

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Sven Bokulić

**Razvoj metode za mjerenje  
amplitude ultrazvučnih vibracija**

Zagreb, 2020.

Ovaj rad izrađen je na katedri za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu pod vodstvom Doc. dr. sc. Tomislava Staroveškog, dipl. ing. i predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2019./2020.

Sven Bokulić

# Sadržaj

1	Uvod . . . . .	1
2	Metode mjerenja amplitude ultrazvučnih vibracija . . . . .	4
	2.1 Trenutni pristupi mjerenja amplituda ultrazvučnih alata . . . . .	4
	2.2 Odabrana mjerna metoda . . . . .	4
	2.3 Verifikacija odabrane mjerne metode . . . . .	5
3	Mjerni sustav . . . . .	7
	3.1 Mjerni postav vizijskog sustava . . . . .	7
	3.2 Mjerni postav verifikacijske metode . . . . .	9
	3.3 Algoritam za mjerenje amplitude ultrazvučnog alata . . . . .	10
4	Provedena ispitivanja i rezultati mjerenja . . . . .	16
	4.1 Plan pokusa i rezultati mjerenja . . . . .	16
	4.2 Procjena mjerne nesigurnosti vizijskog sustava . . . . .	27
	4.3 Procjena mjerne nesigurnosti verifikacijske metode . . . . .	33
	4.4 Rezultati mjerenja . . . . .	35
5	Rasprava . . . . .	39
6	Zaključak . . . . .	40
	Literatura . . . . .	42

# Popis slika

1	Ultrazvučni alat za glodanje . . . . .	2
2	Skica verifikacijske metode . . . . .	5
3	Okidni signal doticaja sonotrode i ticala . . . . .	6
4	Ticalo i sonotroda . . . . .	6
5	Mjerni postav . . . . .	7
6	Prihvat sonotrode na alatni mikroskop . . . . .	8
7	Sklop prihvata izvora svjetlosti i njegovo usmjeravanje uz pomoć dva vijka i opruge . . . . .	9
8	Zglobni nosač ticala . . . . .	10
9	Ulazna slika mjerenja amplitude pristupom segmentaciji zasnovanoj na različici nezasićenih piksela . . . . .	11
10	Usporedba sonotrode u a) mirujućem i b) radnom stanju prilikom segmentacije zasnovane na zasićenim pikselima . . . . .	12
11	Usporedni prikaz segmentiranih bridova u radnom i mirujućem stanju sonotrode . . . . .	14
12	Histogramski prikaz rasipanja izmjerenih razlika za svaki redak u slici . . . . .	15
13	Dijagram toka algoritma za obradu slike i mjerenja amplitude . . . . .	15



# Popis tablica

1	Ponovljivost položaja dodira ticala i vrha sonotrode u stanju mirovanja . . .	17
2	Ponovljivost položaja dodira ticala i vrha sonotrode u radnom stanju sonotrode . . . . .	17
3	Ispitivanje odnosa metode verificiranja i vizijskog sustava . . . . .	18
4	Ponovljivost segmentacije brida u stanju mirovanja sonotrode . . . . .	20
5	Ponovljivost segmentacije brida u radnom stanju sonotrode . . . . .	21
6	Utjecaj ekspozicije - stanje mirovanja . . . . .	22
7	Utjecaj ekspozicije - radno stanje . . . . .	22
8	Utjecaj pojačanja - stanje mirovanja . . . . .	24
9	Utjecaj pojačanja - radno stanje . . . . .	24
10	Utjecaj redoslijeda učitavanja slika na rezultat mjerenja . . . . .	26
11	Utjecaj kuta zamaka sonotrode na rezultat mjerenja . . . . .	27
12	Rezultati uzoraka - Sonotroda 0 . . . . .	36
13	Rezultati uzoraka - Sonotroda 1 . . . . .	37

# Popis oznaka

$A$	m	Amplituda
$k$	-	Faktor pokrivanja
$N_f$	px	Broj piksela koji opisuju značajku
$Exp$	s	Vrijeme trajanja ekspozicije kamere
$Gain$	-	Pojačanje kamere
$\Delta l$	m	Promjena duljine
$R_f$	mm/px	Prostorna rezolucija
$S_f$	mm	Stvarna veličina značajke
$s$	m	Nepriistrana provjera standardne devijacije
$U$	m	Proširena mjerna nesigurnost
$u$	m	Mjerna nesigurnost
$u_c$	m	Sastavljena mjerna nesigurnost
$\delta l_{alignm}$	m	Utjecaj poravnanja sonotrode
$\delta l_c$	m	Utjecaj parametara akvizicije slike
$\delta l_{calib}$	m	Utjecaj umjeravanja kamere
$\delta l_{def}$	m	Utjecaj deformacija
$\delta l_{kont}$	m	Utjecaj kontakta
$\delta l_{res}$	m	Utjecaj prostorne rezolucije
$\delta l_T$	m	Utjecaj temperature

# 1 Uvod

Unazad nekoliko desetljeća ultrazvuk nailazi na čestu primjenu u području proizvodnog strojarstva. Provedena istraživanja ukazala su prednosti ultrazvučnih obrada, a najznačajnije primjene mogu se pronaći u zavarivanju i obradama odvajanjem čestica. Prednosti kod ultrazvučnog zavarivanja su povećanje produktivnosti, ujednačenost kvalitete zavara, te raznolikost materijala koje je moguće zavariti. Ultrazvukom potpomognute obrade odvajanjem čestica učinkovite su kod obradaka čije su geometrijske značajke okarakterizirane visokim i tankim stijenkama što omogućuje smanjena sila rezanja (uslijed smanjenog trenja) prilikom superponiranja ultrazvučne komponente na istu. Također se ostvaruje bolja kvaliteta površine i duži vijek trajanja reznog alata. Kod ultrazvukom potpomognutih obrada odvajanjem čestica (UAM engl. *Ultrasonic assistent machining*) to su ultrazvukom potpomognuto bušenje, tokarenje i glodanje [1]. S druge strane, ultrazvučna obrada (UMS engl. *Ultrasonic machining*) je nekonvencionalna metoda obrade odvojenom česticom gdje ultrazvuk ima glavnu ulogu u formiranju odvojene čestice. Također kod nekonvencionalnih obrada, ultrazvuk se koristi kod elektroerozije u svrhu pospješivanja odvođenja odvojene čestice, te u ultrazvučno aditivnim obradama što predstavlja spoj aditivne tehnologije i tehnologija obrade odvajanjem [2, 3].

Karakteristika ultrazvučnih alata je visoka frekvencija (od 20 kHz do 70 kHz) i mala amplituda titranja (od 10  $\mu\text{m}$  do 130  $\mu\text{m}$ ). Ultrazvučni alat (**Slika 1**) kod UAM-a najčešće je sklop reznog alata i držača alata u kojemu se pobuđuju vibracije. Različiti rezni alati imaju različite geometrijske značajke koje utječu na amplitudu i formu vibriranja. Uz navedeno na amplitudu alata utječe pobuda (izlazna snaga pojačala), te interakcija alata i obratka (na koju može utjecati način stezanja reznog alata, sila stezanja itd.) S druge strane frekvencija ultrazvučnog alata jednaka je rezonantnoj frekvenciji alata (koja ovisi o brzini zvuka kroz materijal i položaju (isponu) reznog alata u držaču alata), a moguće ju je izmjeriti ili očitati s pojačala kojime je alat pobuđen.

Konstrukcija ultrazvučnih alata složen je postupak, a zadaća mu je postizanje određenih karakteristika alata, odnosno vlastite (rezonantne) frekvencije, amplitude i forme vibriranja. Forma vibriranja može biti jednostavna (duž jedne osi) ili složena [4]. Konstrukcija ultrazvučnih alata provodi se uz pomoć analitičkih metoda i metodom konačnih elemenata gdje obje metode pretpostavljaju poznata mehanička svojstva materijala od kojega će alat biti izrađen. Kod jednostavnih formi vibriranja analitički pristup pokazao se pouzdan, dok je za postizanje složenijih formi vibriranja najčešće nužno koristiti metodu konačnih elemenata. Taj postupak je često dugotrajan i može rezultirati odstupanjima od stvarnih karakteristika (frekvencije i amplitude vibriranja) [5].

Odstupanja od željenih frekvencijskih karakteristika alata mogu biti prouzročena uslijed grešaka u odabranom pristupu proračuna, odstupanjima u kemijskim i mehaničkim karakteristikama odabranog materijala, te greškama proizašlim u procesu obrade (dimenzijska odstupanja ili odstupanja od oblika). Dok frekvenciju alata možemo izmjeriti, određivanje amplitude alata je puno zahtjevnije.



**Slika 1.** Ultrazvučni alat za glodanje

Amplituda ultrazvučnih alata izravno utječe na dimenzijsku točnost obrade, te njezino nepoznavanje rezultira dimenzijskim odstupanjima. Iz tog razloga, prije obrade potrebno je provesti prednamještanje alata u cilju određivanja položaja vrha alata uzimajući u obzir i amplitudu kojom alat vibrira. Ovisno o tome radi li se o gruboj ili finoj, odnosno završnoj obradi mogući su zahtjevi nad podešavanjem amplitude alata. U tom slučaju tražena amplituda se postiže podešavanjem izlazne snage pojačala.

Prethodno navedeni razlozi ukazuju na potrebu mjerenja amplitude ultrazvučnih alata čime se ovaj rad i bavi. Cilj rada je predložiti i ispitati metodu mjerenja amplitude korištenjem strojnog vida, koja prema dostupnoj literaturi do sada nije korištena.

## 2 Metode mjerenja amplitude ultrazvučnih vibracija

### 2.1 Trenutni pristupi mjerenja amplituda ultrazvučnih alata

Usljed malih amplituda i relativno visokih frekvencija kojima ultrazvučni alat oscilira mjerenje amplitude kontaktnim metodama nije poželjno. Kontaktne metode mjerenja općenito su tromije, te je pitanje odziva mjernog sustava na navedenu pobudu. Također, tijekom eksploatacije uslijed izlaganja vibracijama u kratkom roku može doći do oštećenja mehanizma ili ticala mjernog uređaja.

Prema dostupnoj literaturi, za potrebe mjerenja amplitude korištene su beskontaktno metode mjerenja. Korišteni su senzori kao što su laserski vibrometri (PSV-400, Polytec) [6], beskontaktni senzori vibracija na principu prikupljanja emitirane svjetlosti odaslane optičkim vlaknom (MTI-2100, Mtiinstruments) [7, 8], visokobrzinski triangulacijski senzor udaljenosti (LK-G5000, Keyence) [9] i slični. Osim mogućnosti mjerenja amplitude ultrazvučnih vibracija, zajedničko svojstvo ovih senzora je i njihova relativno visoka cijena.

Mogućnost izrade cjenovno prihvatljivijeg sustava mjerenja amplitude ultrazvučnih vibracija uz zadržavanje razine točnosti ujedno je i motivacija za ispitivanje i razvoj mjernog sustava korištenjem strojnog vida.

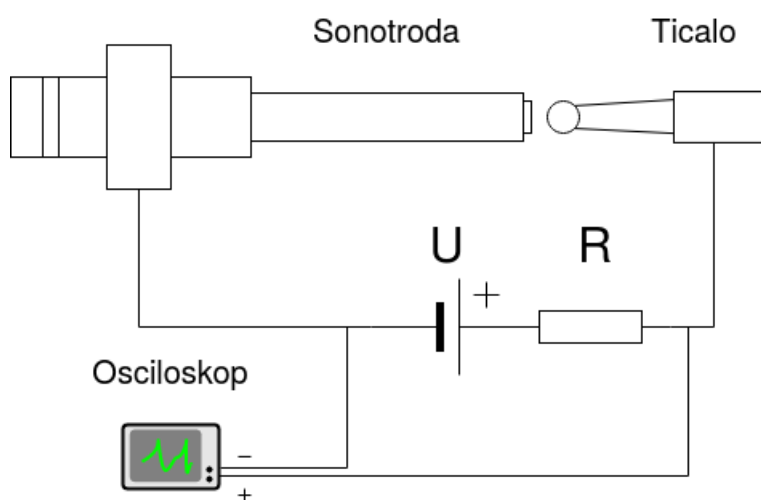
### 2.2 Odabrana mjerna metoda

Prednosti beskontaktnih metode pokazale su smjer u kojemu treba tražiti novo rješenje. Mogućnost koja se do sada nije razmatrala, a ima potencijal je upotreba mikroskopskog objektiva i kamere. Mikroskopski objektiv omogućuje optičko povećanje, dok kamera bilježi digitalni zapis tako uvećane slike. Brzina gibanja daleko veća od brzine učitavanja slike rezultira zamućenjem područja u kojemu ultrazvučni alat oscilira. Područje zamućenja slike jednako je amplitudi ultrazvučnog alata. Potencijalni utjecaji na

ovu metodu mjerenja amplitude su maleni, dok je cijena mikroskopskog objektiva i industrijske kamere znatno niža od navedenih uređaja.

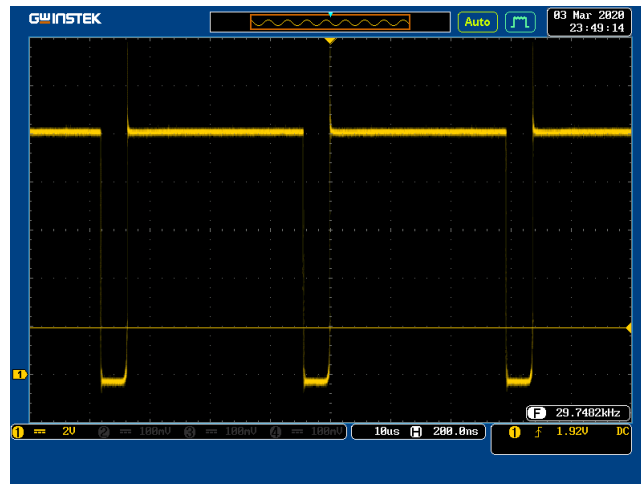
### 2.3 Verifikacija odabrane mjerne metode

Pristup beskontaktnim sensorima kao što su korišteni u ranije navedenim istraživanjima nije moguć, stoga je verifikacija izabrane metode provedena kontaktnim pristupom.



Slika 2. Skica verifikacijske metode

Metoda provjere odabrane metode temelji se na mjerenju položaja u kojem ticalo dotiče vrh sonotrode. Mjerenje položaja ostvaruje se interferometrom, dok se trenutak dodira zasniva na okidnom signalu (Slika 3) nastalog kao posljedica zatvaranja strujnog kruga između ticala i vrha sonotrode (Slika 2), (Slika 4). Ticalo i sonotroda u otvorenom strujnom krugu su na različitim potencijalima (ticalo je na višem potencijalu u odnosu na sonotrodu). Nakon međusobnog dodira strujni krug je zatvoren, te su sonotroda i ticalo na istom potencijalu. Okidni signal prati se osciloskopom (GW Instek GDS-3154), dok je interferometar (HP 5508A) u mogućnosti mjeriti s rezolucijom od nekoliko nano metara.



Slika 3. Okidni signal doticaja sonotrode i ticala



Slika 4. Ticalo i sonotroda



### 3 Mjerni sustav

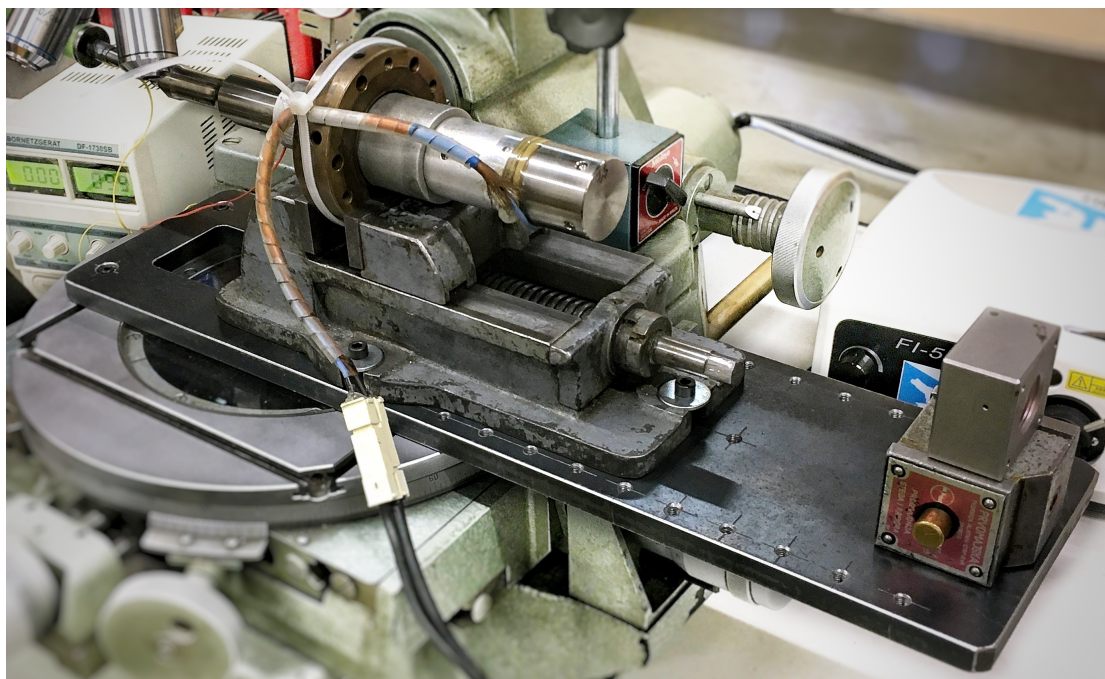
U cilju smanjenja utjecaja okolišnih uvjeta i lakšeg praćenja procesa gdje će razlika u rezultatima ukazivati na utjecaje specifične za pojedinu od metoda, verifikaciju odabrane metode odlučeno je provoditi paralelno s mjerenjima odabrane metode.



Slika 5. Mjerni postav

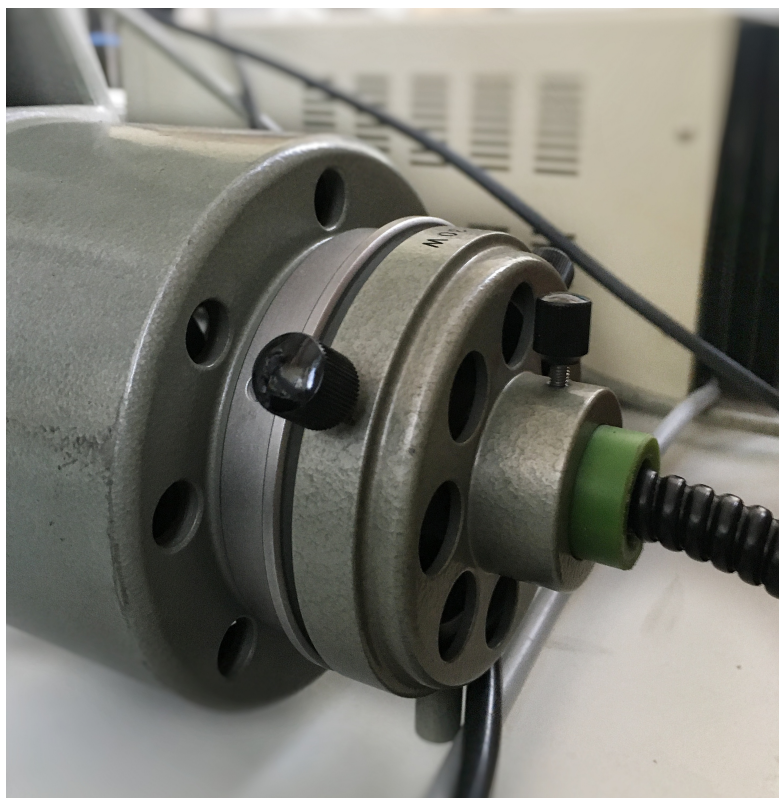
#### 3.1 Mjerni postav vizijskog sustava

Mjerni postav (Slika 5) izveden je modificiranjem alatnog mikroskopa. Alatni mikroskop odabran je zbog krutosti i izvedbe koja omogućuje potrebne preinake. S alatnog mikroskopa uklonjen je postojeći mikroskop i na njegovo mjesto postavljena je kamera s mikroskopskim objektivom. Ultrazvučni pretvornik s sonotrodom stegnut je u škripac učvršćen na prethodno izrađenoj montažnoj ploči, a montažna ploča stegnuta je na pomični stol alatnog mikroskopa (Slika 6).



**Slika 6.** Prihvat sonotrode na alatni mikroskop

Za potrebe odabrane metode mjerenja osigurana je pozadinska rasvjeta. U prethodnoj izvedbi alatni mikroskop imao je sustav za pozadinsku rasvjetu. Rasvjeta je bila izvedena na način da se svjetlost dobiva žaruljom na žarnu nit. Svjetlost iz takvog izvora nije usmjerena, te samo dio svjetlosti obasjava optički sustav. Postojeći optički sustav se sastoji od skupine leća, kolimatora i zrcala postavljenog pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na smjer pružanja svjetlosti čime je svjetlost zakrenuta za  $90^\circ$  u smjeru kamere. Postojeći izvor svjetlosti zamijenjen je LED izvorom svjetlosti namijenjenom za mikroskope (model FI-5030), te je za njegovu ugradnju izrađen prilagodnik na postojeći prihvat rasvjete alatnog mikroskopa (**Slika 7**). Pozicioniranje kamere po visini i nagibu konstrukcijski je riješeno na samom alatnom mikroskopu, stoga nije bilo potrebe za dodatnim preinakama.

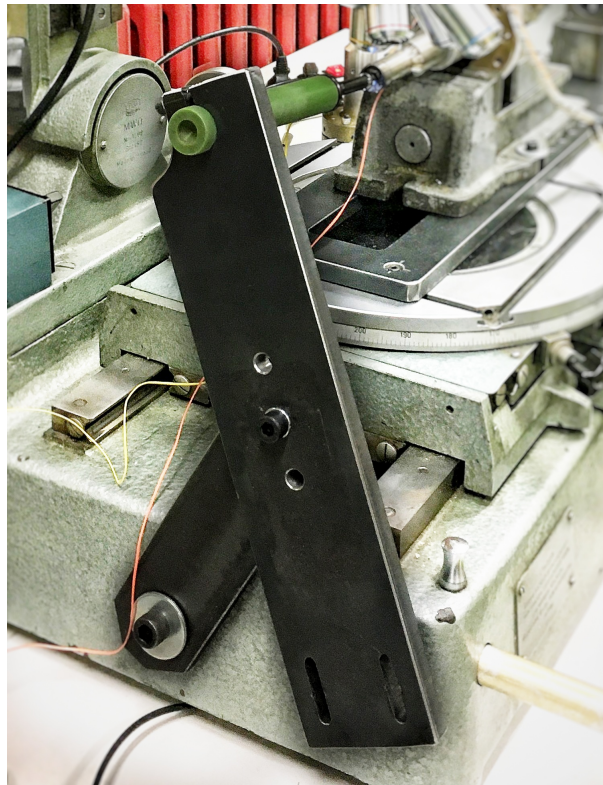


**Slika 7.** Sklop prihvata izvora svjetlosti i njegovo usmjeravanje uz pomoć dva vijka i opruge

### 3.2 Mjerni postav verifikacijske metode

Za kontaktnu metodu verifikacije potrebno je realizirati pozicioniranje ticala u osi translacije sonotrode i njeno električno odvajanje od ostatka alatnog mikroskopa. U tu svrhu izrađen je zglobov učvršćen na bok postolja alatnog mikroskopa (**Slika 8**). Za potrebe mjerenja pomaka sonotrode koristi se laserski interferometar. Zrcalo od kojeg se odbija zraka interferometra mora pratiti translacijsko gibanje sonotrode pa je iz tog razloga čvrsto vezano za pomični stol alatnog mikroskopa preko izrađenog prihvata (**Slika 6**).

Uz navedene dijelove mjernog postava potreban je i osciloskop kojime se prati otvaranje i zatvaranje strujnog kruga, izvor napajanja za okidni strujni krug, upravljačka jedinica interferometra, te ultrazvučno pojačalo.



Slika 8. Zglobni nosač ticala

### 3.3 Algoritam za mjerenje amplitude ultrazvučnog alata

Programska podrška potrebna za obradu slika odabrane metode mjerenja temeljene na vizijskom sustavu izrađena je pomoću programskih biblioteka pisanih u otvorenom kodu (engl. *Open Source*). Korišteni programski jezik je Python 3.5 [10] s popratnim bibliotekama među kojima je i OpenCV [11] (engl. *Open source computer vision*). Korišteni operativni sustav je Ubuntu 16.04 LTS.

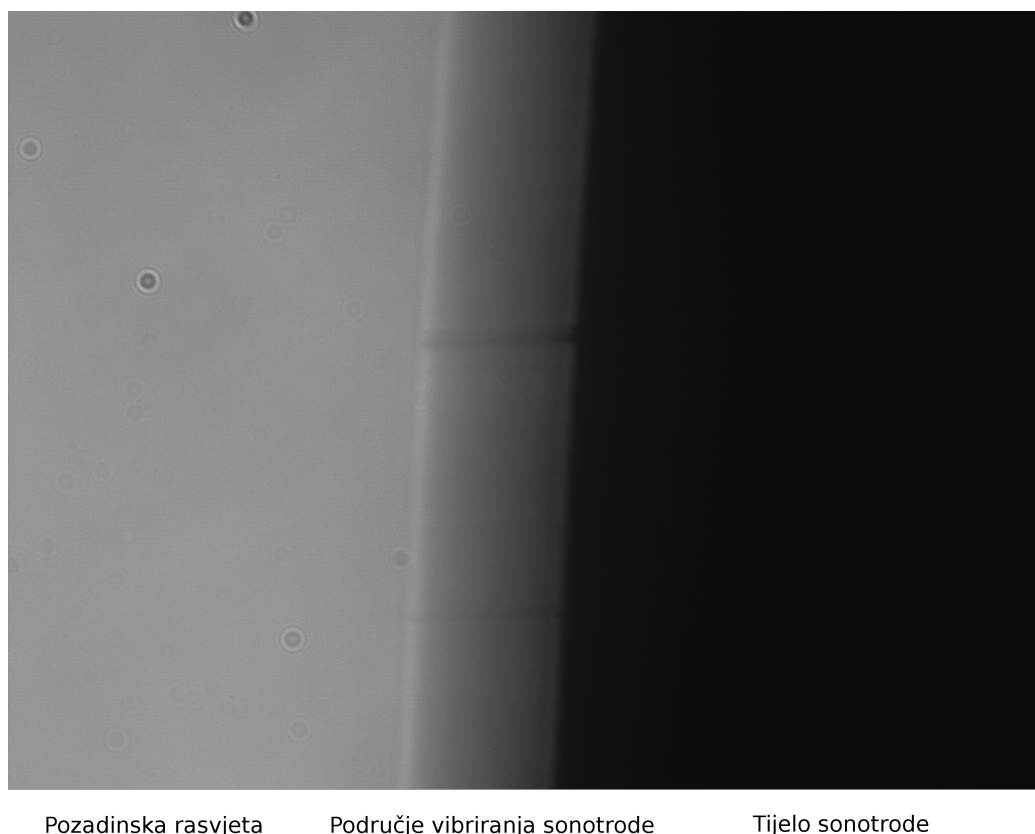
Iz učitanih uzoraka potrebno je segmentirati (izdvojiti) vrh alata. Segmentaciju je moguće provesti na dva načina:

1. Segmentacijom zasnovanom na razlici zasićenih piksela
2. Segmentacijom zasnovanom na razlici nezasićenih piksela

Prilikom pristupa segmentaciji zasnovanoj na razlici nezasićenih piksela, slika se dobiva kraćom ekspozicijom. Područje vibriranja ultrazvučnog alata vidljivo je kao "zamućenje"



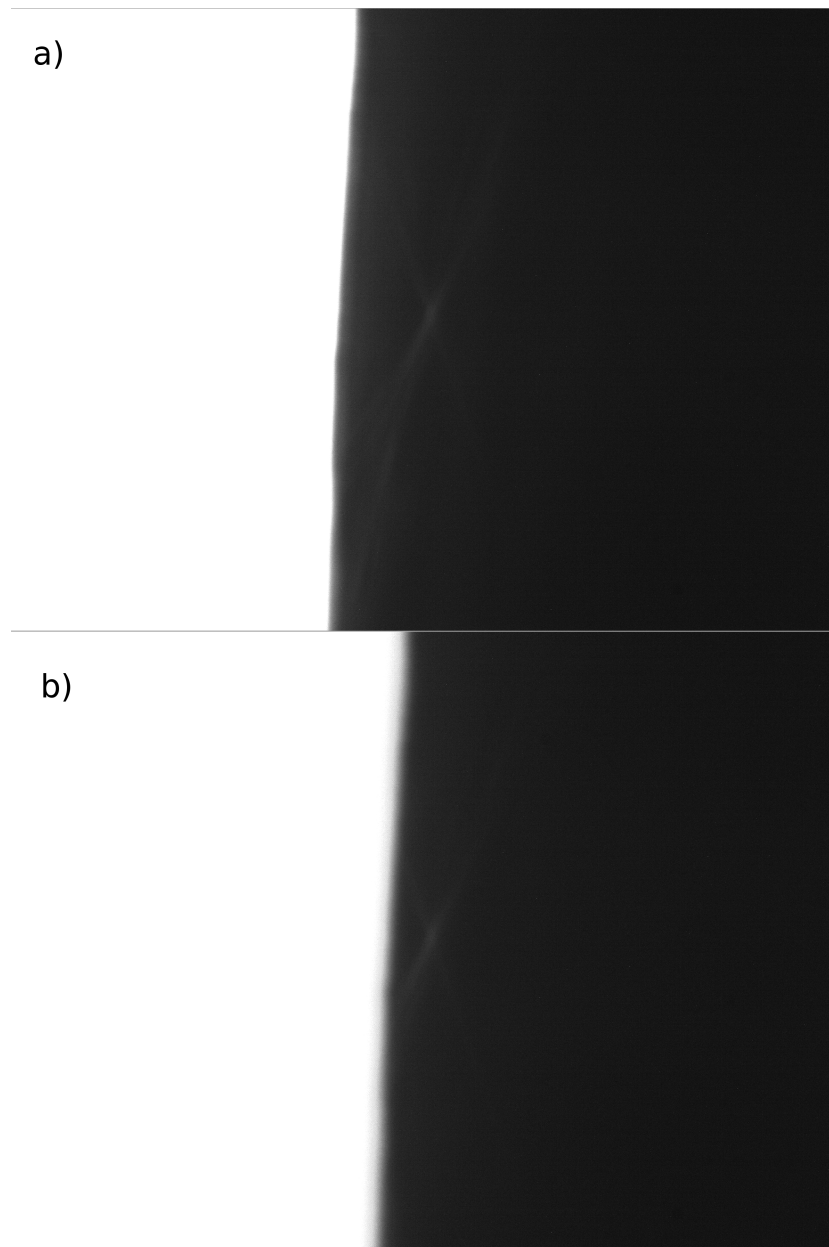
prijelaza između svjetlijeg i tamnijeg područja (**Slika 9**). Za segmentaciju su potrebna dva praga propuštanja. Prvim pragom se izdvaja područje vibriranja i tijela sonotrode u odnosu na pozadinsku rasvjetu, dok se drugim pragom izdvaja područje vibriranja i pozadinske rasvjete u odnosu na tijelo sonotrode. Razlika segmentiranih područja jednak je područje vibriranja, a širina područja proporcionalna je amplitudi vibriranja alata. Time je omogućeno mjerenje amplitude pomoću jedne učitane slike.



**Slika 9.** Ulazna slika mjerenja amplitude pristupom segmentaciji zasnovanoj na razlici nezasićenih piksela

Segmentacija zasnovana na razlici zasićenih piksela (**Slika 10**) postiže se jakim pozadinskom rasvjetom i dugom ekspozicijom. Cilj izražene rasvjete je zasićenje senzora kamere u regiji interesa koji su izloženi rasvjetom za vrijeme mirovanja i za vrijeme rada sonotrode. Tako podešenim vizijskim sustavom dobivena slika u području osciliranja sonotrode ima potpuno zasićene piksele, time se dobiva dojam skraćivanja sonotrode u radnom stanju. Ovim pristupom potrebno je učitati dvije slike. Jednu silu u stanju mirovanja, te

drugu u radnom stanju sonotrode. Presjek segmentiranih područja predstavlja područje vibriranja, dok je širina područja proporcionalna polovici amplitude vibriranja alata.



**Slika 10.** Usporedba sonotrode u a) mirujućem i b) radnom stanju prilikom segmentacije zasnovane na zasićenim pikselima

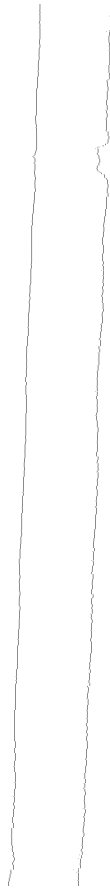
Oba pristupa su podvrgnuta ispitivanju mijenjanjem parametara akvizicije i pozadinske rasvjete. Prednost pri odabiru pristupa mjerenju dana je metodi koja je pokazala manju osjetljivost na promjenu akvizicijskih parametara kamere, pozadinske rasvjete i vanjskih utjecaja.

Kod pristupa segmentaciji nezasićenih piksela kontrast između područja pozadinske rasvjete, područja vibriranja sonotrode i tijela sonotrode je vrlo malen (**Slika 9**). Provedena ispitivanja pokazala su kako se granice segmentacije značajno pomiče za male promjene parametara akvizicije i pozadinske rasvjete. Osim problema pomicanja granica segmentacije veliki problem je i visoka razina šuma uzrokovana niskim kontrastom čime je prijelazno područje između segmenata široko. Utjecaj okolišne rasvjete u ovom slučaju je nepovoljno utjecao na segmentaciju područja.

Kontrast prilikom segmentacije zasićenih piksela je izrazito visok (**Slika 10**). Time je ostvarena niska razina šuma i jasna granica segmentacije između pozadinske rasvjete i vrha sonotrode. Ispitivanja su pokazala kako se za promjene parametara akvizicije i promjene pozadinskog osvjetljenja granica segmentacija ne pomiče značajno. Također je utvrđeno da okolišna rasvjeta nema utjecaj na segmentaciju područja.

Na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem odlučeno je mjerenje amplitude provoditi segmentacijom zasićenih piksela uz uvjet da su parametri akvizicije slike uvijek isti.

Učitani uzorci se uz pomoć programske podrške obrađuju. Obrada slike započinje filtriranjem binarnim pragom s vrijednošću praga propuštanja određenog uz pomoć Otsu metode [12]. U cilju uklanjanja šuma nastalog u zoni vrha sonotrode nakon binarnog filtriranja koristi se morfološka operacija otvaranja (engl. Opening) [13]. Obje učitane slike prolaze kroz jednaki proces. Razlika između njih je položaj segmentiranih dijelova slike (**Slika 11**).

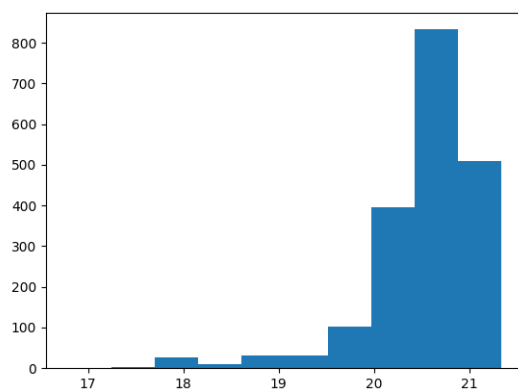


**Slika 11.** Usporedni prikaz segmentiranih bridova u radnom i mirujućem stanju sonotrode

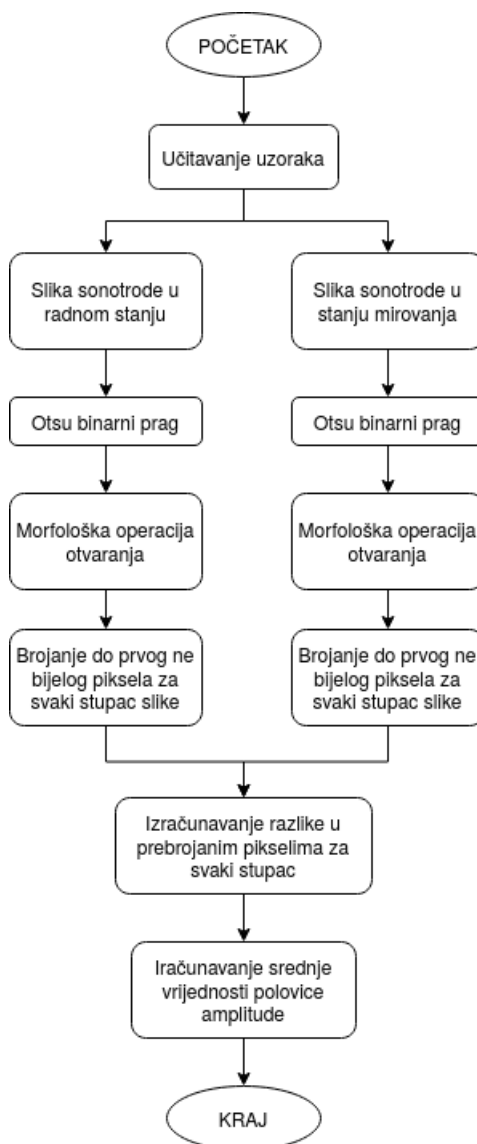
Tako obrađene slike spremne su za analizu, odnosno mjerenje amplitude. Mjerenje se sastoji od prebrojavanja bijelih piksela od lijevog kraja slike prema desnom do prvog crnog piksela. Taj postupak se odvija za svaki redak slikovnog zapisa. Rezultat mjerenja je prosjek razlika prebrojanih piksela svakog retka slikovnog zapisa sonotrode u stanju mirovanja i radnom stanju. Na **slici 12** prikazano je rasipanje izmjerenih vrijednosti za svaki redak slike. Uprosječena razlika svih redova slika jednaka je polovici amplitude sonotrode.

Navedeni algoritam prikazan je i u obliku dijagrama toka (**Slika 13**).





Slika 12. Histogramski prikaz rasipanja izmjerenih razlika za svaki redak u slici



Slika 13. Dijagram toka algoritma za obradu slike i mjerenja amplitude

## 4 Provedena ispitivanja i rezultati mjerenja

Za potrebe ispitivanja metode mjerenja amplitude ultrazvučnih vibracija korištena je sonotroda. Sonotroda je ultrazvučni alat, a najčešće se primjenjuje za zavarivanje. U sklopu ispitivanja mjerne metode korištene su dvije sonotrode različitih duljina.

### 4.1 Plan pokusa i rezultati mjerenja

U ovom poglavlju prikazat će se provedena ispitivanja koja su rađena u svrhu određivanja utjecaja na rezultat obje metode mjerenja amplitude. Svrha im je uočiti utjecaje, utvrditi njihovu prirodu ponašanja, u kojoj mjeri utječe na mjerni rezultat, te kako ih umanjiti ili držati pod kontrolom. Uz pomoć dobivenih rezultata kasnije je procijenjena i mjerna nesigurnost za obje metode.

#### **Ponovljivost položaja dodira ticala i vrha sonotrode u stanju mirovanja i u radnom stanju**

Svrha ovog ispitivanja je utvrditi ponovljivost određivanja položaja točke dodira sonotrode i ticala, a uvjeti koji mogu utjecati na nju su stanje površine, karakteristike mikrometarskog vijka kojime se pomiče stol alatnog mikroskopa i napon okidnog kruga koji se zasebno razmatra. Uspon mikrometarskog vijka je 1 mm što znači da će se za 1° okretaja vijka stol pomaknuti za 2.78  $\mu\text{m}$ . Ovako mala rezolucija pomaka sonotrode ujedno je i najveći nedostatak korištenog ispitnog postava.

Ispitivanje je provedeno tako da se vrhom sonotrode dotakne ticalo i točka u tom položaju postavi kao nultočka interferometara. Zatim se sonotroda odmakne od ticala te ponovno približava do uspostavljanja međusobnog dodira. Očitana vrijednost na interferometru jednaka je razlici položaja dodira sonotrode i ticala. Dodir ticala i vrha sonotrode prati se zatvaranjem strujnog kruga pomoću osciloskopa. Izmjereni rezultati prikazani su u **tablici 1** za slučaj sonotrode u mirovanju i **tablici 2** za slučaj sonotrode u radnom

stanju.

**Tablica 1**

Ponovljivost položaja dodira ticala i vrha sonotrode u stanju mirovanja

Redni broj mjerenja	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]	Redni broj mjerenja	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	-0.5	10	0.6
1	-0.1	11	0.3
2	-0.1	12	0.1
3	0.5	13	0.4
4	0.7	14	-0.2
5	-0.2	15	0.2
6	0.2	16	0.1
7	0.6	17	0.1
8	0.5	18	0.6
9	0.9	19	0.3
Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]			0.25
Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]			0.3466
Nepriistrana procjena standardne devijacije [ $\mu\text{m}$ ]			0.3576
Raspon [ $\mu\text{m}$ ]			1.4

**Tablica 2**

Ponovljivost položaja dodira ticala i vrha sonotrode u radnom stanju sonotrode

Redni broj mjerenja	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]	Redni broj mjerenja	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	0.4	10	0
1	0.2	11	0.1
2	0.4	12	0.2
3	0.5	13	0.6
4	0.1	14	0.2
5	0.2	15	0.3
6	0.1	16	0.6
7	0.6	17	0.2
8	0.4	18	0.3
9	0.3	19	0.5
Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]			0.31
Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]			0.1786
Nepriistrana procjena standardne devijacije [ $\mu\text{m}$ ]			0.1832
Raspon [ $\mu\text{m}$ ]			0.6

## Odnos metoda verificiranja i vizijskog sustava

Svrha ispitivanja je ispitati odnos izmjerenog pomaka vrha sonotrode korištenjem interferometra i vizijskog sustava. Provodi se na način da se sonotroda u stanju mirovanja pomakne za ne određenu vrijednost, te se isti pomak izmjeri interferometrom i vizijskim sustavom korištenjem prethodno opisanog algoritma.

Uzorci su uzimati uzduž cijelog kadra kamere s lijeve na desnu stranu. Ispitivanjem se željelo utvrditi postoji li razlika u izmjerenim vrijednostima između dvije metode i kolika je, te mijenja li se razlika izmjerenih vrijednosti ovisno o dijelu kadra u kojem je uzet uzorak.

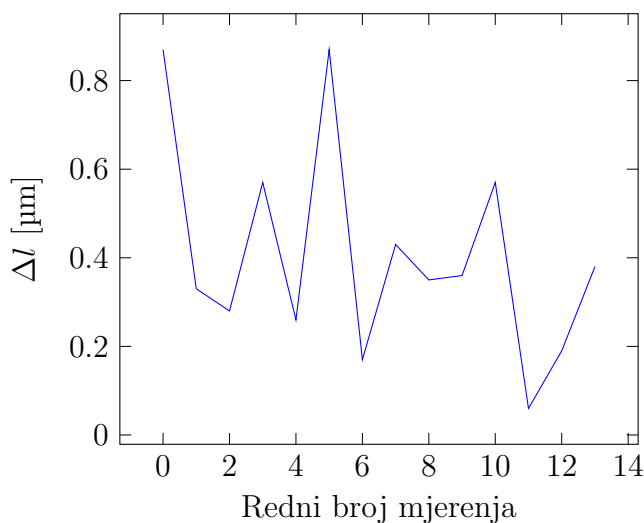
**Tablica 3**

Ispitivanje odnosa metode verificiranja i vizijskog sustava

Redni broj mjerenja	$l_{Interferometar}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$l_{Vizijski\ sustav}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	20.3	21.27	0.87
1	20.2	20.53	0.33
2	20.1	20.38	0.28
3	20.1	20.67	0.57
4	20.3	20.56	0.26
5	20.3	21.17	0.87
6	20.2	20.37	0.17
7	20.3	20.73	0.43
8	20.1	20.45	0.35
9	19.9	20.26	0.36
10	20.1	20.67	0.57
11	20.2	20.26	0.06
12	20.4	20.59	0.19
13	20.5	20.88	0.38
Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]			0.4062
Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]			0.2323
Nepristrana procjena standardne devijacije [ $\mu\text{m}$ ]			0.2411
Raspon [ $\mu\text{m}$ ]			0.81

Iz dobivenih rezultata (**Tablica 3**) vidljivo je kako su izmjerene vrijednosti uvijek veće kod mjerenja vizijskim sustavom što se može pripisati nesavršenosti kalibracije kamere.

Razlika u rezultatima između interferometra i vizijskog sustava



Također nije uočena povezanost između dijela kadra kamere u kojoj je uzet uzorak i razlike u rezultatima za taj uzorak pa se zaključuje kako nema utjecaja distorzije na rezultate mjerenja, te se ovaj pokus nije više puta ponavljao.

### Utjecaj napona na ostvarivanje kontakta vrha sonotrode i ticala

Utjecaj napona kojime se prati kontakt sonotrode i ticala nije jednoznačno utvrđen. Prilikom ispitivanja istoga javljala su se nejednolika prijelazna područja između potpuno otvorenog i zatvorenog strujnog kruga.

Na osnovu niza pokusa, stanje kontaktnih površina pokazalo se kao iznimno utjecajan faktor. Kako bi širina prijelaznog područja bila što uža potrebne su čiste površine.

Zbog navedenih nedostataka, mjerenje se provodilo tako da se sonotroda približava nekoj stabilnoj razini napona nakon prijelaznog područja. Prijelazno područje iznosi između  $0.5 \mu\text{m}$  i  $3 \mu\text{m}$ , ovisno o stanju površine i naponu strujnog kruga. Svi pokusi provedeni su na način da je napon ticala bio  $5 \text{ V DC}$ , dok je sonotroda bila uzemljena.

## Utjecaj deformiranja zgloba ticala prilikom dodira kuglice i sonotrode

Direktnim mjerenjem deformacije zgloba uz pomoć mjerne ure izmjerena je deformacija zgloba od  $0.5\ \mu\text{m}$  prilikom dodira ticala sonotrodom. U idealnim uvjetima deformacije nosača kuglice ne bi smjelo biti.

## Ponovljivost segmentacije brida u stanju mirovanja i u radnom stanju sonotrode

Ispitivanjem se ispitalo odstupanje u segmentaciji sonotrode i pozadinske rasvjete dok je sonotroda u stanju mirovanja (**Tablica 4**) i radnom stanju (**Tablica 5**). Provedeno je tako da se učita set uzoraka od dvije slike sonotrode u istom položaju za konstantne parametre akvizicije i pozadinske rasvjete u prisutnosti okolišne rasvjete.

**Tablica 4**

Ponovljivost segmentacije brida u stanju mirovanja sonotrode

Redni broj mjerenja	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]	Redni broj mjerenja	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	0.1444	10	0.1374
1	0.0879	11	0.0898
2	0.1443	12	0.0700
3	0.0878	13	0.0755
4	0.0972	14	0.0706
5	0.0904	15	0.0824
6	0.0897	16	0.0983
7	0.0836	17	0.0795
8	0.0826	18	0.0597
9	0.1228		
Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]			0.0919
Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]			0.0231
Nepriistrana procjena standardne devijacije [ $\mu\text{m}$ ]			0.0249
Raspon [ $\mu\text{m}$ ]			0.0847

**Tablica 5**

Ponovljivost segmentacije brida u radnom stanju sonotrode

Redni broj mjerenja	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]	Redni broj mjerenja	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	0.1469	10	0.1271
1	0.1741	11	0.1194
2	0.1261	12	0.1312
3	0.1564	13	0.1226
4	0.1423	14	0.1239
5	0.1230	15	0.1750
6	0.1264	16	0.1413
7	0.1453	17	0.1246
8	0.1288	18	0.1671
9	0.1710	19	0.1337
Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]			0.1403
Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]			0.0183
Nepriistrana procjena standardne devijacije [ $\mu\text{m}$ ]			0.0189
Raspon [ $\mu\text{m}$ ]			0.0556

### Utjecaj ekspozicije

Pouzdanost promatrane mjerne metode direktno ovisi o uspješnosti segmentacije pozadinske rasvjete i vrha sonotrode. Preliminarnim ispitivanjima utvrđeno je da je granica koja ih dijeli podložna promjeni ovisno o uvjetima rasvjete i akvizicijskim parametrima kamere. Iz tog razloga ispitan je utjecaj ekspozicije na mjesto segmentiranog brida u stanju mirovanja i radnom stanju sonotrode.

Ispitivanje je provedeno na način da se postepeno povećava ekspozicija kamere, te se za svaki korak ekspozicije učita slika i uz pomoć programa za mjerenje amplitude mjeri pomak segmentiranog brida.

**Tablica 6**

Utjecaj ekspozicije - stanje mirovanja

Redni broj mjerenja	Exp1 [ $\mu$ s]	Exp2 [ $\mu$ s]	$\Delta l$ [ $\mu$ m]
0	800	850	0.1388
1	850	900	0.1302
2	900	950	0.1022
3	950	1000	0.1079
4	1000	1050	0.1051
5	1050	1100	0.0921
6	1100	1150	0.0953
7	1150	1200	0.1038
8	1200	1250	0.0844
9	1250	1300	0.0870
10	1300	1350	0.0716
11	1350	1400	0.0843
12	1400	1450	0.0797
13	1450	1500	0.0770
14	1500	1550	0.0750
15	1550	1600	0.0718

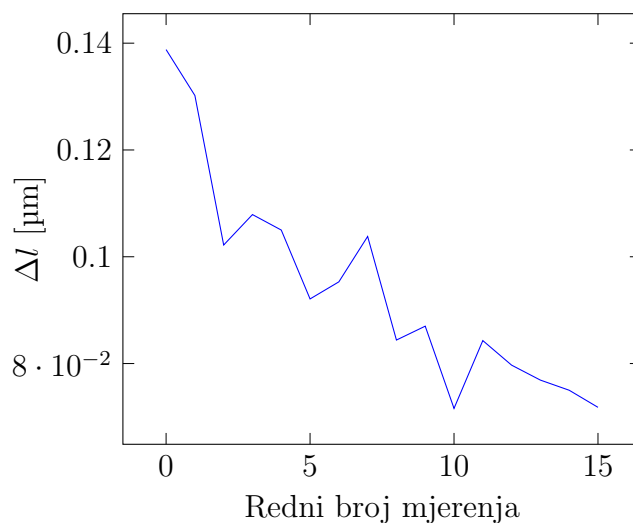
**Tablica 7**

Utjecaj ekspozicije - radno stanje

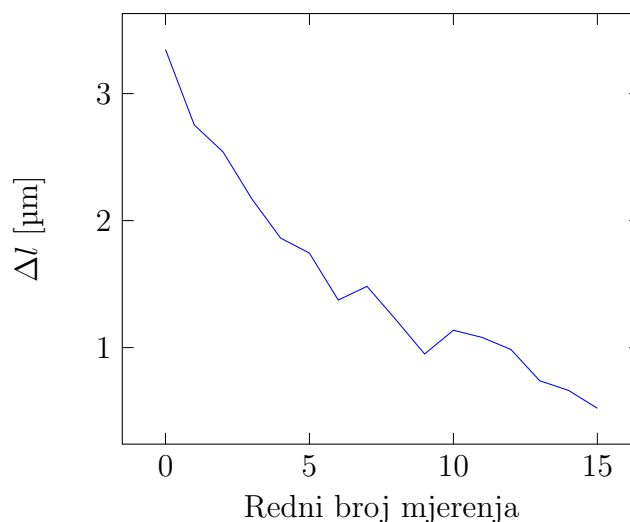
Redni broj mjerenja	Exp1 [ $\mu$ s]	Exp2 [ $\mu$ s]	$\Delta l$ [ $\mu$ m]
0	800	850	3.3478
1	850	900	2.7533
2	900	950	2.5409
3	950	1000	2.1711
4	1000	1050	1.862
5	1050	1100	1.7442
6	1100	1150	1.3745
7	1150	1200	1.4822
8	1200	1250	1.2205
9	1250	1300	0.9497
10	1300	1350	1.1365
11	1350	1400	1.0799
12	1400	1450	0.9848
13	1450	1500	0.7389
14	1500	1550	0.6628
15	1550	1600	0.5224



Utjecaj ekspozicije - stanje mirovanja



Utjecaj ekspozicije - radno stanje



Iz dobivenih rezultata (**Tablica 6**) (**Tablica 7**) vidljivo je kako se s povećanjem ekspozicije pomak granice segmentacije smanjuje. Kako bi se tijekom mjerenja smanjio unos topline u tijelo sonotrode, potrebno je koristiti ekspoziciju razumnog trajanja. Odabrano vrijeme trajanja ekspozicije je  $1400 \mu\text{s}$ , te su sva mjerenja rađena s navedenom vrijednošću.

### Utjecaj pojačanja

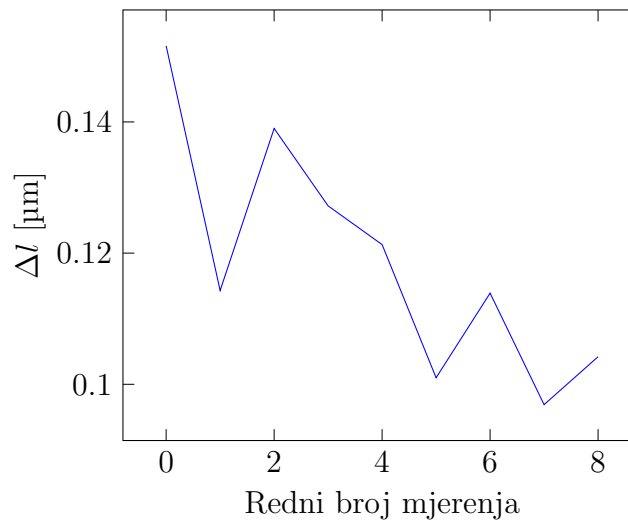
Kao što je provedeno ispitivanje za provjeru utjecaja ekspozicije tako je provedeno i ispitivanje utjecaja pojačanja (engl. *Gain*) u stanju mirovanja i u radnom stanju sonotrode.

**Tablica 8**

Utjecaj pojačanja - stanje mirovanja

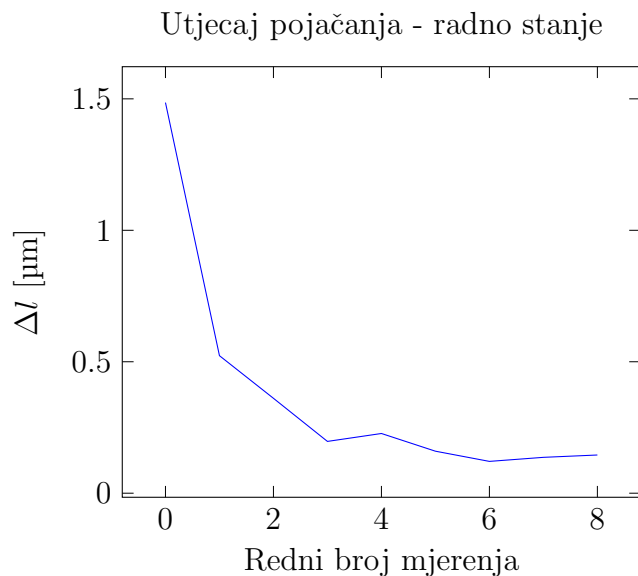
Redni broj mjerenja	Gain 1	Gain 2	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	26	28	0.1516
1	28	30	0.1144
2	30	32	0.1390
3	32	34	0.1272
4	34	36	0.1213
5	36	38	0.1011
6	38	40	0.1140
7	40	42	0.0970
8	42	44	0.1041

Utjecaj pojačanja - stanje mirovanja

**Tablica 9**

Utjecaj pojačanja - radno stanje

Redni broj mjerenja	Gain 1	Gain 2	$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	26	28	1.4859
1	28	30	0.5231
2	30	32	0.3611
3	32	34	0.1971
4	34	36	0.2272
5	36	38	0.1600
6	38	40	0.1210
7	40	42	0.1364
8	42	44	0.1453



U stanju mirovanja s povećanjem pojačanja vidljivo je smanjenje u pomaku granice segmentacije (**Tablica 8**). U radnom stanju sonotrode nakon određene razine pojačanja razlika u segmentaciji više nije toliko izražena (**Tablica 9**). Za količinu pojačanja uzeta je vrijednost 40, te se ta vrijednost parametra akvizicije koristi za sva mjerenja.

### Utjecaj redoslijeda učitavanja slika

Metoda mjerenja amplitude vizijskim sustavom može se provoditi na dva načina. Prvi način je učitavanjem slike sonotrode u radnom stanju, a potom u stanju mirovanja, dok je drugi učitavanjem slike sonotrode u stanju mirovanja, a potom u radnom stanju. Cilj ispitivanja je utvrditi postoji li razlika u rezultatima mjerenja između ova dva pristupa mjerenja. Razlika u rezultatima može se pripisati promjeni duljine sonotrode uslijed unesene topline u radnom stanju sonotrode.

**Tablica 10**

Utjecaj redoslijeda učitavanja slika na rezultat mjerenja

Uključena pa isključena		Isključena pa uključena	
Redni broj mjerenja	$A/2$ [ $\mu\text{m}$ ]	Redni broj mjerenja	$A/2$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	20.3270	0	20.2493
1	20.3240	1	20.3378
2	20.3365	2	20.3712
3	20.3348	3	20.3682
4	20.3068	4	20.3601
5	20.3133	5	20.3477
6	20.3443	6	20.3403
7	20.3267	7	20.3536
8	20.3581	8	20.3298
9	20.2518	9	20.3248
Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]	20.3223	Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]	20.3383
Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]	0.026	Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]	0.0349

Iz rezultata ispitivanja (**Tablica 10**), vidljivo je da redoslijed učitavanja slika nema utjecaja na rezultat mjerenja. Iz navedenog proizlazi da su utjecaji u jednakoj mjeri prisutni u oba pristupa mjerenja. Zaključuje se da je mjerenje ispravno provoditi na oba načina.

### Utjecaj kuta zakreta sonotrode

Vrh sonotrode nije uvijek savršeno okomit na retke piksela koji se prebrojavaju, stoga je potrebno ispitati unesenu grešku takvim mjerenjem. Ispitivanje se provodilo na način da se sonotroda zamiče za korak od  $2^\circ$  u horizontalnoj ravnini, te je u svakom položaju uzet uzorak. Zatim su provođena mjerenja amplitude sonotrode pomoću opisanog algoritma, te je promatran utjecaj kuta zakreta na izmjerenu vrijednost amplitude sonotrode.

**Tablica 11**

Utjecaj kuta zamaka sonotrode na rezultat mjerenja

Kut zakreta [°]	$A/2$ [μm]
0	20.0040
2	20.0144
4	20.3103
6	20.3131
8	20.3245
10	20.7440
12	20.1376

Iz dobivenih rezultata (**Tablica 11**), može se zaključiti kako utjecaj kuta nije značajan, pošto se smatra da sonotroda nikada neće biti zakrenuta više od  $5^\circ$  čime se unosi približno 2% greške.

## 4.2 Procjena mjerne nesigurnosti vizijskog sustava

Mjerni rezultat potpun je samo ako sadrži vrijednost pridruženu mjernoj veličini zajedno s mjernom nesigurnošću. Procjena mjerne nesigurnosti računat će se uz pomoć GUM metode (engl. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*) [14], a procjenjivat će se polovica prosječne amplitude sonotrode izmjerene vizijskim sustavom i uz pomoć interferometra.

**Polovina amplitude sonotrode definirana je izrazom**

$$\frac{A}{2} = \Delta l + \delta l_c + \delta l_{calib} + \delta l_{res} + \delta l_{alignm} + \delta l_T \quad (1)$$

gdje je:

$\Delta l$       razlika udaljenosti piksela u radnom i mirujućem stanju sonotrode

$\delta l_c$       utjecaj parametara akvizicije

$\delta l_{calib}$     utjecaj umjeravanja kamere

$\delta l_{res}$       utjecaj prostorne rezolucije

$\delta l_{alignm}$     utjecaj poravnanja sonotrode

$\delta l_T$       utjecaj temperature

**Nesigurnost uslijed umjeravanja kamere  $u(\delta l_{calib})$** 

Umjeravanje kamere, odnosno određivanje prostorne rezolucije kamere provedeno je snimanjem mikrometerske staklene mjerne skale i određivanjem udaljenosti između crtica skale. Postupak umjeravanja prostorne rezolucije mikroskopskog objektiva prikazan je u prijašnjem radu [15]. Nesigurnosti umjeravanja sačinjena je uslijed nesavršenosti staklene mjerne skale i samog postupka određivanja prostorne rezolucije.

**1. Nesigurnost etalona  $u(\delta l_{skala})$** 

Nesigurnost staklene mjerne skale definirana je potvrdom o umjeravanju (br. 0211/16)

[16]. Nesigurnost rezultata mjerenja je:

$$U = (150 + L)\text{nm}, \quad L \text{ mm} \quad (2)$$

Iz toga slijedi da je za umjeravanje objektiva duljinom skale od 0.33 mm:

$$u_1(L = 0.33) = \frac{0.15 + L}{\sqrt{3}} = \frac{0.15 + 0.33}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ } \mu\text{m} \quad (3)$$

2. Nesigurnost uslijed kalibracije  $u(\delta l_{calib})$ 

Prilikom obrade slike moguće je odstupanje interpoliranog pravca od stvarnog središta crtice mjerne skale. Pretpostavlja se da je moguća greška od 4 px s jednakom vjerojatnošću unutar procijenjenog intervala. Interval od 4 px za prostornu rezoluciju od  $R_s = 0.1301$  mm/px iznosi  $0.52$   $\mu\text{m}$ , što rezultira nesigurnošću od:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.52}{\sqrt{3}} = 0.3 \mu\text{m} \quad (4)$$

za interpoliranje jednog pravca. Umjeravanje je provedeno mjerenjem udaljenosti između dva interpolirana pravca, te tada nesigurnost iznosi:

$$u_2 = \sqrt{2 \cdot u^2} = \sqrt{2 \cdot 0.3^2} = 0.42 \mu\text{m} \quad (5)$$

Ukupna mjerna nesigurnost provedene kalibracije je:

$$u(\delta l_{calib}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.03^2 + 0.42^2} = 0.42 \mu\text{m} \quad (6)$$

**Nesigurnost prostorne rezolucije  $u(\delta l_{res})$** 

Izmjerena prostorna rezolucija kamere jednaka je  $R_s = 0.13$  mm/px. Iz toga slijedi da je nesigurnost korištenja ovakve rezolucije jednaka:

$$u(\delta l_{res}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{R_s}{2}}{\sqrt{3}} = \frac{0.065}{\sqrt{3}} = 0.0375 \mu\text{m} \quad (7)$$

**Određivanje nesigurnosti razlike udaljenosti piksela u radnom i mirujućem stanju sonotrode  $u(\Delta l)$** 

Nesigurnost određivanju brida ovisi o:

## 1. Nesigurnost određivanja ruba u stanju mirovanja

Dobiveni rezultati mjerenja dani su u **tablici 4** na stanici 20. Iz njih je izračunato:

$$u_1 = s = 0.0249 \text{ } \mu\text{m} \quad (8)$$

2. Nesigurnost određivanja ruba u stanju rada

Dobiveni rezultati mjerenja dani su u **tablici 5** na stanici 21. Iz njih je izračunato:

$$u_2 = s = 0.018 \text{ } \mu\text{m} \quad (9)$$

3. Nesigurnost uslijed korištenja prosječne udaljenosti granica segmentiranih područja

Rezultat prethodno opisanog algoritma je srednja vrijednost razlike udaljenosti granica segmentiranih područja za svaki red slike. Razlog nesigurnosti je unošenje pogreške uslijed određivanja mjernog rezultata na temelju srednje vrijednosti razlike segmentiranih područja. Za određivanje nesigurnosti, nasumično su uzeti statistički podaci rasipanja nekoliko uzoraka i na temelju njih izračunato je srednje procijenjeno standardno odstupanje:

$s_i$	1.7012
	1.6062
	1.7230
	1.6738
	<hr/>
$\bar{s}$	1.64 $\mu\text{m}$

Standardna nesigurnost tada iznosi:

$$u_3 = \frac{\bar{s}}{\sqrt{n}} = \frac{1.64}{\sqrt{1944}} = 0.04 \text{ } \mu\text{m} \quad (10)$$

4. Odstupanje položaja detektiranog brida u odnosu na stvarni brid

Stvarni brid ne mora biti na istom mjestu kao što je određen pomoću vizijskog



sustava. Navedeno odstupanje nije moguće mjeriti pa se na temelju razmatranja zaključuje da se stvarni brid može nalaziti s istom vjerojatnošću bilo gdje u procijenjenom intervalu od  $\pm 6$  px, što je za vrijednost prostorne rezolucije od 0.1301 px/mm [15] jednako  $\pm 0.78$   $\mu\text{m}$ . Standardna nesigurnost tada iznosi:

$$u_4 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.78}{\sqrt{3}} = 0.45 \mu\text{m} \quad (11)$$

Ukupna nesigurnost određivanja ruba jednaka je:

$$\begin{aligned} u(\Delta l) &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \\ &= \sqrt{0.025^2 + 0.018^2 + 0.04^2 + 0.45^2} = 0.453 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (12)$$

#### Nesigurnost uslijed parametara akvizicije $u(\delta l_c)$

Prethodno je zaključeno kako su optimalni parametri akvizicije slike 1400  $\mu\text{s}$  ekspozicije i faktor pojačanja 40. Ispitivanje je pokazalo kako su za navedene parametre pomaci u mjestu detekcije brida minimalni. I u radnom i u mirujućem stanju sonotrode pomak u mjestu detekcije ne prelazi  $\pm 0.1$   $\mu\text{m}$ , a vjerojatnost da se pogreška nađe u bilo kojem od tog područja je jednaka. Stoga slijedi:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.057 \mu\text{m} \quad (13)$$

Ova pogreška prisutna je prilikom učitavanja slike u stanju mirovanja, radnom stanju, te za parametre ekspozicije i pojačanja. Ona tada iznosi:

$$u(\delta l_c) = \sqrt{4 \cdot u^2} = \sqrt{4 \cdot 0.0577^2} = 0.115 \mu\text{m} \quad (14)$$

#### Nesigurnost uslijed poravnanja $u(\delta l_{alignm})$

Razumno odstupanje kuta zakreta je  $5^\circ$  što za amplitudu od 70  $\mu\text{m}$  daje pogrešku od  $a = 0.31$   $\mu\text{m}$ . Ta pogreška se povećava s povećanjem kuta pa se smatra da je maksimalna

moguća pogreška:

$$u(\delta l_{alignm}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.31}{\sqrt{3}} = 0.179 \text{ } \mu\text{m} \quad (15)$$

### **Pogreška uslijed utjecaja temperature $u(\delta l_T)$**

Ispitivanjem utjecaja redoslijeda učitavanja slika sonotrode na mjerenje amplitude (**Tablica 10**) utvrđeno je da nema razlike između učitavanja slike sonotrode prvo u mirujućem, a potom u radnom stanju i suprotno. Time je potvrđeno da ovim načinom mjerenja nije unijeta značajnija količina topline koja bi uzrokovala pogrešku toplinskom širenjem sonotrode.

### **Određivanje sastavljene mjerne nesigurnosti $u_c$**

Sastavljena mjerna nesigurnost  $u_c$  za metodu mjerenja vizijskim sustavom je:

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u(\Delta l)^2 + u(\delta l_c)^2 + u(\delta l_{calib})^2 + u(\delta l_{res})^2 + u(\delta l_{alignm})^2} \\ &= \sqrt{0.45^2 + 0.115^2 + 0.42^2 + 0.037^2 + 0.179^2} = 0.65 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned} \quad (16)$$

### **Proširena mjerna nesigurnost $U$**

Za vjerojatnost od  $P = 95\%$  da će se rezultat naći u granicama proširene nesigurnosti uzima se faktor pokrivanja  $k = 2$ . Time se dobiva da je proširena mjerna nesigurnost jednaka:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0.65 = 1.3 \text{ } \mu\text{m} \quad (17)$$

### 4.3 Procjena mjerne nesigurnosti verifikacijske metode

Polovina amplitude sonotrode definirana je izrazom

$$\frac{A}{2} = \Delta l + \delta l_{kont} + \delta l_{def} + \delta l_{alignm} + \delta l_T + \delta l_{res} \quad (18)$$

gdje je:

$\Delta l$       razlika udaljenosti piksela u radnom i mirujućem stanju sonotrode

$\delta l_{kont}$     utjecaj kontakta

$\delta l_{def}$     utjecaj deformacije zgloba

$\delta l_{alignm}$     utjecaj poravnanja

$\delta l_T$       utjecaj temperature

$\delta l_{res}$     utjecaj rezolucije mjerenja

Nesigurnost razlike udaljenosti u radnom i mirujućem stanju sonotrode  $u(\Delta l)$

Nesigurnost mjerenja izravno ovisi o nesigurnosti kontakta ticala i sonotrode pa je tako nesigurnost jednaka procijenjenoj standardnoj devijaciji prethodno provedenih mjerenja i one iznose:

1. Nesigurnost kontakta u stanju mirovanja sonotrode (**Tablica 1**):

$$u_{mirovanje} = s = 0.358 \text{ } \mu\text{m} \quad (19)$$

2. Nesigurnost kontakta u radnom stanju sonotrode (**Tablica 2**):

$$u_{radno} = s = 0.183 \text{ } \mu\text{m} \quad (20)$$

Ukupna mjerna nesigurnost:

$$u_{kontakt} = \sqrt{u_{mirovanje}^2 + u_{radno}^2} = \sqrt{0.358^2 + 0.183^2} = 0.402 \text{ } \mu\text{m} \quad (21)$$

### Nesigurnost uslijed određivanja točke zatvaranja strujnog kruga $u(\delta l_{kont})$

Širina prijelaznog područja nije konstantna, te se nalazi u rasponu između 0.5 i 3  $\mu\text{m}$ . Smatra se da se položaj točke zatvaranja strujnog kruga može s jednakom vjerojatnošću naći u navedenom rasponu. Standardna nesigurnost tada iznosi:

$$u(\delta l_{kont}) = \frac{a}{\sqrt{n}} = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1.732 \mu\text{m} \quad (22)$$

### Nesigurnost uslijed deformiranja zgloba $u(\delta l_{def})$

Izravnim mjerenjem korištenjem mjerne ure utvrđeno je kako se zglob deformira kod dodira ticala i sonotrode. Izmjereni pomak ticala prilikom kontaktnog pritiska sonotrode potrebnog za zatvaranje strujnog kruga iznosi 0.4  $\mu\text{m}$ , te se smatra da će se s jednakom vjerojatnošću nalaziti u navedenom području. Standardna nesigurnost tada iznosi:

$$u(\delta l_{def}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \mu\text{m} \quad (23)$$

### Nesigurnost uslijed utjecaja temperature $u(\delta l_T)$

Iz prijašnjih ispitivanja utvrđeno je kako nema značajnijeg utjecaja topline na promjenu duljine sonotrode ili drugih komponenata mjernog sustava, stoga se ono zanemaruje.

### Nesigurnost uslijed poravnanja $u(\delta l_{alignm})$

Zrcalo interferometra je postavljeno u smjeru pomicanja sonotrode čime je uklonjena pogreška prvoga reda, odnosno Abbeova pogreška. Pogreška u poravnanju dodira sonotrode i ticala konstrukcijski je osigurano korištenjem kuglice, te se dodir između sonotrode i ticala svodi u točku. Iz navedenog se zaključuje kako nema značajnijeg utjecaja poravnanja mjernog postava na rezultat mjerenja.

**Nesigurnost uslijed rezolucije interferometra  $u(\delta l_{res})$** 

Rezolucija interferometra je  $0.1 \mu\text{m}$ , te je standardna nesigurnost jednaka:

$$u(\delta l_{res}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029 \mu\text{m} \quad (24)$$

**Sastavljena mjerna nesigurnost  $u_c$** 

Sastavljena mjerna nesigurnost  $u_c$  koja objedinjuje sve utjecaje za verifikacijsku metodu mjerenja iznosi:

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u(\Delta l)^2 + u(\delta l_{kont})^2 + u(\delta l_{def})^2 + u(\delta l_{res})^2} \\ &= \sqrt{0.402^2 + 1.732^2 + 0.289^2 + 0.029^2} = 1.802 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (25)$$

**Proširena mjerna nesigurnost  $U$** 

Za vjerojatnost od  $P = 95\%$  da će se rezultati naći u granicama proširene nesigurnosti koristi se faktor pokrivenosti  $k = 2$ . Proširena mjerna nesigurnost tada iznosi:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 1.802 = 3.604 \mu\text{m} \quad (26)$$

## 4.4 Rezultati mjerenja

U prethodnim mjerenjima uzet je veći uzorak mjerenja. Zbog ne poznavanja utjecaja unesene su velike pogreške, te su ta mjerenja odbačena. Glavni utjecaj na mjerenja bile su površinske nečistoće kod kontaktne metode mjerenja. Pošto su granice rasipanja prethodnih mjerenja bile uske, a rezultat zamaknut za debljinu površinskih nečistoća, odlučeno je uzeti manji broj uzoraka.

Mjerenja su provedena na dvije sonotrode različitih duljina korištenjem prethodno opisanog algoritma obrade slike. Izmjereni rezultati (**Tablica 12**) (**Tablica 13**) i pro-

cijenjena mjerna nesigurnost odnose se na polovicu amplitude, stoga je za iskazivanje amplitude potrebno udvostručiti izmjerene vrijednosti.

**Tablica 12**

Rezultati uzoraka - Sonotroda 0

Sonotroda 0		
Redni broj uzorka	$(A_{V.S.}/2)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$(A_{Verifikacija}/2)$ [ $\mu\text{m}$ ]
0.	20.5285	20.0
1.	20.4836	22.1
2.	20.5791	19.8
3.	20.5222	21.0
4.	20.5516	19.6
5.	20.5200	20.1
6.	20.5556	20.4
7.	20.5570	20.0
8.	20.5412	21.2
9.	20.5330	20.7
10.	20.5117	20.9
11.	20.5164	21.2
12.	20.5002	21.6
Mjerna nesigurnost $U$ [ $\mu\text{m}$ ]	1.3	3.604
Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]	20.531	20.663
Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]	0.026	0.725
Koeficijent varijacije [%]	0.127	3.509
Raspon [ $\mu\text{m}$ ]	0.095	2.500

**Tablica 13**

Rezultati uzoraka - Sonotroda 1

Redni broj uzorka	Sonotroda 1	
	$(A_{V.s.}/2)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$(A_{V.eri\,fikacija}/2)$ [ $\mu\text{m}$ ]
0.	35.6786	37.0
1.	35.3354	37.2
2.	35.3700	37.7
3.	35.4481	37.0
4.	35.6893	37.6
5.	35.6911	36.0
6.	35.7492	36.7
7.	35.9365	36.2
8.	35.2023	36.9
9.	35.5722	37.0
10.	35.6540	37.0
11.	35.6540	35.6
12.	35.6105	36.0
Mjerna nesigurnost $U$ [ $\mu\text{m}$ ]	1.3	3.604
Srednja vrijednost [ $\mu\text{m}$ ]	35.597	36.761
Standardna devijacija [ $\mu\text{m}$ ]	0.208	0.611
Koeficijent varijacije [%]	0.584	1.662
Raspon [ $\mu\text{m}$ ]	0.734	2.100

**Rezultati izmjerene amplitude - vizijski sustav**

Sonotroda 0:  $41.06 \pm 2.6 \mu\text{m}$

Sonotroda 1:  $71.19 \pm 2.6 \mu\text{m}$

**Rezultati izmjerene amplitude - kontaktna metoda**

Sonotroda 0:  $41.33 \pm 7.208 \mu\text{m}$

Sonotroda 1:  $73.52 \pm 7.208 \mu\text{m}$



## 5 Rasprava

Na osnovu niza provedenih mjerenja utvrđeno je da se rezultati mjerenja obje metode podudaraju čime je potvrđena uspješnost odabrane metode mjerenja. Iz procijenjene nesigurnosti kao i rasipanja rezultata vidljivo je kako odabrana metoda može dati točniji rezultat. Glavni nedostatak vizijskog sustava je utjecaj akvizicijskih parametara koji rezultiraju nepoznavanjem stvarnog vrha sonotrode u odnosu na detektirani. Navedeni nedostatak najviše je izražen u radnom stanju sonotrode. Naime, približavanjem naj-uvučenijoj točki sonotrode, smanjuje se količina propuštene svjetlosti. Razlog tome je vremenski period u kojem je sonotroda onemogućavala prolaz svjetlosti. U cilju određivanja pouzdanosti mjernog sustava provedena je procjena mjerne nesigurnosti. Njom je procijenjeno da izmjereni rezultat predloženim sustavom najviše može odstupati od stvarne vrijednosti za  $2.48\ \mu\text{m}$  uz vjerojatnost od 95%.

Zbog manjka drugih mogućnosti kontaktna metoda je bila jedini izbor za potrebu verifikacije. Kod kontaktne metode vrlo problematičnom se pokazao kontakt između ticala i sonotrode. Velika odstupanja mjernih rezultata stvorila je nečistoća na ticalu i vrhu sonotrode. Njen utjecaj utvrđen je uslijed odstupanja u rezultatima mjerenja između metoda. Ponovljenim mjerenjima ustanovljeno je da se sa strane kontaktne metode rezultat približio rezultatu beskontaktne metode za 3 do  $4\ \mu\text{m}$ , a prijelazno područje zatvaranja strujnog kruga suzilo. Osim problema s površinskim nečistoćama, prisutan je i problem trošenja. Zbog velikog broja malih udaraca došlo je do trošenja kontaktne površine, odnosno loma površinskog dijela kuglice ticala koja je bila u kontaktu sa sonotrodom. Nakon analize svih utjecaja, procijenjeno odstupanje rezultata mjerenja ovom metodom može odstupati do  $7.2\ \mu\text{m}$  od stvarne vrijednosti uz vjerojatnost od 95%. Kontaktna metoda mjerenja ima mogućnost za unaprjeđenje, kao što je finiji pomak stola ili bolje izveden prihvat ticala, ali je pitanje smislenosti takvog pristupa.

## 6 Zaključak

U sklopu rada razvijena je beskontaktna metoda mjerenja amplitude ultrazvučnih vibracija, koja je verificirana drugom kontaktnom metodom. Za svaku od primijenjenih metoda identificirani su ključni utjecaji koji su detaljnije razmotreni.

Provedena mjerenja na dvije sonotrode različite duljine i procijenjena mjerna nesigurnost temeljena na provedenim ispitivanjima ukazuju kako je upotreba vizijskog sustava za mjerenje amplitude ultrazvučnih vibracija moguća i opravdana. Također se pokazalo kako je bolji pristup upotrebe vizijskog sustava u odnosu na kontaktnu metodu mjerenja. Rasipanje podataka vizijskog sustava puno je uže pa je tako potreban manji broj uzoraka za provođenje mjerenja. Osim preciznosti kod mjerenja važna je i točnost. Zbog različitih utjecaja na obje metode nije moguće sa sigurnošću reći koja je od njih točnija, ali se iz dobivenih rezultata vidi da je razlika u rezultatima mala, čime se također potvrđuje uspješnost odabrane metode mjerenja vizijskim sustavom.

Mjerenje amplitude ultrazvučnih vibracija korištenjem predložene metode, pokazalo se pouzdanim s malom mjernom nesigurnošću. Potvrđivanjem uspješnosti predložene metode mjerenja, omogućena je njegova primjena u kontroli ultrazvučnih alata, podešavanju izlazne snage pojačala u svrhu postizanja određene amplitude alata, te prednamještanje ultrazvučnih alata kod UAM-a.

Metoda ne zahtijeva složena konstrukcijska rješenja, a za mjerenje je potrebna kamera, mikroskopski objektiv, pozadinska rasvjeta, te postolje. Jednostavnost i pristupačnost ovakve metode mjerenja amplitude omogućuje implementaciju u postojeće sustave gdje će sustav samostalno bez potrebe operatera moći podesiti parametre ultrazvučnog alata. Također se otvara mogućnost razvoja samostalnih mjernih uređaja pomoću kojih će se kontrolirati ultrazvučni alati prije njegove upotrebe.

# Literatura

- [1] Poorn Chandra Pandey i HS Shan. *Modern machining processes*. Tata McGraw-Hill Education, 1980.
- [2] Juan A Gallego-Juárez i Karl F Graff. *Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound*. Elsevier, 2014.
- [3] Oleg Vladimirovich Abramov. *High-intensity ultrasonics: theory and industrial applications*. Routledge, 2019.
- [4] Hassan Dakhil Al-Budairi. „Design and analysis of ultrasonic horns operating in longitudinal and torsional vibration”. Disertacija. University of Glasgow, 2012.
- [5] SG Amin, MHM Ahmed i HA Youssef. „Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis”. *Journal of Materials Processing Technology* 55.3-4 (1995), str. 254–260.
- [6] Thomas M Huber i dr. „Spatial distribution of acoustic radiation force modal excitation from focused ultrasonic transducers in air”. *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.5 (2017), str. 3576–3576.
- [7] Said Jahanmir, Mamidala Ramulu i Philip Koshy. *Machining of ceramics and composites*. Marcel Dekker, 1999.
- [8] Alain Boucaud i dr. „High power low frequency ultrasonic transducer: vibration amplitude measurements by an optical interferometric method”. *1999 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. International Symposium (Cat. No. 99CH37027)*. Sv. 2. IEEE. 1999, str. 1095–1098.

- [9] Iakovos Tzanakis i Dmitry Eskin. *Ultrasonic Cavitation Treatment of Metallic Alloys*. 2020.
- [10] Guido Van Rossum i Fred L. Drake. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN: 1441412697.
- [11] G. Bradski. „The OpenCV Library”. *Dr. Dobb’s Journal of Software Tools* (2000).
- [12] Ta Yang Goh i dr. „Performance analysis of image thresholding: Otsu technique”. *Measurement* 114 (2018), str. 298–307.
- [13] Akira Asano, Tohru Yamashita i Shunsuke Yokozeki. „Learning optimization of morphological filters with gray scale structuring elements”. *Optical Engineering* 35 (1996).
- [14] EA Laboratory Committee. „EA-4/02 - Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration”. (2013).
- [15] Sven Bokulić. „Projekt PI - Umjeravanje prostorne rezolucije”. *Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje* (2020).
- [16] „POTVRDA O UMJERAVANJU br.0211/16”. *Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu* (2016).

## Sažetak

Autor: Sven Bokulić

Naslov rada: Razvoj metode za mjerenje amplitude ultrazvučnih vibracija

Cilj rada je razvoj metode za mjerenje amplitude ultrazvučnog alata primjenom vizijskog sustava. Motivacija za rad proizlazi iz činjenice da u dostupnoj literaturi, kao ni na tržištu do sada nisu razvijeni slični sustavi koji bi na cjenovno prihvatljiv način mjerili predmetnu veličinu uz dovoljnu točnost. Predložena metoda uspoređena je s drugom metodom i ispitana. Na temelju ispitivanja procijenjena je mjerna nesigurnost obje metode, a dobiveni rezultati ukazuju kako se rezultati podudaraju što ukazuje na pouzdanost predložene metode.

Ključne riječi: mjerenje amplitude, ultrazvučni alati, strojni vid, otvoreni kod (engl. *Open Source*).

## **Abstract**

Autor: Sven Bokulić

Title: Development of a method for measuring the amplitude of ultrasonic vibration

The aim of this paper is to propose the method of measuring the amplitude of ultrasonic tools based on machine vision. According to the available literature, a method for measuring the amplitude of ultrasonic vibrations based on machine vision has not been proposed so far. Such a method can be significantly cheaper than currently available systems on the market with sufficient accuracy. An appropriate verification method is chosen and applied to quantify the measurement uncertainty. The measurements were carried out on two different sonotrodes and both the results and the measurement uncertainties are presented. The results obtained with the novel and validation method are in good agreement indicating the viability of the novel method.

Key words: measurement of amplitude, ultrasonic tools, machine vision, Open source.