku obdelave.

---

<sup>9</sup>Definiramo lahko tudi t.i. *excessive kurtosis* - odvečno kurtosis, ki vzame za referenčno vrednost 3



## Literatura

- [1] J. Bezjak: *Tehnologija materiala*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 1997.
- [2] *Strojniški priročnik*. Ljubljana: Littera picta, 2007.
- [3] TINT: *Diapozitivi za vaje pri predmetu tribologija*.
- [4] *Laserska interferenca - proge*. Dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction>, Zadnji ogled: 1. 3. 2016.
- [5] G. M. H. M. I. K. Bronštejn, K. A. Semendjajev: *Matematični priročnik*. Ljubljana: TZS, 2012.