

Istraživanje mjeriteljskih značajki digitalnog autokolimatora

Bolkovac, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:494524>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-04**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ISTRAŽIVANJE
MJERITELJSKIH ZNAČAJKI
DIGITALNOG
AUTOKOLIMATORA**

Josip Bolkovac

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ISTRAŽIVANJE
MJERITELJSKIH ZNAČAJKI
DIGITALNOG
AUTOKOLIMATORA**

Mentori:

Doc. dr. sc. Marko Katić, dipl. ing.

Student:

Josip Bolkovac

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, prvenstveno majci i ocu, na pruženoj podršci i strpljivosti tijekom mog studija.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Marku Katiću, svom mentoru, na iskazanoj pomoći, strpljivosti i stručnom vodstvu prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se svim djelatnicima Laboratorija za precizna mjerenja dužina na pruženoj pomoći tijekom izvođenja pokusa i ispitivanja.

Josip Bolkovac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP BOLKOVAC** Mat. br.: 0035195742

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Istraživanje mjeriteljskih značajki digitalnog autokolimatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Investigation of measurement capability of a digital autocollimator**

Opis zadatka:

Autokolimatori spadaju među najtočnije uređaje za mjerenje kuta, a rade na principu mjerenja odklona reflektiranog snopa kolimiranog svjetla. U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina izrađen je autokolimator s LED izvorom svjetla visokog intenziteta te CCD senzorom za mjerenje odklona reflektiranog snopa. U okviru ovog diplomskog zadatka potrebno je:

1. Prikazati teorijsku osnovu rada autokolimatora.
2. Odrediti mjerno područje izrađenog autokolimatora.
3. Ispitati rezoluciju izrađenog autokolimatora.
4. Ispitati efektivni domet izrađenog autokolimatora.
5. Istražiti utjecaj varijacije postavljanja primarne leće na rezoluciju.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. travnja 2020.

Rok predaje rada:
2. srpnja 2020.

Predvideni datum obrane:
6. srpnja do 10. srpnja 2020.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. MJERENJE.....	2
2.1. Mjerna nesigurnost.....	3
2.2. Greške mjerenja.....	3
3. AUTOKOLIMATOR	5
3.1. Građa autokolimatora.....	5
3.2. Načelo rada autokolimatora.....	6
3.3. Prednosti i nedostaci autokolimatora.....	7
3.4. Područja primjene.....	8
4. LABORATORIJSKI POSTAV	9
4.1. Obični autokolimator.....	12
4.2. Digitalni autokolimator.....	13
4.2.1. M625L4 LED izvor svjetla [9].....	13
4.2.2. R1DS3N negativni nitni križ [10].....	15
4.2.3. CCM1-BS013/M djelitelj snopa svjetlosti [11].....	15
4.2.4. AC508-300-A akromatska leća [12].....	17
4.2.5. DMM 27UJ003-ML monokromatska kamera [14].....	19
4.3. Teorijsko mjerno područje.....	21
4.4. Teorijska razlučivost.....	22
4.5. Diobena glava.....	23
4.6. Antivibracijski stol / uvjeti okoliša.....	24
5. UTVRĐIVANJE MJERITELJSKIH ZNAČAJKI DIGITALNOG AUTOKOLIMATORA	26
5.1. Mjerno područje.....	26
5.2. Razlučivost.....	28
5.3. Efektivni mjerni domet.....	37
5.4. Utjecaj varijacije položaja leće na razlučivost.....	37
6. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Građa običnog autokolimatora [8].....	6
Slika 2.	Princip rada autokolimatora [8].....	7
Slika 3.	Laboratorijski postav.....	9
Slika 4.	Zrcalo digitalnog autokolimatora.....	10
Slika 5.	Zrcalo običnog autokolimatora.....	10
Slika 6.	Poluga na diobenoj glavi (desna strana slike).....	11
Slika 7.	Laboratorijski autokolimator.....	12
Slika 8.	Valna duljina LED izvora svjetla.....	13
Slika 9.	Monokromatski LED izvor.....	14
Slika 10.	Ugrađeni LED izvor.....	14
Slika 11.	Nitni križ.....	15
Slika 12.	Graf pojasa radnih valnih duljina.....	16
Slika 13.	Djelitelj snopa.....	16
Slika 14.	Ugrađeni djelitelj snopa.....	17
Slika 15.	Primarna akromatska leća.....	17
Slika 16.	Ugradbeno mjesto leće.....	18
Slika 17.	Razlika između žarišne točke akromatske i kromatske leće.....	19
Slika 18.	Monokromatska kamera.....	20
Slika 19.	Ugrađena kamera.....	20
Slika 20.	Optička diobena glava.....	24
Slika 21.	Mjerni postav na antivibracijskom stolu.....	25
Slika 22.	Gornja granica mjernog područja po osi y.....	26
Slika 23.	Donja granica mjernog područja po osi y.....	27
Slika 24.	Izmjereni kut $0^{\circ} 4' 45,9''$	29
Slika 25.	Izmjereni kut $0^{\circ} 4' 48,8''$	29
Slika 26.	Položaj kamere.....	38
Slika 27.	Neizoštreni nitni križevi.....	39
Slika 28.	Izoštreni nitni križ senzora.....	39
Slika 29.	Prekriveni objektiv autokolimatora.....	40
Slika 30.	Izoštreni nitni križevi.....	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti obavljenih mjerenja	30
Tablica 2. Razlučivost po mjerenjima	32
Tablica 3. Vrijednosti razlučivosti unutar zadanog raspona vrijednosti	35

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	m	pomak nitnog križa u ravnini
$d_{x,max}$	m	najveći pomak po osi x
$d_{y,max}$	m	najveći pomak po osi y
f	m	žarišna duljina
$f_{+1\%}$	m	jedan posto uvećana žarišna duljina
$f_{-1\%}$	m	jedan posto umanjena žarišna duljina
H	m	visina senzora
H_{px}	m	visina jednog piksela
LED		eng. <i>Light Emitting Diode</i>
N	piksel, px	pozicija centra linije nitnog križa
$N_{x,px}$		broj piksela senzora na osi x
$N_{y,px}$		broj piksela senzora na osi y
W	m	širina senzora
W_{px}	m	širina jednog piksela
α	°	kut zakreta zrcala
$\alpha_{r,x}$	°	razlučivost po osi x
$\alpha_{r,x,max}$	°	najviša gornja granica razlučivosti po osi x
$\alpha_{r,x,min}$	°	najniža donja granica razlučivosti po osi x
$\alpha_{r,y}$	°	razlučivost po osi y
$\alpha_{r,y,d}$	°	donja granica razlučivosti po osi y
$\alpha_{r,y,g}$	°	gornja granica razlučivosti po osi y
$\alpha_{r,gr}$	°	raspon razlučivosti po osi y
$\alpha_{r,y,max}$	°	najviša gornja granica razlučivosti po osi y
$\alpha_{r,y,min}$	°	najniža donja granica razlučivosti po osi y
α_x	°	mjerno područje autokolimatora po osi x
$\alpha_{x,max}$	°	najviša gornja granica mjernog područja po osi x
$\alpha_{x,min}$	°	najniža donja granica mjernog područja po osi x
α_y	°	mjerno područje autokolimatora po osi y
$\alpha_{y,d}$	°	donja granica mjernog područja po osi y
$\alpha_{y,g}$	°	gornja granica mjernog područja po osi y
$\alpha_{y,max}$	°	najviša gornja granica mjernog područja po osi y
$\alpha_{y,min}$	°	najniža donja granica mjernog područja po osi y
$\bar{\alpha}_{r,y}$	°	prosjeak ili srednja vrijednost razlučivosti po osi y
σ	°	standardna devijacija prosjeka razlučivosti

SAŽETAK

Autokolimatori su mjerni instrumenti za mjerenje malih kuteva, umjeravanje drugih mjernih uređaja i očitavanje određenih geometrijskih značajki mjerenog predmeta poput pravocrtnosti ili ravnosti.

Ovdje opisan postupak utvrđivanja svojstava autokolimatora i ishod tog postupka popraćeni su teorijskim osnovama o mjerenju i o autokolimatorima kao mjernim uređajima. Opisan je laboratorijski postav za mjerenje najvažnijih značajki digitalnog autokolimatora i svi mjerni uređaji upotrijebljeni u ispitivanjima. Navedeni su ključni dijelovi autokolimatora te optičke značajke tih dijelova i izrazi po kojima se tražene značajke autokolimatora izračunavaju.

Na kraju su opisana provedena ispitivanja i predstavljeni njihovi ishodi.

Ključne riječi: autokolimator, mjerenje, mjerno područje, razlučivost

SUMMARY

Autocollimators are measuring instruments for measuring fine angles, calibrating other measuring devices and reading certain geometric features of the measured object, for example, straightness or flatness.

The described procedure for determining the properties of the autocollimator and its results are backed up by theoretical foundations on measurement and on autocollimators as measuring devices. The laboratory setup for measuring the required digital autocollimator characteristics and all measuring devices used in the tests are described here. The key parts of the autocollimator, the optical characteristics of those parts and the equations used to calculate said characteristics are listed, as well.

The performed tests and their outcomes are described at the close of the thesis.

Key words: autocollimator, measurement, measurement range, resolution

1. UVOD

Ako želimo zmaju izmjeriti raspon krila, trebamo mjerni uređaj za duljinu. Ako želimo vidjeti koliko će boljeti kad nekome stane na nogu, moramo znati kolika mu je masa. Za zagriz trebamo izmjeriti silu, a za oganj kojim žari treba nam temperatura. Sve u svemu, trebaju nam mjerne jedinice koje odgovaraju veličinama koje mjerimo, ali i dovoljno točni mjerni uređaji kojima ćemo vrijednosti mjerenih veličina usporediti s tim mjernim jedinicama.

Zašto je bitno imati mjerne jedinice i mjerne uređaje? Zato što ljudi trebaju razumljivost mjerenja i dobivenih vrijednosti u svim granama znanosti, tehnike i ostalih ljudskih djelatnosti. Ako se poštuje mjerno jedinstvo, Japanac točno zna i razumije Hrvata kad mu kaže da zmaj ima raspon krila od šest metara i da ima masu dvjesto kilograma. Znaju obojica što su metar i kilogram i time imaju predodžbu o izmjerenom predmetu.

Međutim, nije dovoljno samo uzeti bilo koji uređaj i početi mjeriti. Svaka mjerka, svaki alat kojim osoba uspoređuje neku veličinu s mjernom jedinicom mora biti umjeren. Što to znači? To znači da mjerni uređaj o kojem se radi može dati dovoljno točnu vrijednost po propisanim odredbama i dostupnim pramjerama, odnosno da su njegovi mjerni rezultati uspoređeni s etalonom čija je vrijednost utvrđena za red veličine točnije od umjeravanog uređaja. Loš će uređaj davati mjerenja izvan postavljenih granica tolerancije i točnosti mjerenja. Spomenuti zmaj tako bi jednom mogao imati pola metra širi, a drugi put pola metra uži raspon krila ako je mjerni uređaj neispravan. Ovo je primjer koji podrazumijeva da je samo mjerni uređaj loš i da su svi ostali čimbenici dobri i unutar propisa.

U ovom se radu objašnjava što je autokolimator, koji predstavlja jedan od najpreciznijih uređaja za mjerenje kuta, kako radi i kako ga se priprema za mjerenje. S obzirom da je u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina razvijen novi digitalni autokolimator, izvodi se procjena tog uređaja i njegovih sposobnosti te se opisuju radnje kojima je navedena procjena dobivena.

2. MJERENJE

Mjerenje je postupak dobivanja brojčane vrijednosti neke mjerne veličine u odnosu na pripadnu mjernu jedinicu. Drugim riječima, ishod mjerenja pokazuje koliko je puta neka mjerena veličina veća ili manja od službeno i općepriznato dogovorene mjerne jedinice s kojom se uspoređuje [1]. Svakom se ishodu mjerenja pridružuje mjerenju svojstvena mjerna nesigurnost.

Dvije su vrste mjerenja, izravno i posredno (neizravno).

Izravno mjerenje obavlja se uspoređivanjem vrijednosti mjerne veličine s vrijednošću istovrsne usporedbene veličine [1]. Usporedbena veličina obično je mjerna jedinica sadržana u nekom obliku na mjernom uređaju.

Posredno (neizravno) mjerenje rabi izravno mjerenje onih veličina koje su funkcijski povezane s traženom mjernom veličinom te fizikalnu zakonitost za izračun tražene vrijednosti.

Bitno svojstvo mjerenja koje se mora zadovoljiti mjerno je jedinstvo: mjerni će ishod biti u skladu sa zakonskim propisima, bit će izražen u zakonskim mjernim jedinicama i posjedovat će naznačenu mjernu nesigurnost za područje kojim se mjerenje bavi. Ovo osigurava razumljivost mjernog ishoda svugdje gdje se primjenjuju jednaki mjerni propisi [2].

Kako bi mjerno jedinstvo bilo globalno, u svijetu se rabi Međunarodni sustav jedinica (SI sustav) koji sadrži dogovoreni skup osnovnih i iz njih izvedenih mjernih jedinica. Međunarodno je prihvaćen 1960. godine i nastao je iz dotadašnjeg Metarskog sustava jedinica. Temeljno mu je svojstvo suvislost mjernih jedinica: jednostavan odnos među njima osiguran pretvorbenim faktorom jedan. [3].

Spomenuti Metarski sustav jedinica nastao je 1795. godine u Francuskoj i nadograđivao se tijekom 19. st. Cilj mu je bio stvoriti sustav mjernih jedinica koji bi jednako vrijedio za sve i za sva vremena i koji bi zamijenio proizvoljne mjerne sustave koji su se oslanjali na vlast i zajedno se s njom mijenjali. Sve su mjerne jedinice oslonjene na prirodne pramjere ili su izvedenice osnovnih mjernih jedinica [4].

Iz navedenog je jasno kako su usustavljanje i standardizacija mjerenja i mjernih jedinica iznimno važni za ljudske djelatnosti. Spomenute pramjere pomažu pri tome jer daju točne vrijednosti prema kojima se izrađuju i umjeravaju svi ostali mjerni uređaji i alati.

Svaka je pramjera utvrđena kao utjelovljenje neke mjerne jedinice ili određene vrijednosti neke fizikalne veličine. Kvaliteta izrade pramjere određuje radi li se o međunarodnoj, državnoj,

primarnoj, sekundarnoj, usporedbenoj, radnoj ili posredničkoj pramjeri. Svaka razina pramjere posjeduje točnost koja se traži za neko područje. Nema smisla rabiti državnu pramjeru ako je dovoljna radna, prvenstveno zbog skupoće, a potom i zbog uvjeta u kojima se može rabiti s nazivnom točnošću i mjernom nesigurnošću [5].

Pramjere se prvenstveno rabe za umjeravanje mjernih uređaja. Samo umjeravanje skup je postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti mjernih veličina i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih pramjerama. Umjeravane vrijednosti mjernih veličina dio su nekog mjerila, neke usporedbene tvari ili nekog mjernog sustava. Ovime se jamči da će uređaj mjeriti s određenom točnošću i mjernom nesigurnošću u određenim uvjetima [6].

2.1. Mjerna nesigurnost

Da živimo u idealnom svijetu, mjerenje određene veličine određenog predmeta svaki bi put dalo istu vrijednost. Međutim, u stvarnom svijetu postoji rasipanje vrijednosti kod više mjerenja iste veličine. Zato je prethodno spominjana mjerna nesigurnost ključni dio svakog mjerenja: to je parametar koji opisuje rasipanje vrijednosti ishoda mjerenja oko stvarne vrijednosti mjerene veličine. Mjerni ishodi izvan granica postavljenih mjernom nesigurnošću mogu se zanemariti u postupku mjerenja [7].

Ukoliko tijekom mjerenja ne postoji rasipanje vrijednosti, mjerni uređaj nema dovoljnu razlučivost i mjerenje se ne može uzeti u obzir kao ispravno. Mjerni sustav mora biti za barem red veličine točniji od tražene točnosti mjerenja.

Rasipanje vrijednosti treba svesti na što užu pojas. Za to je potrebno ukloniti što više mogućih grešaka tijekom postupka mjerenja i imati što kvalitetniji mjerni uređaj. Navedeno također povećava točnost mjerenja.

2.2. Greške mjerenja

Greške mjerenja dolaze u tri vrste:

1. grube greške ili propusti,
2. sustavne greške,
3. slučajne greške.

Grube greške nastaju zbog nedovoljne stručnosti ili nemara mjeritelja, nepažnje pri mjerenju, upotrebe neprikladnog postupka i previda pri istraživanju nastalih pogrešaka. One se lako otklanjaju, ali ako se pojave, mjerenje je potrebno ponoviti. Mogućnost propusta jedan je od razloga za ponavljanje mjerenja. Ovo je greška koju je najlakše uočiti jer ju obično prati mjerni ishod izvan granica mjerne nesigurnosti [7].

Sustavne greške nastaju zbog nesavršenosti samog mjernog postupka, mjernog uređaja i mjera. Manje su utjecajni čimbenici poremećaji u okolišu i osobni utjecaj mjeritelja.

Mnoge sustavne greške vrlo je teško ili nemoguće odrediti pa ih je potrebno procijeniti. Taj nezahvalan posao ima jednu svijetlu točku: sustavne greške obično imaju stalnu vrijednost i stalan predznak pa ih je moguće kompenzirati. Time se ponekad mogu pronaći i ukloniti uzroci grešaka [7].

Slučajne greške uzrokuju nepouzdanost mjernih ishoda jer su same ishod promjena koje za vrijeme mjerenja nastaju u mjerilima, mjerama, mjernom predmetu, okolišu i mjeritelju. One se mogu uočiti ponavljanjem mjerenja uz vremenski odmak od prijašnjih mjerenja. Razlog je jednostavan: ako jedan mjeritelj u određenom vremenu ponovi niz mjerenja, neće biti svjestan slučajnih pogrešaka jer će mu dobivene vrijednosti biti rasute pod istim okolnostima [7].

3. AUTOKOLIMATOR

Na postavljenim temeljima prethodnog poglavlja moguće je objasniti što je autokolimator, kako radi i gdje se upotrebljava.

Autokolimator je beskontaktni optički mjerni uređaj sposoban mjeriti male kuteve velikom točnošću. To je spoj kolimatora i teleskopa u jednom uređaju, što znači da se slika osvijetljenog nitnog križa u žarišnoj ravnini leće odašilje u beskonačnost usporednim ili kolimiranim snopom svjetla. Odašlana se slika odbija od zrcalne površine ili samog zrcala i vraća u autokolimator kako bi se položaji referentnog nitnog križa i križa koji se odbio od mjerenog predmeta mogli usporediti. Razlučivost može doseći nanosekundu kuta i time je jedan od najtočnijih mjernih uređaja [8].

Mogu se podijeliti u tri vrste:

1. vizualni ili uobičajeni autokolimator,
2. digitalni autokolimator,
3. laserski autokolimator.

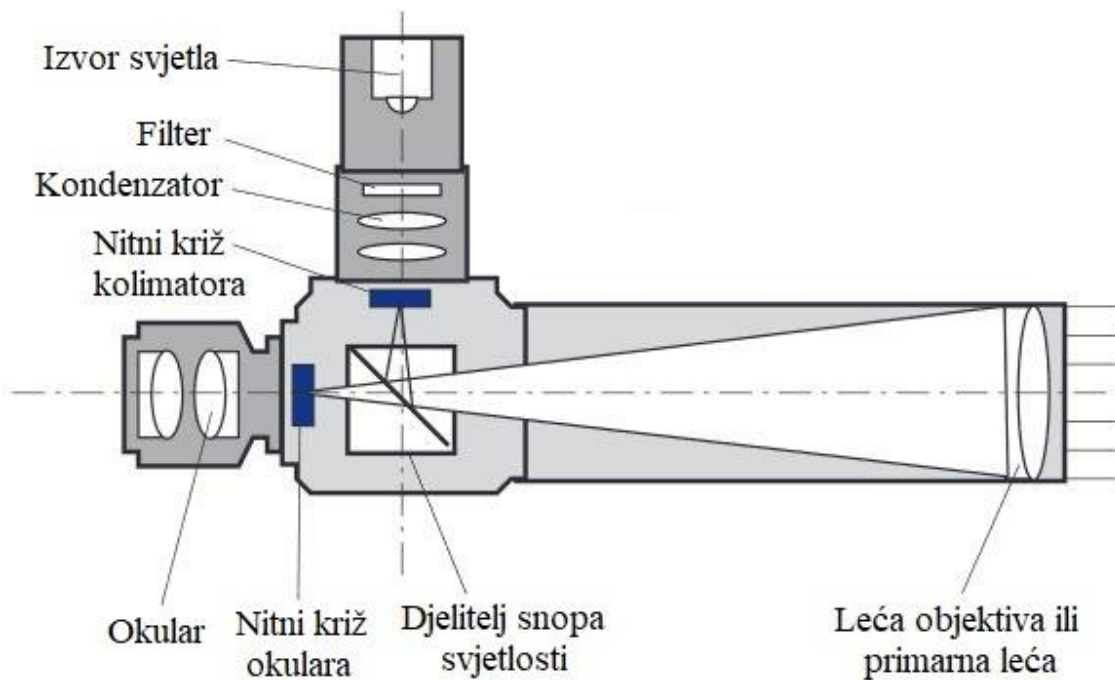
U radu je potrebno odrediti svojstva digitalnog autokolimatora.

3.1. Građa autokolimatora

Iako je autokolimator kao uređaj općenito jednostavan, dijelovi od kojih je složen moraju biti izrazito visoke kvalitete kako bi se postigla očekivana razina točnosti.

Glavni dijelovi od kojih se sastoji, prikazani na slici 1:

1. uređaj za osvijetljenje,
2. djeliteľ snopa svjetlosti,
3. leća objektiva ili primarna leća,
4. okular ili senzor.



Slika 1. Građa običnog autokolimatora [8]

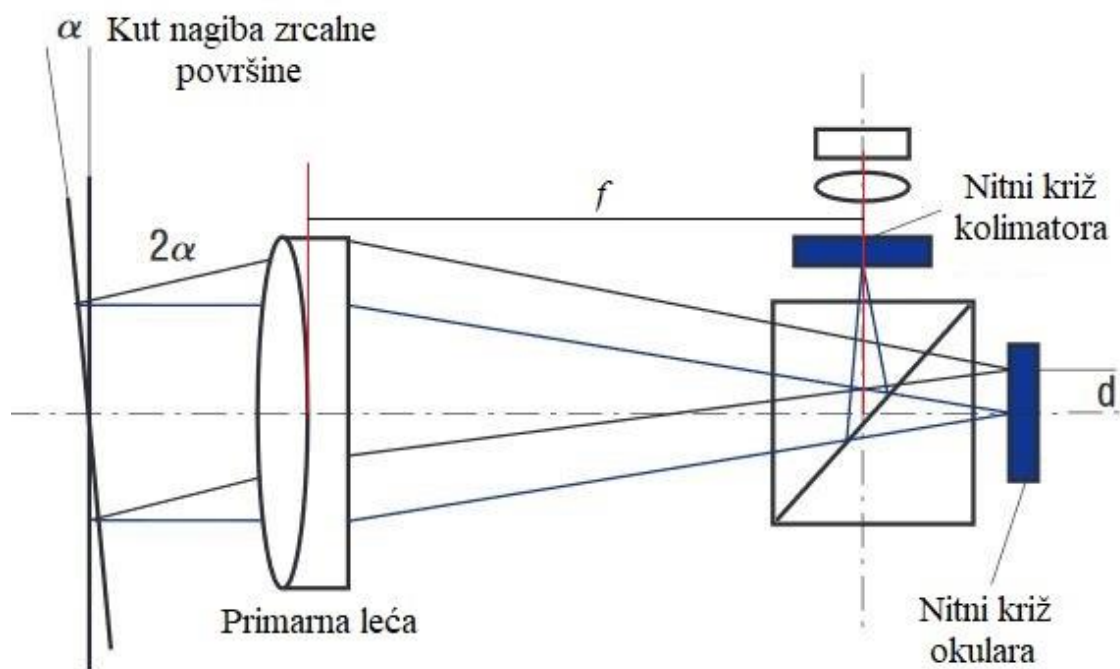
3.2. Načelo rada autokolimatora

Načelo rada na kojem se temelji autokolimator upravo je to, automatsko kolimiranje snopa svjetlosti i upotreba trigonometrijskih zakonitosti kako bi se izračunala tražena mjerena veličina.

Automatsko kolimiranje optička je tehnika u kojoj se u beskonačnost projicirana slika nitnog križa kolimatora odbija od ravnog zrcala i vraća istim putem. Odbijena slika dovodi se u žarište leće objektivna u kojem se već nalazi nepomična slika nitnog križa okulara. Svrha je dobiti pogled na obje slike istodobno: ako je zrcalo okomito na kolimirani snop svjetla koji izlazi iz autokolimatora, nitni će se križevi poklapati. Ako je zakrenuto, snop će se odbiti pod kutem dvostruko većim od kuta nagiba zrcala α i nitni križ kolimatora bit će pomaknut u ravnini u odnosu na nitni križ okulara za duljinu d . Jednadžba koja povezuje taj pomak i zakret glasi ovako:

$$d = 2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot f. \quad 3.1.$$

Žarišna duljina označena je kao f .



Slika 2. Princip rada autokolimatora [8]

S obzirom da je cilj izmjeriti kut, a ne udaljenost između nitnih križeva, izraz 3.1. pretvara se u izraz 3.2.:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{d}{2 \cdot f} \right). \quad 3.2.$$

Bez poznavanja žarišne duljine nije moguć izračun kuta. Također, mora biti stalna za sva mjerenja kako bi izračunati kutevi za jednake pomake bili jednoznačni [8].

3.3. Prednosti i nedostaci autokolimatora

Prednosti upotrebe autokolimatora:

- beskontaktno mjerenje,
- visoka točnost i razlučivost,
- jednostavno rukovanje uređajem,
- jednostavno očitavanje ishoda mjerenja,
- dobivanje skupova mjerenja za proučavanje,
- široko područje primjene.

Nedostaci uređaja:

- redovito održavanje,
- osjetljivost sustava,
- teško podešavanje i namještanje uređaja prije mjerenja,
- usko mjerno područje (što je mjereni predmet dalje, to je mjerno područje uže).

3.4. Područja primjene

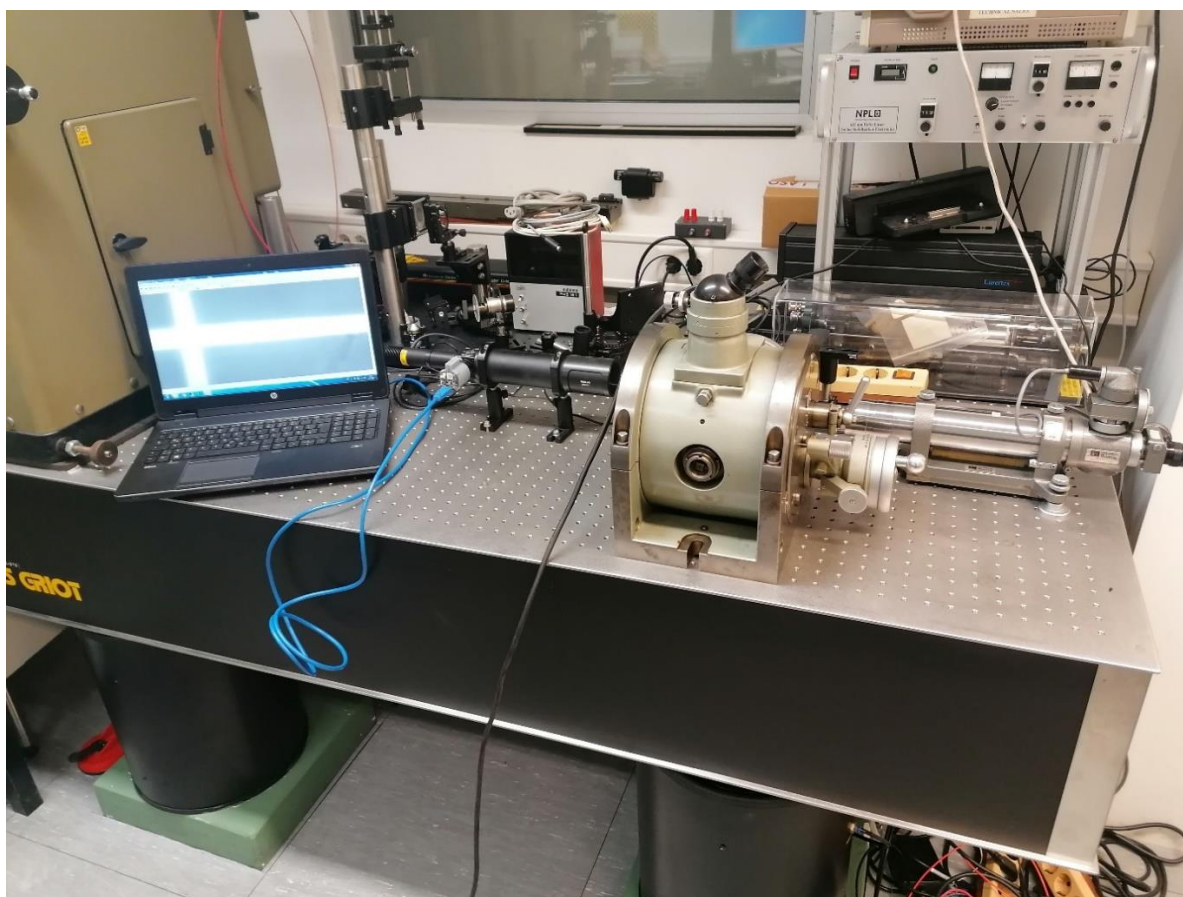
Prvenstveno namijenjen mjerenju malih kuteva i kutnih pomaka uz visoku razinu točnosti, autokolimator ima već spomenuto široko područje primjene. Mjereni kut može dati brojne podatke u sprezi sa načinom mjerenja i samim mjerenim predmetom:

- provjera pravocrtnosti,
- provjera usporednosti,
- provjera ravnosti,
- provjera pravokutnosti,
- umjeravanje rotacijskih stolova,
- mjerenje optičkih parametara.

S obzirom na sve navedeno, razumljivo je zašto autokolimator mora biti ispravan i dobro umjeren. Mogućnost grde pogreške povećava se suprotno veličini mjerene značajke.

4. LABORATORIJSKI POSTAV

Kako bi se zadani zadaci mogli izvršiti na zadovoljavajući način, potrebno je posložiti mjerni postav kojim će biti moguće pokusno odrediti tražene veličine i mjerne značajke digitalnog autokolimatora. Na slici 3. vidi se postav u jednom od laboratorija za mjerenje.



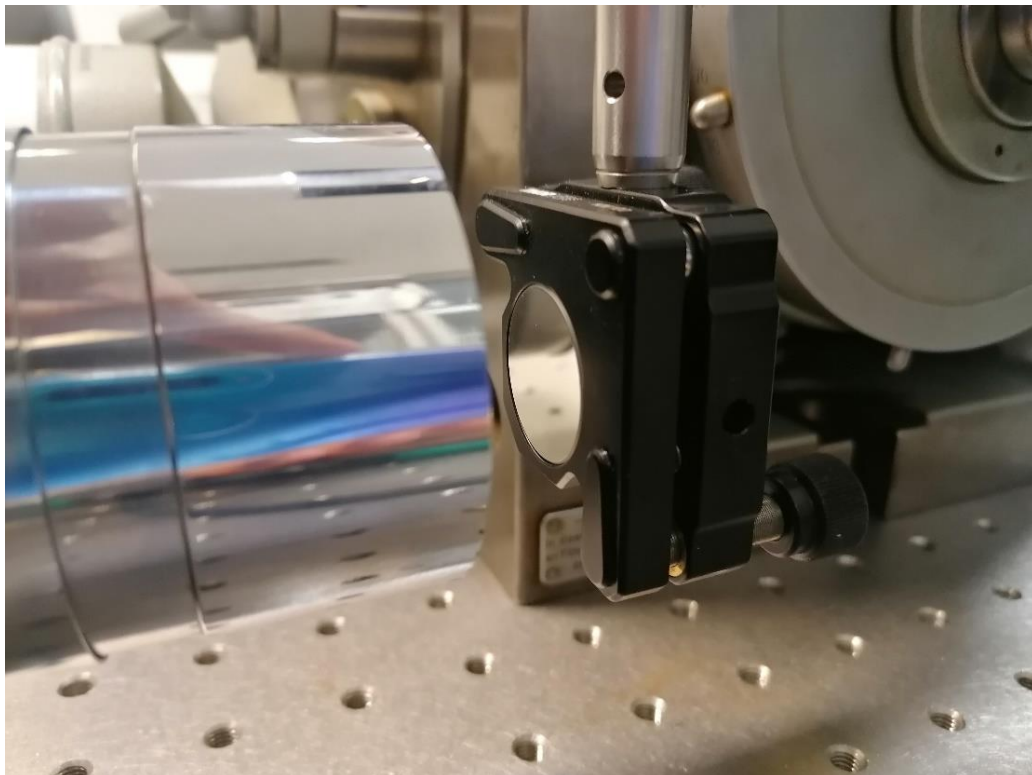
Slika 3. Laboratorijski postav

Krećući slijeva nadesno, na antivibracijskom se stolu prvo vidi prijenosno računalo s programom za primanje slike sa senzora crnog digitalnog autokolimatora. Navedeni autokolimator pričvršćen je za stol desno od računala.

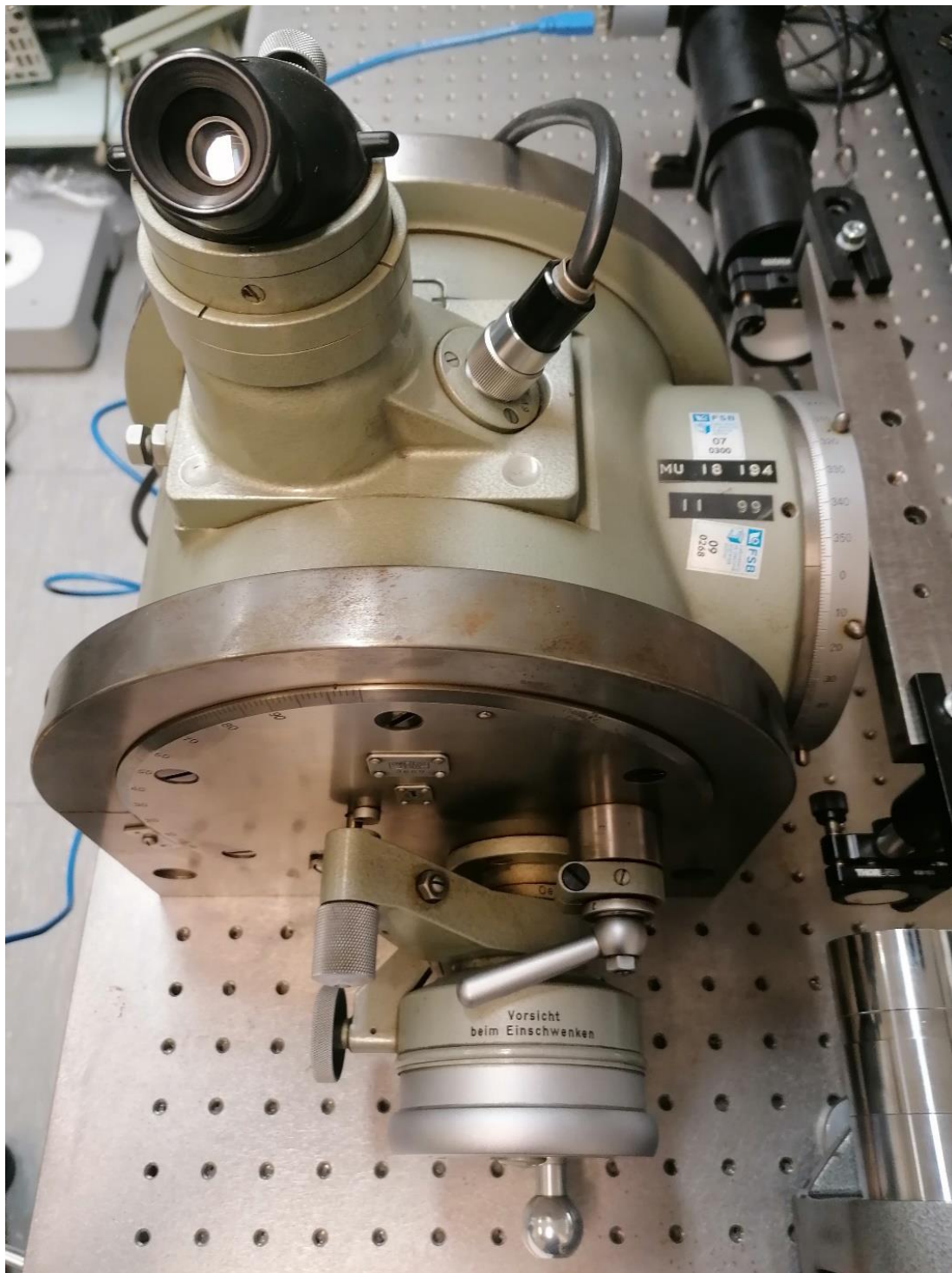
Diobena glava i laboratorijski autokolimator koji stoje desno od digitalnog autokolimatora upotrijebljeni su u ispitivanju nepoznatih značajki spomenutog autokolimatora. Diobena je glava služila za fino zakretanje poluge na čijim su krajevima stajala zrcala, po jedno za svaki autokolimator, a ona se vide na slikama 4. i 5. Sama se poluga jasno vidi na slici 6.



Slika 4. Zrcalo digitalnog autokolimatora



Slika 5. Zrcalo običnog autokolimatora



Slika 6. Poluga na diobenoj glavi (desna strana slike)

Obični ili laboratorijski srebrni autokolimator stoji sasvim desno na slici 3. On je upotrijebljen za očitavanje kuteva nerazlučivih na diobenoj glavi.

4.1. Obični autokolimator

Umjereni autokolimator poznatih mjernih značajki upotrijebljen je u sklopu postava za određivanje razlučivosti izrađenog digitalnog autokolimatora. Na njemu su se očitavale vrijednosti kuteva pri pomacima poluge diobene glave. Preko njih se kasnije izračunavala razlučivost digitalnog autokolimatora.



Slika 7. Laboratorijski autokolimator

Na slici 7. prikazan je laboratorijski autokolimator. Na lijevoj se strani vidi malo zrcalo ispred objektiva, a na desnoj okular, izvor svjetla i jedan od dva mehanička kotačića za poravnavanje nitnog križa kolimatora s nitnim križem okulara. Svaki od tih kotačića posjeduje dvije mjerne skale: jedna se nalazi pored kotačića i očitava pomak u minutama, a druga je na samom kotačiću i očitava pomak u sekundama.

Mjerne značajke ovog autokolimatora:

- mjerno područje: 10' po svakoj osi,
- razlučivost: 0,2".

4.2. Digitalni autokolimator

Digitalni autokolimator na kojem se vrše mjerenja kako bi se ustanovilo njegovo mjerno područje i njegova razlučivost sastavljen je od sljedećih dijelova:

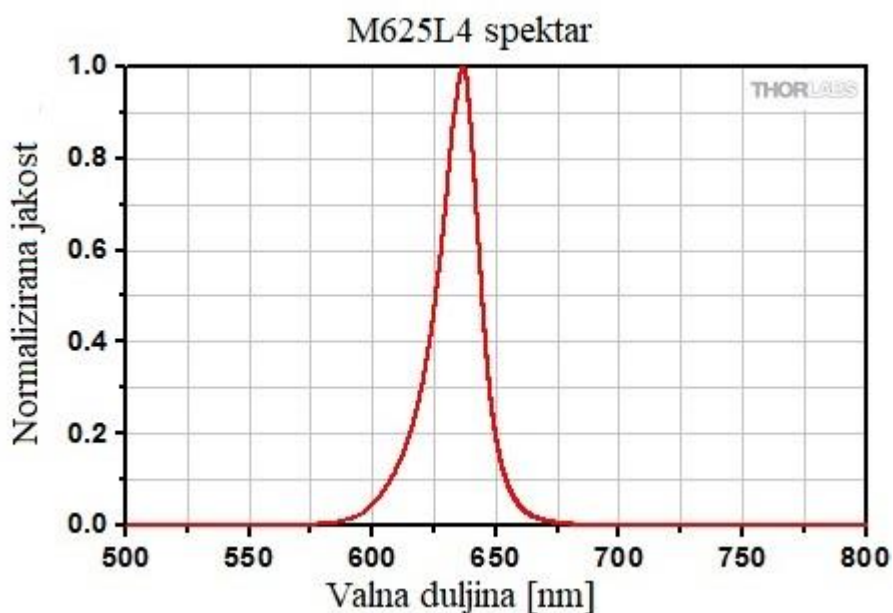
- M625L4 LED izvor svjetla,
- R1DS3N negativni nitni križ,
- CCM1-BS013/M djelitelj snopa svjetlosti,
- AC508-300-A akromatska leća,
- DMM 27UJ003-ML monokromatska kamera,
- kućište.

Kućiče je metalna cijev s odgovarajućim priključcima i navojima za pritezanje ostalih dijelova te zato nije posebno obrađeno.

Svi su dijelovi odabrani s ciljem poboljšanja značajki autokolimatora, poglavito smanjivanja žarišne točke i povećanja žarišne duljine. Ove dvije veličine najviše utječu na razlučivost autokolimatora po izrazu 3.2.

4.2.1. M625L4 LED izvor svjetla [9]

Izvor svjetla početak je svakog autokolimatora. Za ovaj je digitalni autokolimator uzet monokromatski LED izvor nazivne valne duljine svjetla 625 nm, što znači da isijava crveno svjetlo u uskom pojasu oko navedene nazivne valne duljine svjetla, slika 8.



Slika 8. Valna duljina LED izvora svjetla

Svjetlo jedinstvene valne duljine lakše je kolimirati i jednostavnije je za raspoznati na senzoru.

Na slikama 9. i 10. vidi se odabrani LED izvor i on sam na svojem mjestu na autokolimatoru.



Slika 9. Monokromatski LED izvor



Slika 10. Ugrađeni LED izvor

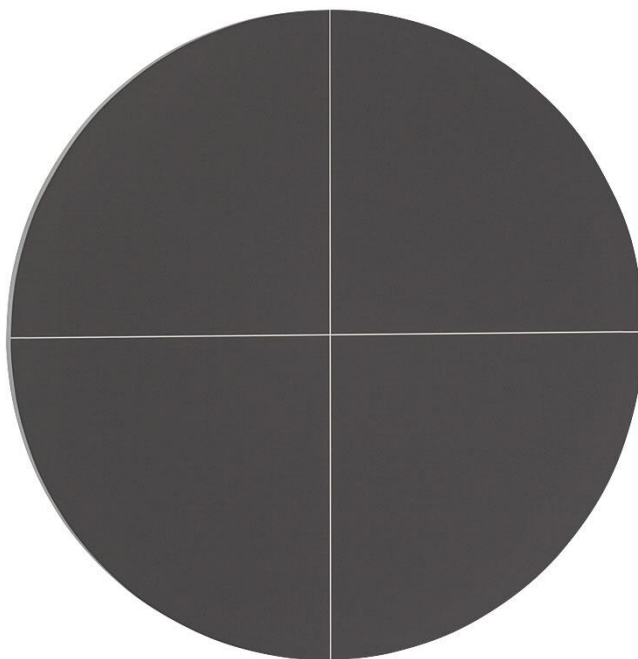
4.2.2. *R1DS3N negativni nitni križ [10]*

Za razliku od laboratorijskog autokolimatora kod kojeg su nitni križevi tanke crte oko kojih svjetlost prolazi, u ovom se digitalnom autokolimatoru nalaze negativni nitni križevi. To znači da svjetlost prolazi kroz krakove nitnih križeva, ne oko njih. Ovime se nitni križevi lakše očitavaju na senzoru.

Bitno svojstvo pločice na kojoj se nitni križevi nalaze jest da ima što manji indeks loma svjetla kako ne bi utjecala na mjerenje.

Sami nitni križevi služe kao referentno mjesto za usredištenje autokolimatora i kasnija mjerenja pomoću njihovog preklapanja nakon pomaka.

Na slici 11. prikazan je odabrani nitni križ.

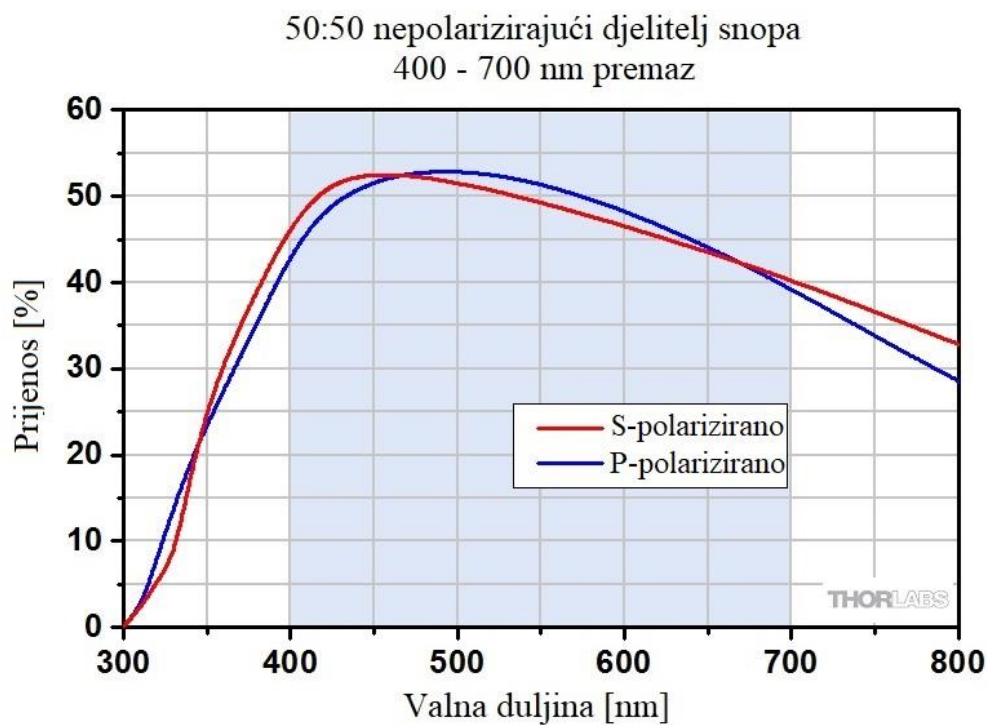


Slika 11. Nitni križ

4.2.3. *CCM1-BS013/M djelitelj snopa svjetlosti [11]*

Djelitelj snopa omogućuje dijelu svjetlosnog snopa da odmah pada na senzor i time stvori nitni križ okulara kao referentni položaj. Preostali dio snopa prolazi kroz djelitelj i, kad se vraća, skreće na senzor. Nastali nitni križ kolimatora omogućuje mjerenje u sprezi s nitnim križem okulara.

Slika 12. prikazuje pojas valnih duljina za koji je djeliteľ izrađen i unutar kojeg se jamči dobar rad i ispunjavanje značajki navedenih uz proizvod. Pravilan rad izvan tog pojasa razlikuje se od proizvoda do proizvoda i ne može se jamčiti.



Slika 12. Graf pojasa radnih valnih duljina

Odabrani se djeliteľ vidi na slici 13., a slika 14. prikazuje gdje je ugrađen.



Slika 13. Djeliteľ snopa



Slika 14. Ugrađeni djeliteľ snopa

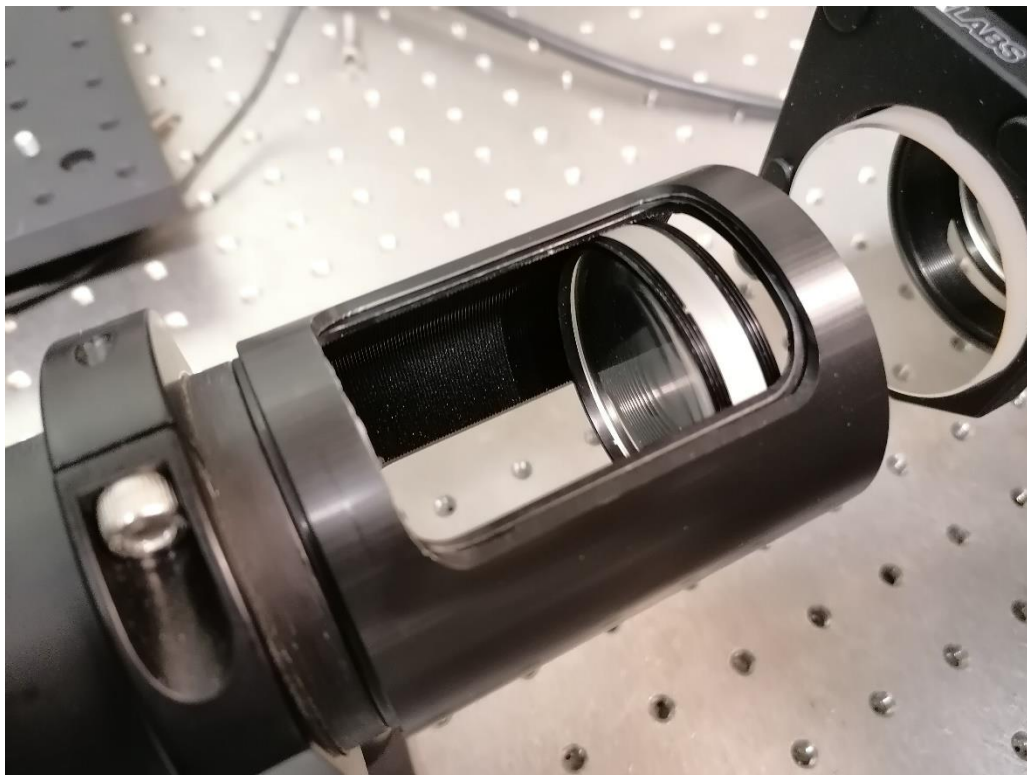
4.2.4. AC508-300-A akromatska leća [12]

Ovo je jedan od dva najvažnija dijela autokolimatora. Primarna leća kolimira izlazni snop i fokusira povratni kako bi se na senzoru mogla očitati slika nitnog križa kolimatora. Pomakom povratnog nitnog križa u odnosu na referentni može se izmjeriti kut pod kojim se zrcalna površina nalazi.

Sama je leća prikazana na slici 15, a njeno mjesto u autokolimatoru vidi se na slici 16.



Slika 15. Primarna akromatska leća



Slika 16. Ugradbeno mjesto leće

Treba primijetiti da leća ne posjeduje vlastito kućište te ju je potrebno pričvrstiti dvama zasebnim prstenovima.

Bitne optičke značajke leće za ovaj rad:

- nazivna žarišna duljina: $f = 300 \pm 1\%$ mm,
- raspon valnih duljina: 400 – 700 nm.

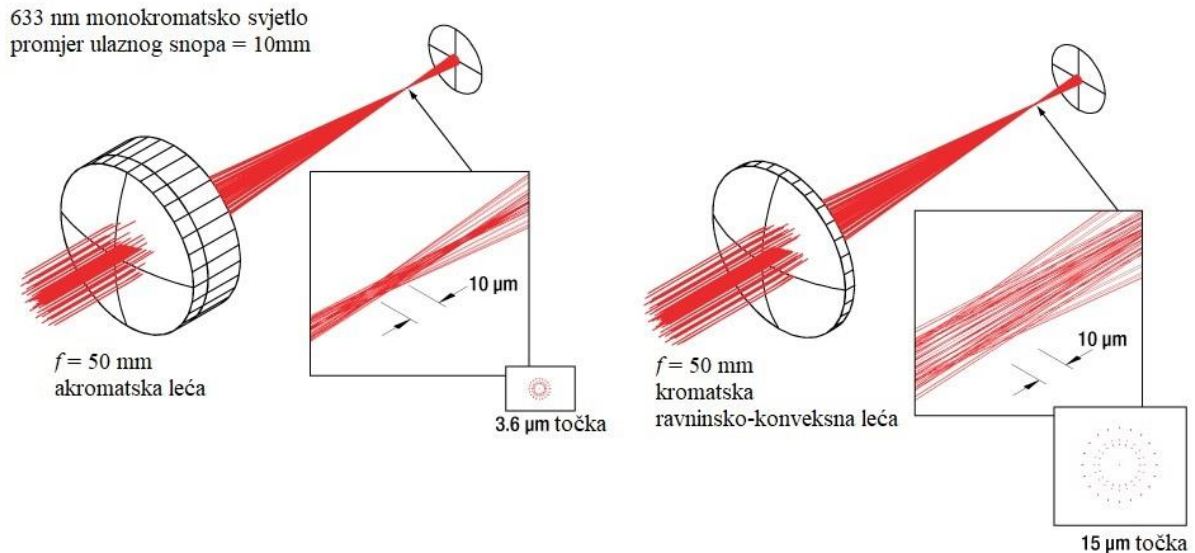
Postavlja se pitanje zašto je leća akromatska. Dva su razloga za to:

- uklanjanje kromatske aberacije,
- smanjenje žarišne točke.

Svaka je leća u osnovi prizma. Što je upadni kut svjetla na leću veći, veća je kromatska aberacija koja se događa, pogotovo na rubovima leće. Vezivanjem konkavne i konveksne leće u jednu leću može se postići svojstvo akromatičnosti, tj. neovisnosti o boji. Akromatska leća ispravlja kromatsku aberaciju za bar dvije valne duljine, tj. one se nalaze u istom žarištu. Vrsta stakla od kojih su leće napravljene također igra ulogu: jedna je obično načinjena od krunskog, a druga od kristalnog stakla kako bi se indeksi loma svjetlosti pri prolasku snopa kroz leće

međusobno poništiti [13]. Tako se snop svjetla ne raspršuje i dobiva se veća točnost očitavanja na senzoru.

Navedeno svojstvo također smanjuje površinu žarišne točke kroz koju snop prolazi, kao što se vidi na slici 17. Akromatska leća izrađena je tako da je raspršenje svjetlosti najmanje u žarištu leće.



Slika 17. Razlika između žarišne točke akromatske i kromatske leće

4.2.5. DMM 27UJ003-ML monokromatska kamera [14]

Senzor je drugi od dva najvažnija dijela autokolimatora. On određuje mjerno područje, a razlučivost autokolimatora određuje uz leću.

Monokromatska kamera uzeta je uz monokromatski izvor svjetla, uz prije spomenute razloge, kako bi se što više smanjio utjecaj okolnog svjetla na mjerenje. Bitan je čimbenik i što bolje očitavanje nitnih križeva koji padaju na nju.

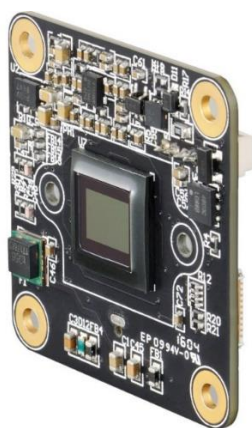
Uz monokromatsku kameru dostavljen je i odgovarajući program za primanje slike IC Capture 2.4.

Bitne značajke odabrane monokromatske kamere:

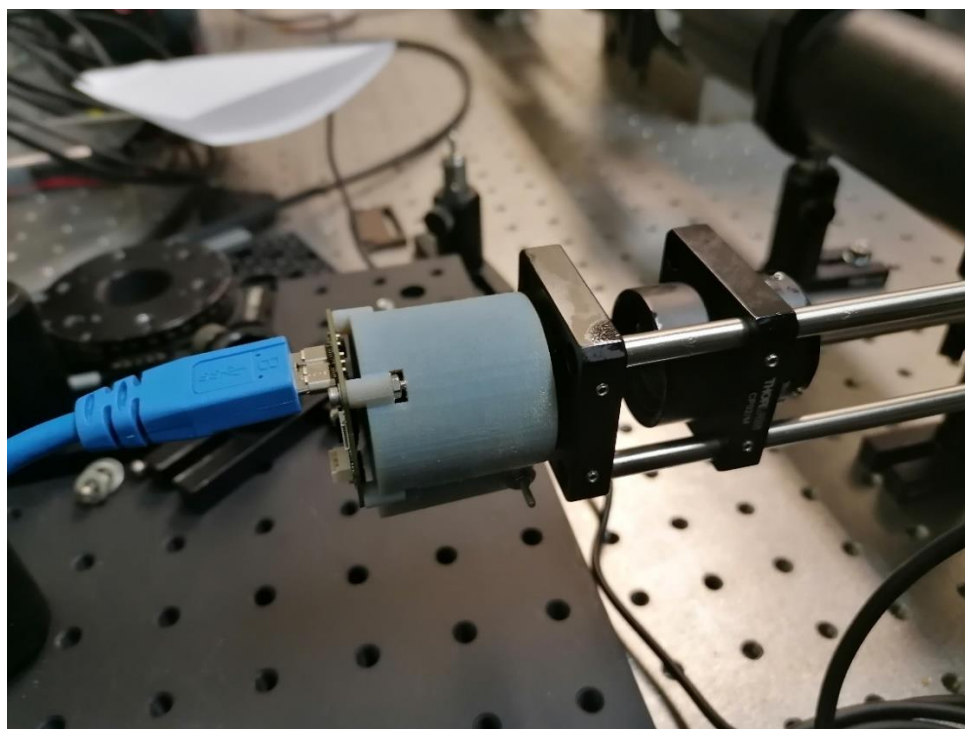
- veličina senzora: 3856 x 2764 piksela,
- veličina piksela: 1,67 μ m x 1,67 μ m.

Uz navedene značajke, za mjerne primjene bitno je i očitava li kamera vrijednosti svih piksela odjednom (eng. *global shutter*) ili se inkrementalno očitavaju pojedini redovi piksela (eng. *rolling shutter*). Drugi način može uzrokovati pogreške u očitavanju ako se mjere pojave koje brzo mijenjaju lokaciju slike u odnosu na frekvenciju očitavanja redova piksela. Iako odabrana kamera vrši očitavanje upravo na taj način (red po red piksela), zbog statične prirode mjerenja kuta ne očekuje se pojava pogešaka vezanih uz vrstu očitavanja vrijednosti piksela.

Slika 18. prikazuje sklop kamere, a slika 19. mjesto gdje je postavljena na autokolimatoru.



Slika 18. Monokromatska kamera



Slika 19. Ugrađena kamera

4.3. Teorijsko mjerno područje

Mjerno područje autokolimatora predstavlja najveći kut koji autokolimator može izmjeriti. Teorijsko mjerno područje u ovom se slučaju razlikuje po x i y osi jer sami senzor nije kvadratičan, samo pravokutan. Stoga imamo dva izraza za dva različita mjerna područja po izrazu 3.2.:

$$\alpha_x = \arctg\left(\frac{d_{x,max}}{2 \cdot f}\right) = \arctg\left(\frac{W}{2 \cdot f}\right), \quad 4.1.$$

$$\alpha_y = \arctg\left(\frac{d_{y,max}}{2 \cdot f}\right) = \arctg\left(\frac{H}{2 \cdot f}\right). \quad 4.2.$$

Visina i širina senzora nisu dane u milimetrima, no poznat je broj piksela po visini i širini i poznata je veličina pojedinog piksela. Tako će se širina senzora izračunati po izrazu

$$W = N_{x,px} \cdot W_{px}, \quad 4.3.$$

a visina po izrazu

$$H = N_{y,px} \cdot H_{px}. \quad 4.4.$$

Vrijednosti potrebne za izračun traženih veličina spomenute su u prethodnim potpoglavljima i ovdje su jasno ponovljene:

$$N_{x,px} = 3.856, \quad 4.5.$$

$$N_{y,px} = 2.764, \quad 4.6.$$

$$W_{px} = H_{px} = 1,67 \mu\text{m} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{m}, \quad 4.7.$$

$$f = 300 \text{ mm} = 300 \cdot 10^{-3} \text{m}. \quad 4.8.$$

Uvrštavanjem prethodnih vrijednosti u izraze 4.3. i 4.4. te tih izraza u izraze 4.1. i 4.2., dobivaju se sljedeće teorijske vrijednosti mjernih područja:

$$\alpha_x = \arctg\left(\frac{N_{x,px} \cdot W_{px}}{2 \cdot f}\right) = \arctg\left(\frac{3.856 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 300 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^\circ 36' 53,66'', \quad 4.9.$$

$$\alpha_y = \arctg\left(\frac{N_{y,px} \cdot H_{px}}{2 \cdot f}\right) = \arctg\left(\frac{2,764 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 300 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^\circ 26' 26,79''. \quad 4.10.$$

Dobivene su vrijednosti nazivne. S obzirom da nijedna leća nije jednaka drugoj i da nijedna nije savršena, potrebno je eksperimentalno utvrditi gornje i donje granice mjernih područja. Dva su razloga za to: prvi je provjera ishoda ispitivanja kako bi se vidjelo nalazi li se dobivena stvarna vrijednost mjernog područja unutar teorijskih granica. Drugi je nesavršenost same leće, nazivna žarišna duljina ne mora odgovarati stvarnoj vrijednosti.

Izrazi za granice mjernih područja jednaki su izrazima 4.1. i 4.2., samo se kao žarišna duljina stavlja njena gornja ili donja vrijednost po izjavi proizvođača.

$$f_{-1\%} = 300 \cdot 0,99 = 297 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad 4.11.$$

$$f_{+1\%} = 300 \cdot 1,01 = 303 \cdot 10^{-3} \text{ m}. \quad 4.12.$$

Kad se vrijednost u izrazu 4.11. uvrsti u izraze 4.9. i 4.10., gornje granične vrijednosti mjernih područja glase ovako:

$$\alpha_{x,max} = \arctg\left(\frac{N_{x,px} \cdot W_{px}}{2 \cdot f_{-1\%}}\right) = \arctg\left(\frac{3,856 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 297 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^{\circ}37'16,02'', \quad 4.13.$$

$$\alpha_{y,max} = \arctg\left(\frac{N_{y,px} \cdot H_{px}}{2 \cdot f_{-1\%}}\right) = \arctg\left(\frac{2,764 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 297 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^{\circ}26'42,82''. \quad 4.14.$$

S druge strane, donje će se granice pokazati uvrštavanjem vrijednosti izraza 4.12. u izraze 4.9. i 4.10.:

$$\alpha_{x,min} = \arctg\left(\frac{N_{x,px} \cdot W_{px}}{2 \cdot f_{+1\%}}\right) = \arctg\left(\frac{3,856 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 303 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^{\circ}37'16,02'', \quad 4.15.$$

$$\alpha_{y,min} = \arctg\left(\frac{N_{y,px} \cdot H_{px}}{2 \cdot f_{+1\%}}\right) = \arctg\left(\frac{2,764 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 303 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^{\circ}26'11,08''. \quad 4.16.$$

4.4. Teorijska razlučivost

Kao što se u prethodnom potpoglavlju mjerno područje izračunalo po izrazu 3.2., isti će se postupak upotrijebiti za izračun teorijske razlučivosti. Ovdje se radi o vezi kuta pomaka koji senzor može prepoznati i pomaka od jednog piksela koji odgovara tom kutu pomaka. Izraz je dan ovako:

$$\alpha_{r,x} = \alpha_{r,y} = \arctg\left(\frac{W_{px}}{2 \cdot f}\right) = \arctg\left(\frac{H_{px}}{2 \cdot f}\right). \quad 4.17.$$

Izrazi su jednaki jer je svaki piksel kvadratičan. Uvrštavanjem odgovarajućih vrijednosti izraženih u prethodnom potpoglavlju u izraz 4.11, teorijska razlučivost digitalnog autokolimatora iznosi

$$\alpha_{r,x} = \alpha_{r,y} = \arctg\left(\frac{1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 300 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^{\circ}0'0,5741''. \quad 4.18.$$

I ovdje se također mogu postaviti granice razlučivosti. Uvrštavanjem izraza 4.11. i 4.12. u izraz 4.17 dobiju se sljedeće vrijednosti granica razlučivosti:

$$\alpha_{r,x,max} = \alpha_{r,y,max} = \arctg\left(\frac{1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 297 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^{\circ}0'0,5799'', \quad 4.19.$$

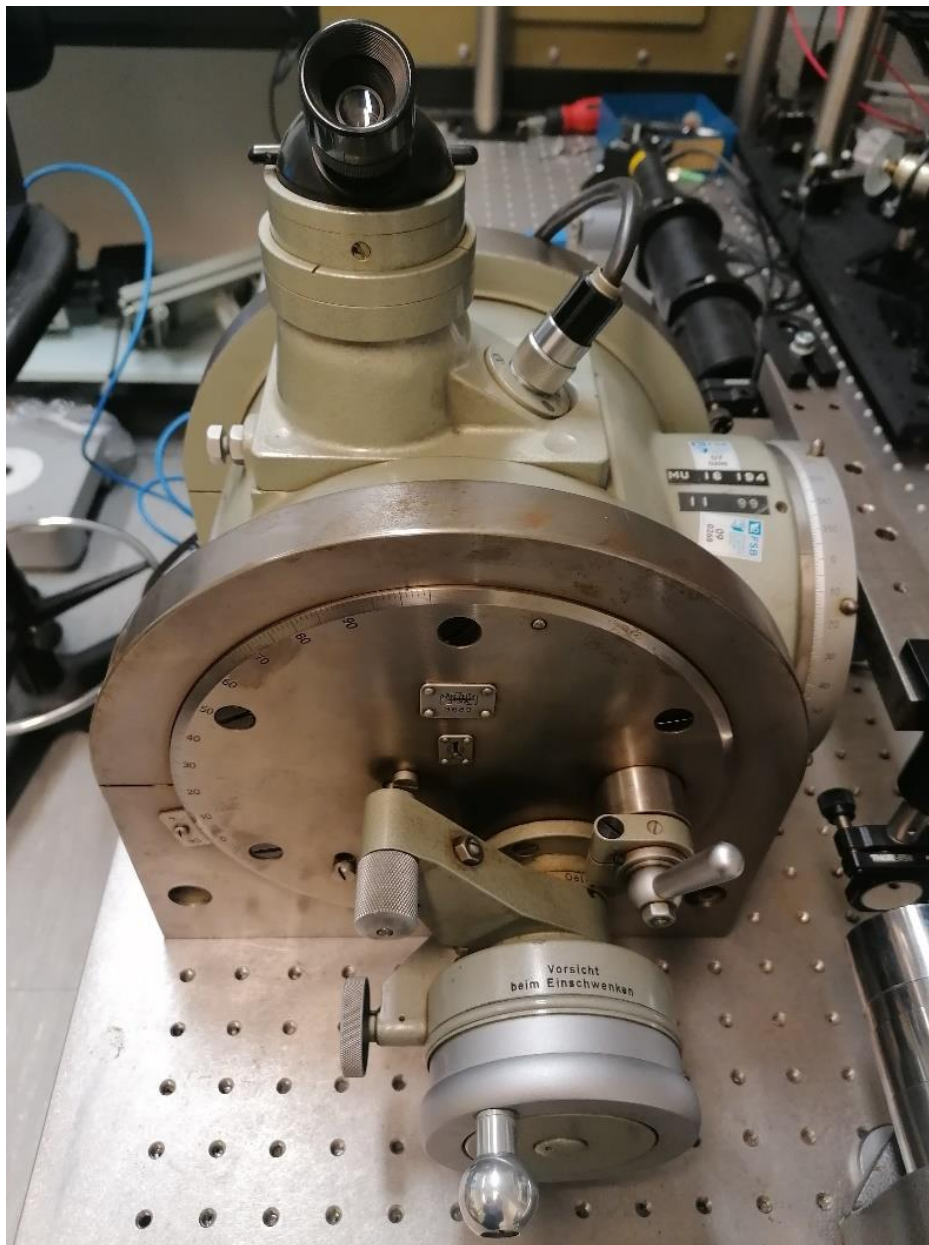
$$\alpha_{r,x,min} = \alpha_{r,y,min} = \arctg\left(\frac{1,67 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 303 \cdot 10^{-3}}\right) = 0^{\circ}0'0,5684''. \quad 4.20.$$

4.5. Diobena glava

Diobena je glava mjerni uređaj za mjerenje kuteva i točno pomicanje predmeta u horizontalnoj ravnini na temelju diobe kruga [15].

Ovdje služi za ostvarivanje finih nagiba poluge sa zrcalima ispred objektiva dva autokolimatora i tvori vezu između pomaka njihovih nitnih križeva. Također je poslužila za utvrđivanje mjernog područja digitalnog autokolimatora.

Na slici 20. prikazana je optička diobena glava upotrijebljena u mjerenjima.



Slika 20. Optička diobena glava

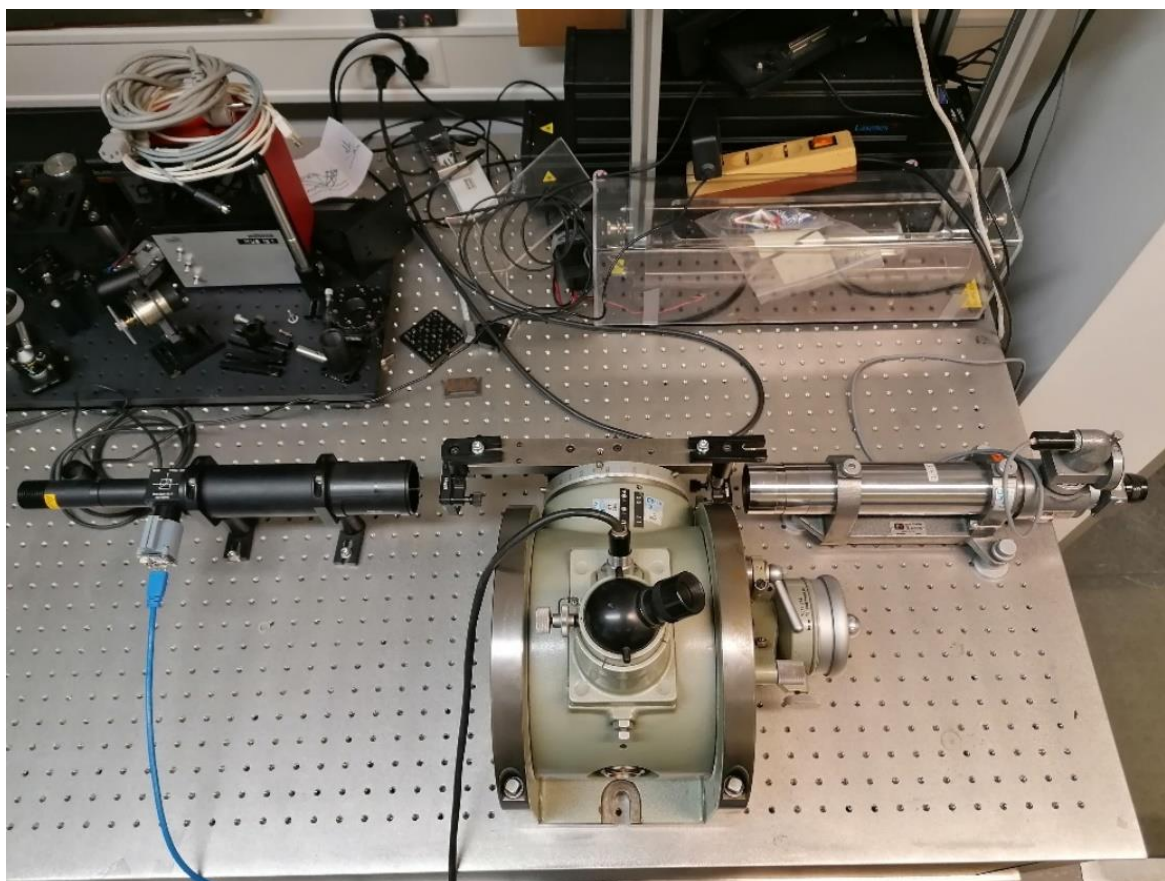
4.6. Antivibracijski stol / uvjeti okoliša

Kako bi se izbjegao utjecaj vibracija na ishode mjerenja, cijeli je postav složen na antivibracijskom stolu, slika 21. Njegova ploča lebdi na zračnim jastucima pod tlakom, što ujedno znači i da je postav okomit u odnosu na djelovanje sile teže.

Gornja površina stola sadrži brojne navoje u pravokutnoj mreži za pričvršćivanje mjerne opreme, mjerenih predmeta i drugih stvari, kako u kojem slučaju. Time se mjerni postav može

očuvati od nepredviđenih pomaka i može se s određenom sigurnošću rabiti s vremenskim odmacima između mjerenja.

Stabilnost uvjeta okoliša, prije svega temperature, tlaka i relativne vlažnosti okolišnog zraka, također je važna za ostvarivanje ponovljivih mjerenja. Svi navedeni parametri utječu na promjene indeksa loma zraka što može dovesti do varijacija optičkog puta tijekom samog mjerenja. Ovaj je utjecaj minimiziran provedbom pokusa u dijelu laboratorija koji ima najbolje temperaturne uvjete – temperatura zraka regulirana je unutar $20\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$.



Slika 21. Mjerni postav na antivibracijskom stolu

5. UTVRĐIVANJE MJERITELJSKIH ZNAČAJKI DIGITALNOG AUTOKOLIMATORA

Postavljeni su teorijski temelji, izračunate su teorijske vrijednosti traženih veličina i definiran je postav za ispitivanje i mjerenje. Zadatak je potvrditi ili opovrgnuti dosadašnje teorijske zaključke.

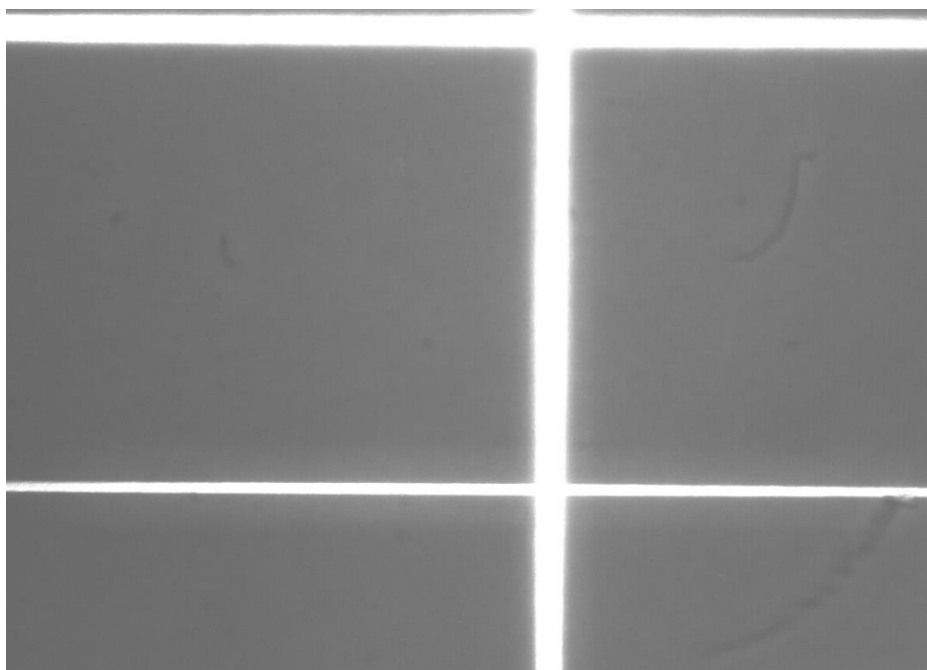
5.1. Mjerno područje

Mjerno područje digitalnog autokolimatora razlika je kuteva očitanih za položaje nitnog križa kolimatora na rubovima tog mjernog područja. Za određivanje je odabrano uže mjesto područje, ono po osi y , što se može vidjeti iz prethodnog izraza 4.10.:

$$\alpha_y = |\alpha_{y,g} - \alpha_{y,d}| \quad 5.1.$$

Apsolutna je vrijednost u izraz stavljena jer se kut može mjeriti s obje strane poluge diobene glave, tj. može se dogoditi slučaj da se na gornjoj granici očita kut manji od kuta na donjoj granici mjernog područja. To se nije dogodilo u ovom slučaju, ali općeniti izraz zahtijeva apsolutnu vrijednost kako bi vrijednost mjernog područja uvijek bila pozitivna.

Slika 22. prikazuje nitni križ doveden na gornju granicu mjernog područja. Tanja horizontalna crta pripada nitnom križu senzora, vertikalne linije oba nitna križa ovdje se preklapaju.

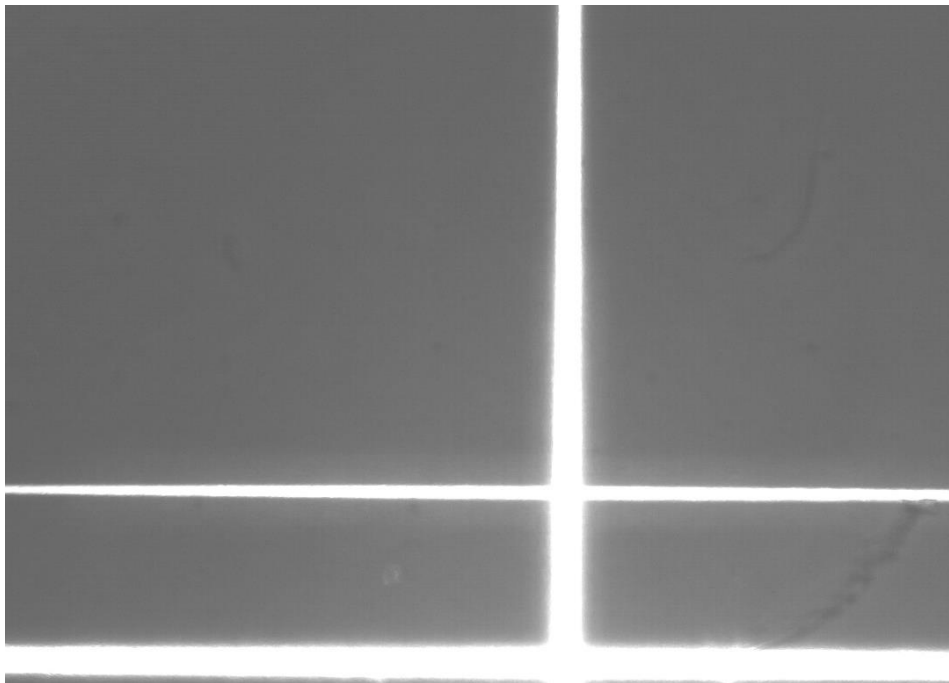


Slika 22. Gornja granica mjernog područja po osi y

Za gornju granicu koja se vidi na slici 18., na diobenoj je glavi očitana vrijednost kuta

$$\alpha_{y,g} = 357^{\circ}47' . \quad 5.2.$$

Isti se postupak primijenio i na donjoj granici, kao što se vidi na slici 23.



Slika 23. Donja granica mjernog područja po osi y

Očitani kut na diobenoj glavi za donju granicu mjernog područja iznosi

$$\alpha_{y,d} = 357^{\circ}22' . \quad 5.3.$$

Kad se vrijednosti u izrazima 5.2 i 5.3 uvrste u izraz 5.1, dobije se mjerno područje digitalnog autokolimatora po osi y:

$$\alpha_y = |\alpha_{y,g} - \alpha_{y,d}| = 357^{\circ}47' - 357^{\circ}22' = 0^{\circ}25' . \quad 5.4.$$

Dobivena razlučivost ne nalazi se unutar granica određenih izrazima 4.14. i 4.16. te bi se moglo zaključiti da mjerenje nije ispravno, no to nije slučaj.

Treba primijetiti da se nitni križ nije poravnao tik do ruba mjernog područja, nego je ostavljeno malo mjesta između stvarnog ruba i položaja nitnog križa. Razlog je potreba programa za uočavanje rubova za jasnim rubovima nitnog križa kako bi mogao izračunati središnju crtu pri mjerenju digitalnim autokolimatorom. Ukoliko bi se nitni križ pokušao postaviti na sam rub, došlo bi do veće pogreške pri mjerenju nego kad bi se radilo ovako kako

je prikazano, velikim dijelom zato što bi dio nitnog križa bio izvan mjernog područja i izračunata središnja crta ne bi se poklapala sa stvarnom središnjom crtom nitnog križa.

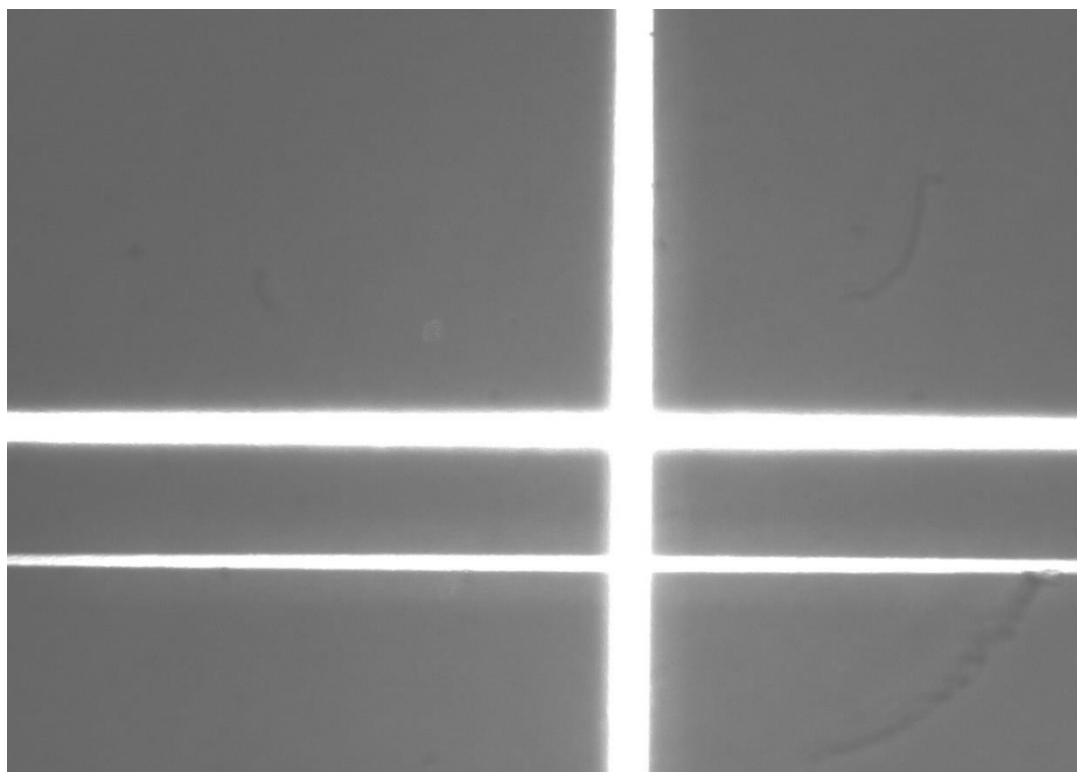
Ovo je ujedno i određeni faktor sigurnosti jer se nitni križ nikad neće moći vratiti u točno ove položaje, ali mali odmaci od ovih položaja mogu se tolerirati upravo zato što ima dovoljno mjesta za takvo nesavršeno pomicanje nitnog križa. Također je bitno da se dobivena vrijednost nalazi ispod donje granice određene izrazom 4.16., što znači da će mjerenja izvedena s ovako zadanim mjernim područjem uvijek biti čitljiva na senzoru.

5.2. Razlučivost

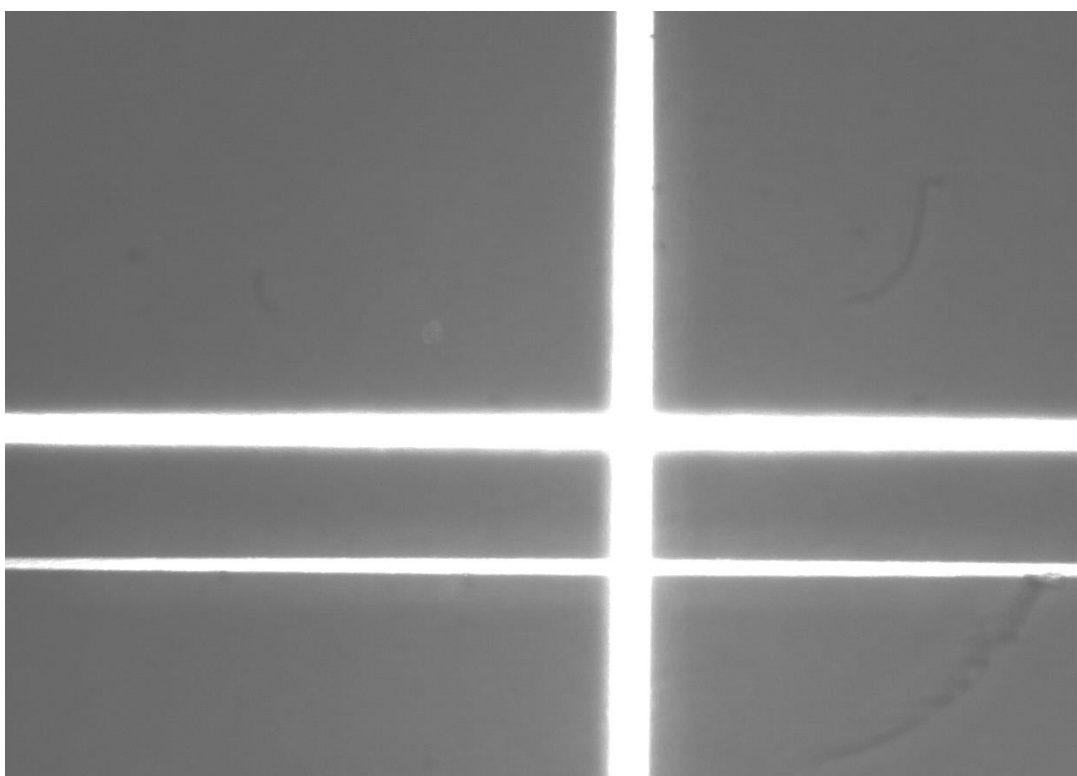
Ispitivanje razlučivosti počinje pomicanjem nitnog križa po mjernom području digitalnog autokolimatora. Očitava se kut za svaki položaj nitnog križa i uzima se slika svih tih položaja. Ovdje se za očitavanje kuta rabi laboratorijski autokolimator, a za mjerenje je odabrana os y .

Nakon što se napravi određeni broj tih mjerenja, gledaju se razlike kuteva i brojeva piksela između nitnih križeva kolimatora na tim slikama. Programom za očitavanje rubova pronalazi se središte nitnog križa na svakoj snimljenoj slici te se za svaka dva uzastopna mjerenja izračunava razlika između očitanih kuteva i očitanih položaja središta u pikselima.

Program se rabi zato što je nemoguće golim okom razlučiti razlike između položaja nitnog križa na dvije slike i izbrojiti tražene piksele položaja središta nitnog križa. Primjeri dani na slikama 24. i 25. zorno prikazuju potrebu za programskom obradom slika mjerenja. Razlika između dviju slika uzastopnih mjerenja gotovo je neprimjetna zbog izrazito sitnih kutnih pomaka među njima.



Slika 24. Izmjereni kut $0^{\circ} 4' 45,9''$



Slika 25. Izmjereni kut $0^{\circ} 4' 48,8''$

Mjereno je sedamdeset pomaka nitnog križa kolimatora oko referentnog položaja, uključujući i sam referentni položaj. Tablica 1. prikazuje očitane kuteve i brojeve piksela položaja središta nitnog križa. Svim izmjerenim kutevima stupnjevi su jednaki nuli te su zato stupnjevi izostavljeni iz tablice.

Tablica 1. Vrijednosti obavljenih mjerenja

Položaj	Kut (α_y)		Pozicija centra linije (N) [pikseli]
	Minute [' , m]	Sekunde [" , s]	
1	4	53,7	1490
2	4	45,9	1504,491
3	4	48,8	1498,5
4	4	36,7	1519,5
5	4	39,8	1518
6	4	34,6	1525,009
7	4	47,4	1503,5
8	4	29,2	1533
9	4	44,2	1508,5
10	4	47,1	1503,5
11	4	37,5	1520,5
12	4	29,9	1533,5
13	4	33,2	1527,482
14	4	57,2	1489,535
15	4	32,6	1510,991
16	4	47	1504
17	4	41,7	1514,5
18	4	44,6	1508,5
19	4	47,7	1504
20	4	57,8	1485
21	4	53	1493
22	4	45	1509
23	4	36,9	1522
24	4	32,7	1529,5
25	4	35,7	1522

26	4	43,1	1509
27	4	46,4	1504,5
28	4	42,9	1514,5
29	4	34,7	1529,5
30	4	30,4	1536,483
31	4	50,1	1503,5
32	4	34,6	1532,009
33	4	29,2	1540
34	4	32,9	1534
35	4	43	1515,991
36	4	55,9	1493
37	4	53,2	1501
38	4	44,6	1513,5
39	4	36,3	1529
40	4	40,6	1519,991
41	4	43,1	1517
42	4	49,4	1505,5
43	4	44,6	1515
44	4	38,8	1524,473
45	4	41,6	1519
46	4	36,6	1528,5
47	4	41,1	1520,5
48	4	48,2	1507
49	4	43,5	1517,5
50	4	36,6	1530
51	4	39,8	1522
52	4	49,6	1505,991
53	4	47,1	1508,982
54	4	41,5	1519,5
55	4	44,6	1514,5
56	4	45	1513
57	4	38,2	1523,5
58	4	41,3	1519

59	4	53,8	1498,491
60	4	49,4	1505,991
61	4	43,3	1516,5
62	4	46,3	1511,5
63	4	36,8	1529,5
64	4	39,1	1522
65	4	41,4	1518
66	4	59,8	1485,5
67	4	50	1504
68	4	45,7	1509,991
69	4	41,5	1519
70, referenca	4	42,9	1508,5

Pozivajući se na definiciju razlučivosti kao vezu kutnog pomaka i pomaka po pikselima senzora danu u potpoglavlju 4.4., razlučivost između dva mjerena položaja izračunava se po sljedećem izrazu:

$$\alpha_{r,y,i-1} = \left| \frac{\alpha_{y,i} - \alpha_{y,i-1}}{N_i - N_{i-1}} \right|, \quad 5.5.$$

$$i = 2, 3, \dots, 70. \quad 5.6.$$

Uvrštavanjem vrijednosti tablice 1. u izraz 5.5. dobivaju se vrijednosti razlučivosti sadržane u tablici 2.

Tablica 2. Razlučivost po mjerenjima

$i - 1$	$\alpha_i - \alpha_{i-1}$ [", s]	$N_i - N_{i-1}$	$\alpha_{r,y,i-1}$ [s / px]
1	7,8	14,491	0,538265
2	2,9	5,991	0,484059
3	12,1	21	0,57619
4	3,1	1,5	2,066667
5	5,2	7,009	0,741903
6	12,8	21,509	0,5951
7	18,2	29,5	0,616949
8	15	24,5	0,612245
9	2,9	5	0,58
10	9,6	17	0,564706

11	7,6	13	0,584615
12	3,3	6,018	0,548355
13	24	37,947	0,632461
14	24,6	21,456	1,146532
15	14,4	6,991	2,059791
16	5,3	10,5	0,504762
17	2,9	6	0,483333
18	3,1	4,5	0,688889
19	10,1	19	0,531579
20	4,8	8	0,6
21	8	16	0,5
22	8,1	13	0,623077
23	4,2	7,5	0,56
24	3	7,5	0,4
25	7,4	13	0,569231
26	3,3	4,5	0,733333
27	3,5	10	0,35
28	8,2	15	0,546667
29	4,3	6,983	0,615781
30	19,7	32,983	0,597277
31	15,5	28,509	0,543688
32	5,4	7,991	0,67576
33	3,7	6	0,616667
34	10,1	18,009	0,560831
35	12,9	22,991	0,561089
36	2,7	8	0,3375
37	8,6	12,5	0,688
38	8,3	15,5	0,535484
39	4,3	9,009	0,4773
40	2,5	2,991	0,835841
41	6,3	11,5	0,547826
42	4,8	9,5	0,505263
43	5,8	9,473	0,612266

44	2,8	5,473	0,511602
45	5	9,5	0,526316
46	4,5	8	0,5625
47	7,1	13,5	0,525926
48	4,7	10,5	0,447619
49	6,9	12,5	0,552
50	3,2	8	0,4
51	9,8	16,009	0,612156
52	2,5	2,991	0,835841
53	5,6	10,518	0,532421
54	3,1	5	0,62
55	0,4	1,5	0,266667
56	6,8	10,5	0,647619
57	3,1	4,5	0,688889
58	12,5	20,509	0,609489
59	4,4	7,5	0,586667
60	6,1	10,509	0,580455
61	3	5	0,6
62	9,5	18	0,527778
63	2,3	7,5	0,306667
64	2,3	4	0,575
65	18,4	32,5	0,566154
66	9,8	18,5	0,52973
67	4,3	5,991	0,717743
68	4,2	9,009	0,4662
69	1,4	10,5	0,133333

Tablica 2. također pokazuje zašto je potrebno izvršiti više od jednog mjerenja. Dobiti istu vrijednost pri dva mjerenja gotovo je nemoguće jer uvjeti za vrijeme dva različita mjerenja nisu isti, a kamoli za njih sedamdeset.

Raspon dobivenih vrijednosti treba suziti kako bi se prosjek mogao računati s vrijednostima otprilike jednako udaljenima od stvarne vrijednosti razlučivosti koju tražimo. Vrijednosti koje

se nalaze daleko iznad ili ispod većine ostalih vrijednosti loše utječu na prosjek i pomiču ga dalje od stvarne vrijednosti koju tražimo.

Uzevši u obzir teorijsku vrijednost razlučivosti po izrazu 4.18., vrijednosti koje će se uzeti u obzir pri računanju prosjeka razlučivosti određene su granicama po izrazima

$$\alpha_{r,y,gr} = \alpha_{r,y} \cdot (1 \pm 0,28), \quad 5.7.$$

$$\alpha_{r,y,g} = 1,28 \cdot 0,5741 = 0^{\circ}0'0,735'', \quad 5.8.$$

$$\alpha_{r,y,d} = 0,72 \cdot 0,5741 = 0^{\circ}0'0,413''. \quad 5.9.$$

Nakon što se iz tablice 2. izvuku vrijednosti koje se nalaze u rasponu zadanom izrazima 5.8. i 5.9., dobije se tablica 3.

Tablica 3. Vrijednosti razlučivosti unutar zadanog raspona vrijednosti

<i>i</i>	$\alpha_{r,y,i}$ [s / px]	<i>i</i>	$\alpha_{r,y,i}$ [s / px]
1	0,538265	29	0,561089
2	0,484059	30	0,688
3	0,57619	31	0,535484
4	0,5951	32	0,4773
5	0,616949	33	0,547826
6	0,612245	34	0,505263
7	0,58	35	0,612266
8	0,564706	36	0,511602
9	0,584615	37	0,526316
10	0,548355	38	0,5625
11	0,632461	39	0,525926
12	0,504762	40	0,447619
13	0,483333	41	0,552
14	0,688889	42	0,612156
15	0,531579	43	0,532421
16	0,6	44	0,62
17	0,5	45	0,647619
18	0,623077	46	0,688889
19	0,56	47	0,609489
20	0,569231	48	0,586667
21	0,733333	49	0,580455
22	0,546667	50	0,6

23	0,615781	51	0,527778
24	0,597277	52	0,575
25	0,543688	53	0,566154
26	0,67576	54	0,52973
27	0,616667	55	0,717743
28	0,560831	56	0,4662

Prosjeck ili srednja vrijednost razlučivosti najbliže je što možemo doći stvarnoj vrijednosti koju tražimo. Nakon što se vrijednosti u tablici 3. uvrste u izraz za srednju vrijednost [16]

$$\bar{\alpha}_{r,y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{r,y,i}, \quad 5.10.$$

dobije se srednja vrijednost razlučivosti

$$\bar{\alpha}_{r,y} = \frac{1}{56} \sum_{i=1}^{56} \alpha_{r,y,i} = 0^{\circ}0'0,574952''. \quad 5.11.$$

Vidi se da je ispitivanjem dobivena razlučivost gotovo jednaka nazivnoj, teorijskoj razlučivosti, što potvrđuje tu pretpostavljenu razlučivost. Razlika između te dvije razlučivosti manja je od 1%, što se može vidjeti po izrazu

$$\left| \frac{\alpha_{r,y} - \bar{\alpha}_{r,y}}{\alpha_{r,y}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,5741 - 0,574952}{0,5741} \right| \cdot 100 = 0,1484\%. \quad 5.12.$$

Sad treba vidjeti predstavlja li izračunata srednja vrijednost razlučivosti rezultate mjerenja razlučivosti. To se može postići izračunom standardne devijacije [17] po izrazu

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_{r,y,i} - \bar{\alpha}_{r,y})^2}. \quad 5.13.$$

Uvrštavanjem vrijednosti tablice 3. i izraza 5.11. u izraz 5.13. dobije se

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{56} \sum_{i=1}^{56} (\alpha_{r,y,i} - \bar{\alpha}_{r,y})^2} = 0^{\circ}0'0,06186''. \quad 5.14.$$

Iznos standardne devijacije je mali, čime smo potvrdili pretpostavku da izračunata srednja vrijednost razlučivosti dobro predstavlja rezultate mjerenja. U ovom slučaju to također znači da je ovako izveden postupak umjeravanja rezolucije ponovljiv.

5.3. Efektivni mjerni domet

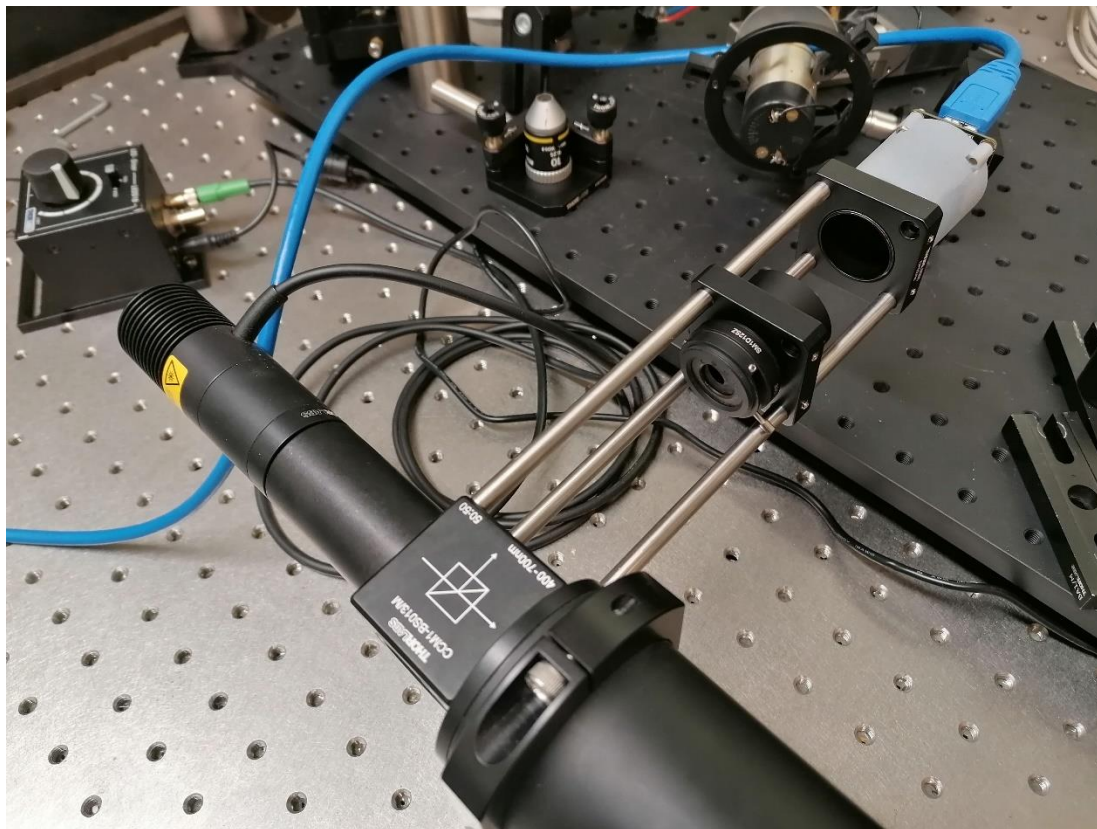
Mjerni domet autokolimatora prvenstveno ovisi o intenzitetu izvora svjetla, a zatim i o kvaliteti ugrađenih optičkih elemenata koji uzrokuju raspršenje povratnog snopa. S obzirom da je u ispitivani autokolimator ugrađen izvor svjetla vrlo visokog intenziteta, potrebno je ostvariti relativno velike udaljenosti mjernog zrcala kako bi se moglo uočiti mjerljivo smanjenje intenziteta.

Budući da je u trenutku izrade ovog rada Laboratorij za precizna mjerenja dužina bio u postupku obnove, oprema kojom bi se mogli ostvariti traženi pomaci nije bila dostupna te ovaj dio pokusa nije bilo moguće provesti. Kvalitativna analiza intenziteta kod pomaka od 1 m, što je najveći pomak koji se mogao ostvariti, pokazala je da pri tom pomaku nije došlo do vidljivog smanjenja intenziteta.

5.4. Utjecaj varijacije položaja leće na razlučivost

Sva dosadašnja ispitivanja provedena su na autokolimatoru kojem žarište primarne leće nije bilo fino podešeno, što znači da nitni križevi nisu bili maksimalno izoštrani. Mjerno područje ne mijenja se u odnosu na položaj primarne leće, no pitanje je vrijedi li isto za razlučivost autokolimatora koja se dobiva pomoću nitnih križeva.

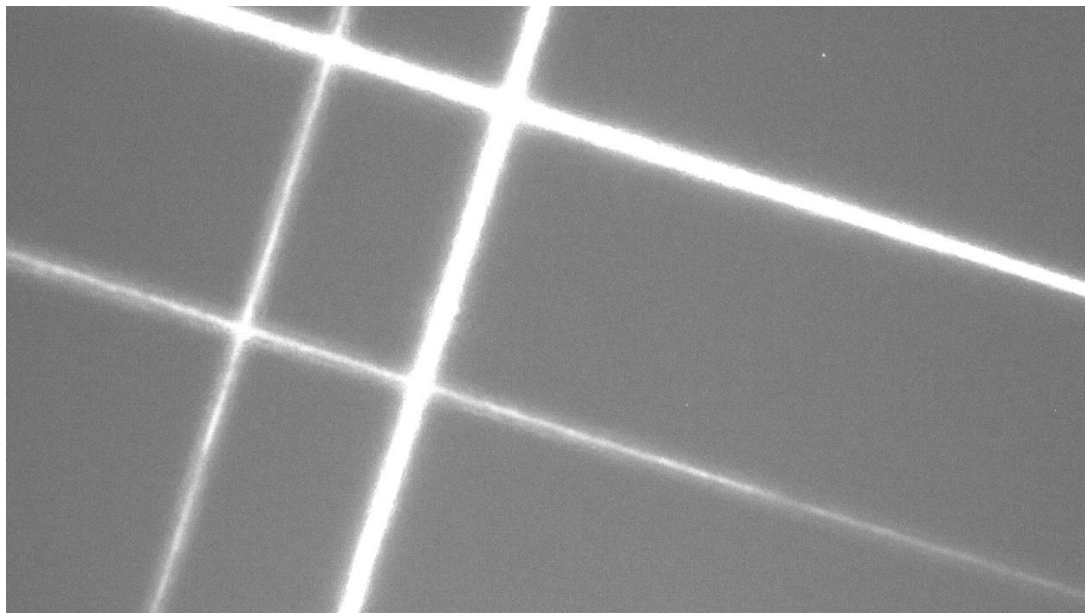
Autokolimator se podešava postavljanjem senzora na odgovarajući razmak od djelatelja snopa i postavljanjem žarišne točke na senzor. Za to je potrebno cijeli senzorski dio postaviti na suprotnu stranu djelatelja snopa, prikazano na slici 26.



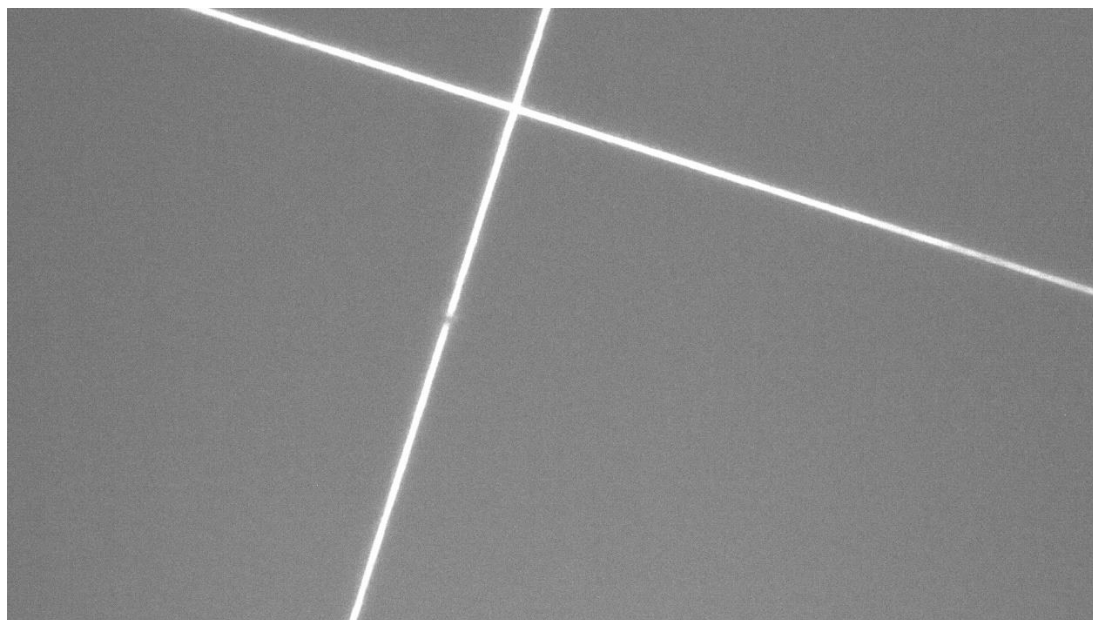
Slika 26. Položaj kamere

Na slici se također vidi leća s blendom koja će poslužiti za izoštravanje nitnog križa kolimatora. Blendom se, uz napajanje LED osvjetljenja, upravlja jačinom svjetla koje dolazi na senzor pri podešavanju.

Izoštravanje nitnih križeva prilično je osjetljiv posao jer je teško pogoditi točan položaj kamere i primarne leće za najbolji izgled nitnih križeva i najmanje rasipanje svjetla na njihovim rubovima. Slike 27. i 28. prikazuju zašto je bitno dobro podesiti autokolimator.



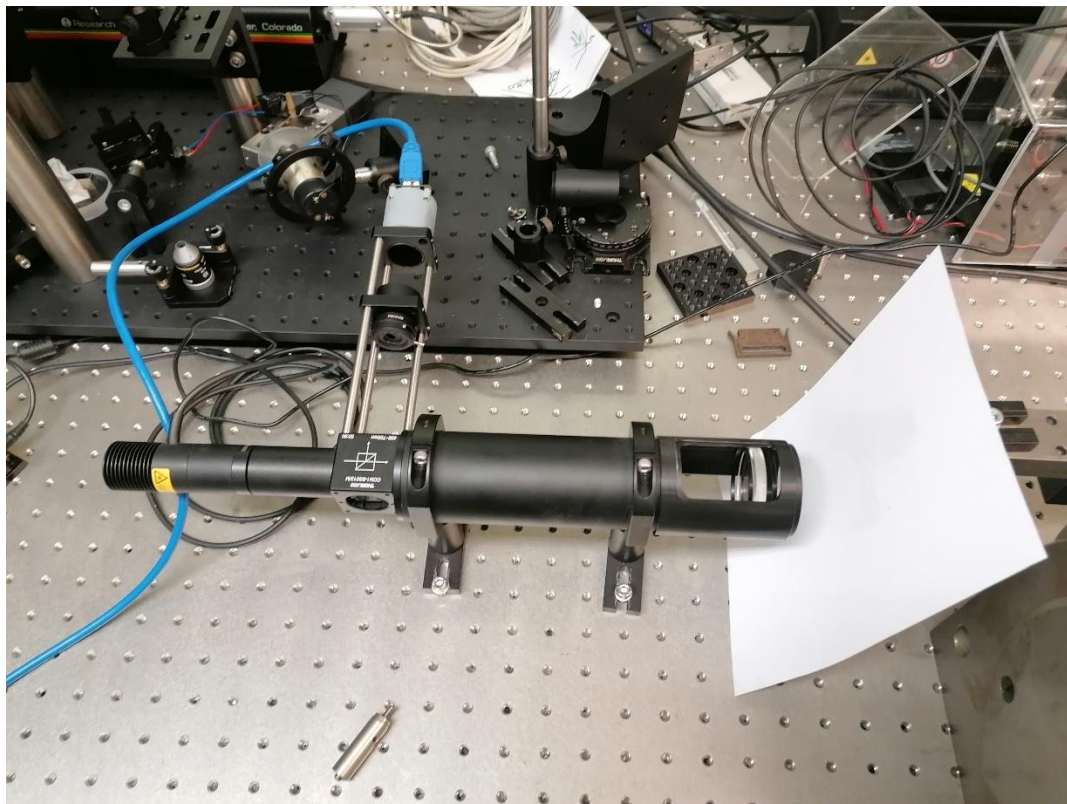
Slika 27. Neizoštreni nitni križevi



Slika 28. Izoštreni nitni križ senzora

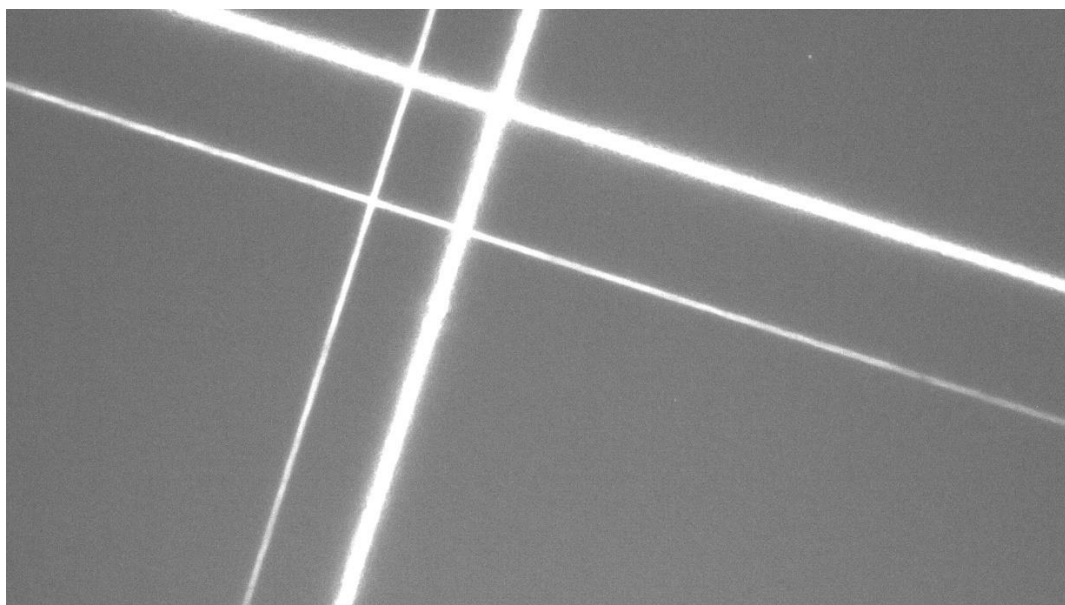
Zakret kamere u ovom trenutku nije bitan, zato se slike 23. i 24. razlikuju po nagibu.

Na prethodnoj se slici ne vidi povratni križ, tj. nitni križ kolimatora. Razlog je jednostavan: stavljena je zapreka između autokolimatora i zrcala kako se dva križa ne bi slučajno pomiješala i kako bi se lakše izoštrio ciljani nitni križ. Slika 29. prikazuje prekriveni objektiv autokolimatora.



Slika 29. Prekriveni objektiv autokolimatora

Nitni križ autokolimatora može se izoštriti nakon izoštravanja nitnog križa senzora. Izoštavanje se provodi pomicanjem primarne leće sve dok joj žarišna točka ne dođe na senzor, a to se vidi po nitnom križu. Na slici 30. vidi se izoštreni nitni križ kolimatora.



Slika 30. Izoštreni nitni križevi

Spomenuto je kako je ovo osjetljiv i dugotrajan posao. Prilično je teško ručno naći pravi položaj primarne leće, no ne i nemoguće. Problem predstavljaju i trzaji autokolimatora pri nepažljivom rukovanju koji mogu poremetiti sav dotadašnji trud. Važno je i postaviti prikaz senzora na najveću razlučivost koju ima kako bi se moglo vidjeti cijelo područje senzora, a time i cijeli nitni križevi.

Nakon što su se nitni križevi izoštrili, kamera se vraća na prvotno mjesto i vrše se mjerenja jednaka onima u potpoglavlju 5.2. Postupak je isti i iz njega za podešeni autokolimator proizlazi razlučivost

$$\bar{\alpha}_{r,y} = 0^{\circ}0'0,5767''. \quad 5.15.$$

6. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada bila je ispitati mjerne značajke digitalnog autokolimatora u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina. Uspješno su se ispitale tri mjerne značajke: mjerno područje, razlučivost i utjecaj varijacije položaja primarne leće na razlučivost. Jedina značajka koja se nije mogla u potpunosti ispitati bio je efektivni domet autokolimatora.

Tijekom ispitivanja bilo je i više nego potvrđeno koliko je autokolimator osjetljiv uređaj. U jednom se trenutku ispitivanje moralo prekinuti jer se nitni križ kolimatora na laboratorijskom autokolimatoru vrlo slabo vidio. Razlog je bilo zrcalo: moralo se zamijeniti jer je i nakon temeljitog pranja nitni križ bio mutan. S novim se zrcalom ispitivanje moglo nastaviti, a neispravno je zrcalo odloženo sa strane.

Primijećena je i razlika u kvaliteti slike na senzoru kad je izložen okolišnom svjetlu i kad je posve zaštićen i u tami. Bitno je osigurati mrak u unutrašnjosti autokolimatora tako da je jedino svjetlo koje pada na senzor ono nitnih križeva samog autokolimatora.

Podešavanje nitnih križeva i primarne leće brzo se pokazalo kao dugotrajan posao za mirnu ruku i strpljivu glavu. Sati se mogu provesti dok se autokolimator ne podesi sukladno svim zahtjevima koji su nužni kako bi se ostvarile najbolje mjeriteljske mogućnosti.

Sve u svemu, ovo je bilo vrijedno iskustvo. Rad je uspješno teorijski postavio i pokusima utvrdio tražene značajke i pružio potrebne podatke za budući rad s digitalnim autokolimatorom.

LITERATURA

- [1] mjerenje. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=41305>, 27. 6. 2020.,
- [2] Jugoslavenski leksikografski zavod. Tehnička enciklopedija: 8 Meh-Mos. Zagreb: Grafički zavod Hrvatske; 1982. p. 496-497.
- [3] Međunarodni sustav jedinica. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=39852>, 28. 6. 2020.
- [4] Metarski sustav jedinica. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=40388>, 27. 6. 2020.
- [5] pramjera. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49943>, 28. 6. 2020.
- [6] umjeravanje. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=63149>, 28. 6. 2020.
- [7] Jugoslavenski leksikografski zavod. Tehnička enciklopedija: 8 Meh-Mos. Zagreb: Grafički zavod Hrvatske; 1982. p. 604-610.
- [8] Trioptics. Optitest, a complete range of Optical Instruments. http://trioptics-usa.com/wp-content/uploads/Optitest_en.pdf, 30. 6. 2020.
- [9] Thorlabs, M625L4, <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=M625L4>, 8. 7. 2020.
- [10] Thorlabs, R1DS3N, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6768&pn=R1DS3N, 8. 7. 2020.
- [11] Thorlabs, CCM1-BS013/M, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4129&pn=CCM1-BS013/M, 8. 7. 2020.
- [12] Thorlabs, AC508-300-A, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=120&pn=AC508-300-A, 8. 7. 2020.
- [13] akromatičnost. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=1162>, 8. 7. 2020.

- [14] The imaging source, DMM 27UJ003-ML <https://www.theimagingsource.com/products/board-cameras/usb-3.0-monochrome/dmm27uj003ml/>, 8. 7. 2020.
- [15] Francis T. Farago, Mark A. Curtis: Handbook of Dimensional Measurement, Third edition. New York: Industrial Press Inc., 1994., [https://books.google.hr/books?id=eVQPSr8nWekC&pg=PA258&lpg=PA258&dq=Carl+Zeiss+dividing+head&source=bl&ots=5-Yt297-LS&sig=ACfU3U0gp_0RmjHmJ7h2uZ4gP_ZMqXG_Uw&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwjBtY_-hrjqAhVy-
yoKHcHOCQ4Q6AEwEnoECAoQAQ#v=onepage&q=Carl%20Zeiss%20dividing%20head&f=false](https://books.google.hr/books?id=eVQPSr8nWekC&pg=PA258&lpg=PA258&dq=Carl+Zeiss+dividing+head&source=bl&ots=5-Yt297-LS&sig=ACfU3U0gp_0RmjHmJ7h2uZ4gP_ZMqXG_Uw&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwjBtY_-hrjqAhVy-
yoKHcHOCQ4Q6AEwEnoECAoQAQ#v=onepage&q=Carl%20Zeiss%20dividing%20head&f=false)
- [16] aritmetička sredina. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=3839>, 9. 7. 2020. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=3839>>
- [17] standardna devijacija. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57758>, 9. 7. 2020.