

Razvoj metodologije projektiranja i postupka umjeravanja rekonfigurabilnoga mjernog sustava

Vlatković, Maja

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:478086>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Maja Vlatković

**RAZVOJ METODOLOGIJE
PROJEKTIRANJA I POSTUPKA
UMJERAVANJA REKONFIGURABILNOGA
MJERNOG SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Maja Vlatković

**RAZVOJ METODOLOGIJE
PROJEKTIRANJA I POSTUPKA
UMJERAVANJA REKONFIGURABILNOGA
MJERNOG SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Duško Pavletić

Rijeka, 2023.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

Maja Vlatković

**DESIGN PRINCIPLES AND CALIBRATION
METHOD OF RECONFIGURABLE
MEASURING SYSTEM**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2023

Mentor doktorskog rada: prof. dr. sc. Duško Pavletić

Doktorski rad obranjen je dana _____ na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. izv. prof. dr. sc. Sandro Doboviček, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
2. prof. dr. sc. Zoran Jurković, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
3. prof. dr. sc. Biserka Runje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

Zahvale

Ovim putem se prvenstveno zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Dušku Pavletiću na velikoj pomoći tijekom studija i izradi doktorskog rada.

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Sandru Dobovičeku, na idejama i dijelu financiranja ovog istraživanja, te tvrtkama Feroplast i TEH-CUT, posebno Valteru Uranu na izrađenim uzorcima.

Veliko hvala prof. dr. sc. Biserki Runje na savjetima i mogućnosti boravka na Katedri za mjerenje i kontrolu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Također se zahvaljujem kolegicama i kolegama sa Zavoda za industrijsko inženjerstvo i menadžment na podršci i savjetima, posebno prof. dr. sc. Zoranu Jurkoviću.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj obitelji koja me podupirala tijekom cijelog mog obrazovanja. Zahvaljujem braći Luki i Nikoli na moralnoj i stručnoj podršci. Hvala suprugu Matiji na motivaciji i razumijevanju.

SAŽETAK

Trendovi suvremene proizvodnje utječu na promjene u proizvodnoj tehnologiji koja mora postati brzo i učinkovito prilagodljiva postavljenim zahtjevima. To dovodi do uspostave koncepta rekonfigurabilnosti i na njemu temeljenog razvoja rekonfigurabilnih proizvodnih sustava (RPS). Prema načelima rekonfigurabilnosti takav sustav mora biti dizajniran na način da se može brzo prilagoditi zahtjevima unutar pojedine grupe predmeta te između različitih grupa predmeta. Sastavni dio takvih sustava, pored proizvodne opreme, čini i kontrola kvalitete te pripadajuća mjerna i kontrolna oprema. Kontrola kvalitete neizostavan je dio proizvodnog procesa. Da bi se uspostavio učinkovit RPS potrebno je da i mjerna i kontrolna oprema bude projektirana i korištena u skladu s navedenim konceptima. Ovaj rad bavi se razvojem metodologije projektiranja i postupaka umjeravanja rekonfigurabilnih mjernih sustava (RMS). Iz asortimana proizvoda potrebno je odrediti skupinu sličnih proizvoda koji će se kontrolirati odgovarajućim RMS-om te predložiti metodologiju projektiranja i postupak umjeravanja takvog RMS-a, uključujući i izradu referentnog etalona potrebnog za njegovo umjeravanje. Osmišljavanjem odgovarajućeg RMS-a osigurat će se potrebna razina fleksibilnosti i točnosti. Ovo istraživanje oslanja se na tehnike beskontaktnih dimenzionalnih mjerenja strojnim vidom. Dizajnirani sustav kao glavnu komponentu koristi strojni vid koji je postao neizostavan dio industrijske metrologije u konceptu Industrije 4.0. U radu je prikazan postupak projektiranja i umjeravanja ovakvog mjernog sustava. Rezultati provedenog mjerenja projektiranim RMS-om su uspoređeni s konvencionalnom metodom mjerenja. Raspon mogućnosti projektiranog RMS-a prikazan je na primjeru mjerenja provedenog na predmetima jednostavnog geometrijskog oblika te na složenijim predmetima koji dolaze iz realnog proizvodnog okruženja. Svrha ovakvog mjernog sustava je da se prilagodi varijacijama proizvoda, a u radu prikazani RMS konstruiran je za određene tri grupe proizvoda, koje su se dobile iz skupine od 12 proizvoda. Prednost sustava koji koristi strojni vid je da se uz potrebne dimenzije dobivaju i fotografije predmeta koje se mogu koristiti za daljnju digitalnu obradu i analizu.

ABSTRACT

In order to meet modern production trends, a production technology has to become promptly and effectively adjustable to set demands. As a consequence, the concept of reconfigurability was introduced along with the development of reconfigurable production systems (RPS) based on the new concept. According to the principles of reconfigurability, such a system must be designed to promptly adopt set demands within a specific product group or within different product groups of products. Apart of production equipment, the associated quality control and measurement equipment is an integral component of this type of systems. Quality control is an essential part of the production process. To set up an efficient RPS, the quality control and measuring equipment must also be designed and used in line with forementioned concepts. This paper is having focus on developing of design methodology and procedures for reconfigurable measuring system (RMS) calibration. It is necessary to define a group of alike products, among full product range that will be controlled with an appropriate RMS and to propose an suitable design methodology as well as calibration procedure for such RMS, inclusive of construction of the etalon required for their calibration. Designing of an appropriate RMS will guarantee required level of flexibility and accuracy for the system. This research focuses on contactless dimensional measurement techniques using machine vision. Integral component of designed system is machine vision, which is in any case an essential element of industrial metrology as part of the Industry 4.0 concept. The design and calibration procedure of designed measurement system is presented in this thesis. The results of measurements performed with the designed RMS are compared with conventional measurement methods. The measurements performed on simply shaped objects and on more complex shaped objects that originate from the real production environment show the range of possibilities of designed RMS. Purpose of the designed measurement system is to easily adapt to product variations, hence presented RMS is designed for three product groups selected out of 12 products. Inclusive of dimensional checks, the system with implemented machine vision is providing additional advantages as the recorded images can be used later for subsequent digital processing and analysis.

KLJUČNE RIJEČI

Rekonfigurabilnost
Rekonfigurabilni mjerni sustav
Beskontaktno mjerenje
Optičko mjerenje
Strojni vid
Mjerni sustav
Umjeravanje
Kontrola kvalitete
Referentni predmet / etalon

KEYWORDS

Reconfigurability
Reconfigurable measuring system
Non-contact measuring
Optical measuring
Machine vision
Measuring system
Calibration
Quality control
Reference object

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SAŽETAK..... | i |
| ABSTRACT | ii |
| KLJUČNE RIJEČI | iii |
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Cilj i hipoteze istraživanja | 3 |
| 1.2. Struktura rada | 5 |
| 2. REKONFIGURABILNOST U PROIZVODNIM SUSTAVIMA | 7 |
| 2.1. Usporedba postojećih proizvodnih sustava | 9 |
| 2.2. Rekonfigurabilni proizvodni sustav..... | 10 |
| 2.2.1. Karakteristike i načela RPS | 12 |
| 2.2.2. Rekonfigurabilnost primijenjena na proizvodne strojeve | 16 |
| 2.3. Rekonfigurabilnost u sustavima kontrole kvalitete proizvoda | 19 |
| 2.4. Rekonfigurabilni mjerni sustavi u industrijskom okruženju | 22 |
| 2.5. Strojni vid kao osnovni dio mjernog sustava u Industriji 4.0..... | 25 |
| 3. METODOLOGIJA PROJEKTIRANJA REKONFIGURABILNOGA MJERNOG SUSTAVA..... | 30 |
| 3.1. Postavljanje ciljeva i analiza asortimana proizvoda | 31 |
| 3.2. Određivanje grupa iz zadanog asortimana proizvoda..... | 32 |
| 3.3. Traženje mogućih rješenja RMS-a | 39 |
| 3.4. Odabir mjerne metode | 44 |
| 3.5. Odabir konfiguracije RMS-a | 48 |
| 3.5.1. Hardverski dio predloženog sustava..... | 49 |
| 3.5.2. Softverski dio predloženog sustava..... | 60 |
| 3.6. Izvedba sustava i provedba mjerenja | 72 |
| 3.7. Predložena metodologija projektiranja RMS-a | 75 |

| | |
|---|-----|
| 4. METODOLOGIJA UMJERAVANJA REKONFIGURABILNOGA MJERNOG SUSTAVA..... | 77 |
| 4.1. Dostupnost etalona i dosadašnja istraživanja mjerenja i umjeravanja vizijskih sustava | 78 |
| 4.2. Definiranje zahtjeva i projektiranje etalona..... | 82 |
| 4.2.1. Smjernice za odabir etalona prilikom umjeravanja na RMS-u | 90 |
| 4.3. Izrada etalona za odabrane grupe proizvoda | 91 |
| 4.3.1. Provedba umjeravanja RMS-a predloženim etalonom..... | 93 |
| 4.4. Predložena metodologija umjeravanja RMS-a | 94 |
| 5. PRIMJENA PROJEKTIRANOG RMS-A NA ODABRANOM PRIMJERU | 96 |
| 5.1. Opis postupka mjerenja RMS-om na grupi proizvoda 1 | 96 |
| 5.1.1. Potvrda odabira modula RMS-a..... | 98 |
| 5.1.2. Analiza mjernog sustava | 100 |
| 5.1.3. Provedba mjerenja na RMS-u radi praćenja procesa izrade dijelova..... | 105 |
| 5.2. Opis postupka mjerenja RMS-om na grupi proizvoda 2 | 110 |
| 5.3. Opis postupka mjerenja RMS-om na grupi proizvoda 3 | 112 |
| 5.4. Analiza rezultata mjerenja | 114 |
| 6. ZAKLJUČAK | 116 |
| POPIS LITERATURE | 121 |
| POPIS OZNAKA I KRATICA | 132 |
| POPIS SLIKA | 134 |
| POPIS TABLICA..... | 138 |
| ŽIVOTOPIS | 139 |
| POPIS OBJAVLJENIH RADOVA | 140 |

1. UVOD

Zahvaljujući sve naprednijoj tehnologiji, izumom automatiziranih strojeva, događa se takozvana četvrta industrijska revolucija. Informatika i telekomunikacija napredovale su uz razne softvere i hardvere te donose revoluciju proizvodne Industrije 4.0 u sklopu koje se razvijaju tzv. pametne tvornice. Nacionalni institut za standarde i tehnologije (NIST, 2022) definira pojam pametne tvornice kao potpuno integrirani i kolaborativni proizvodni sustav koji ima svojstvo reagiranja u stvarnom vremenu kako bi odgovorio na promjenjive zahtjeve i uvjete u tvornici, novonastale zbog potrebe kupaca. Ključno je kod pametne proizvodnje da se stvara okruženje koje će na dulji period osigurati pozitivne pokazatelje u ekonomiji te biti sposobno na ubrzano razvijanje novih koncepata, metoda i tehnologija.

Osnovni cilj proizvodnje je ostvarenje planiranih količina proizvoda iz proizvodnog programa s konstrukcijskim, tehnološkim i proizvodnim karakteristikama uz održavanje propisane kvalitete. Naime, nužno je utvrditi kvalitetu proizvoda koji napušta proizvodni proces te osigurati kontinuitet proizvodnje (Mikac i Ljubetić, 2009).

Smatra se da je za uspjeh na današnjem tržištu potrebno prilagoditi proizvodnju povezivanjem zahtjeva korisnika i prilagodbe operacija u proizvodnji. Ekološki aspekti se moraju zadovoljiti što znači optimizirati potrošnju ograničenih resursa te maksimalno iskoristiti prednosti svakog proizvoda u životnom ciklusu s ciljem zaštite i očuvanja okoliša.

Zahtjevi korisnika odnosno kupaca u nekim granama proizvodnje postaju sve više nepredvidljivi te je stoga potrebno stvoriti okruženje koje će se ponašati u skladu s brzim promjenama. Orijentacija na zahtjeve korisnika i brza prilagodba na nove tehnologije mijenja strukturu proizvodnje. Istraživanja idu i u smjeru potrebe za uvođenjem rekonfigurabilnosti koja se primjenjuje zbog sve veće potrebe za promjenom i individualizacijom proizvoda.

Neizostavan dio proizvodnog procesa je kontrola kvalitete proizvoda. Kontrola kvalitete proizvoda ne doprinosi direktno vrijednosti proizvoda u proizvodnom procesu, no ona mora biti

prisutna. Reakcija i brzina za pronalazak nesukladnosti na proizvodima je vrlo bitna. Potrebno je u skladu s konceptima Industrije 4.0 dobiti brzu povratnu informaciju.

Mjeriteljstvo je jedna od najstarijih znanosti i temeljna je potreba svim znanstvenim djelatnostima te čini temelje kvalitete proizvoda. Današnja istraživanja u ovom području usmjeravaju se su sve više prema beskontaktnim mjerenjima i primjeni strojnog vida u kontroli kvalitete. Strojni vid već se neko vrijeme koristi upravo u mjerenjima i 100 % -tnoj kontroli na proizvodnoj liniji, a sve u sklopu Industrije 4.0. Vizijski sustavi i napredne tehnologije omogućile su napredak u kontrolnim uređajima, no postavlja se pitanje njihove točnosti. Kako bi se izradak imao s čime usporediti potrebno je proizvesti referentni predmet, odnosno etalon. Trenutno je dominantna obrada 2D dobivene fotografije za pozicioniranje, detekciju ruba, objekata, dijelova objekata, mjerenja dimenzija te čitanja barkodova, teksta i sl. Koristi se najviše u detekciji i mjerenju dimenzija ravnih i tankih objekata (poput lemljenih pločica i sl.) bez promjene visine (Martin Gramatke, 2019). Prilikom korištenja strojnog vida u kontroli kvalitete, vrlo bitna tema je umjeravanje takvog sustava. Umjeravanje se provodi kako bi se odredio odnos između dimenzije koja je izmjerena u pikselima i stvarne dimenzije predmeta. Ova pretvorba prvenstveno utječe na mjeriteljski sustav. Da bi se moglo provesti točno i precizno mjerenje, pogreška mjernog sustava mora biti minimalna (Moru i Borro, 2021).

Proučavanjem potrebe za uvođenjem 100 % kontrole proizvoda na proizvodnoj liniji, zaključeno je kako postoji potreba za osmišljavanjem koncepta rekonfigurabilnog sustava za kontrolu kvalitete. Takav sustav će omogućiti brzu reakciju na promjene zahtjeva korisnika vezanih uz proizvod kao i brzu povratnu informaciju u slučaju nezadovoljavanja tih zahtjeva. Postojeći mjerni sustavi koji imaju takvu razinu fleksibilnosti, kao što je primjerice koordinatni mjerni uređaj (KMU), nemaju dovoljnu brzinu povratne informacije. Suprotno njima, konvencionalni uređaji i naprave, poput naprava „ide-ne ide“, koje predstavljaju tip linijskog sustava uz malu fleksibilnost, imaju brzu povratnu informaciju. Rekonfigurabilni mjerni sustav (RMS) se po svojim karakteristikama našao u sredini između prethodno spomenutih, kombinirajući njihove najbolje karakteristike.

Ovaj rad bavi se razvojem metodologije projektiranja i postupka umjeravanja rekonfigurabilnoga mjernog sustava. Predložena metodologija pokazana je primjenom na asortimanu proizvoda. Slika 1.1 prikazuje trendove u proizvodnji koji dovode do uvođenja rekonfigurabilnosti u proizvodnim i mjernim sustavima, te potrebe za metodologijom projektiranja i umjeravanja takvih sustava.

Pojedine tvrtke nude gotove 3D digitalizirane hardvere i softvere, no oni su zatvorenog tipa u smislu prilagodbe zahtjeva korisnika te cjenovno zahtjevni. Najčešće nisu pogodni za brzo mjerenje određene grupe proizvoda. Svrha rekonfigurabilnog sustava je da se prilagodi varijacijama proizvoda, a da pri tome ne utječe na brzinu proizvodnje, odnosno kontrole.

Za provedbu kontrole kvalitete rekonfigurabilnim mjernim sustavom (RMS) prvo je potrebno odrediti način na koji će se odrediti grupa proizvoda koja se koristi pri provjeri kontrole kvalitete. Nakon što je određen postupak kojim će se grupe odrediti, potrebno ih je i formirati. Na formiranim grupama potrebno je odrediti područja od interesa na kojima se kontrola provodi. Prema tim područjima formiraju se potrebni resursi s kojima će se kontrola provoditi. Potrebno je odrediti maksimalne dimenzije proizvoda kako bi se formirao RMS. Težnja je uvesti 100 % kontrolu u proizvodni sustav te dobiti pravovremenu povratnu informaciju kako bi se odmah reagiralo na nepravilnosti te time smanjila proizvodnja nezadovoljavajuće kvalitete. Slijedom navedenog, u serijskoj proizvodnji nema dovoljno vremena za primjenu fleksibilnog uređaja za kontrolu poput KMU na proizvodnoj liniji ukoliko je ciklus proizvodnje kraći od trajanja provjere s KMU.



Slika 1.1 Trendovi u proizvodnji

1.1. Cilj i hipoteze istraživanja

Dva značajna utjecajna elementa koji karakteriziraju suvremenu proizvodnju su skraćenje životnog vijeka proizvoda te povećanje raznolikosti, odnosno prilagodba proizvoda zahtjevima kupca. Takvi tržišni trendovi utječu na promjene u proizvodnoj tehnologiji koja mora postati brzo i učinkovito prilagodljiva postavljenim zahtjevima. Time dolazi do uspostave koncepta rekonfigurabilnosti i na njemu temeljenog razvoja rekonfigurabilnih proizvodnih sustava (RPS). Sastavni dio RPS-a, pored odgovarajućih strojeva i naprava, odnosno proizvodne

opreme, čini i kontrola kvalitete te pripadajuća mjerna oprema. Stoga, da bi se uspostavio učinkovit RPS potrebno je da i mjerna i kontrolna oprema bude projektirana i korištena u skladu s konceptima rekonfigurabilnosti. Istraživanja u tom području su u začetcima te je predloženo istraživanje usmjereno ka razvoju metodologije projektiranja i postupaka umjeravanja rekonfigurabilnih mjernih sustava (RMS) te njihove primjene u industrijskom okruženju.

Pored proizvodne opreme bitan element proizvodnog sustava je i kontrolna oprema. Dosadašnja istraživanja vezana uz kontrolnu opremu i njeno projektiranje u konceptu rekonfigurabilnosti skromnijeg su obima. Radovi skupine autora (Barhak et al., 2005), (Davrajh i Bright, 2010), (Davrajh i Bright, 2013) prva su i gotovo jedina objavljena istraživanja u području rekonfigurabilnih kontrolnih (mjernih) sustava te integracije istih u RPS. Stoga je ovo područje posebno interesantno za daljnje istraživanje i razvoj.

Svrha istraživanja je projektiranje rekonfigurabilnoga mjernog sustava koji će omogućiti dovoljno brzu i potpunu kontrolu kvalitete proizvoda prema zahtijevanim karakteristikama i mogućnostima.

Cilj istraživanja je razviti metodologiju projektiranja rekonfigurabilnoga mjernog sustava i metodologiju postupka umjeravanja rekonfigurabilnoga mjernog sustava.

Hipoteze:

H1: Projektiranjem rekonfigurabilnoga mjernog sustava može se dobiti optimalni rekonfigurabilni mjerni sustav.

H2: Postupak umjeravanja ovisi o grupi proizvoda odnosno odabranim karakteristikama koje će se mjeriti.

H2.1.: Za umjeravanje potrebno je koristiti odgovarajuće pripremljeni etalon.

Slijedom postavljenih hipoteza potrebno je projektirati mjerni sustav koji će zadovoljiti sve karakteristike rekonfigurabilnosti. Razvijenom metodologijom postupka umjeravanja definirat će se optimalno umjeravanje rekonfigurabilnoga mjernog sustava što podrazumijeva određivanje etalona za umjeravanje takvog sustava te time dovesti do minimalne pogreške mjerenja takvim sustavom. Time će se omogućiti optimalno umjeravanje s jasnim smjernicama o umjeravanju rekonfigurabilnoga mjernog sustava.

1.2. Struktura rada

Istraživanje će obuhvatiti:

- teorijsku analizu i sintezu postojećih koncepata rekonfigurabilnosti u proizvodnim i kontrolnim sustavima
- definiranje konfiguracije i izradu RMS-a temeljem definirane grupe sličnih proizvoda
- provedbu pokusa mjerenja
- modeliranje i izradu referentnog etalona obzirom na prikupljene informacije dobivene iz provedenih pokusa mjerenja
- analizu kvalitete uspostavljenog mjernog sustava.

U prvom dijelu rada naveden je opis problema istraživanja, hipoteze, ciljevi i svrha istraživanja te je obrazložena struktura doktorskog rada.

Drugi dio rada opisuje rekonfigurabilnost u proizvodnim sustavima, karakteristike i načela rekonfigurabilnosti te njenu primjenjivost u sustavima kontrole kvalitete. Opisani su trendovi industrijske metrologije te postizanje rekonfigurabilnosti u mjernom sustavu. Opisana je metoda beskontaktnog mjerenja korištenjem strojnog vida.

U trećem dijelu rada na početku je dan pregled osnovnih koraka prilikom projektiranja rekonfigurabilnoga mjernog sustava, a koji su kroz daljnja potpoglavlja analizirani, detaljizirani i prikazani kroz primjer. Poglavlje je zaključeno sažetim pregledom metodologije projektiranja RMS-a. Uz primjer iz zadanog asortimana proizvoda, određene su grupe proizvoda te je predstavljen RMS koji je ujedno i izveden i postavljen za provedbu kontrole kvalitete.

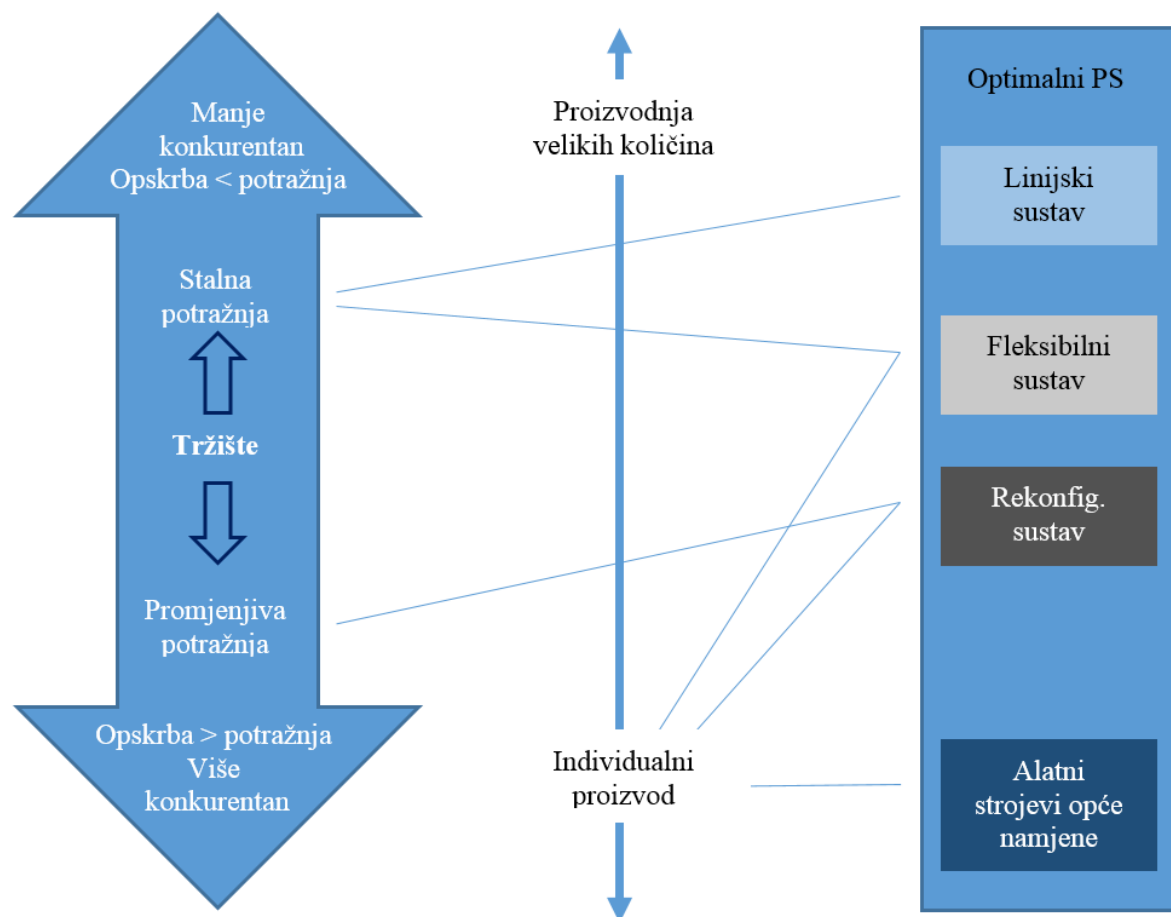
Četvrto poglavlje opisuje metodologiju umjeravanja RMS-a. Poglavlje počinje uvidom u dosadašnja istraživanja vezanih za umjeravanje vizijskih sustava uz prikaz dostupnih načina umjeravanja. Opisan je postupak umjeravanja s naglascima na što je potrebno obratiti pažnju te smjernice za određivanje etalona. Prema zadanom asortimanu proizvoda koji će se mjeriti na ovom sustavu, a imajući u vidu sve spoznaje iz istraživanja, predložen je model i izrađen je set etalona kojim se predloženi sustav umjerio.

U petom poglavlju prikazana je provedba mjerenja i primjena sustava na odabranim grupama proizvoda. Mjerene su zahtijevane karakteristike odabranih grupa proizvoda s opisom postavki sustava. Provedena je analiza mjernog sustava te su prikazani rezultati koji su se dobili na mjerenju predmeta iz realnog okruženja.

U zadnjem poglavlju dan je zaključak o provedenom istraživanju kroz potvrde postavljenih hipoteza i ostvareni znanstveni doprinos te su također dani prijedlozi za daljnja istraživanja.

2. REKONFIGURABILNOST U PROIZVODNIM SUSTAVIMA

Zahtjevi korisnika odnosno kupaca u nekim granama proizvodnje postaju sve više nepredvidljivi te je stoga potrebno stvoriti okruženje koje će se ponašati u skladu s brzim promjenama i ekološki prihvatljivijim rješenjima. Orijentacija na zahtjeve korisnika i brza prilagodba na nove tehnologije mijenja strukturu proizvodnje. Kako bi ostale konkurentne, tvrtke trebaju koristiti sustav u kojemu ne samo da će se proizvesti potrebni proizvodi dovoljno brzo i s visokom kvalitetom nego će imati sposobnost brzog odgovora na novonastale zahtjeve tržišta (slika 2.1).



Slika 2.1 Povezanost potreba tržišta i odabira proizvodnog sustava (Koren, 2010)

Takvi proizvodni sustavi koji su sposobni brzo odgovoriti na promjenu zahtjeva i time plasirati novi proizvod nazivaju se rekonfigurabilni proizvodni sustavi (RPS). To su mehanizmi u

nastajanju koji pomažu proizvodnim organizacijama da ostanu konkurentne na globalnom tržištu gdje su snažni ekonomski pritisci i veliki zahtjevi u varijacijama proizvoda, a istovremeno se nalaze u dinamičnom okruženju (Singh et al., 2017).

Proces transformacije proizvodnje danas i u budućnosti bitno je pod utjecajem promjena i novih paradigmi. Tri su bitne nove paradigme u proizvodnji (Dashchenko, 2006):

- pogled na životni vijek proizvoda
- integracija znanja u proizvode
- servisi orijentirani na proizvode.

Svi oni utječu na proizvodni proces i mogu se primijeniti na proizvodnju. Promjene bi se trebale prilagoditi na svim razinama u proizvodnji kako na radno mjesto tako i na strojeve i procese.

Krajem 20-tog stoljeća proizvodnja je ušla u novu eru Industrije 4.0. Ona po definiciji obuhvaća integraciju suvremenih informacijsko komunikacijskih tehnologija (ICT) s konvencionalnom fizičkom proizvodnjom i procesima, što omogućuje razvoj novih tržišta i poslovnih modela (Veža, 2016).

Preko novih pojmova koji su zastupljeni u industriji poput IoT (Internet Of Things), CPS (engl. *Cyber – Physical System*), oblak (engl. *Cloud*), analiza velikih podataka (engl. *Big Data Analyses*), robotika te virtualna stvarnost (engl. *virtual reality* (VR)), pametne tvornice mogu se jednostavnije realizirati. Z. Bi et al. (2014) se bave jednim takvim utjecajem IoT tehnologije u proizvodnom okruženju pametne tvornice. Postupci poput ugradnje senzora i komunikacijske opreme za proizvodnju strojeva i linija zahtijevaju i razvoj softvera te sustava koji mogu interpretirati i analizirati masovne ulazne podatke.

Promjene u tehnologiji općenito mijenjaju strukturu industrije te pomažu u optimizaciji procesa. Kako bi prelazak na takvu strukturu industrije bio moguć, potrebno je da tehnologije, procesi i ljudi budu povezani i zajedno rade.

Svi proizvodni sustavi trebali bi imati tri cilja:

- proizvoditi uz niske troškove
- poboljšati kvalitetu proizvoda i
- imati sposobnost brze reakcije na postavljene zahtjeve.

Rekonfigurabilni sustavi usmjereni su na postizanje trećeg cilja, a to je odaziv na postavljeni zahtjev. Da bi se ovo zadovoljilo, sustav i strojevi moraju biti konstruirani u skladu s ciljem rekonfigurabilnosti, jer ukoliko taj početni zahtjev nije zadovoljen ovakav pristup je potpuno nepraktičan.

Koncept rekonfigurabilnosti prvi puta se spominje 1999. godine u Michiganu (Koren, Heisel, et al., 1999), a danas je prepoznat kao nezaobilazan alat za povećanje proizvodnosti i opstanak na globalnom tržištu.

2.1. Usporedba postojećih proizvodnih sustava

Od postojećih proizvodnih sustava dominantni su linijski i fleksibilni sustav. U nastavku je prikazan njihov kratki pregled.

Linijski sustav dizajniran je tako da proizvodi jedan tip proizvoda, ali u velikim količinama. Sastavljen je od više strojeva koji su poredani u liniji i svaki obavlja svoj dio proizvodnog procesa kako se proizvod pomiče po liniji (konvejeru/pomičnoj traci). Ovakav sustav isplativ je kada se dugoročno proizvodi jedan proizvod. Sustav je baziran na strojevima s ograničenom automatizacijom i proizvodi ono za što je specijaliziran, odnosno jednu vrstu proizvoda u velikim serijama i na duži vremenski period. Fleksibilnost je pri takvom sustavu niska, a kapacitet proizvodnje visok. Ukoliko je sustav takav da sadrži više proizvodnih linija, svaka linija je dizajnirana na način da proizvodi jedan dio proizvoda u velikoj količini koji se zatim na jednoj od linija sklapa s drugim dijelovima proizvoda. Kako je količina velika, time je cijena jediničnog proizvoda niska, no problemi se javljaju zbog jake globalne konkurencije ili zbog nedovoljne iskorištenosti kapaciteta linije, a time se javljaju i veliki gubitci kada linija nije potpuno iskorištena. Kod početnih ulaganja, kapitalni troškovi su konstantni do maksimalno planiranog kapaciteta, ukoliko postoji potreba za povećanjem kapaciteta, ugrađuje se u sustav potpuno nova neovisna proizvodna linija. Dodavanjem jedne linije, kapacitet se udvostručuje, no ako potreba za tolikim kapacitetom nije potrebna, sustav brzo postaje neisplativ, a ulaganje upitno.

Fleksibilni sustavi pojavili su se 70-tih godina prošlog stoljeća. Na takvim sustavima moguće je proizvoditi više različitih proizvoda, proizvodni kapacitet je niži od kapaciteta linijskih

sustava i nisu dizajnirani za brzu izmjenu svojih sposobnosti u smislu kapaciteta, no fleksibilnost je veća i troškovi ulaganja su veći. Fleksibilni sustav je sastavljen od programabilnih uređaja te može proizvoditi raznolike proizvode u jednom sustavu. Ovakav sustav podrazumijeva prilagodbu na (Mikac, 2004):

- asortiman izradaka (proizvodni program)
- alternativnost tehnološkog procesa (promjenu redoslijeda operacija)
- promjenu veličine serije te promjenu ukupnih količina izradaka.

Fleksibilni sustavi se razvijaju oko CNC strojeva kada se govori o proizvodnji, a kada se govori o montaži ključan element su robotski sustavi, dok je u kontroli kvalitete primjer fleksibilnosti koordinatni mjerni uređaj (KMU). Ovakva izvedba strojeva je mnogo skuplja od onih koji se koriste u linijskom sustavu.

U tablici 1 dan je prikaz osnovnih karakteristika navedenih sustava u usporedbi s rekonfigurabilnim sustavom.

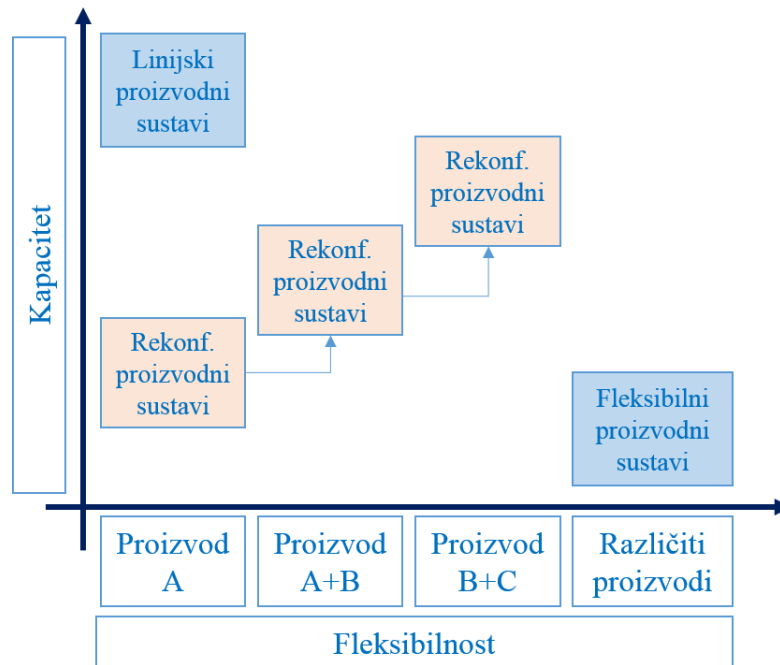
Tablica 1 Usporedba tradicionalnih sustava s RPS-om (Dashchenko, 2006)

| <i>Vrsta sustava</i> | <i>Linijski</i> | <i>Fleksibilni</i> | <i>RPS</i> |
|-------------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Cijena po jedinici proizvoda | niska | visoka | srednja |
| Struktura sustava | fiksna | promjenjiva | promjenjiva |
| Razina fleksibilnosti | niska | visoka | srednja |
| Razina skalabilnosti | niska | visoka | visoka |
| Produktivnost | visoka | niska | visoka |
| Fokus sustava | izradak | stroj | grupa proizvoda |

2.2. Rekonfigurabilni proizvodni sustav

Radi potrebe za brzim odgovorima na uvjete na tržištu, željama korisnika/kupca, zakonskim odredbama ili pogreškama u proizvodnji, razvila se potreba za drugačijim proizvodnim sustavima koji se po svojim karakteristikama nalaze između područja primjene fleksibilnog i linijskog sustava. Takav sustav naziva se rekonfigurabilni proizvodni sustav (RPS). Kada bi se usporedio ovakav sustav s tradicionalnima prema slici 2.2, zaključilo bi se da je od oba predstavnika tradicionalnih sustava, ovakav sustav preuzeo prednosti i kombinirao ih. Pa tako

za razliku od linijskih i fleksibilnih, RPS odgovara na količinu proizvoda, njihov kapacitete i fleksibilnost u skladu sa zahtjevima tržišta. To pokazuju i autori Hassan et al. (2011) koji su napravili hibridnu rekonfigurabilnu CIM ćeliju koja je preuzela najbolje od fleksibilnog CIM i RPS sustava.



Slika 2.2 Područje primjene rekonfigurabilnih proizvodnih sustava (Dashchenko, 2006)

Potrebna karakteristika sustava je da što brže reagira na zahtijevane promjene koje su prisutne na tržištu. To se postiže zadovoljavanjem konstrukcije sustava prema dva principa (Dashchenko, 2006):

- Dizajnirati sustav s pripadajućim strojevima s prilagodljivom strukturom koja omogućava skalabilnost sustava prema zahtjevima tržišta i prilagodljivost sustava prema zahtjevima novog proizvoda. Struktura se može prilagoditi na razini sustava i na razini stroja.
- Dizajnirati sustav na način da se prilagodi određenoj grupi proizvoda, s prilagođenom fleksibilnošću čime se smanjuje ukupni trošak proizvodnje.

Rekonfigurabilni proizvodni sustav je sustav konstruiran na način da je u mogućnosti brzo izmijeniti strukturu (hardverske i softverske komponente), u cilju prilagodbe kapaciteta i funkcionalnosti proizvodnog sustava sukladno zahtjevima tržišta za određenu grupu proizvoda (Koren et al., 2018).

Sustav koji ima prilagodljivu strukturu, skalabilnost i fleksibilnost, a koji je orijentiran na određenu grupu proizvoda, odgovara na osnovnu ideju rekonfigurabilnih sustava zadanu definicijom i navedenim principima rekonfigurabilnosti.

U slučaju kada su potrebne veće količine proizvoda, ali je nesigurnost trajanja proizvoda na tržištu visoka, tada je RPS najisplativije troškovno rješenje. Autor (Renna, 2017) se bavi problematikom odabira sustava uz pomoć korištenja genetskog algoritma izborom hoće li to biti linijski, fleksibilan ili rekonfigurabilan sustav te je dao prijedlog rješenja sustava koji će biti optimalan s obzirom na zahtjeve tržišta.

Rekonfigurabilni proizvodni sustav omogućuje fleksibilnost ne samo u proizvodnji izradaka, već i u promjeni samog sustava. Da bi sustavi bili rekonfigurabilni moraju se takvima dizajnirati i to korištenjem posebnih tehnologija i posjedujući specifične karakteristike.

U rekonfigurabilnost je potrebno uvrstiti i proizvodnu politiku razvoja organizacijske strukture (prema proizvodnom programu i određivanju grupe proizvoda), politiku osiguranja alata (izrada specijalnih dodataka za rekonfigurabilnu proizvodnju i orijentacija prema nabavi rekonfigurabilnih strojeva) te politiku financiranja s dugoročnim planom.

Krygier (2005) je opisao na koji način je rekonfigurabilan sustav implementiran u tvornicu Ford Motor Co. uz analizu početnih ulaganja u takav sustav. Vuković et al. (2010) u svom radu pokušavaju odgovoriti na posebnosti rekonfigurabilnih proizvodnih sustava koji su po definiciji projektirani za proizvodnju grupe proizvoda i pokušavaju približiti troškovnu učinkovitost proizvodne linije s prilagodljivosti FS-a.

Iako istraživači od kada je prvi put spomenut pojam rekonfigurabilnog sustava razvijaju i istražuju to područje industrije, još postoje područja u kojima se mora predložiti rješenje. Za sada koncept rekonfigurabilnosti dobiva praktično značenje i ojačan je snažnim i vidljivim ekonomskim prednostima, navode Singh et al. (2017).

2.2.1. Karakteristike i načela RPS

Koren i Shpitalni (2010) su postavili 6 glavnih karakteristika koje se moraju zadovoljiti da bi se sustav nazvao rekonfigurabilnim. Općenito sustav treba biti dizajniran na način da se relativno jednostavno i brzo izmjenjuju hardverske i softverske komponente. U suprotnom,

sustav je nepraktičan i neupotrebljiv. Prema navedenim zahtjevima nastalo je 6 glavnih karakteristika podijeljenih u dvije skupine:

- 1) tri kritične rekonfigurabilne karakteristike:
 - prilagodljivost
 - skalabilnost
 - konvertibilnost (promjenjivost).
- 2) tri karakteristike koje omogućuju brzu rekonfiguraciju, ali pri tome ne jamče izmjene proizvodnih kapaciteta i funkcionalnosti:
 - dijagnostibilnost
 - modularnost
 - integrabilnost.

Ovih 6 karakteristika potrebno je primijeniti na bilo koji rekonfigurabilni sustav pa tako i na mjerni sustav.

2.2.1.1. Prilagodljivost

Prilagodljivost se definira kao karakteristika sustava da je dizajniran tako da omogućava točno određenu razinu fleksibilnosti kolika je potrebna za određenu grupu proizvoda. Još se naziva i prilagođena fleksibilnost, što definira značenje da će primjerice konfiguraciju nekog stroja odrediti upravo određena grupa proizvoda. Ovakav pristup omogućava korištenje više različitih alata na istom stroju. Ova karakteristika čini razliku RPS od tradicionalnih sustava i omogućuje značajnu ekonomsku korist povećanjem produktivnosti uz niže troškove.

2.2.1.2. Skalabilnost

Skalabilnost se definira kao sposobnost promjene kapaciteta dodavanjem ili uklanjanjem proizvodnih resursa ili mijenjanjem dijelova sustava. Može uključivati i dodavanje strojeva u sustav za proširenje kapaciteta ukoliko tržište to zahtijeva.

Luke (1993) spominje jednu od definicija skalabilnosti kao „mogućnost održavanja troškovne učinkovitosti s povećanjem radnog opterećenja“. Predložio je i funkciju po kojoj se ocjenjuje skalabilnost.

Uran (2021) je u svojoj disertaciji proučavao utjecaj skalabilnosti na formiranje rekonfigurabilnih sustava i utvrdio da skalabilnost ima značajan utjecaj na optimalno funkcioniranje proizvodnje s postavljenim proizvodnim kapacitetima upravo toliko koliko ih treba u određenom terminu potražnje.

2.2.1.3. Konvertibilnost (Promjenjivost)

Karakteristika konvertibilnosti se definira kao sposobnost jednostavne transformacije funkcionalnosti postojećih sustava i strojeva u skladu s novim proizvodnim zahtjevima (Koren i Shpitalni, 2010). Mehrabi et al. (2000) definiraju karakteristiku konvertibilnosti kao mogućnost sustava da brzo promijeni postojeće proizvode i prilagodi se budućim proizvodima, a autor Farid (2017) daje prijedlog mjere konvertibilnosti.

2.2.1.4. Dijagnostibilnost

Dijagnostibilnost je karakteristika koja omogućuje prikaz stvarnog stanja sustava i otkriva uzrok pogreške u sustavu ili na proizvodu, a uzrokovanu sustavom. Cilj je sprječavanje kvara prije nego se dogodi. Kako se od rekonfigurabilnog sustava zahtijevaju češće modifikacije, ova karakteristika je bitna za brzo podešavanje novog sustava u cilju zahtijevane kvalitete proizvoda. Autori Gumasta et al. (2011) su podijelili dijagnostibilnost na detektibilnost, predvidljivost i prepoznatljivost. Detektibilnost je mjera vremena koje prolazi prije činjenice da neuspjeh postoji i da je prepoznat. Predvidljivost je mjera vremena koje će proći prije nego što se dogodi određeni neuspjeh. Prepoznatljivost je mjera vremena koje je potrebno da bi se odredilo koja je jedinica zamjenjive linije sustava uzrok gubitak funkcionalnosti. Također daje prijedlog za računanje dijagnostibilnosti. Izračun se kreće u vrijednostima od 0 do 1. Vrijednost 0 pokazuje da se ne može odrediti točna linija na kojoj nastaje problem, dok vrijednost 1 točno pokazuje mjesto na kojem nastaje problem.

2.2.1.5. Modularnost

Rekonfigurabilni sustav zahtijeva da su sve komponente koje ga čine modularne. Kada se ukaže potreba, modularne komponente mogu se jednostavno zamijeniti ili nadograditi ovisno o potrebi radnog zadatka za određeni sustav. Module je jednostavnije i lakše zamijeniti nego

cijele uređaje/sustave, a time se smanjuju troškovi koji su prouzrokovani skraćivanjem životnog vijeka uređaja/sustava. Nova kompenzacija i umjeravanje pri promjeni modula može se odmah uvrstiti u strojnu kontrolu kako bi se postigla veća točnost uređaja/sustava. Pravilnim odabirom osnovnih modula i načinom na koji su spojeni omogućeno je više kombinacija sustava koje se mogu prilagoditi i konvertirati ovisno o zahtjevima.

Skupina autora (Gumasta et al., 2011) smatra da je modularnost obrnuto proporcionalna broju veza između različitih komponenti te zaključuju da se modularnost smanjuje s povećanjem kompaktnosti sustava te predlažu matematičku definiciju za izračun indeksa modularnosti.

2.2.1.6. Integrabilnost

Karakteristika integrabilnosti sustava predstavlja sposobnost relativno jednostavnog i brzog integriranja (trenutnih i budućih) komponenti i podsustava u ostatak sustava (Uran, 2021). Njome je omogućena jednostavna i precizna integracija određenih modula sa setom mehaničkih, informatičkih i upravljačkih sučelja.

2.2.1.7. Načela sustava

RPS su konstruirani prema određenim načelima i što ih je više primijenjeno, to je određeni proizvodni sustav više rekonfigurabilan. Od nabrojanih 6 načela prva tri su ključna, a ostala pomažu u poboljšavanju sustava (Dashchenko, 2006):

1. RPS sadrži prilagodljive proizvodne resurse kako bi odgovorio na neizbježne potrebe tržišta.
 - a. RPS kapacitet je brzo skalabilan u malim, optimalnim koracima. Funkcionalnost RPS-a brzo se može prilagoditi proizvodnji novih proizvoda dodavanjem ili uklanjanjem elementa.
2. RPS je dizajniran oko grupe proizvoda, s dovoljno prilagođene fleksibilnosti koja je potrebna za proizvodnju svih proizvoda te grupe.
3. Kako bi se poboljšao odaziv proizvodnog sustava, temeljne značajke RPS-a moraju biti ugrađene u cijeli sustav, kao i u njegove komponente (mehaničke, komunikacijske i kontrolne).

4. RPS sadrži ekonomsku mješavinu fleksibilnog i linijskog sustava s prilagođenom fleksibilnošću, kao što su rekonfigurabilni strojevi čija funkcionalnost se može promijeniti.
5. Općenito, sustavi s velikim brojem alternativnih mogućnosti za proizvodnju su više rekonfigurabilni, odnosno mogućnost rekonfiguracije na više mjesta, ali oni zahtijevaju veće troškove ulaganja u alate i sustave za rukovanje materijalima.
6. RPS posjeduje hardverske i softverske mogućnosti za troškovno učinkovito reagiranje na nepredvidive događaje (promjene na tržištu i kvar stroja).

Primjena ovih načela u dizajnu sustava omogućuje postizanje krajnjeg cilja - stvaranje takvog sustava koji je u stanju brzo prilagoditi svoje proizvodne kapacitete uz održavanje visokih razina kvalitete.

2.2.2. Rekonfigurabilnost primijenjena na proizvodne strojeve

Rekonfigurabilnost se osim na sustave može primijeniti i samo na proizvodne strojeve. Najnoviji trendovi u proizvodnji vezani su za razvoj rekonfigurabilnih strojeva (RS). Takvi strojevi promjenom svoje konfiguracije mogu zadovoljiti promjenjive zahtjeve proizvodnje, odnosno to su strojevi čije se strukture mogu mijenjati i osigurati alternativnu funkcionalnost i/ili mogućnost nadogradnje na zahtjev (načelo 1). Oni su uvijek osmišljeni oko zajedničkih karakteristika grupe proizvoda (načelo 2). Mogu se vratiti u prvobitno stanje ili dalje modificirati kako bi se osigurala još jedna nova funkcionalnost ili proizvodni kapacitet prema potrebi.

Rekonfigurabilne strojeve prvi put spominju 1999. godine znanstvenici sa Sveučilišta u Michiganu, koji su konstruirali dva rekonfigurabilna alatna stroja, dva rekonfigurabilna kontrolna stroja i rekonfigurabilni stroj za montažu. Do danas je razvijano još nekoliko prototipova ovakvih strojeva (Z. M. Bi i Zhang, 2001), (Ho i Ranky, 1997), (I. M. Chen, 1994), (Z. M. Bi et al., 2008).

Strojevi su dizajnirani na način da koriste module koji se mogu dodavati ili uklanjati tijekom operacija kako bi se postigle drugačije konfiguracije koje će zadovoljiti novonastale zahtjeve

proizvodnje. Razvoj takvih strojeva može zamijeniti implementaciju više strojeva koji posjeduju mnogo različitih i skupih modula, a koji se rijetko koriste.

Rekonfigurabilnom stroju se struktura može mijenjati kako bi se osigurala određena funkcionalnost ili postupno povećanje proizvodnog kapaciteta, a sve da se zadovolje postavljeni zahtjevi. Također, konfiguracija se može neprestano modificirati kako bi stroj zadovoljavao postavljene zahtjeve. Stroj je konstruiran za jednu ili više grupa proizvoda koje imaju specifične karakteristike. Grupe proizvoda često se nazivaju obitelj proizvoda.

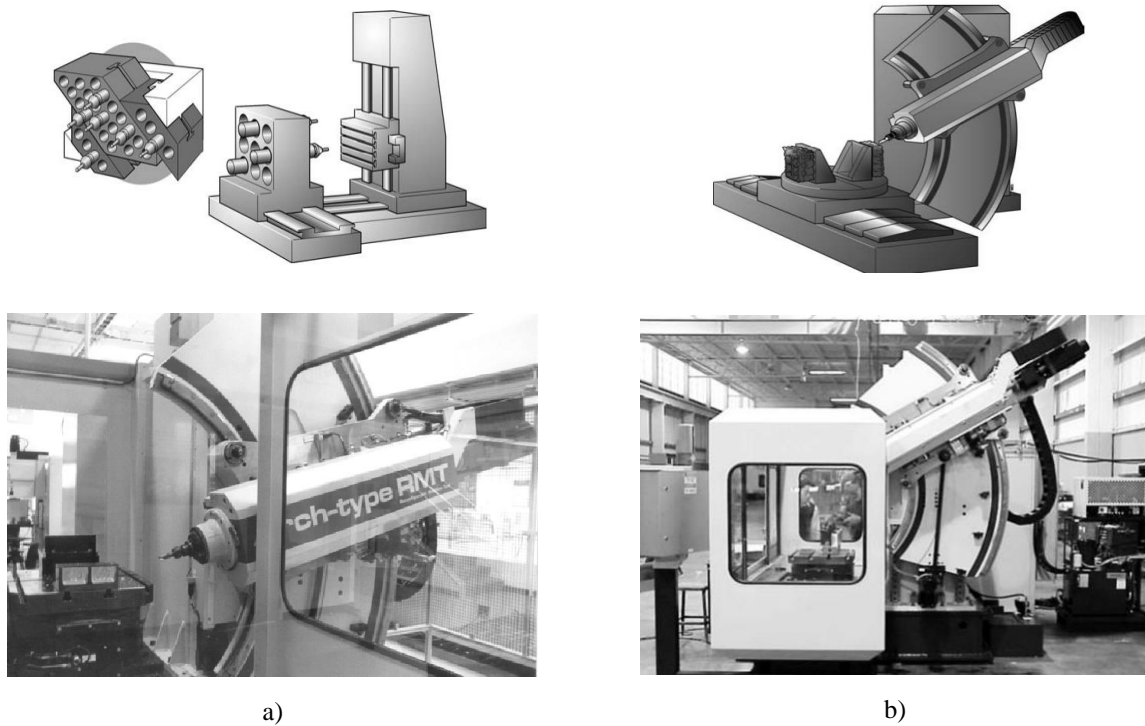
Postoje dva osnovna cilja pri konstruiranju rekonfigurabilnih strojeva:

- mijenjati kapacitet proizvodnje dodavanjem ili oduzimanjem modula kako bi se postigao potreban kapacitet
- prilagoditi funkcionalnost stroja promjenom geometrije na potrebnu funkcionalnost koja bi odgovarala proizvodnji novog člana obitelji proizvoda.

Prema (Dashchenko, 2006), postoje dvije vrste rekonfigurabilnih strojeva:

1. Rekonfigurabilni stroj s mogućnošću promjene kapaciteta (slika 2.3 a) posjeduje karakteristike:
 - modularnosti (svako vreteno je modul)
 - integrabilnosti (nosači vretena osiguravaju brzu mehaničko-električnu integraciju)
 - prilagodbe (fleksibilnost samo za horizontalno bušenje)
 - skalabilnosti (mogućnost dodavanja do četiri vretena).
2. Rekonfigurabilni stroj s mogućnošću promjene funkcionalnosti (slika 2.3 b) posjeduje dvije karakteristike:
 - prilagodbu (grupa proizvoda s kosim površinama)
 - konvertibilnost (brzo mijenjanje kuta osi Z).

Osmišljavanje rekonfigurabilnih strojeva je prvenstveno vođeno ekonomskim razlozima i s ciljem smanjenja troškova. Kako kupac stroja ne bi kupovao dijelove stroja koje ne koristi, osmišljeno je da kupuje jedan stroj kojemu se lako dodaje i mijenja dijelove ovisno o zahtjevima u proizvodnji. Prototip jednog takvog stroja objavljen je u radu (Koren, Arbor, et al., 1999).



Slika 2.3 a) Primjeri modela i prototipa rekonfigurabilnih alatnih strojeva za promjenu kapaciteta b) Primjeri modela i prototipa rekonfigurabilnih alatnih strojeva za promjenu funkcionalnosti (Dashchenko, 2006)

Prema namjeni postoji više tipova rekonfigurabilnih strojeva (Koren, 2010):

- stroj za proizvodnju
- stroj za inspekciju/kontrolu
- stroj za stezanje/pričvršćivanje
- stroj za sastavljanje i montažu.

Katz (2007) je sumirao različita načela potrebna za konstruiranje rekonfigurabilnih sustava i metodu kako ih primijeniti na grupe strojeva.

Rekonfigurabilnost se može primijeniti i na pojedine dijelove sustava osim same obrade, primjerice autor Dashchenko (2006) je konstruirao robota (slika 2.4) koji je prilagođen za poslove poput pakiranja, lijepljenja, slaganja, laserskog rezanja i dr.



Slika 2.4 Robot kao primjer rekonfigurabilnog stroja (Dashchenko, 2006)

2.3. Rekonfigurabilnost u sustavima kontrole kvalitete proizvoda

U knjizi (ElMaraghy, 2009) opširno su opisane podjele rekonfigurabilnih sustava, no primijećeno je da se ne spominju važni dijelovi proizvodnog sustava, a to su mjerni i kontrolni sustavi.

Iako se teži da je cijeli proizvodni sustav rekonfigurabilan, moguće je ostvariti rekonfigurabilnost i na pojedinim dijelovima proizvodnog procesa, primjerice na kontroli kvalitete. Kako je spomenuto sve se više teži kontroli koja će biti dio proizvodne linije i kontrolirati svaki izradak, stoga nije opravdano koristiti potpuno fleksibilan stroj kao što je koordinatni mjerni uređaj. Predlaže se rekonfigurabilni sustav koji će biti u mogućnosti prilagođavati se proizvodnom sustavu upravo onoliko koliko je potrebno i zadovoljavat će sve karakteristike i principe koje jedan rekonfigurabilan mjerni sustav mora imati.

Ovakav pristup je i ekološki prihvatljiviji obzirom na to da se obraća pozornost na ograničeno korištenje resursa (točno onoliko koliko je potrebno).

U području vezanom za razvoj rekonfigurabilnih sustava postignut je značajan napredak zadnjih godina, zahvaljujući Industriji 4.0 koja omogućuje razvoj pametnih tvornica. Velik broj znanstvenika orijentiran je na konstruiranje arhitekture strojeva i sustava koji bi zadovoljili zahtjeve rekonfigurabilnosti te na njihovu optimizaciju i upravljanje, no ostaje pitanje pouzdanosti i točnosti takvih sustava. Nastavno na pitanje točnosti sustava postavlja se i pitanje točnosti izratka koji je proizveden u takvom okruženju. S time u skladu razvija se i

rekonfigurabilni mjerni sustav (RMS). On može djelovati sam za sebe, a može biti i dio cjelokupnog rekonfigurabilnog proizvodnog sustava kao što su to najavili autori Xing et al. (2006). Oni su rekonfigurabilni stroj i sustav kontrole kvalitete vizijskim sustavom definirali kao podvrstu rekonfigurabilnog proizvodnog sustava, a koji spada u kategoriju agilne proizvodnje. Definirali su agilnu proizvodnju kao proizvodnju koja omogućuje prilagodbu brzim promjenama između proizvodnje pojedinih izradaka. Predstavili su sustav naziva AVIS, rekonfigurabilni sustav automatske kontrole na temelju vizijskog sustava metodom 3D skeniranja predmeta. Autori Bright i Davrajh (2007) također dizajniraju automatski sustav kontrole kvalitete vizijskim sustavom, ali u sklopu CIM ćelije te ističu važnost beskontaktna kontrole kvalitete izradaka u masovno prilagođenoj proizvodnji radi osiguravanja zadanih tolerancija. Autori Z. M. Bi et al. (2008) su u svome radu dali opsežan pregled literature vezane za različite definicije rekonfigurabilnih sustava. Podijelili su rekonfigurabilnost s obzirom na rukovanje materijalom, montažu, naprave za stezanje te strojeve, zanemarujući pritom sustav za kontrolu kvalitete proizvoda.

U linijskim sustavima dimenzije se najčešće provjeravaju napravom koja je izrađena za brzu provjeru jedne dimenzije na točno određenom mjestu, a ukoliko dođe do promjene izratka, cijelu napravu potrebno je zamijeniti novom. Najjednostavniji primjer takve naprave su mjerni trnovi i rašlje (slika 2.5) koji služe za brzu kontrolu točno određenog provrta ili osovine i rade na principu „ide/ne ide“. Osim ovako jednostavnih, postoje i naprave koje su specijalno dizajnirane i izrađene za brzu provjeru izratka kompleksnog izgleda (slika 2.6.).



Slika 2.5 Mjerni trnovi i rašlje – princip „ide/ne ide“

Kada se govori o fleksibilnim sustavima, najzastupljeniji način kontrole kvalitete izratka dimenzijskih i geometrijskih veličina je korištenjem koordinatnog mjernog uređaja - KMU (slika 2.7). Koordinatni mjerni uređaj ima visoku razinu fleksibilnosti, može mjeriti mnogo značajki, no glavni nedostatak mu je vrijeme potrebno za provedbu mjerenja.



Slika 2.6 Specijalna mjerna naprava po principu „ide/ne ide“

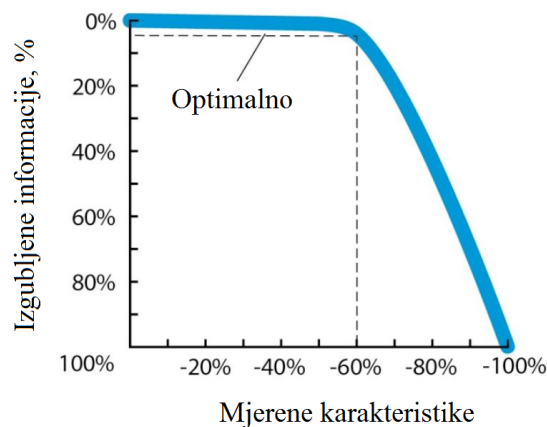
Određenom mjernom napravom, kao što su mjerni trnovi može se proizvod kontrolirati u proizvodnom okruženju odmah nakon što je proizveden, no s KMU je potrebno proizvod transportirati u zasebnu prostoriju (laboratorij) te postupak mjerenja traje puno duže od takta proizvodnje. Problemi s točnošću rezultata mogu nastati i zbog uvjeta okoline (laboratorijski i radni uvjeti nisu isti) i zbog vremena potrebnog da informacija o lošem proizvodu stigne prije nego se proizvede određena količina novih izradaka.



Slika 2.7 Koordinatni mjerni uređaj (Coordinate Measuring Machines, 2022)

Iz navedenog može se zaključiti da je potreban takav sustav mjerenja koji će raditi brzo, u sklopu proizvodne linije i javljati povratnu informaciju odmah nakon što je proizvod izrađen. Radi ovakve potrebe dan je prijedlog rekonfigurabilnoga mjernog sustava. Prema načelima rekonfigurabilnosti definicija rekonfigurabilnoga mjernog sustava definirala bi ga kao sustav koji je dizajniran na način da može brzo promijeniti svoju strukturu kako bi se prilagodio kontroli unutar određene grupe proizvoda ili između različitih grupa.

Autor Krygier (2005) je dao primjer potrebe za uvođenjem ovakvog sustava u jednu tvornicu automobilskih dijelova. Naime u korištenju KMU kao glavnog mjernog uređaja pri kontroli kvalitete određenih izradaka javljaju se nedostaci u vremenu koje se troši na mjerenje. KMU je fleksibilan sustav i može mjeriti velik broj značajki proizvoda, no često puta je upravo zbog te visoke razine fleksibilnosti, ekonomski neisplativ. U danom primjeru napravljena je analiza u kojoj je smanjen broj izvedenih mjerenja, na mjerenje samo određenih značajki. Rezultati su pokazali da je smanjivanjem broja mjerenja za 60 % izgubljeno samo 4 % podataka. Slika 2.8 upućuje na zaključak da postoji potreba za sustavom kojim će se mjeriti manji broj pomno odabranih značajki proizvoda kako bi se skratilo vrijeme za provedbu mjerenja, a ipak prikupilo sve potrebne informacije o proizvodu.



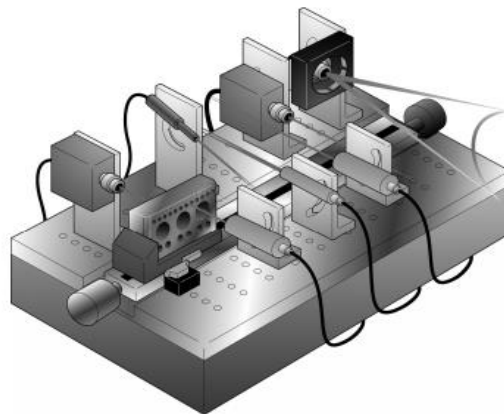
Slika 2.8 Odnos ukupnog broja izgubljenih podataka i količine izmjerenih podataka (Krygier 2005)

2.4. Rekonfigurabilni mjerni sustavi u industrijskom okruženju

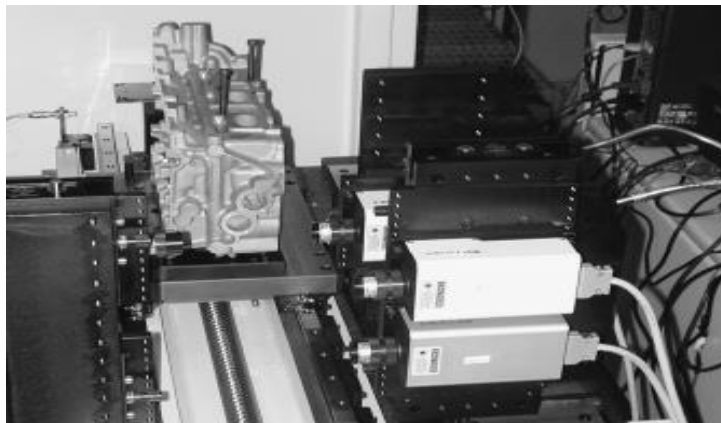
Rekonfigurabilni mjerni sustav predstavlja novu vrstu kontrolne opreme koja se koristi za provjeru dimenzijskih i geometrijskih značajki. Potrebno je dizajnirati sustav da zadovoljava sve zahtjeve rekonfigurabilnosti koji su navedeni ranije u radu. Glavna prednost ovakvog sustava je brzo dobivanje povratne informacije o svakom izratku u proizvodnom procesu te je uz korištenje dostupne tehnologije u sklopu pametne tvornice moguće odmah napraviti i korekciju na proizvodnoj liniji ukoliko za nju ima potrebe.

Rekonfigurabilni mjerni sustav vrlo je povoljan za proizvodne sustave u kojima je omogućena masovno prilagođena proizvodnja s čestim izmjenama proizvoda zbog njegove brze reakcije, a glavna prednost mu je mogućnost kontrole svih proizvoda unutar proizvodne linije.

Autor Koren (2010) dao je prijedlog izgleda jednog takvog sustava, a nazvao ga je rekonfigurabilni inspeksijski stroj (slika 2.9 i slika 2.10). Sastoji se od preciznog konvejera po kojemu se kreće proizvod i prolazi kroz sustav elektro-optičkih uređaja poput kamera i laserskih senzora. Svaka kamera i senzor mogu brzo promijeniti poziciju kako bi se mjerila određena karakteristika izratka.



Slika 2.9 Model rekonfigurabilnog inspeksijskog stroja (Koren, 2010)



Slika 2.10 Rekonfigurabilni inspeksijski stroj sa svojim optičkim sensorima kojeg je predstavio (Koren, 2010)

Ovakvom konfiguracijom omogućena je provjera:

- profila površine
- ravnosti
- paralelnosti i
- udaljenosti između pojedinih površina i provrta.

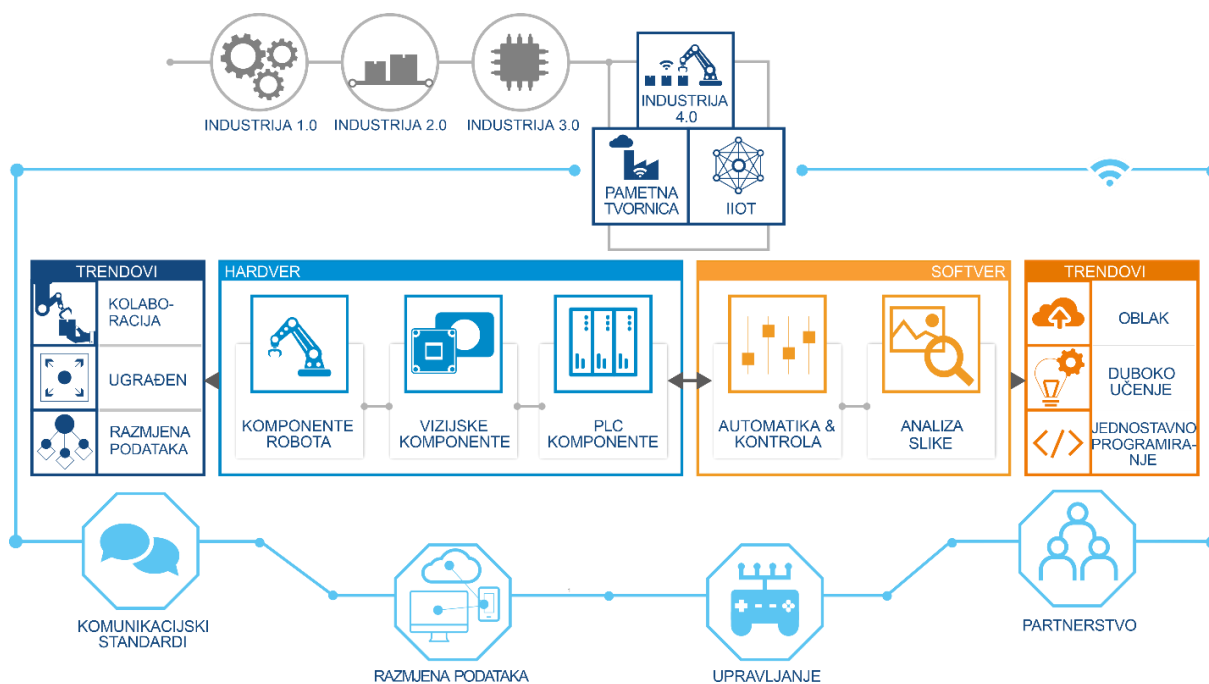
Kako bi se rekonfigurabilni inspekcijski sustav prilagodio novom proizvodu iz iste grupe proizvoda, lokacije pojedinih senzora se mogu rekonfigurirati. Navodi se da je vrijeme potrebno za provjeru 20 sekundi. Sličan stroj implementiran je u tvrtki General Motors Michigan kako bi se uvela 100 % kontrola proizvoda (Koren, 2010). Time se povećala produktivnost i kvaliteta proizvoda.

Poželjno je da sustavi za kontrolu kvalitete budu točni i dovoljno svestrani da omogućuju mjerenje izradaka uz pružanje više informacija istovremeno. U mjernim laboratorijima najčešće je stoga zastupljen uređaj za mjerenje poput KMU. Procedura korištenja KMU zahtjeva da se predmet mjerenja dopremi do stola za mjerenje koji se najčešće nalazi u drugoj prostoriji/laboratoriju te sam uređaj nije pogodan za premještanje zbog masivnosti i potrebe za specijalnom popratnom opremom. Proces samog mjerenja određenih značajki zahtjeva dulji vremenski period (D'Apuzzo, 2006). Nedostatak mjerenjem KMU predstavlja potrebno osposobljavanje operatera za mjerenje te ekonomski zahtjevno održavanje sustava.

S razvojem beskontaktnog mjerenja omogućena je veća razina rekonfigurabilnosti pomicanjem optičkih sustava na područja izvan mjernih laboratorija. Zbog širokih mogućnosti primjene, fotogrametrija je pronašla mjesto i u industriji te se naziva industrijska fotogrametrija. Od kada je digitalna obrada slike postala dostupna, mogućnosti fotogrametrijskog mjerenja slike su se značajno promijenile (Teubner i Brückner, 2019). Fotogrametrija je postala potpuno prihvaćen alat u mnogim industrijskim postrojenjima (Bösemann, 2016). U sklopu industrijske fotogrametrije, industrijskog mjeriteljstva i općenito koncepta Industrije 4.0, kamera je pronašla važno mjesto u kontroli kvalitete proizvoda.

Slika 2.11 prikazuje kako su vizijski sustavi i analiza slike usko povezani s konceptom Industrije 4.0 i pametne tvornice. Novi pristupi nude velik potencijal za učinkovito i inteligentno postavljanje dijelova sustava u industriji koja se sastoji od podsustava međusobno povezanih u cjelinu, a među kojima su i vizijski sustavi (Böge, 2019).

Još 1988. godine objavljen je prvi patent koji koristi tehniku vizijske kontrole proizvoda (Nielson i Kaufman, 1988).



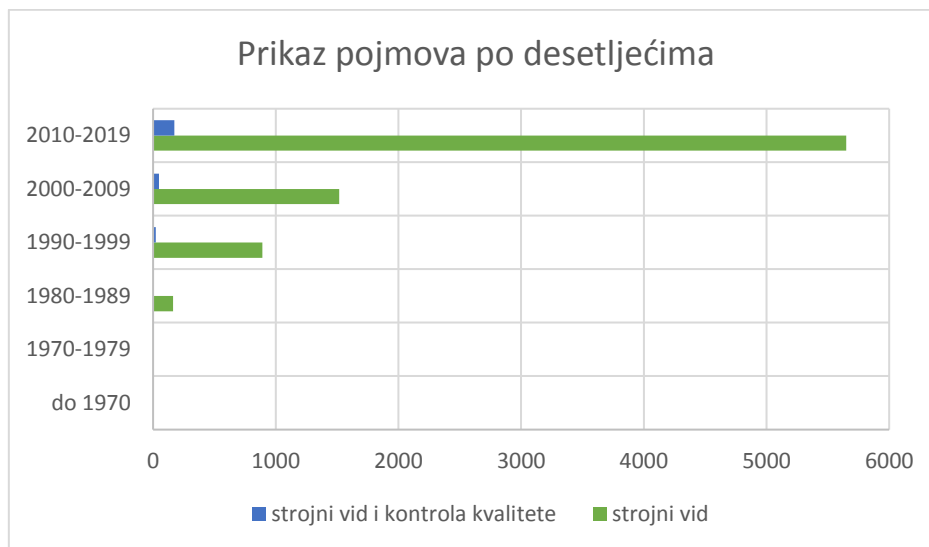
Slika 2.11 Vizijski sustavi i analiza slike kao dio koncepta Industrije 4.0 (Basler AG, 2020)

2.5. Strojni vid kao osnovni dio mjernog sustava u Industriji 4.0

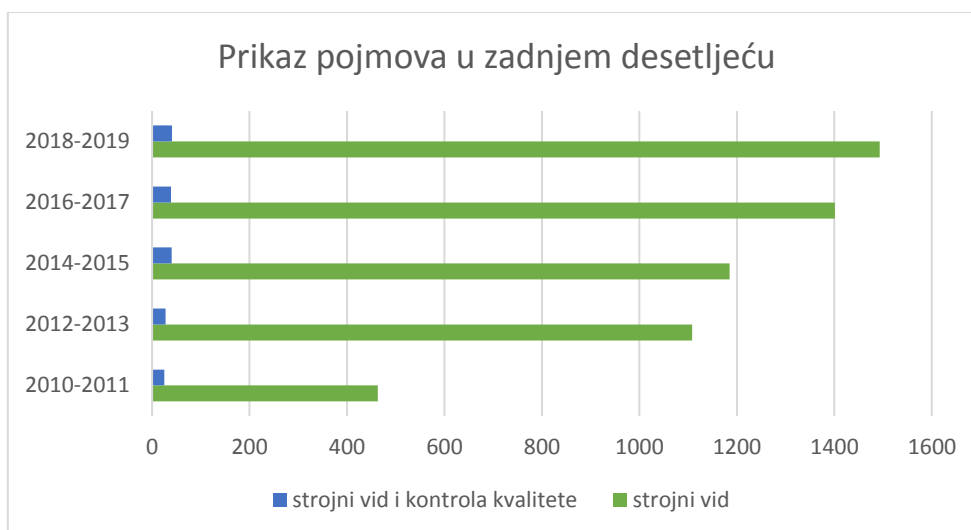
S napretkom tehnologije, proizvodi se po proizvodnoj liniji kreću sve brže. Vizijska kontrola kvalitete u nekim tvrtkama uključuje kontrolu ljudskim okom. Istraživanja su pokazala da čovjeku pada koncentracija nakon 2 h obavljanja vizijske kontrole. Strojni vid poželjna je zamjena čovjeku ukoliko ga je moguće uključiti u proces (Harding, 2013).

Kombinacija tehnologije kamere i računala otvorila je novo područje strojnog vida kao i pametnih kamera. Od početka pojave strojnog vida 1970tih godina do danas objavljeno preko 8000 radova koji obrađuju pojam strojni vid, a od toga najviše ih se objavilo u zadnjih deset godina, čak njih 5650. Slika 2.12 prikazuje količinu članaka objavljenih u citatnoj bazi *Web od science* s ključnim pojmovima „strojni vid“ i kombinaciju pojmova „strojni vid“ i „kontrola kvalitete“ (*Web of Science [v.5.34] - Web of Science Core Collection Basic Search*, 2020). Zelenom bojom prikazan je broj radova koji proučavaju pojam „strojni vid“ od pojave pojma 1970. do 2019. godine. Slika 2.13 prikazuje detaljniji prikaz po godinama, gdje je vidljivo da broj objavljenih radova raste. Plavom bojom prikazan je pojam „kontrola kvalitete“ vezan uz „strojni vid“, te članci koji obrađuju ovu temu čine 3 % svih članak koji uključuju pojam

strojnog vida općenito. Također u blagom porastu su teme koje pokrivaju ključne riječi strojnog vida, ali zauzimaju vrlo malo mjesta u ukupno obrađenim temama.



Slika 2.12 Prikaz pojmova od 1970 - 2019 godine



Slika 2.13 Prikaz pojmova 2010 – 2019 godine

Mali broj literature opisuje stvarne probleme i primjene u industrijskim okruženjima, uglavnom se bave teorijskim pristupom. U industrijskom vidu tako se najčešće susreće rješenje unutar gotovog proizvoda.

Tehnologija strojnog vida uključuje prikupljanje slike, obradu slike i obradu dobivenih podataka. Struktura sustava se sastoji od hardvera i softvera (Xiao et al., 2019).

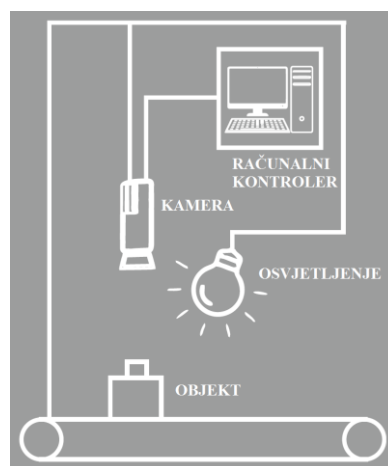
Łabudzki (2011) je definirao strojni vid i pokazao gdje je najzastupljeniji. Strojni vid se koristi za rješavanje problema u kontroli kvalitete uz mogućnost potpune automatizacije procesa

kontrola što rezultira istovremenom povećanju učinkovitosti i točnosti kontrolnog sustava. Određeni vizijski sustav bi trebao moći pohraniti snimljenu sliku, analizirati je na način da prepozna tražene značajke ili cijeli objekt i odradi zadanu radnju te prikaže rezultate. Takav sustav trebao bi se sastojati od izvora svjetlosti i zahtijevane optičke opreme.

Dijelovi sustava strojnog vida sastoje se od različitih vrsta optičkih uređaja, izvora svjetlosti, računala, softvera te popratnih dijelova koji odrađuju pojedine operacije zadane programom. Optički dio sustava može biti laser, izvor bijele svjetlosti ili kamera, a mjeri se promjena refleksije svjetla u svrhu mjerenja. Osnovni mehanizmi optičke metrologije uključuju sljedeće:

- promjenu u količini svjetla koje se reflektira ili odašilje
- promjenu u smjeru svjetlosti
- promjenu u vrsti svjetlosti poput faze, koherencije ili polarizacije
- promjenu u distribuciji svjetlosti.

Današnja industrijska proizvodnja bez strojnog vida je nezamisliva, a može se pronaći u svim vrstama industrije i proizvodnje. Optički jednostavni mehanizmi omogućuju široki spektar optičkih metoda koje dozvoljavaju mjerenje objekata raznih dimenzija. Strojni vid sa svojim pripadajućim komponentama (objekt za koji se provodi kontrola, kamera, osvjetljenje, računalni kontroler s pripadajućim softverom) postaje neizostavan dio kontrole kvalitete na proizvodnoj liniji (slika 2.14).



Slika 2.14 Osnovne komponente strojnog vida

Optički sustavi za mjerenje mogu se podijeliti obzirom na funkciju za koju su namijenjeni (Steger et al., 2018):

- prepoznavanje objekata

- pozicioniranje objekata
- provjera je li neki zadatak izvršen
- provjera oblika i dimenzija objekata
- provjera stanja površine objekata.

Većina autora koristi slike za mjerenje 3D značajki umjesto 2D mjerenja značajki predmeta, što također pruža mogućnost za brzom, jednostavnom i jeftinom automatizacijom procesa s visokom točnošću (Aicardi et al., 2018). Cijena je ograničavajući faktor u području vizijske kontrole. Mnogi proizvodni sustavi nemaju resurse za kupovinu vizijskih sustava u sklopu potpune kontrole izradaka pa traže rješenja uz primjenu nisko budžetnih uređaja s kojima mogu ostvariti zadovoljavajuću razinu kvalitete (Santosi et al., 2019).

Vizijski sustavi primjenjivi su u svim područjima industrijske proizvodnje i kontrole. U automatiziranim sustavima, strojni vid se koristi u sustavima upravljanja industrijskim robotima, kontroli obojanih dijelova, kontroli zavora (M. J. Tsai i Ann, 2008), (Liao i Xi, 2009), provjeri blokova motora i različitih drugih izradaka poput keramičkih pločica (Keser et al., 2010). Han et al. (2007) koriste strojni vid za provjeru veličine unutarnjeg promjera ležaja, a Anh-Tuan et al. (2017) za provjeru crijeva za vodu. Thomas et al. (2007) te Krstajić i Doran (2006) su napravili optički CT uređaj koristeći CCD kameru. U radu (*Turbo Stress Basler Pilot GigE Cameras Help to Inspect Turbine Blades in Aircraft Engines*, 2020) koriste optički sustav za kontrolu lopatica turbine. Neki autori su pokazali primjenu vizijskih sustava i u uvjetima loše vidljivosti i pod vodom te dali primjer umjeravanja takvog sustava (Bianco et al., 2013).

Vidljivo je da se primjena strojnog vida nalazi u raznim granama industrije. Često se koristi kod postupaka spajanja materijala primjerice, autori M. J. Tsai i Ann (2008) koriste vizijski sustav za kontrolu i manipulaciju robota koji zavaruje dijelove palica za golf te su postigli točnost mjerenja od 0,18 mm. Drugi primjer su autori Fonseka i Jayasinghe (2019) koji su predstavili automatski optički sustav koji se može integrirati na robota za lemljenje. Od optičkih tehnika kod kontrole zavora koriste se skenirajuće kamere, laserski sustavi, hibridni sustavi te termografija (Rodríguez-González et al., 2017). Autori Dutta et al. (2013) su u preglednom članku prikazali mjerni sustav za provjeru trošenja alata koristeći obradu slike, a autori Lina Zhang et al. (2018) i Shi et al. (2019) su pokazali primjenu vizijskog sustava na mjerenje dimenzije tijela životinje. Autori Keser et al. (2010) su u svome radu predstavili kako vizijski sustav može zamijeniti kontrolora u procesu vizualne kontrole keramičkih pločica. Autori

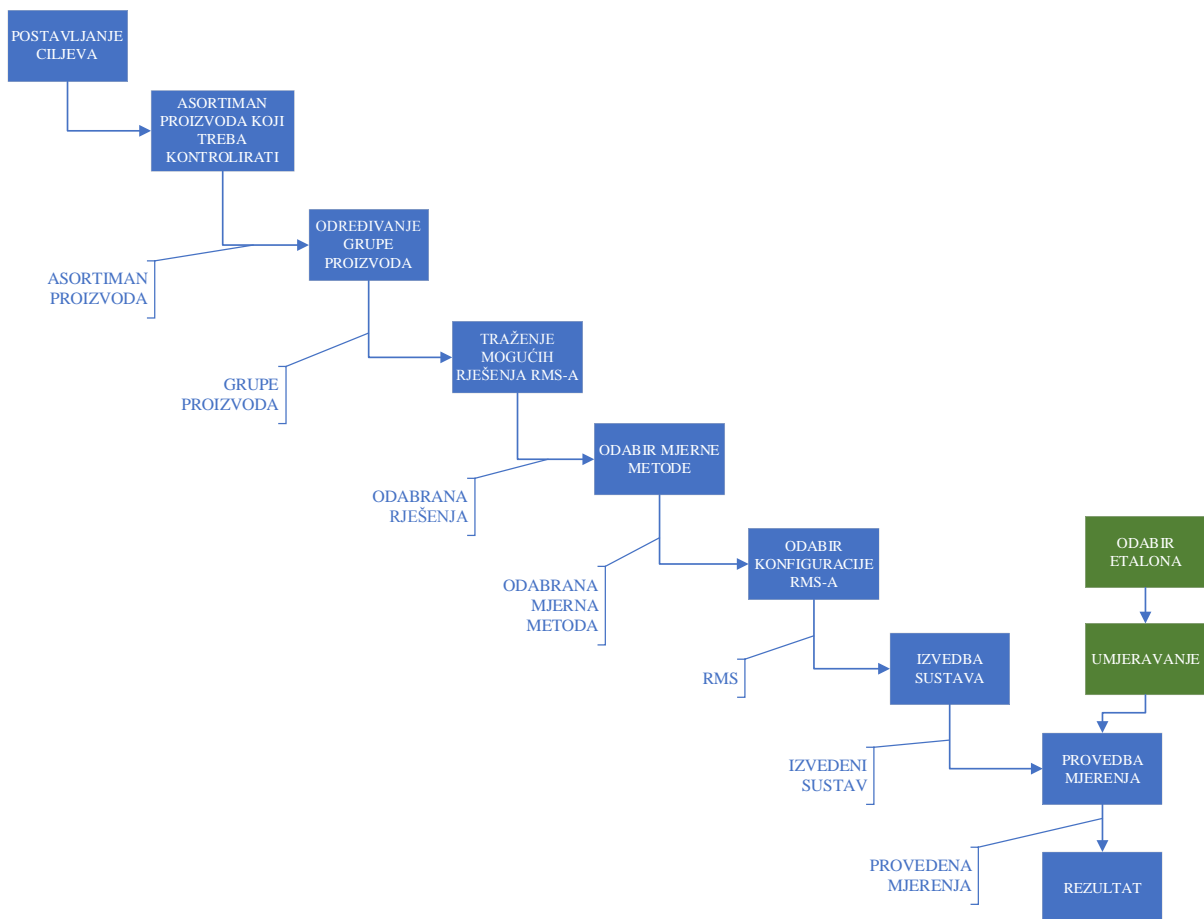
Yang et al. (2020) su u svome radu prikazali mogućnost otkrivanja defekata pomoću vizijskih sustava, te su postigli 99,87 % točnosti u otkrivanju geometrijskih nedostataka na zavaru koristeći pri tome 8000 slika za učenje algoritma. Wu et al. (2020) su pokazali primjenu vizijskog sustava u tekstilnoj industriji razvijanjem algoritma za otkrivanje defekata na tekstilu iz skupine prikupljenih slika.

Nozaki (2000) predložio je detekciju ruba predmeta na razini koja je manja od jednog piksela - subpiksela. Mjerenje na subpikseloj razini moguće je ako se pozicija slikanog objekta može interpolirati kroz nekoliko piksela (Teubner i Brückner, 2019). Postoji više algoritama koji su predstavljeni za detekciju ruba na subpikseloj razini, a jedan su predstavili autori Sun et al. (2016).

Osim prikupljanja slika, iste je potrebno i pohraniti i obraditi. Prilikom snimanja predmeta javljaju se velike količine podataka, a spremati se mogu u oblak kako je i poželjno radi postizanja koncepta Industrije 4.0 (Milošević et al., 2019).

3. METODOLOGIJA PROJEKTIRANJA REKONFIGURABILNOGA MJERNOG SUSTAVA

U ovom poglavlju analizirana je metodologija projektiranja rekonfigurabilnoga mjernog sustava uz prikaz na primjeru. Prikazana metodologija primjenjiva je u industrijskom okruženju. Osnovni koraci dijagrama toka predložene metodologije projektiranja RMS-a prikazani su na slici 3.1. U nastavku rada će se svaki od osnovnih koraka analizirati i prikazati kroz odabrani primjer.



Slika 3.1 Osnovni koraci dijagrama toka predložene metodologije projektiranja RMS-a

3.1. Postavljanje ciljeva i analiza asortimana proizvoda

Prvi korak u projektiranju rekonfigurabilnoga mjernog sustava je postavljanje jasnih ciljeva. Za ulazne podatke u postavljanju ciljeva mogu se za sustav RMS-a uzeti zahtjevi za potrebnom razinom točnosti mjerenja, brzina provođenja mjerenja pojedinih predmeta, dostupni resursi i troškovi sustava te drugi dodatni zahtjevi. U ovom radu ciljevi su postavljeni na način da je projektiranim rekonfigurabilnim sustavom potrebno provesti kontrolu dimenzija na pojedinim proizvodima uz određenu razinu točnosti, definiranu brzinu provedbe kontrole pojedinih proizvoda, poštujući dostupne resurse i moguće buduće zahtjeve o kojima odlučuje projektni tim. Projektni tim također sagledava koje su očekivane promjene u asortimanu proizvoda za koje se zahtijeva kontrola. Rekonfigurabilni sustav projektira se tako da bude iskoristiv i u budućim zahtjevima kupca ukoliko se zahtjevi promijene. Prema asortimanu proizvoda za koji je trenutno potrebno izvršiti kontrolu, potrebno je sagledati moguće buduće zahtjeve. Moguće buduće promjene za zahtjevima potrebno je istražiti i pokušati predvidjeti kako bi se sustav projektirao na način da ga je u budućnosti što jednostavnije rekonfigurirati i time smanjiti dodatne troškove.

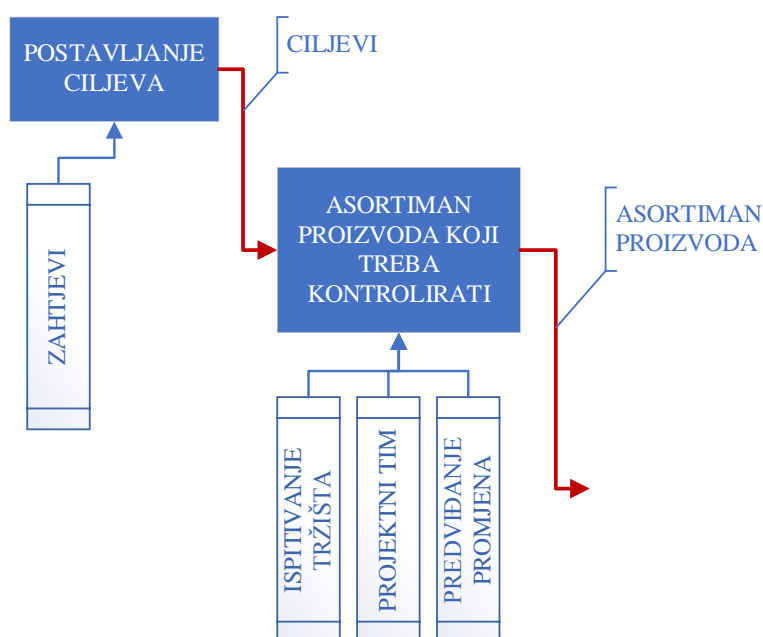
U ovom radu postavljen je zahtjev za mjerenjem pojedinih dimenzija za 12 različitih proizvoda. Proizvodi su navedeni u tablici 2. Mjerenja je potrebno provesti uz razinu točnosti od 0,1 mm.

Tablica 2 Popis predmeta za koje je potrebno provesti kontrolu

| Naziv predmeta | Opis predmeta |
|--------------------|-----------------------------------|
| Proizvod 1 | Mjerne rašlje 1 |
| Proizvod 2 | Mjerne rašlje 2 |
| Proizvod 3 | Mjerne rašlje 3 |
| Proizvod 4 | Mjerne rašlje 4 |
| Proizvod 5 | Žeton 1 |
| Proizvod 6 | Žeton 2 |
| Proizvod 7 | Žeton 3 |
| Proizvod 8 | Žeton 4 |
| Proizvod 9 | Žeton 5 |
| Proizvod 10 | Žeton 6 |
| Proizvod 11 | Dvije zavarene žice promjera 3 mm |
| Proizvod 12 | Dvije zavarene žice promjera 4 mm |

Brojčani obim proizvodnje na godišnjoj razini je u zavisnosti o dimenzijama izradaka te je za definiranje granice područja između velikih, srednjih i malih potrebno uključiti i stabilnost proizvodnog programa (Mikac, 1994).

Prva dva osnovna koraka u metodologiji projektiranja RMS-a mogu se prikazati kao na slici 3.2. Iz koraka *postavljanja ciljeva* izlazni podatak će biti ciljevi koji tvore ulazni podatak za idući korak, *popis asortimana proizvoda koji treba kontrolirati*. Na asortiman proizvoda pored postavljenih ciljeva utječu *ispitivanja tržišta* koje je potrebno provesti kako bi se mogle *predvidjeti promjene* koje se očekuju u asortimanu proizvoda, a u odlukama treba sudjelovati *projektini tim*. Izlazni podataka je definirani *asortiman proizvoda*.



Slika 3.2 Dio dijagrama toka osnovnih koraka - postavljanje ciljeva i asortiman proizvoda

3.2. Određivanje grupa iz zadanog asortimana proizvoda

Ključan dio projektiranja rekonfigurabilnog sustava i ujedno idući korak nakon odabira asortimana proizvoda je *određivanje grupe proizvoda*. Određena grupa proizvoda treba biti odabrana na način da bude ekonomski isplativa. Po samoj definiciji neka proizvodna oprema je rekonfigurabilna kada je dizajnirana na način da joj fizička struktura može jednostavno biti promjenljiva i kada je dizajnirana za određenu grupu proizvoda (Dashchenko, 2006). U kontekstu RPS-a, jedna grupa proizvoda definira se kao skup svih proizvoda koji imaju slične

geometrijske značajke i oblike, istu razinu tolerancija, zahtijevaju iste procese i nalaze se u istom rasponu troškova.

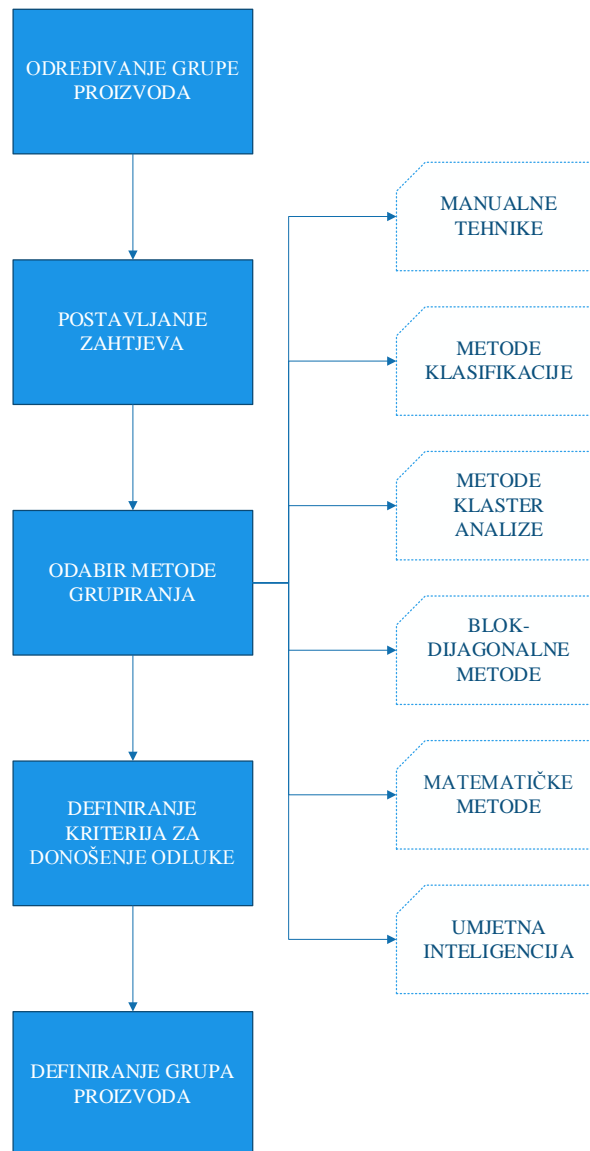
Kod odabira grupe proizvoda za rekonfigurabilni proizvodni sustav potrebna je analiza proizvoda koji se izrađuje, operacija kojima se izrađuju zajedno s pripadajućim parametrima i odabirom alata. Ako se govori o sustavu za kontrolu kvalitete potrebno je analizirati koji proizvodi se trebaju kontrolirati, kojim načinom će se primijeniti kontrola te kojom opremom.

Kako bi se rekonfigurabilni sustav dobro postavio bilo to u sklopu proizvodnje ili u sklopu kontrole potrebno je poznavati način na koji će se proizvod postaviti i eventualno stegnuti na mjesto provjere. Obzirom na varijacije koje su prisutne u proizvodima nužno je odrediti pojedine dijelove koji se nazivaju zone od interesa te je na njih potrebno obratiti pažnju prilikom određivanja grupe proizvoda.

Formiranje grupe proizvoda može se provesti na razne načine te je razvijeno nekoliko metoda za određivanje grupa proizvoda (Galan et al., 2007), (Eguia et al., 2013), (Gupta et al., 2013), (Al-Sultan, 1997), (Goyal et al., 2012).

Metoda grupiranja i analiza grupe koristi se u mnogim područjima kako bi se definirale grupe objekata u kojima su pojedini proizvodi slični drugima iz grupe, tj. posjeduju neke zajedničke karakteristike koje ih povezuju. Kako bi se proizvodi rasporedili u pojedine grupe, potrebno je prvo odrediti koeficijent sličnosti, time su se bavili autori Galan et al. (2007) i Abdi et al. (2004) koji su na više načina izračunavali koeficijent sličnosti te Gupta et al. (2013) i Al-Sultan (1997) koji su proučavali metodu klastera, K-sredina za formiranje grupa. Klaster analiza formalno je proučavanje metoda i algoritama za grupiranje objekata prema izmjerenim ili percipiranim unutarnjim karakteristikama ili sličnostima. Jedan od najčešće korištenih algoritama grupiranja je K-sredina. Metoda klastera K-sredina pronalazi najbolja rješenja za grupe proizvoda te je učinkovita i brza, a općenito se najviše koristi u strojnom učenju (Jain, 2010).

Sažeti prikaz analize kojom se određuju grupe proizvoda prikazan je dijagramom toka na slici 3.3. Prikazanim postupkom iz zadanog asortimana proizvoda određene su grupe prema kojima će se projektirati rekonfigurabilni mjerni sustav. Metoda odabrana za određivanje grupe proizvoda u ovom istraživanju je metoda klaster analizom.



Slika 3.3 Dijagram toka određivanja grupe proizvoda

Značajke za pojedine predmete iz zadanog asortimana proizvoda su određene prema tablici 3 i podijeljene su u skupine:

- 3 vrste oblika: kružni (0), kvadratni (-1) i križni (1)
- visine u rasponu od 3 mm do 10 mm
- širine predmeta u rasponu od 6 mm do 42 mm
- zahtjev mjerenja (3 vrste različitih zahtjeva -1, 0 i 1).

Kako bi softver prepoznao razliku u zahtjevima mjerenja potrebno je pojedinoj vrsti zahtjeva dodijeliti određenu kategoriju:

- kategorijom „1“ označen je zahtjev za mjerenje dvije dimenzije otvora koje je potrebno odrediti na mjernim rašljama
- kategorijom „0“ označen je zahtjev za mjerenje dimenzija promjera žetona i visine žetona
- kategorijom „-1“ označen je zahtjev za mjerenjem penetracije.

Tablica 3 Prikaz unesenih vrijednosti zahtjeva u softver za obradu podataka Minitab

| Proizvod | Oblik | Visina (mm) | Širina (mm) | Zahtjev |
|----------|-------|-------------|-------------|---------|
| 1 | -1 | 5 | 16 | 1 |
| 2 | -1 | 5 | 17 | 1 |
| 3 | -1 | 5 | 18 | 1 |
| 4 | -1 | 5 | 20 | 1 |
| 5 | 0 | 3 | 40 | 0 |
| 6 | 0 | 3 | 40 | 0 |
| 7 | 0 | 3 | 40 | 0 |
| 8 | 0 | 3 | 42 | 0 |
| 9 | 0 | 3 | 38 | 0 |
| 10 | 0 | 3 | 40 | 0 |
| 11 | 1 | 10 | 8 | -1 |
| 12 | 1 | 10 | 6 | -1 |

Analiza se provodi prema višekriterijskoj metodi kombinatorike klaster analizom. Iz analize je proizašao dijagram stabla – dendrogram (slika 3.4). Ova metoda koristi se najčešće kada je očita razlika u podjeli.

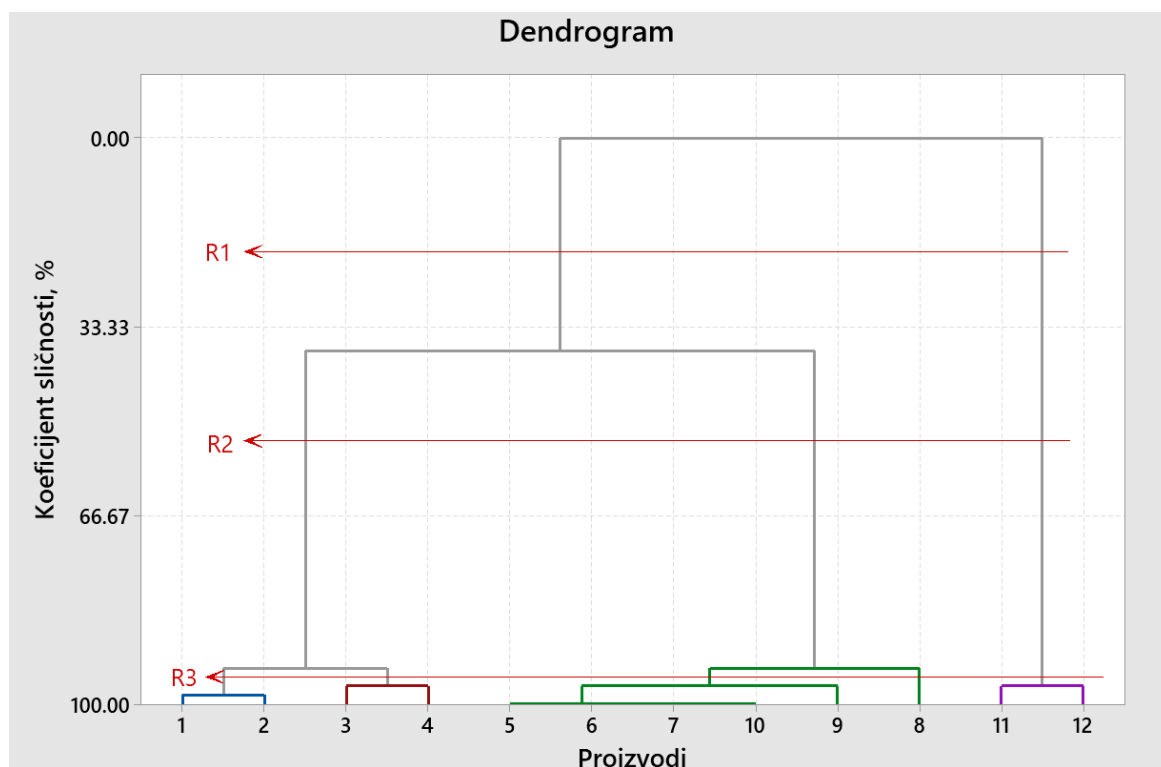
Određivanje grupa pomoću dendrograma može se opisati kao povlačenje horizontalne linije na određenoj vrijednosti koeficijenta sličnosti te praćenjem presijecanja te linije s vertikalnim linijama. Vertikalne linije vode do grupe odnosno do proizvoda. Odabir linije predstavlja odabir grupa prema donošenju odluke projektanta, a sve u skladu s postavljenim ciljevima. Ne postoji univerzalan način za formiranje grupa, no potrebno je donijeti odluku ovisno o zahtijevanoj razini fleksibilnosti i ulaganjima. Odabir broja grupa ovisi o postavljenim zahtjevima, primjerice smanjenjem broja grupa, potrebno je odabrati vrlo prilagodljivu konfiguraciju RMS-a, dok je povećanjem grupa do neke razine potrebna manja prilagodljivost. Kriterij za odabir

broja grupa može se odrediti iskustveno, odabirom najmanjeg troška ulaganja ili primjenom metode optimizacije.

Analiza sličnosti za zadani asortiman proizvoda je provedena u softveru Minitab te su dobiveni rezultati prikazani u nastavku. Dobiveno je hijerarhijsko stablo (dendrogram) grupirano na temelju analize koje ima više razina:

- između 100 % i 98,42 % sličnosti
- između 96,84 % i 93,679 % sličnosti
- između 93,679 % i 37,551 % sličnosti
- između 37,551 % i 0 % sličnosti.

Na dendrogramu (slika 3.4) razine su označene crvenom bojom i pripadaju različitim kombinacijama grupe proizvoda koja može biti formirana.



Slika 3.4 Dobiveni dendrogram za određivanje grupa proizvoda

Primjerice tri označene razine, razina 1 (R1) se nalazi između koeficijenta sličnosti 0 % i 37,551 % te definira dvije grupe proizvoda. Razina 2 (R2) se nalazi između koeficijenta sličnosti 37,551 % i 93,679 % te definira tri grupe proizvoda. Razina 3 (R3) se nalazi između koeficijenta sličnosti 93,679 % i 96,84 % te definira pet grupa proizvoda. Broj grupa se

povećava pomicanjem horizontalne linije, koja određuje pojedinu razinu, prema dolje jer linija siječe sve više vertikalnih linija.

Osim prikaza na dendrogramu, dio dobivenih podataka je prikazan i brojčano u tablici 4. Broj klastera označava broj grupa. Što je veći koeficijent sličnosti to su proizvodi unutar grupe sličniji.

Tablica 4 Podaci dobivene analize u softveru Minitab

| Koraci | Broj klastera | Koeficijent sličnosti | Spojeni klasteri | |
|--------|---------------|-----------------------|------------------|----|
| 1 | 11 | 100,000 | 7 | 10 |
| 2 | 10 | 100,000 | 6 | 7 |
| 3 | 9 | 100,000 | 5 | 6 |
| 4 | 8 | 98,420 | 1 | 2 |
| 5 | 7 | 96,840 | 11 | 12 |
| 6 | 6 | 96,840 | 5 | 9 |
| 7 | 5 | 96,840 | 3 | 4 |
| 8 | 4 | 93,679 | 5 | 8 |
| 9 | 3 | 93,679 | 1 | 3 |
| 10 | 2 | 37,551 | 1 | 5 |
| 11 | 1 | 0,000 | 1 | 11 |

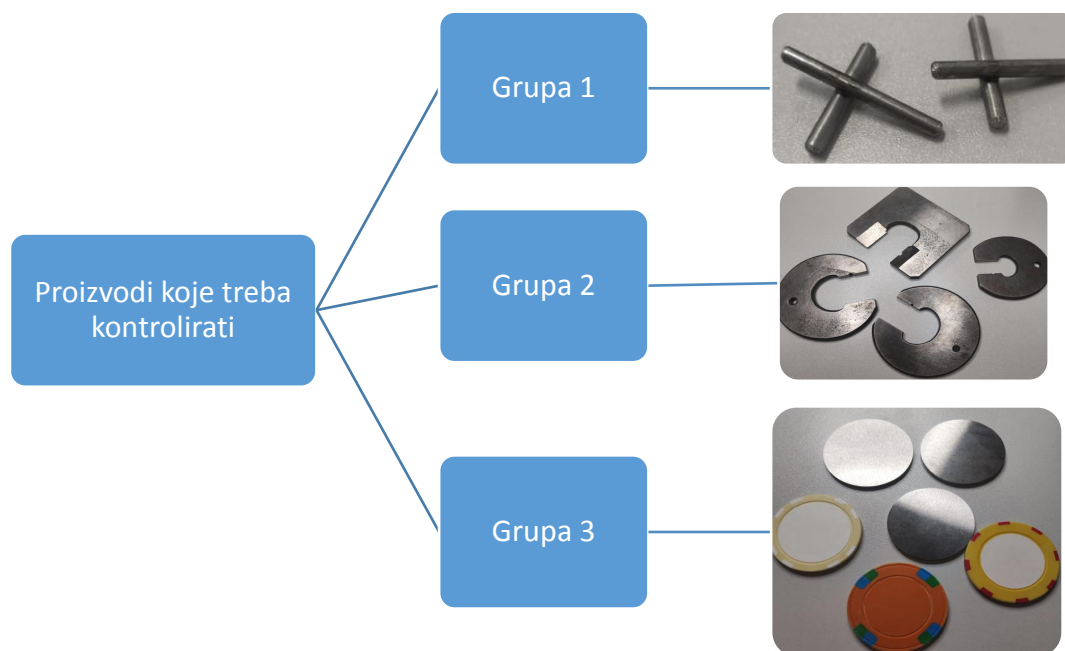
U prikazanim rezultatima na prvoj razini, moguće je podijeliti 12 proizvoda na 11 grupa, pri tome su proizvodi 7 i 10 dodijeljeni u jednu grupu uz koeficijent sličnosti od 100 %. U iduća dva koraka su proizvodi 6 i 7 te 5 i 6 dodijeljeni u jednu grupu uz koeficijent sličnosti od 100 %. Zaključeno je da na toj razini jednu grupu mogu činiti proizvodi 5, 6, 7 i 10. U idućem koraku, koraku 4, koeficijent sličnosti pada na 98,42 % unutar grupe, a proizvodi su podijeljeni u 8 grupa. U idućem koraku, 5. koraku, koeficijent sličnosti pada na 96,84 %, isto je ponovljeno do 7. koraka, kada je uz isti koeficijent sličnosti moguće odrediti 5 grupa proizvoda. U 8. i 9. koraku uz koeficijent sličnosti 93,679 % moguće je odrediti 3 grupe proizvoda. U idućim koracima koeficijent sličnosti pada na 37,551 %, te je u tom slučaju moguće odrediti 2 grupe proizvoda.

Obzirom na definirane zahtjeve za mjerenjem te prema literaturi (*Dendrogram - Minitab*, n.d.) grupa se definira prema mjestu gdje je najveći pad koeficijenta sličnosti, pojedini proizvodi

dodijeljeni su grupama kako slijedi. Proizvodi 11 i 12 će činiti grupu 1. Ova grupa predstavlja skup žica određenog promjera koji varira između 3 i 4 mm. Žice su međusobno spojene zavarivanjem te je na ovoj grupi zbog zahtjeva naručitelja potrebno provesti detaljniju analizu nego kod preostalih proizvoda. Proizvodi 1-4 su mjerne rašlje te će biti dodijeljeni u grupu 2, a proizvodi 5-10 su žetoni i grupirani su u grupu 3.

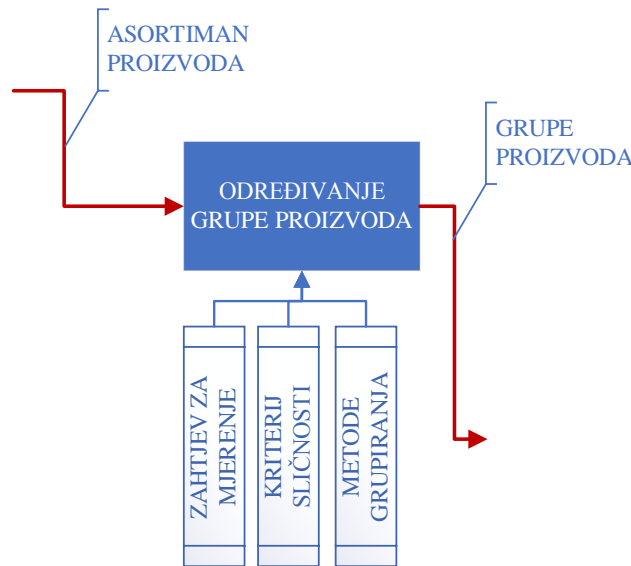
Proizvodi dodijeljeni u grupe iz zadanog asortimana proizvoda prikazani su na slici 3.5. Na svim navedenim proizvodima potrebno je provesti kontrolu prema postavljenim zahtjevima.

Ukoliko postoji rekonfigurabilni proizvodni sustav, a rekonfigurabilni mjerni sustav je njegov sastavni dio, grupe proizvoda potrebno je definirati prije početka proizvodnog procesa. Ukoliko se projektira rekonfigurabilni mjerni sustav koji je neovisan o proizvodnom sustavu, kao što je to primjerice u mjernom laboratoriju u kojem će se predloženi sustav projektirati, grupe proizvoda su određene prema provedenoj analizi.



Slika 3.5 Pojedini proizvodi dodijeljeni u imenovane grupe

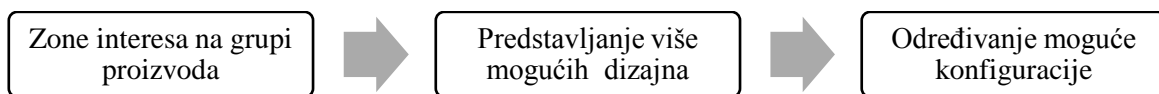
Provedenom analizom, uz prikaz na primjeru, može se zaključiti da na korak koji se odnosi na određivanje grupe proizvoda ulazni podatak predstavljaju *asortimani proizvoda*, postavljeni zahtjevi za mjerenjem, kriteriji o sličnosti proizvoda te odabrana metoda grupiranja (slika 3.6). Izlazni podatak je definirana *grupa proizvoda*.



Slika 3.6 Dio dijagrama toka osnovnih koraka - određivanje grupe

3.3. Traženje mogućih rješenja RMS-a

Nakon što se provede analiza sličnosti i definiraju grupe proizvoda potrebno je odrediti moguće dizajne za određivanje moguće konfiguracije sustava (slika 3.7).



Slika 3.7 Tok postupka određivanja konfiguracije sustava

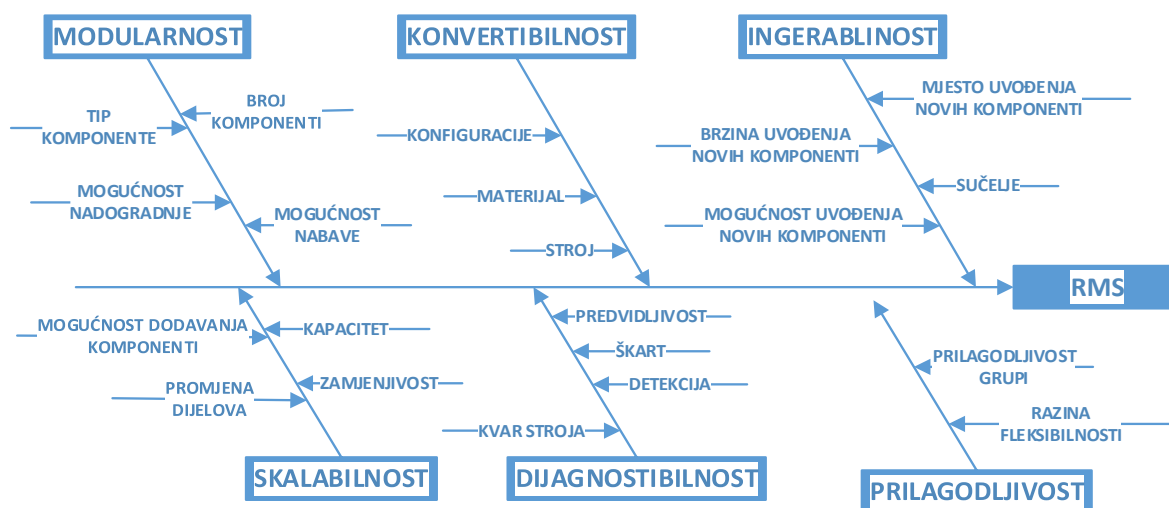
Prema konceptu rekonfigurabilnosti potrebno je zadovoljiti određene zahtjeve da bi se sustav mogao nazvati takvim.

Kako bi se RMS projektirao u skladu s konceptom rekonfigurabilnosti potrebno je da zadovoljava postavljene zahtjeve i principe rekonfigurabilnosti:

- Modularnost – RMS se sastoji od modula koji su standardizirani, lako dostupni, mogu se jednostavno mijenjati ovisno o potrebnoj konfiguraciji sustava: kamere, objektivni, osvjetljenje, modularni dijelovi konstrukcije okvira.
- Integrabilnost definira sposobnost uvođenja novih komponenti te brzina njihovog uvođenja, u skladu sa samom mehanikom, sučeljem i informatikom, a da se nalaze na predefiniranim pozicijama kako ne bi došlo do pogreške u određivanju zahtijevane karakteristike. Potrebno je napisati uputu i pravila postavljanja modula na predefinirane pozicije za određene grupe proizvoda.

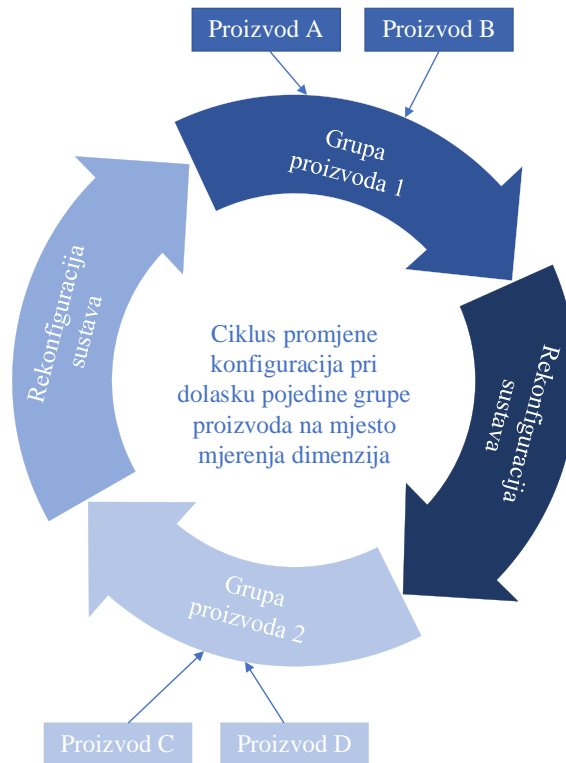
- Prilagodljivost definira razina fleksibilnosti. Za zadanu grupu proizvoda definirana je točno određena fleksibilnost (onoliko koliko je potrebno) prilagođena za tu grupu proizvoda.
- Dijagnostibilnost predstavlja mogućnost detekcije kvara sustava ili detekciju pojave nesukladnih proizvoda, otkrivanje škarta i obavještanje operatera o tome. Može se provoditi unutar koda u softveru.
- Konvertibilnost predstavlja mogućnost postavljanja različitih konfiguracija sustava, materijali koji se pri tome koriste, promjena modula ili njihovo dodavanje kako bi se zadovoljili zahtjevi za kontrolu nove grupe proizvoda (primjerice promjena kamere ili objektiva, korištenje telecentričnog objektiva za sustav mjerenja gdje je potrebno).
- Skalabilnost je karakteristika koja omogućava brzu promjenu i dodavanje komponenti te njihovu zamjenjivost uz inkrementalno povećanje/smanjenje kapaciteta. Mijenjanjem sustava, dodavanjem komponenti omogućuje se promjena kapaciteta mjernog sustava, primjerice implementacijom jačeg računala koji će brže izvoditi zadane operacije te će posljedično postupak mjerenja biti kraći.

Prilikom projektiranja sustava potrebno je izdvojiti što više utjecajnih faktora na konstrukciju i rad samog sustava. Ishikawa dijagramom na slici 3.8 prikazani su utjecajni faktori na pojedinu karakteristiku predloženoga mjernog sustava.



Slika 3.8 Ishikawa dijagramom prikazani utjecajni faktori na predloženi sustav

Različiti proizvodi zahtijevaju različite konfiguracije, a sustav treba biti dizajniran i optimiran na način da omogućuje rekonfiguraciju na jednostavan i prihvatljiv način (slika 3.9).

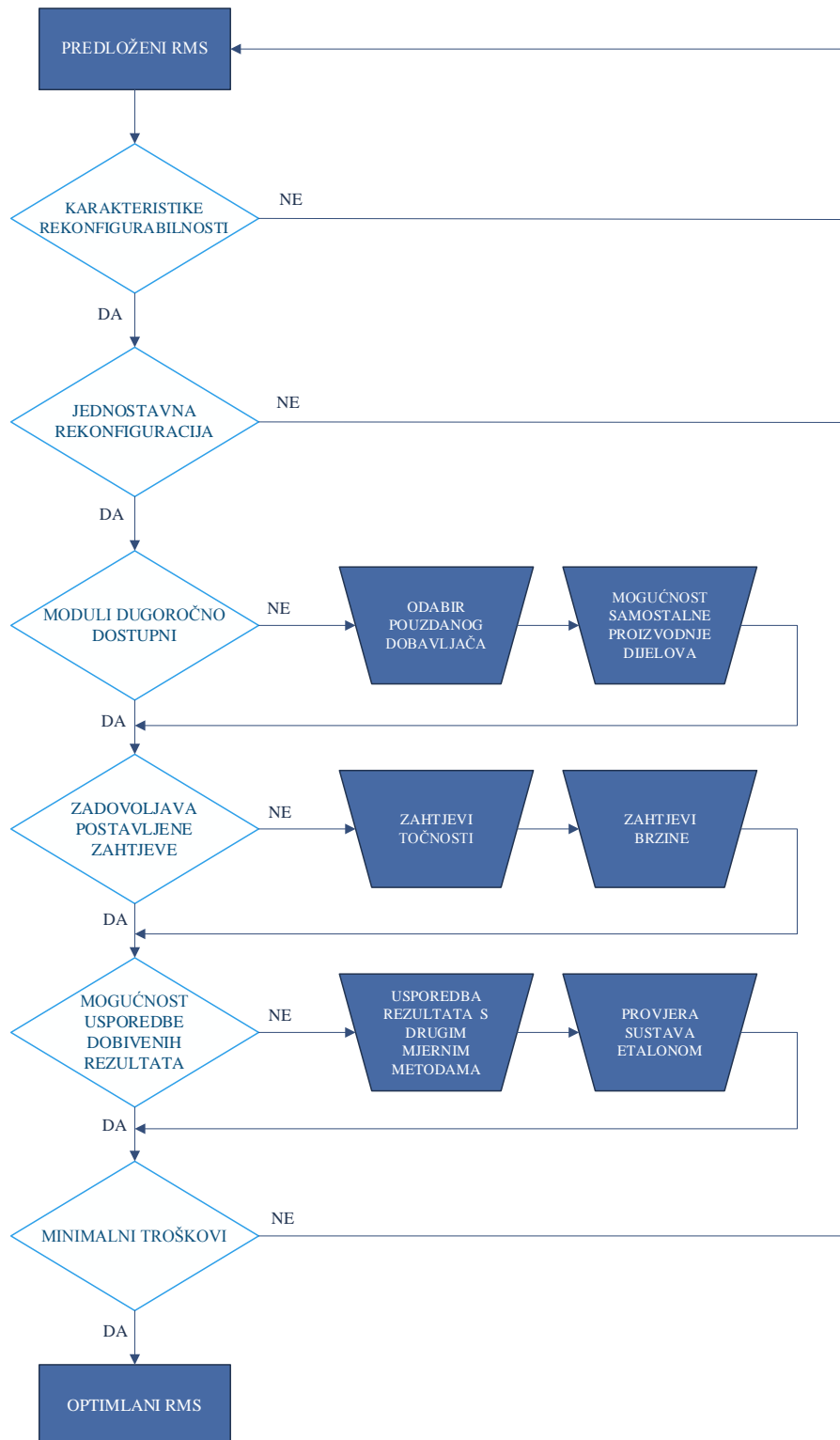


Slika 3.9 Princip promjene rekonfiguracije sustava

Arhitektura konstrukcije RMS-a mora biti modularna, odnosno različiti moduli moraju se moći dodavati i uklanjati iz sustava. Moduli također moraju biti dostupni na tržištu (dugoročno), cjenovno prihvatljivi, lako dobavljivi i kompatibilni s ostatkom opreme. Ukoliko nisu dostupni, uzeti u obzir mogućnost samostalne proizvodnje dijelova sustava (primjerice aditivnim tehnologijama). Moduli trebaju biti integrirani na način da dopuštaju pouzdan način za transformacije pokreta, snage, prijenosa podataka na određeni vremenski period.

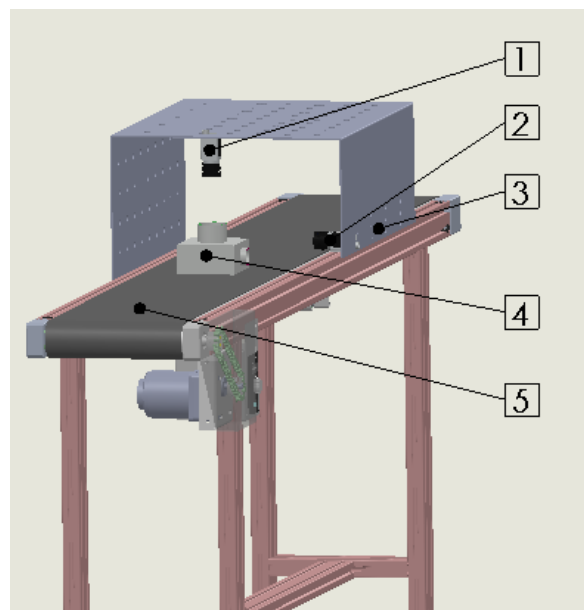
Nakon odabira pojedinih modula potrebno je provjeriti zadovoljavaju li postavljene zahtjeve koje sustav mora imati, poput zahtjeva točnosti ili brzine provedbe mjerenja. Optimalni RMS mora biti takav da je u mogućnosti rezultate dobivene iz mjerenja, moguće usporediti s drugim mjernim metodama ili umjerenim etalonima. Ukoliko su svi prethodni zahtjevi zadovoljeni, a sustav ujedno zahtjeva minimalne troškove ulaganja uzevši u obzir i buduće rekonfiguracije sustava, tada se takav sustav može nazvati optimalnim. Ukoliko je sustav kompleksan i zahtjeva dodatne analize isplativosti i odabira optimalnih komponenti moguće je implementirati neku od metoda odlučivanja, poput autora koji su pokazali primjenu AHP metode (Olabanji i Mpofo, 2014) na projektiranju rekonfigurabilne stezne naprave, te autora (Abdi i Labib, 2010) u rekonfigurabilnim proizvodnim sustavima. Tok postupka projektiranja

optimalnog rekonfigurabilnog sustava sastoji se od nekoliko koraka. Dijagramom toka na slici 3.10 dan je prikaz traženja mogućih rješenja za projektiranje optimalnog RMS-a, nakon čega slijedi odabir konfiguracije sustava te izvedba sustava i njegova primjena.



Slika 3.10 Tok postupka projektiranja optimalnog rekonfigurabilnog sustava

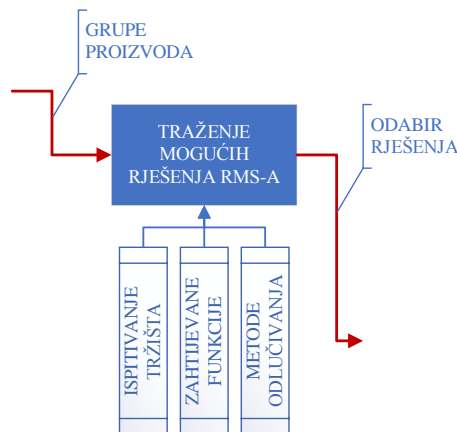
Vodeći se konceptima rekonfigurabilnosti i prethodnim istraživanjima osmišljen je preliminarni model RMS-a koji se sastoji od određenih osnovnih komponenti (slika 3.11) koji je ujedno predstavljen u radu (Marković et al., 2019). Predloženi RMS sastoji se od hardverskih i softverskih komponenti. Hardverske komponente čine senzori (1 i 2) koji mogu biti postavljeni na predefinirane pozicije (3), predmet mjerenja (4) koji se pomiče po transportnoj traci (5) te dolazi na poziciju na kojoj se provodi mjerenje. Nakon što na transportnu traku dolazi druga grupa proizvoda, operater određenom senzoru promijeni poziciju te se prilagođavaju postavke mjerenja za novu grupu proizvoda.



Slika 3.11 Preliminarni koncept RMS-a

Detaljan odabir pojedinih komponenti sustava biti će idući korak. Potrebno je odabrati komponente sustava da zadovoljavaju pojedine postavljene zahtjeve, a rezultati koji će se dobiti projektiranim RMS-om trebaju se moći usporediti i nekom drugom mjernom metodom koja je dostupna.

Zaključno može se reći da traženje mogućih rješenja ovisi, pored prethodno spomenute *grupe proizvoda*, o *ispitivanju tržišta* u smislu dostupnosti i cijene pojedinih komponenti i modula sustava, zadovoljavanju *zahtijevanih funkcija* u skladu s konceptom rekonfigurabilnosti te ukoliko je sustav kompleksan potrebno je koristiti *metode odlučivanja* za odabir optimalnog RMS-a (slika 3.12). Izlazni podatak iz ovog koraka je *odabir rješenja* koji je potrebno detaljizirati u idućim koracima, odabirom mjerne metode i odabirom konfiguracije sustava.



Slika 3.12 Dio dijagrama osnovnih koraka – traženje mogućih rješenja RMS-a

3.4. Odabir mjerne metode

Mjerni postupak je podroban opis mjerenja u skladu s jednim ili više mjernih načela i danom mjernom metodom, na temelju mjernog modela i uključujući svaki izračun kako bi se dobio mjerni rezultat. Mjerna metoda (metoda mjerenja) je opći opis smislene organizacije postupaka koji se upotrebljavaju u mjerenju (Runje, 2014).

Mjerni sustav je skup od jednog ili više mjerila i često drugih uređaja prilagođen da daje podatke koji se upotrebljavaju za dobivanje izmjerenih vrijednosti veličine specificirane vrste u specificiranim intervalima veličina. Osnovni elementi mjernog sustava su predmet mjerenja, mjeritelj, mjerni postupak, okolina i vrijeme u kojem se provodi mjerenje (Runje, 2014).

Opći postupak mjerenja treba se sastojati od sljedećih koraka (Czichos, 2018):

1. Definirati mjerenu veličinu i njenu mjernu jedinicu.
2. Definirati karakteristike objekta koji se mjeri s lokacijom i vremenom mjernog postupka.
3. Naziv mjernog standarda sa sljeditivošću do SI .
4. Odabir mjernog uređaja.
5. Umjeravanje mjernog uređaja prema standardu.
6. Određivanje srednje veličine mjerenja.
7. Određivanje mjerne nesigurnosti.

Prije provođenja mjerenja određenim uređajem nužno je vizualno pregledati uređaj s ciljem potvrđivanja njegovog ispravnog stanja, pravilno postaviti uređaj i predmet mjerenja u mjernu

konfiguraciju, priključiti uređaj na računalo, električnu mrežu i sl., osigurati čistoću mjesta mjerenja te osigurati druge posebne zahtjeve ovisno o mjernoj metodi.

Kako je već spomenuto, potrebno je odrediti mjernu nesigurnost sustava, a ona se procjenjuje jer mjerenja nisu savršena, zbog nedvosmislenog iskazivanja i usporedbe mjernih rezultata dobivenih u različitim umjerenim i ispitnim laboratorijima te radi usporedbe rezultata sa specifikacijama proizvođača ili zadanom tolerancijom (Runje, 2014). Na slici 3.13 su prikazane metode za dimenzijska mjerenja izratka prema veličini, kompleksnosti i vrsti materijala izratka. Dana je usporedba između laserskog mjerenja, mjerenja direktnom usporedbom, mjerenja taktilnim i optičkim koordinatnim mjernim uređajem (KMU), mjerenja računalnom tomografijom, mjerenja fotogrametrijom, mjerenja interferometrijom, mjerenja mikroskopom, mjerenja mikroskopom atomskih sila, mjerenja taktilnom i optičkom profilometrijom. Uz navedene karakteristike prikazana je sljedivost pojedinog uređaja. Taktilni KMU i interferometar imaju potpunu mjeriteljsku sljedivost za razliku od fotogrametrije koja nema, no fotogrametrija zadovoljava u odnosu na druge metode mjerenja u svim kategorijama, osim u kompleksnim oblicima te reflektirajućim površinama. Mjerna nesigurnost definira se kao parametar na temelju kojeg se određuje pouzdanost mjernog procesa te kao parametar korišten za usporedbu i prihvaćanje korištenog sustava u svojstvu mjernog uređaja (Tang et al., 2016).

Potpuna mjeriteljska informacija uključuje iznos mjerenja te podatak o mjernoj nesigurnosti rezultata mjerenja čime se, između ostalog, osigurava mjeriteljska sljedivost (Horvatić Novak, 2018).

Na odabranom mjernom sustavu potrebno je odrediti njegovu preciznost. Pojam preciznosti je definiran u normi ISO 5725 (*ISO 5725-4:2020(En), Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results — Part 4: Basic Methods for the Determination of the Trueness of a Standard Measurement Method*, 2022). Preciznost je raspršenost rezultata između ponovljenih mjerenja. Preciznost ovisi o uvjetima u kojima su dobiveni rezultati. Označava se numerički preko standardne mjerne nesigurnosti te što je ona manja, preciznost je veća (Czichos, 2018). Preciznost umjeravanja vizijskog sustava je pod utjecajem faktora kao što su gubitak informacije o dubini, distorzija leće te pogreške nastale zbog obrade slike (Dongyuan et al., 2008). Vrlo je bitan položaj kamere prilikom njenog postavljanja u odnosu na predmet jer udaljenost između kamere i senzora utječe na rezoluciju, a time i na preciznost (Rodríguez-González et al., 2017).

| | lasersko mjerenje | direktna usporedba | taktilni KMU | optički KMU | računalna tomografija | fotogrametrija | interferometrija | taklino/profilometrija | optička profilometrija | mikroskop | mikroskop atomskih sila |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|--------------|-------------|-----------------------|----------------|------------------|------------------------|------------------------|-----------|-------------------------|
| dimenzije proizvoda | | | | | | | | | | | |
| velike | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| srednje | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| male | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| mikro | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| kompleksnost oblika | | | | | | | | | | | |
| mala | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| srednja | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| velika | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| materijal i površina | | | | | | | | | | | |
| čvrsto, neosjetljivo | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| deformabilno | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| reflektirajuće | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| prozirno | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| neprozirno | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| sljedivost | | | | | | | | | | | |
| | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

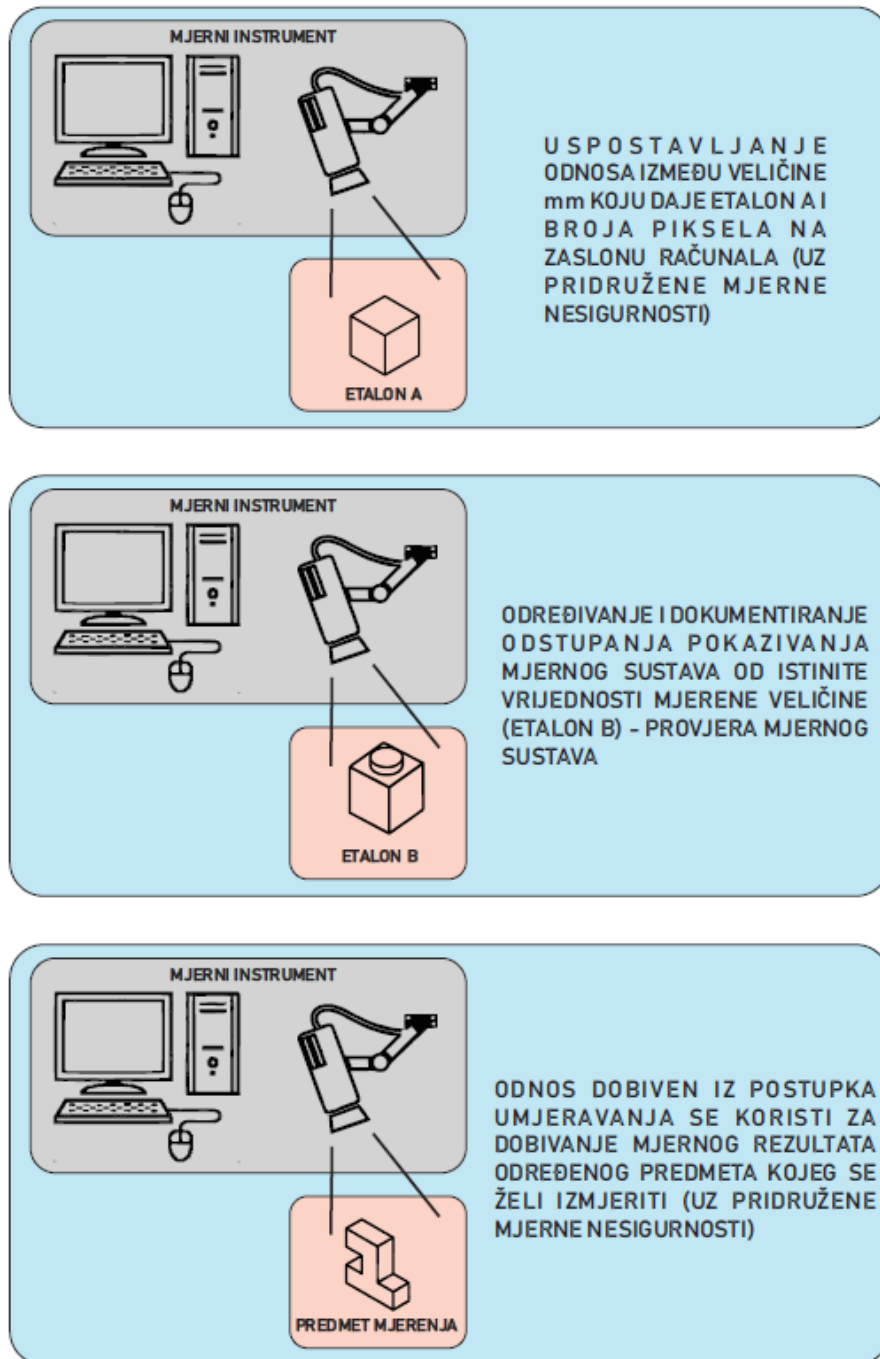
| | |
|--------------------|---|
| potpuno poklapanje | ■ |
| srednje poklapanje | ■ |
| slabo poklapanje | ■ |
| nema poklapanja | ■ |

Slika 3.13 Usporedba metoda mjerenja (Savio et al., 2007)

Slika 3.14 prikazuje shematski postupak dimenzijskih mjerenja vizijskim sustavom koji je u ovom radu odabran kao dio predloženog RMS-a. U prvom koraku potrebno je uspostaviti odnos između stvarne veličine mjernog predmeta i piksela na zaslonu računala, tj. povezati milimetre s brojem piksela. U drugom koraku potrebno je provjeriti je li sustav točan drugim referentnim predmetom. Odnosno, potrebno je odrediti i dokumentirati odstupanja izmjerene vrijednosti od istinite vrijednosti. U trećem koraku iz dobivenog odnosa mm/px moguće je obavljati mjerenja predviđenog predmeta.

Pri obradi podataka sa slike javljaju se problemi koji utječu na točnost ispitivanih dimenzija. Glavni problem je određivanje točnog ruba predmeta, odnosno granice između same pozadine i predmeta. Taj problem se javlja radi kvalitete same kamere i kvalitete osvjetljenja (problem je moguće minimizirati korištenjem prstenastog osvjetljenja oko kamere), odnosno nastanka sjene na rubu zbog treće dimenzije predmeta. Rub tada izgleda mutno te se određeni broj piksela

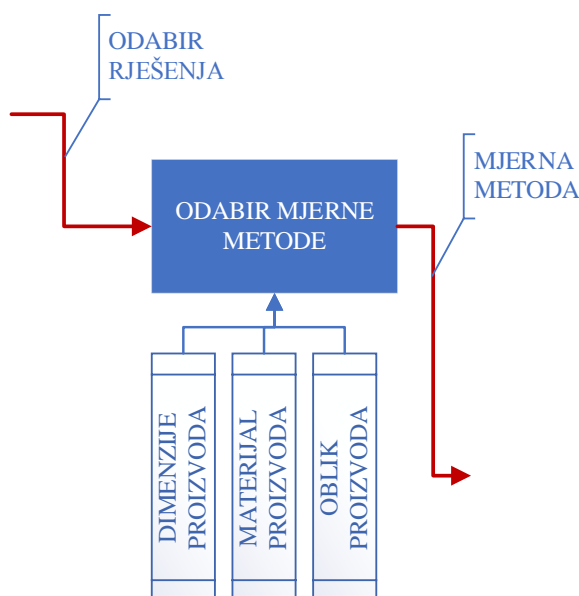
na slici nalazi u tom području koje je potencijalni rub, a nije moguće odrediti samo jedan koji najbolje odgovara stvarnom rubu. Ukoliko je slika kvalitetnije rezolucije (sadrži više piksela, a time i više informacija) veći broj piksela se nalazi u rubnom dijelu.



Slika 3.14 Slikoviti prikaz postupka mjerenja i umjeravanja

U ovom koraku potrebno je, na temelju prethodno *odabranog rješenja*, odabrati kojom mjernom metodom će se dobivati rezultati provedbe mjerenja predloženim RMS-om. Ovaj korak detaljnije će se objasniti u poglavlju umjeravanja sustava. *Odabir mjerne metode* može

ovisiti o *dimenzijama* te *obliku* i *materijalu* proizvoda koji je potrebno kontrolirati i postavljenim zahtjevima (Slika 3.15). Prema odabranoj *mjernoj metodi*, u sljedećem koraku potrebno je detaljno odabrati komponente za konfiguraciju rekonfigurabilnog mjernog sustava.

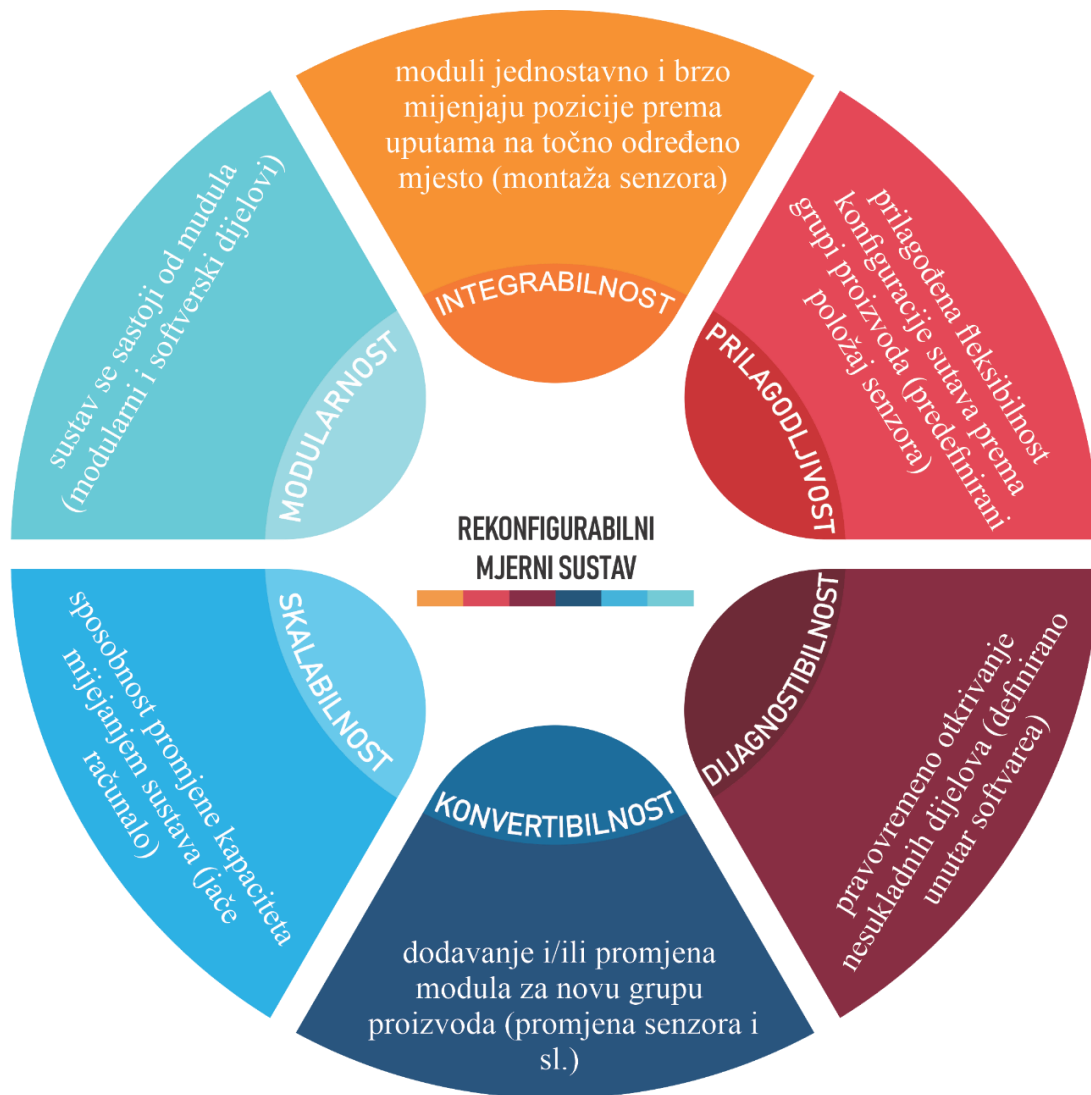


Slika 3.15 Dio dijagrama osnovnih koraka – odabir mjerne metode

3.5. Odabir konfiguracije RMS-a

U ovom poglavlju bit će opisane odabrane hardverske i softverske komponente projektiranog sustava koji zadovoljava prethodno navedene karakteristike te zajedno čine *odabranu konfiguraciju RMS-a*. Temeljem odabranih grupa proizvoda i ideje iz preliminarnog modela te odabrane *mjerne metode* sustava, osmišljen je koncept rekonfigurabilnoga mjernog sustava koji će biti detaljnije prikazan u ovom poglavlju.

Prema postavljenim zahtjevima za provedbu mjerenja pojedinih karakteristika iz predloženih grupa proizvoda odabran je način kontrole strojnim vidom kao glavne komponente sustava. Zatim je osmišljen i preostali dio komponenata koje čine cjelinu RMS-a i načina njihovih slaganja i postavljanja. Navedene karakteristike iz prethodno opisanog koraka traženja mogućih rješenja, u ovom poglavlju su pridružene pojedinim odabranim dijelovima iz primjera ovog RMS-a. Svakoj karakteristikici pridružen je odgovarajući dio sustava i prikazan je na slici 3.16.



Slika 3.16 Karakteristike rekonfigurabilnosti odabranog RMS-a

3.5.1. Hardverski dio predloženog sustava

Osim postolja, hardver samog sustava čine računalo kao nezaobilazan dio svakog sustava, a povezan je kablovima sa sensorima koji su u ovom istraživanju ograničeni na kamere, na koje su integrirani pripadajući objektivni sačinjeni od sustava leća. Dodatna oprema koja čini hardver je i osvjetljenje.

3.5.1.1. Postolje

Sastoji se od standardnih modula koji su lako dobavljivi. Pojedini moduli mogu se preslagivati na zahtijevanu poziciju u ovisnosti o proizvodu za koji je potrebno provesti mjerenje.

Prije samog odabira izgleda i dijelova postolja za predloženi RMS u ovom radu, potrebno je postaviti sljedeće zahtjeve koje rekonfigurabilno postolje mora ispuniti, a u skladu s postavljenim zahtjevima:

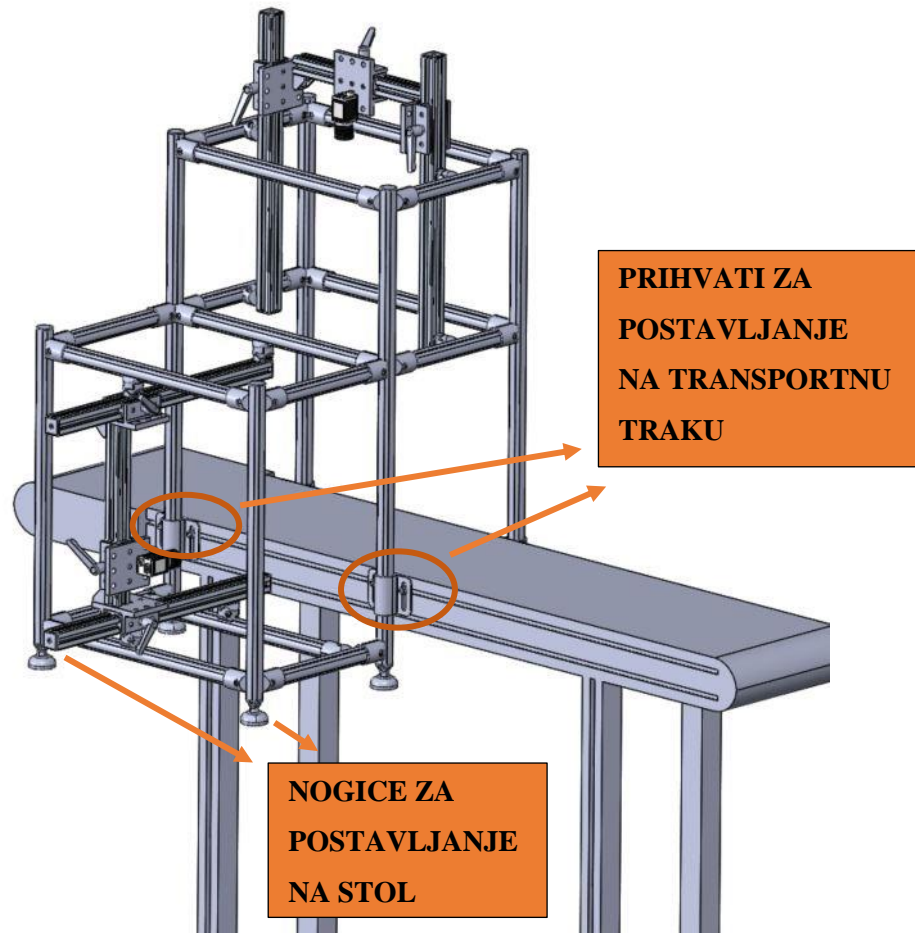
- omogućiti snimanje određene grupe predmeta kamerom odozgo i bočno
- omogućiti paralelnost postolja, odnosno kamere s površinom koja se kontrolira
- rekonfigurabilnost:
 - prilagodba na različite mjerne predmete - omogućiti pomicanje kamere u visinu s korakom ne većim od 2 mm
 - prilagodba na različite kamere/objektive - omogućiti da se s različitim kamerama/objektivima može snimati i odozgo i bočno
- omogućiti montažu na transportnu traku u proizvodnom pogonu (slika 3.17), a istovremeno i mogućnost postavljanja na radni stol u laboratoriju
- osigurati mjesto za osvjetljenje
- osigurati nesmetano spajanje računala i senzora.

Prema modelu (slika 3.17) vidljiv je izgled dijela RMS-a koji se najviše tiče izvedbe postolja.

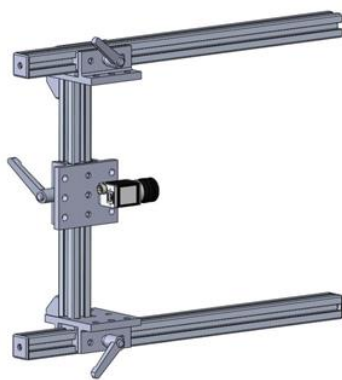
Bitne karakteristike odabranog modela izgleda postolja:

- moduli od kojih se sastoji postolje su odabrani iz ponude standardnih dijelova odabranog dobavljača (slika 3.18.)
- u slučaju potrebe, modularna konstrukcija postolja omogućava jednostavnu rekonfiguraciju i prilagodbu
- konstrukcijski elementi postolja omogućavaju jednostavno postavljanje mjerne opreme (prihvati za kamere i dr.)
- konstruiran je za postavljanje i na transportnu traku (slika 3.19) i za primjenu na stolu u mjernom laboratoriju, ovisno o potrebi.

Ovakva konfiguracija postolja omogućuje jednostavno spajanje pojedinih modula koji će činiti hardverske komponente sustava, a ujedno će biti moguće premještanje na druge pozicije mjerenja, ovisno o potrebi između laboratorija.



Slika 3.17 Model rekonfigurabilnog sustava



a)



b)

Slika 3.18 Model (a) i montirani dijelovi postolja (b)



Slika 3.19 Transportna traka u Laboratoriju za inteligentne strojeve i obradne sustave

3.5.1.2. Računalni kontroler

Komponenta koja čini hardverski dio je računalni kontroler, a koja objedinjuje i obrađuje sve podatke koji su dobiveni korištenjem ostalih hardverskih i softverskih komponenti.

Računala se vrlo brzo razvijaju u današnje vrijeme i neizostavan su dio opreme u svim razinama proizvodnje pa tako i u kontroli kvalitete. Dostupnost programirljivih logičkih kontrolera - PLC sustava omogućava komunikaciju i sinkroniziranost uređaja za kontrolu kvalitete ili nekog drugog uređaja s proizvodnim procesom u slučaju kada postoji jedno globalno računalo koje upravlja procesima. Računalni kontroler bi trebao zadovoljavati određene minimalne tehničke zahtjeve, a sve ovisno o tome što se očekuje kao krajnji rezultat.

Bitne karakteristike odabranog računalnog kontrolera (računala):

- tip sučelja: USB 3.1 Gen
- procesor: Intel Core i5 9th Gen Core i5-9300HQ
- grafička kartica: Nvidia GeForce GTX 1050
- radna memorija: RAM, DDR3, 8GB
- trajna memorija: SSD, 512 GB.

Izbor računala usko je povezan s izborom softvera koji će se koristiti, jer je potrebno osigurati njihov nesmetan rad.

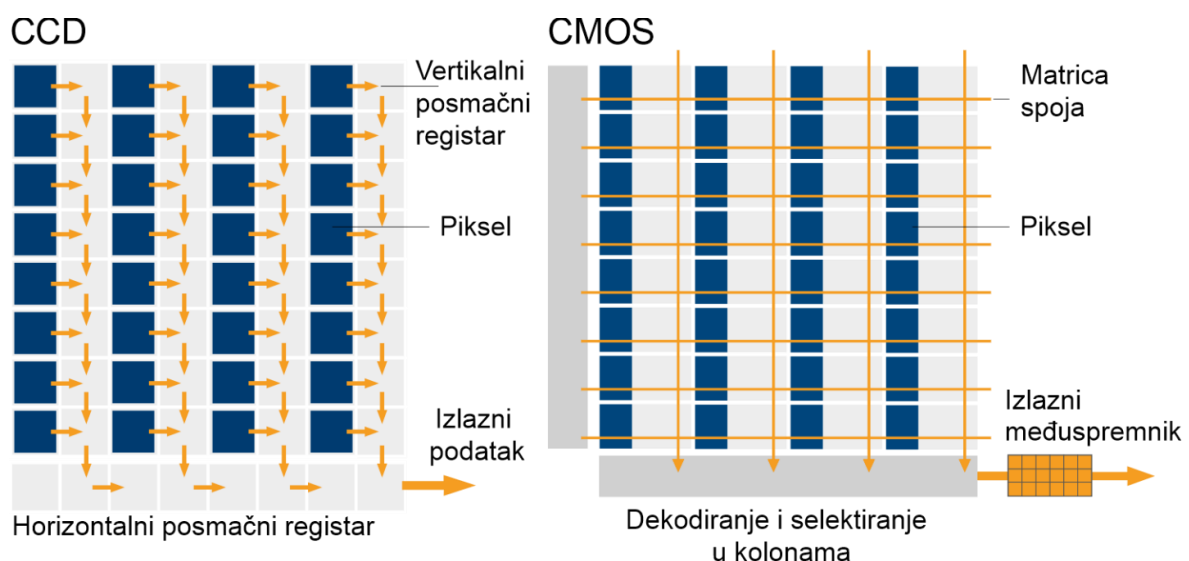
3.5.1.3. Senzor

Senzori su mjerni pretvarači koji pretvaraju određene parametre u električne signale koji mogu biti prikazani, spremljeni i obrađeni. Pod sensorima u strojnom vidu se uglavnom smatraju kamere, iako postoji i drugi tip strojnog vida koji koristi lasere ili ultrazvučne senzore, no oni nisu predmet ovog istraživanja.

Digitalna kamera koristi specifične protokole za komunikaciju s računalom koji onda obrađuje sliku (Niederjohann, 2022). Postoji više tipova kamera koje se koriste u svrhu strojnog vida, no najčešće se koristi tip kamere baziran na CCD (engl. *charge-coupled device*) tehnologiji, ali i kamere bazirane na CMOS tehnologiji (koja će se koristiti u ovom istraživanju). Prema (Fintel, 2015), CMOS tehnologija je najbolji izbor za postavljeni problem.

Slika 3.20. prikazuje razliku između dva senzora CMOS i CCD: CMOS (engl. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) senzor je, kao i CCD, poluvodički senzor koji pretvara svjetlo u električni signal. Za razliku od CCD senzora, kod CMOS-a pikseli se čitaju jedan po jedan u bilo kojem redosljedju, pogodno kada se samo određeni dio slike treba koristiti. Također, šum je slabiji kod CMOS nego kod CCD senzora.

Kod odabira kamere osim odabira senzora bitno je odabrati dovoljnu razlučivost. Rezolucija ili razlučivost kamere je podatak koji kaže koliki može biti maksimalni broj piksela na senzoru u optimalnim uvjetima, odnosno u industrijskoj obradi slike ona označava koja dimenzija objekta se nalazi na jednom pikselu. Piksel je najmanji element slike. Kamera mora imati rezoluciju što bližu zahtijevanoj točnosti kako bi mjerenje bilo bolje i stabilnije.



Slika 3.20 Način čitanja i rada CMOS senzora i CCD senzora (Fintel, 2015)

Ukoliko dođe do potrebe da treba pregledati veliko područje pri visokoj razlučivosti vjerojatnije je da će financijski isplativije biti izabrati sustav opremljen s više kamera koje koriste standardne objektivne nego izabrati sustav opremljen s jednom kamerom koja koristi poseban objektiv koji bi omogućio izradu fotografije potrebne razlučivosti. Dakle, treba unaprijed odrediti potrebnu veličinu senzora i veličinu promatranog područja. Također, za kompleksnije kontrole može se koristiti više kamera koje snimaju različite karakteristike objekta i pod drugačijim uvjetima.

Potrebno je znati treba li fotografija biti crno bijela ili u boji. Pri odabiru kamere treba obratiti pozornost na kvalitetu slike i ostale funkcije same kamere.



Za kamere koje imaju izraženiju osjetljivost na svjetlo moći će se koristiti slabiji izvor vanjskog osvjetljenja. Razina šuma kamere trebala bi biti niska u odnosu na prepoznatljivi signal te je ovo svojstvo posebno važno u uvjetima slabog osvjetljenja.

Među funkcijama kamere vrlo je bitna brzina koja se navodi kao *fps* ili *broj kadrova u sekundi* i označava maksimalni broj slika koje se mogu snimiti u jednoj sekundi.

Ostale funkcije uključuju automatsko vrijeme ekspozicije i podešavanje pojačanja te automatsku ravnotežu bijele boje.

Kamere kao moduli u predloženom RMS-u su industrijske kamere proizvođača Basler, a odabrane su iz kataloga kamera uzimajući u obzir dostupan budžet te zahtjeve za mjerenjem (tablica 5).

Tablica 5 Bitne karakteristike odabranih senzora

| Tip kamere: | a2A2590-60ucBAS - Basler ace 2 | acA2500-60uc - Basler ace |
|-------------------------|---|---|
| |  |  |
| Veličina senzora | 5,2 mm x 3,9 mm | 12,4 mm x 9,8 mm |
| Tip senzora | CMOS | CMOS |
| Rezolucija | 2592 px x 1944 px | 2590 px x 2048 px |
| Frame rate | 60 fps | 60 fps |

| Tip kamere: | a2A2590-60ucBAS - Basler ace 2 | acA2500-60uc - Basler ace |
|----------------------|--------------------------------|---------------------------|
| U boji | da | da |
| Spajanje na računalo | USB 3.0 | USB 3.0 |

3.5.1.4. Objektiv

Objektiv je dio koji se montira na kameru, a sastoji se od određenog sustava leća. Važno je uzeti u obzir karakteristike leće, uključujući izobličenje, rezoluciju, kromatsku aberaciju i optimalan spektralni raspon leće. Primjerice, postoje posebni objektivni za infracrvene, ekstremno širokokutne leće (riblje oko) ili telecentrične leće koje su posebno korisne kod mjerenja duljine. No, ove posebne karakteristike leća često dolaze uz visoku cijenu (Niederjohann, 2022). Objektiv se općenito sastoji od više konkavnih i konveksnih leća, oblikovanih tako da usmjere zrake svjetla na senzor. Količina svjetla koja pada na senzor kontrolira se otvorom zaslona. Što je veći f-broj manje svjetla će ući kroz objektiv. Što je veća žarišna duljina objektiv, dobiva se manja dubinska oštrina i manji vidni kut, ona opisuje kakvo će biti vidno polje korištenog objektiv.

Fokus omogućava oštrinu slike. Kada fokus nije postavljen na potreban način, kontrast na slici nije optimalan i moguće su pojave grešaka u umjeravanju i mjerenju. Procesom stvaranja i obrade slike u domeni strojnog vida znanstvenici se aktivno bave već više od 20 godina. Ljudsko oko može procijeniti kada je slika dobro fokusirana, no ne može procijeniti kada je fokus postavljen optimalno. U industrijskom okruženju uglavnom je konstantna udaljenost predmeta od objektiv pa se ne koristi automatski fokus nego manualni fokus. Autori Moru i Borro (2021) su dokazali da fokus utječe na pogrešku i da se pogreška smanjuje kako se fokus približava 100 %.

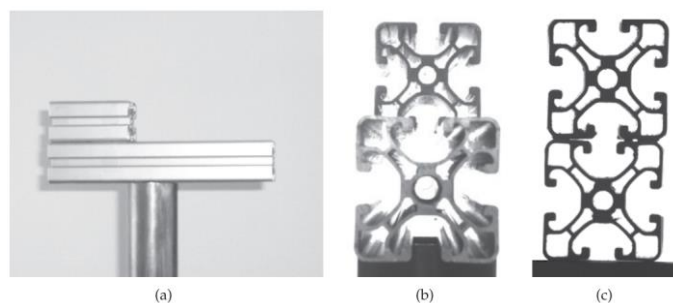
Tablica 6 prikazuje bitne karakteristike odabranih objektiv koji su korišteni u ovom radu za njihovo spajanje na pripadajuće kamere.

Odabran je objektiv Basler C23-5028-5M-P (*Basler Lens*, 2022) koji ima žarišnu duljinu 50 mm. Ljudsko oko ima žarišnu duljinu približno 50 mm i to se naziva normalna žarišna duljina. Povećanjem veličine žarišne duljine, sužava se vidno polje. Objektiv s manjom žarišnom duljinom nazivaju se širokokutni i predmet gledan kroz takav objektiv izgledat će manji. Suprotno njima, postoje telecentrični objektiv.

Tablica 6 Bitne karakteristike odabranih objektivna

| | | |
|-------------------------|---|--|
| Naziv objektiva: | Basler C23-5028-5M-P f50mm | Telecentrični objektiv TC2MHR016-C |
| Slika |  |  |
| Prihvat | C-mount | C-mount |
| Veličina senzora | 2/3" | 2/3", 1/1,2", 1" |
| Radna udaljenost | > 400 mm | 4,3 mm |

Drugi odabrani objektiv je telecentrični TC2MHRP016-C (*Opto Engineering, 2022*), njega karakterizira izgled predmeta na slici koji je istih dimenzija neovisno o njegovoj udaljenosti od objektiva. Iz tog razloga često se koristi u metrologiji i vizijskim sustavima koji zahtijevaju visoku točnost mjerenja. Telecentrični objektiv pogodan je za dimenzionalna mjerenja s različitim radnim duljinama (W. Li et al., 2019). Primjerice slika 3.21-a prikazuje dva profila koji stoje jedan na drugom, poprečni presjek oba profila ima jednake dimenzije i slika se s desne strane ovako postavljenih profila. Profili nisu jednakih duljina pa je stoga udaljenost objektiva do početka poprečnog presjeka različita. Slika 3.21-b i slika 3.21-c prikazuju isti pogled, ali slikan drugim objektivom. Ukoliko se prilikom slikanja koristi obični objektiv (slika 3.21-b) dimenzije poprečnih presjeka profila bit će međusobno različite, a ukoliko se koristi telecentrični objektiv, dimenzije poprečnih presjeka bit će jednake (slika 3.21-c).

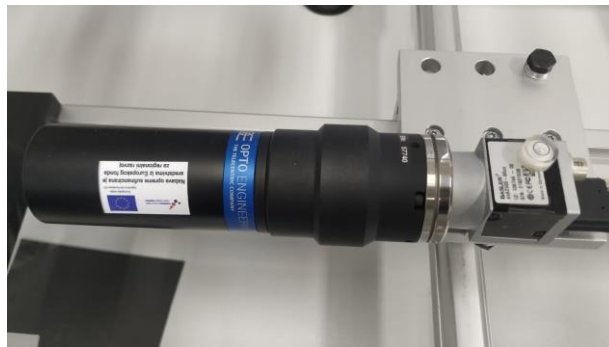


Slika 3.21 Profil (a) slikan običnim (b) i telecentričnim objektivom (c) (Beyerer et al., 2016)

Pripadajuće odabrane komponente senzora i objektiva u radu, prikazuju slika 3.22 i slika 3.23.



Slika 3.22 Spojeni sustav senzora i objektiva 50 mm



Slika 3.23 Spojeni sustav senzora i telecentričnog objektiva

3.5.1.5. Električni vodovi

Univerzalna serijska sabirnica - USB (engl. *Universal Serial Bus*) vodovi pojavili su se 1990ih godina i postali su nezaobilazni alat za spajanje opreme s računalom. U strojnom vidu počinju se koristiti deset godina kasnije s pojavom USB 2.0 tehnologije jer je omogućio prijenos podataka veličine 480Mbit/s. USB tehnologija danas je praktična jer je preko istog voda moguće ostvariti i napajanje spojenog uređaja. 2008. godine USB 3.0 tehnologija postaje dostupna te ima mogućnost prijenosa podataka veličine 5 Gbit/s.

Ethernet tehnologija se pojavljuje 1980ih godina. Treća generacija se naziva Gigabit Ethernet (GigE) i može prenositi količinu podataka od 1 Gbit/s, ali ne može napajati kameru električnom energijom. GigE je odličan izbor za dugačke kablove (do 100 m, (*Opto-E*, 2021)) kojima je hardver povezan, ali u zadnje vrijeme i USB 3.0 tehnologija je postala vrlo zastupljena u ove svrhe. Proizvođači razvijaju standarde kako bi se podaci prenosili brzo, pouzdano i stabilno (Behringer Peter i Dettmer, 2016).

U predloženom RMS sustavu, odabrani su USB 3.0 vodovi (slika 3.24) za napajanje i za prijenos podataka.



Slika 3.24 USB 3.0 za spajanje komponenti

3.5.1.6. Osvjetljenje

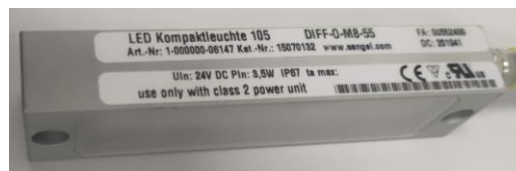
O važnosti osvjetljenja i njegovim utjecajima na snimljenu sliku govore autori Elango i Karunamoorthy (2008) te Zhang et al. (2010). Kada se govori o osvjetljenju uglavnom se koristi LED rasvjeta, a služi za potrebe osvjetljavanja predmeta snimanja koji su tamni te umanjivanja nepovoljne refleksije koja se javlja. Velika važnost pridaje se problemu pojave sjene. Osvjetljenje može biti usmjereno ili raspršeno, reflektivno ili pozadinsko. Raspršujuće je svakako bolje ako se slikaju predmeti koji imaju mnogo reflektivnih površina u raznim smjerovima, a treba uzeti u obzir i valnu duljinu svjetla. LED osvjetljenje s direktnim prednjim osvjetljenjem omogućuje veliki kontrast između objekta i pozadine (Y. Huang et al., 2009). LED rasvjeta omogućuje bolje osvjetljenje i ima duži životni vijek pa se više koriste od halogene tehnologije koja isijava toplinu i ima kraći životni vijek ili fluorescentne tehnologije koja je preglomazna za okruženje strojnog vida i ekonomski najskuplja.

Pojedini autori poput (Shahabi i Ratnam, 2010) koji mjere radijus vrha alata, koriste pozadinsko osvjetljenje, no ono najčešće nije praktično u industrijskom okruženju.

U ovom istraživanju je odabrana prstenasta LED rasvjeta čime se problem sjene i refleksije svodi na minimum te kompaktna LED rasvjeta (slika 3.25).



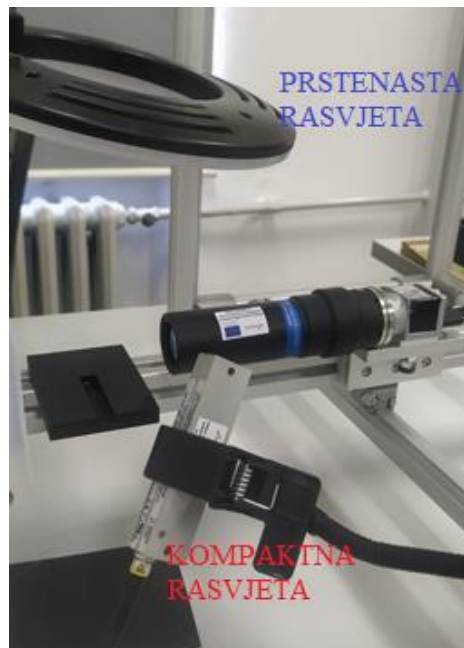
a)



b)

Slika 3.25 Odabrana LED rasvjeta (a) prstenasta, (b) kompaktna

Rasvjeta je postavljena na RMS (slika 3.26) na način da jednostavno može promijeniti mjesto jer je spojena modularnim prihvatom u obliku kvačice. Položaj rasvjete se prilagođava ovisno o pojavi sjene na grupi predmeta koja se kontrolira.

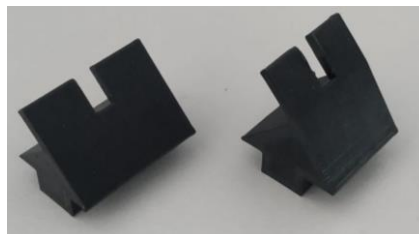


Slika 3.26 Rasvjeta postavljena na RMS

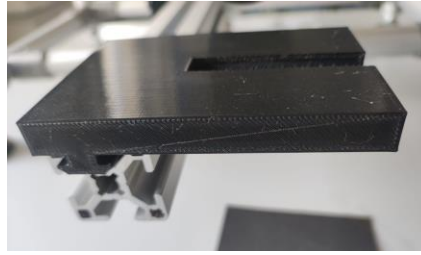
3.5.1.7. Moduli za prihvat predmeta

Pojedini prihvat za predmete napravljeni su na način da su konstruirani za potrebe prijvata određene skupine predmeta i izrađeni aditivnom tehnologijom (slika 3.27). Moduli su konstruirani na način da kada je predmet postavljen na prihvat, bude dobro vidljiv kameri.

Slika 3.28 prikazuje postolje koje povezuje module za prihvat predmeta i postolje RMS-a. Prihvat je također izrađen aditivnim tehnologijama. Ovim načinom je omogućeno lakše namještanje grupe predmeta na mjesto provjere zahtijevanih značajki.



Slika 3.27 Modul za prihvat predmeta mjerjenja iz jedne grupe proizvoda



Slika 3.28 Postolja u koje se postavlja modul za prihvat

3.5.2. Softverski dio predloženog sustava

Za obradu slika potreban je softver. Većina kamera dolazi s aplikacijama koje se koriste za prikazivanje slika i konfiguraciju kamere. U ovom radu odabrane su Basler kamere stoga je korišten i njihov softver Pylon koji služi za pokretanje kamere. Za posebne aplikacije i zadatke za obradu slika potreban je poseban softver koji može biti kupljen ili razvijen. Ukoliko se softver samostalno razvija to može biti vrlo zahtjevno pa se koriste komercijalna programska rješenja kada su ista dostupna i ekonomski isplativa. Rješenja su dostupna za mnoge standardne zadatke vezane za obradu slika, uključujući besplatne ili komercijalno dostupne softverske biblioteke poput Halcon-a (T. Huang et al., 2021) ili programe poput LabVIEW (Shi et al., 2019) u kojem je autor Jovanović (2015) razvio sustav za automatsku kontrolu proizvoda u automobilskoj industriji. Matlab kojeg koriste autori Coman i Balan (2010), Zuperl et al. (2016) se najčešće koristi za strojno učenje, vizijsku kontrolu, obradu slika, općenito za testiranja i mjerenja, robotiku i slično područje od interesa. U radovima iz dostupne literature nedostaje opis umjeravanja sustava te postizanje određene točnosti primijenjenog sustava.

3.5.2.1. Postupak dobivanja informacije iz vizijskog sustava

Digitalna slika se sprema na računalo te se dalje obrađuje odabranim softverom. Nakon što je slika spremljena i pozvana u softver za obradu, pokreće se skupina algoritama za obradu slike. Kada se govori o tehnikama obrade slike, to može biti binarizacija i segmentacija te zadaci brojanje piksela, čitanje barkoda, pronalazak objekta, prepoznavanje teksta, određivanje pojedinih dimenzija, detekcija ruba i slično.

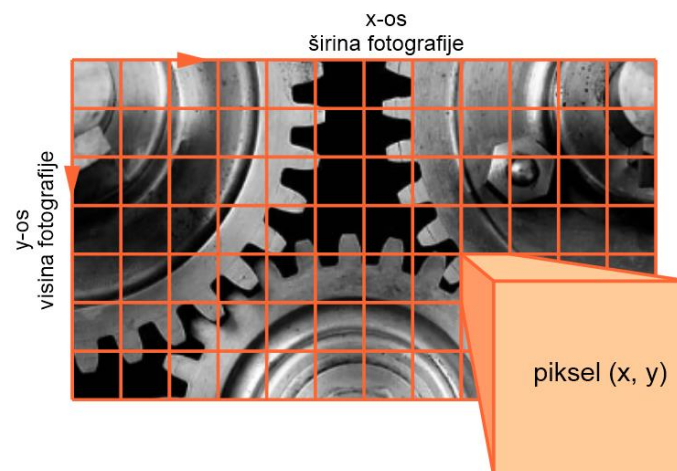
Nakon toga se kreće u postupak određivanja željenih značajki na temelju zadanih zahtjeva poput prepoznavanja objekata, dimenzijskih mjerenja, pronalazak defekata i ostalih željenih

karakteristika, a o kojima se na kraju daje pregledan izvještaj o proizvodu koji je kontroliran. Kada se radi o predmetu koji nije zadovoljio zahtjeve, treba postojati jasan signal na odbijanje takvog proizvoda te se kreće u druge postupke, poput automatskog namještanja parametara u proizvodnji ili pozivanja operatera i upozoravanja na pogrešku.

Faze obrade slike mogu se podijeliti na (Demant et al., 2013):

- snimanje slike
- definiranje zona interesa na slici
- segmentacija objekata na slici (izoliranje objekta od interesa)
- prepoznavanje i rad s određenim značajkama
- odlučivanje o značajkama.

Slika se sastoji od slikovnih elemenata - piksela. Svaki piksel ima svoju poziciju u koordinatnom sustavu fotografije. Prikazan koordinatni sustav piksela na slici 3.29 je pojednostavljen prikaz u svrhu razumijevanja teme. Digitalne slike imaju određeni broj piksela te kroz proces digitalizacije slike dolazi do gubitka određenog broja informacija zbog sažimanja stvarne slike na mogući broj piksela (Demant et al., 2013).



Slika 3.29 Određivanje pozicije piksela

Svaki piksel može poprimiti jednu boju. Iz koje palete boja će piksel moći poprimiti boju ovisi o bitnoj dubini piksela. Ukoliko piksel ima bitnu dubinu od 1 bita tada može poprimiti jednu od 2 boje, ili bijelu ili crnu. Broj boja koje piksel može poprimiti određen je izrazom (1):

$$2^{(\text{bitna dubina piksela})} \quad (1)$$

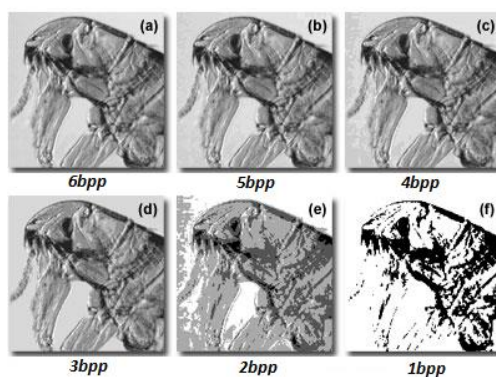
Koristeći izraz (1), u tablici 7 su prikazane karakteristike različitih vrsta fotografija ovisno o bitnoj dubini piksela za neke od mogućih slučajeva.

Tablica 7 Karakteristike vrste fotografije obzirom na bitnoj dubini

| Bitna dubina piksela (bpp) | Broj boja koje piksel može poprimiti* |
|----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 2 |
| 2 | 4 |
| 3 | 8 |
| 4 | 16 |
| 5 | 32 |
| 6 | 64 |
| 7 | 128 |
| 8 | 256 |
| 9 | 512 |
| 10 | 1024 |
| 16 | 65536 |
| 24 | 16777216 |

*Piksel poprima uvijek samo jednu od mogućih boja.

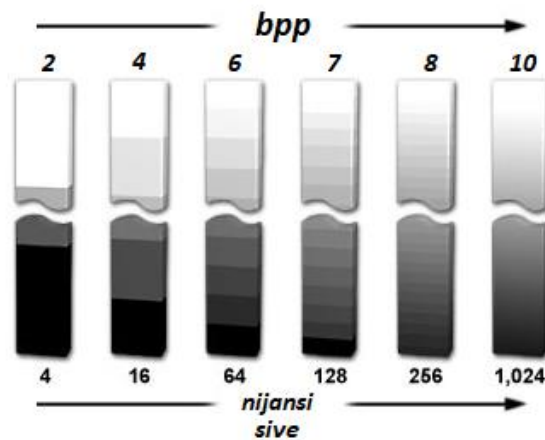
Može se zaključiti da će fotografija sadržavati to više detalja što je bitna dubina veća. Na slici 3.30 može se vidjeti primjer fotografija s različitom bitnom dubinom piksela.



Slika 3.30 Detalji fotografije (Hamamatsu Learning Center: Basic Properties of Digital Images, 2022)

Za dobivanje željenih rezultata prilikom obrade fotografije koristeći softverske alate za procesuiranje fotografija potrebno je da fotografija bude 8-bitna, što znači da svaki njezin piksel može poprimiti jednu od 256 mogućih boja. Obzirom da se za potrebe istraživanja koristi fotografija sivih tonova, svaki piksel može poprimiti jednu od 256 nijansi sive.

Na slici 3.31 može se vidjeti koji je raspon nijansi sive boje za različite vrste fotografija u ovisnosti o bitnoj dubini piksela za neke moguće slučajeve.



Slika 3.31 Nijanse sive boje (Hamamatsu Learning Center: Basic Properties of Digital Images, 2022)

Ljudsko oko primjerice može razlikovati oko 60 nijansi sive boje. Glavna funkcija ljudskih očiju je izvlačenje strukturnih informacija iz vidnog polja, a ljudski vidni sustav je u tu svrhu odlično prilagođen (Wang et al., 2002).

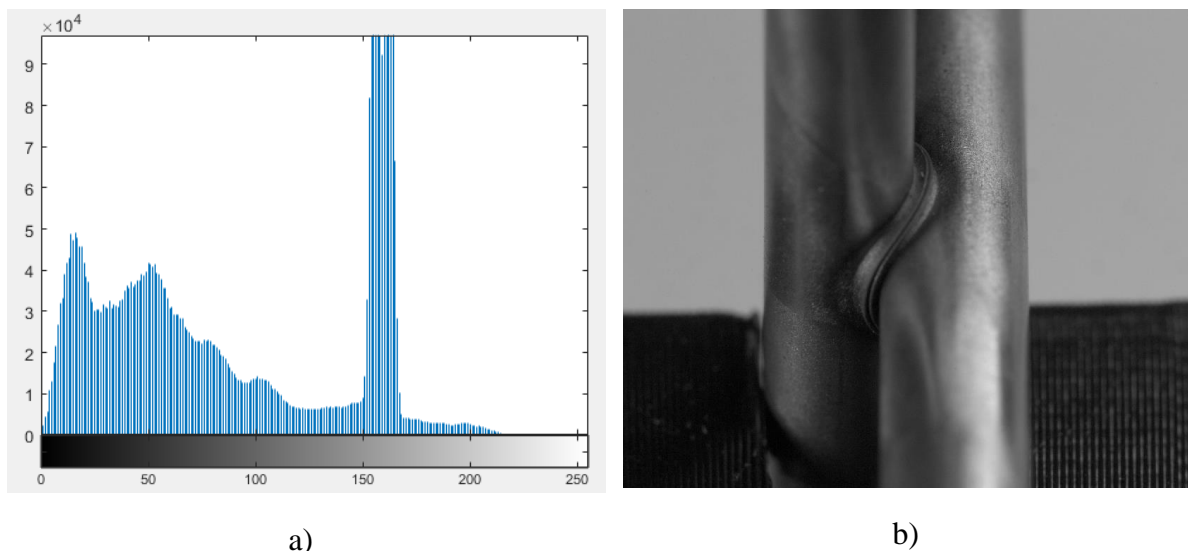
Pretvaranje piksela u skalu sive boje prikazano je izrazom (2).

$$o_{ij} = f(i_{ij}) \quad (2)$$

O_{ij} predstavlja intenzitet sive boje na određenom pikselu na dobivenoj slici kao izlaznom podatku s koordinatama $x=i$, $y=j$, a i_{ij} razinu sive boje na originalnoj slici kao ulaznom podatku. Izraz (2) pokazuje da je ista transformacija funkcije korištena za pretvorbu sive skale za svaki piksel na izlaznoj slici, odnosno da funkcija pretvorbe sive skale ne ovisi o poziciji.

Zastupljenost pojedine nijanse sive boje na slici može biti prikazana histogramom prikazanim na slici 3.32 - a, koji je dobiven iz slike 3.32 - b.

Podaci koje sadrži slika mogu biti spremljeni u više formata, poput *.tiff*, *.bmp*, *.gif*, *.png*, *.jpeg*. Veličina slike ovisit će o broju piksela na slici. Veličina piksela također je bitna (T. Chen et al., 2000).



Slika 3.32 Histogram (a) dobiven od prikazane slike (b)

3.5.2.2. Određivanje ruba predmeta

Rub predmeta određuje se na području gdje je najveća razlika u kontrastu između dva piksela, a preciznija je na subpikselnoj razini (Lee et al., 2018). Obzirom da se za potrebe istraživanja koriste slike u nijansi sive boje, rubovi predmeta se mogu definirati kao nagli prijelazi u skali sive boje. Određivanjem ruba predmeta na slici bave se mnogi autori i koriste različite algoritme (Ziou i Tabbone, 1998), (Maini i Aggarwal, 2009), (Shrivakshan, 2012).

Točnu lokaciju ruba predmeta na slici nije jednostavno odrediti iz razloga što se lokacija ruba predmeta najčešće neće poklapati s rubom pojedinog piksela, odnosno s granicom između dva senzorska elementa (slika 3.33). O pikselu koji je određen kao rub predmeta, ovisit će krajnji rezultat mjere tog predmeta.

Dodatnu poteškoću pri točnom određivanju ruba objekta na slici može stvoriti osvjetljenje. Naime osvjetljenje mora biti takvo da stvarni rub objekta ne naruši pojava sjene. Fizička oštrina ruba objekta također utječe na točnost prikaza ruba na slici. U strojarstvu se često koristi skošenje rubova koje stvara dodatne poteškoće kod određivanja granice ruba predmeta na slici.

Rub će se teže odrediti ukoliko slika nije dobro fokusirana. Što je bolji fokus slike, rub će izgledati oštrije te će ga time biti lakše i odrediti. Pogreške fokusa dovode do zamagljene slike, a tada se pojavljuju pogreške u poziciji točaka na slici što dovodi do pogreške u mjerenju (Beyerer et al., 2016).



Slika 3.33 Rub predmeta u skali sive boje

Najbolji fokus može biti postignut samo na određenoj udaljenosti kamere od predmeta. Ovisnost udaljenosti objekta i fokalne ravnine prikazuju autori Pertuz et al. (2013) koji se bave dobivanjem modela iz fokusa i slike.

Udaljenost v od ravnine fokusa ovisi o žarišnoj duljini objektiva f i udaljenosti od objekta u . Veza između ove tri varijable dana je Gausovim zakonom:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (3)$$

Pošto je ovisnost udaljenosti objekta i žarišne duljine 1 prema l , maksimalni fokus će biti postignut na točno određenoj udaljenosti.

Slike koje se dobivaju kamerom su u određenoj mjeri nerealne uslijed distorzije koja nastaje zbog širokog kuta leće i male udaljenosti od objekta. Distorzija uključuje linearnu ili nelinearnu optičku distorziju uzrokovanu lećom i utjecat će na uspješnost testiranja i mjerenja. Distorzija može uzrokovati da se ravne linije objekta na slici prikažu kao zakrivljene.

Cilj je postići mogućnost slikanja različitih predmeta promjenom pozicije kamere. Pri ponovnoj instalaciji kamere može doći do 4 tipa instalacijskih grešaka, nagib kamere, translacija, rotacija i pogreška udaljenosti koje uzrokuju promjene u obliku, lokaciji, smjeru i veličini slike, rezultata i netočnih mjerenja i testiranja. Promjena u obliku predmeta na slici se događa zbog nagiba kamere i naziva se perspektivna distorzija (Y. Huang et al., 2009).

Kada se predmet snimi optimalno, središte perspektive i središte objekta ležat će na istoj liniji. Međutim, poremećaji u procesu snimanja dovode do kolinearnosti koja se očituje kao odstupanje od točke na slici i od točke na žarišnoj ravnini. Ove nepravilnosti su matematičke prirode (Gruen i S.Huang, 2001).

Prema Demant et al. (2013) prilikom snimanja pravokutne mreže paralelne linije postat će zakrivljene zbog pojave distorzije. Takva pojava raste s udaljenošću od optičke ravnine, a kreće se između 0,2 % i 1 %.

3.5.2.3. Odabir i evaluacija odabranog softvera

Softver koji je odabran za obradu slika dobivenih RMS-om je *National Instruments Vision Builder for Automated Inspection (NI Vision)*. Softver je namijenjen za jednostavnu primjenu i razvijanje strojnog vida te ga je moguće spojiti s LabVIEW softverom za automatsku kontrolu i upravljanje proizvodom (Cheng et al., 2022). Softver osim obrade slika služi i za mjerenje potrebne dimenzije. Odabrani softver predstavlja gotovo industrijsko rješenje za obradu slike, mjerenje dimenzija i provedbu kontrole kvalitete proizvoda. Prednost odabranog softvera je jednostavnost korištenja te razne mogućnosti prikaza i spremanja rezultata. Nedostatak korištenja ovog i sličnih softvera je njegova zatvorena struktura.

Obzirom na probleme određivanja ruba predmeta, potrebno je osmisлити način provjere dobivanja dimenzije odabranim softverom. U svrhu evaluacije odabranog softvera osmišljen je način provjere softverom otvorenog tipa. Odabran je softver Matlab u kojem je osmišljen i napisan program potpuno prilagođen postavljenom problemu u ovom radu. Osmišljen je način provjere dobivanja dimenzije predmeta koji je potpuno neovisan o gotovim industrijskim rješenjima u dostupnim softverima na tržištu.

Potrebno je pronaći vrijednosti točaka, odnosno dimenzije i položaj objekta koji se nalazi na slici. Kako bi se moglo provjeriti da algoritam koji je korišten daje dobar rezultat, tzv. slika je kreirana u Matlabu te su tako poznate točne vrijednosti položaja i dimenzija objekta.

Slika 3.34-a prikazuje predmet bijele boje koji je pravokutnog oblika slikan na crnoj podlozi bez zamagljenog ruba (predstavlja idealni predmet), a slika 3.34 – b predstavlja realan predmet u kojem nije jasan prijelaz iz bijele u crnu, nego je rub zamagljen.



Slika 3.34 Umjetno stvorena slika koja predstavlja: a) idealni predmet slikan na crnoj podlozi i b) realniji prikaz predmeta na crnoj podlozi

Proces u kojem se mora odlučiti hoće li određena siva nijansa postati crna (boja podloge) ili bijela (boja predmeta) boja je ključan jer se tada odlučuje koji točno piksel definira rub predmeta. Simulirajući realne uvjete u Matlab programu korišten je tzv. Gaussov filter (varijabla s u napisanom kodu programiranja) za zamaglivanje rubova (*2-D Gaussian Filtering of Images - MATLAB Imgaussfilt*, 2019). Slika obrađena ovim filterom imitira sliku koja bi nastala da je snimljena kamerom te koja ovisi o osvjetljenju, veličini treće dimenzije predmeta (udaljenost kamera- predmet- podloga) i rezoluciji kamere.

Prvi korak u procesu obrade slike je pretvorba iz *RGB* formata u *Gray*, odnosno pretvorba u crne i bijele piksele, format u kojem je matrica slike sastavljena od vrijednosti 0 i 1.

Problem je postavljen na način da se uspoređuju dvije slike, odnosno dvije matrice. A je matrica slike koja je snimljena, dok je B matrica piksela slike koja se generira kroz kod. Matrice se sastoje od brojeva u rasponu 0-255, a rub predmeta se nalazi na području koje nije 0 ili 255. Vrijednosti koje se nalaze u matricama su dobivene računski, rub predmeta predstavljaju pozicije matrice na kojima vrijednost nije 0 ili 255, i one su dobivene korištenjem Gaus filtera (varijabla s). Varijable a , b , c i d predstavljaju poziciju i dimenziju traženog predmeta u pikselima i dobivaju se procesom optimizacije.

Pri tome je korišten programski paket Matlab koji u sebi ima integrirani optimizacijski paket unutar kojega je i korišten optimizacijski alat genetski algoritam (GA). GA se definira kao evolucijski algoritam jer oponaša prirodne procese evolucije (*Find Minimum of Function Using Genetic Algorithm - MATLAB Ga*, 2019). Rješenja se kod genetskih algoritama mogu prikazati pomoću binarnih, cjelobrojnih ili realnih brojeva, a koji će se prikaz koristiti ovisi o postavljenom problemu za rješavanje (Jurica Kuzmić, 2017).

Potrebno je napraviti funkciju f koja računa odstupanje matrice A i matrice B i pri tome traži optimalna rješenja traženih varijabli takvo da odstupanje bude minimalno.

Kod traženja rješenja koristi se sljedeća sintaksa:

$$[x, fval] = ga(_)$$

$$a = x(1);$$

$$b = x(2);$$

$$c = x(3);$$

$$d = x(4);$$

$$s = x(5);$$

Rješenje ovako postavljenog problema dobiveno je u obliku:

$$x = 87,00 \quad 71,00 \quad 140,00 \quad 90,00 \quad 2,99$$

$$fval = 12,72$$

GA je funkcija unutar Matlaba za koju je potrebno definirati funkciju cilja, broj varijabli, granice i neke dodatne opcije ovisno o potrebi samog problema koji se želi riješiti. Granice su u ovom problemu postavljene tako da predstavljaju okvir slike, odnosno da sam predmet ne može biti izvan dimenzija slike.

Funkcija cilja definirana je kao:

$$\text{function diff} = f_cilja(x) \tag{4}$$

$$\text{diff} = \text{norm}(A-B, 2); \tag{5}$$

Cilj je pronaći najmanju vrijednost razlike između matrica prema normi L-2 (Weisstein, 2019), (MathWorks Help Center, 2019). Drugim riječima potrebno je naći takve parametre a , b , c , d i s , da kada se dvije slike A i B preklope, pogreška bude minimalna. Ta pogreška (*fvalue - fitness value*) dobiva se kada se uspoređuju slike na način da se svaki piksel slike A uspoređi sa svakim pikselom slike B te se izračuna razlika njihovih vrijednosti. Pogreška treba konvergirati u nulu jer se traži da ona bude minimalna. Ukoliko se ne koristi GA ili neka druga metoda optimizacijskog pretraživanja, nego se pretražuju svi pikseli i sve kombinacije s klasičnim *for*

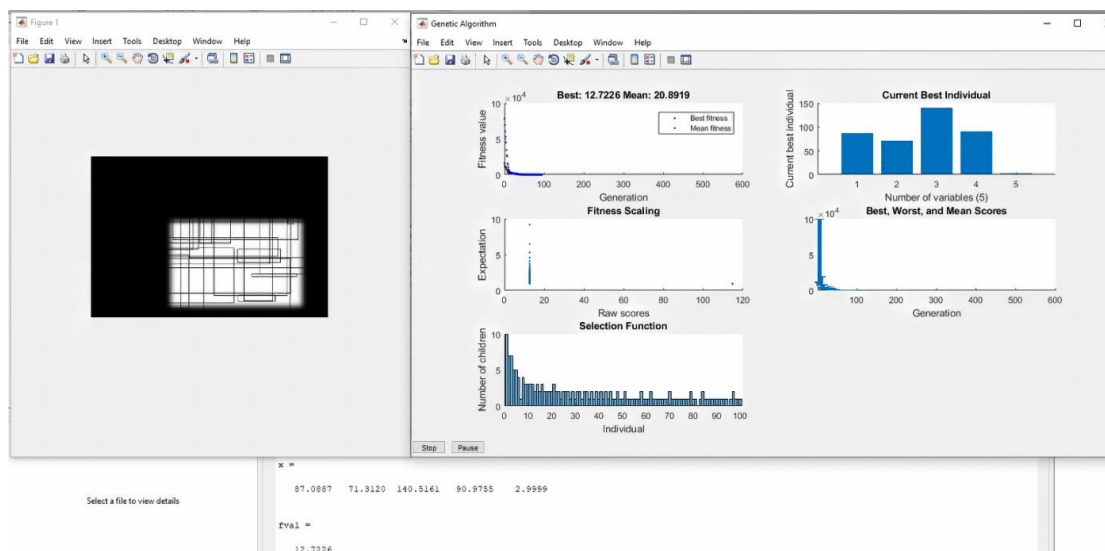
petljama, (uz uvjet da je slika umjetno generirana) moguće je dobiti da ta pogreška zaista i bude 0, što znatno produljuje vrijeme obrade slike.

Rješenje je moguće prikazati grafički i numerički, primjer jednog takvog prikaza u Matlabu je na slici 3.35. U posebnoj slici (s lijeve strane) dobiva se izgled generirane slike iz matrice B . S desne strane prikazani su neki od dijagrama koji se mogu dobiti u realnom vremenu. Jedan od dijagrama (gornji desni) je dijagram kojemu je na x osi broj iteracije ili generacije, a na y osi vrijednost funkcije cilja koja se dobije evaluacijom najbolje jedinice u toj iteraciji. Vidljivo je da vrijednost ciljane vrijednosti konvergira te se nakon nekog vremena zaustavlja proces (kada se vrijednost više značajno ne mijenja ili kada se odredi točan broj generacija koje će se generirati). Odnosno, pogreška se sa svakom novom iteracijom (generacijom) smanjuje, konvergira prema 0 te je prikazana najbolja vrijednost svake varijable. Ove vrijednosti se u svakoj iteraciji mijenjaju u realnom vremenu, a nakon završetka iteracija, ostaje prikazan samo najbolji rezultat. Najbolji rezultat u ovom primjeru je kada je izračunata pogreška iznosi 12,72 što je u odnosu na druge vrijednosti pogreški vrlo blizu 0.

Tijekom istraživanja i rješavanja problema napravljeno je više kombinacija slika, više kombinacija postavki GA, različite vrijednosti Gauss filtera i veličina dimenzija slike, dimenzija samog predmeta i pozicije, te je u nastavku dan prikaz za one u kojima su odabrane najbolje postavke s najboljim rješenjima. Pri postavkama GA da je veličina populacije 100, a maksimalni broj generacija 600, uz prethodno opisana ograničenja te za zadanu funkciju cilja dobivaju rješenja kako je prikazano u tablici 8.

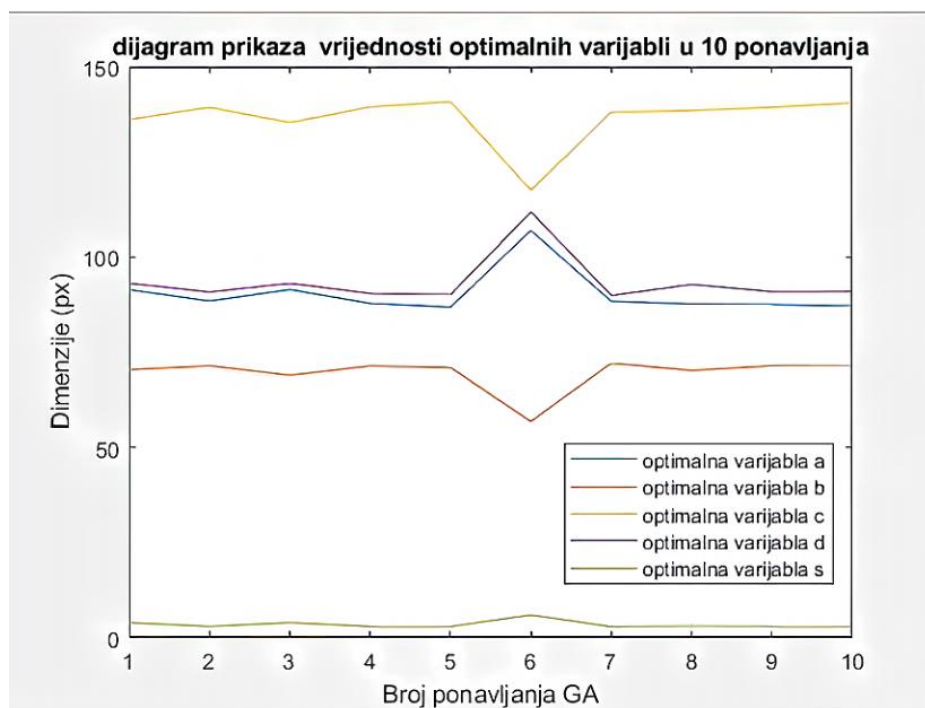
Tablica 8 Rješenje dobiveno GA u usporedbi s točnim unaprijed poznatim rješenjem

| Varijable | Vrijednosti dobivene GA u Matlabu u px | Vrijednosti koje su poznate u px |
|-----------|--|----------------------------------|
| <i>a</i> | 87 | 87 |
| <i>b</i> | 71 | 71 |
| <i>c</i> | 140 | 140 |
| <i>d</i> | 90 | 90 |
| <i>s</i> | 3 | 3 |



Slika 3.35 Prikaz jednog rješenja s grafičkim prikazom u Matlabu

Grafički prikaz pojedinih vrijednosti varijabli dobivenih u 10 ponavljanja dan je na slici 3.36. Prikazana analiza pokazuje da programirani kod daje dobre rezultate te da je ovim načinom moguće evaluirati odabrani softver. Također je ovim načinom moguće, uz malu prilagodbu napisanog koda, provoditi sva mjerenja u sklopu projektiranog RMS-a. Nedostatak korištenja Matlab-a za potrebna mjerenja je veći vremenski interval dobivanja rješenja od gotovog industrijskog rješenja.



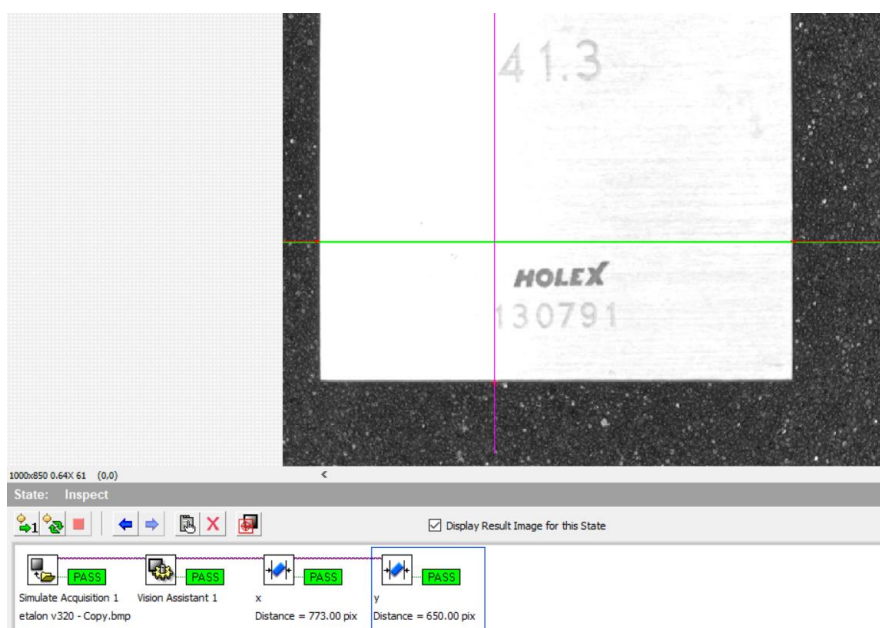
Slika 3.36 Vrijednosti pojedinih rješenja kroz 10 ponavljanja

U cilju evaluiranja odabranog softvera NI Vision, odabrano je 4 predmeta poznatih dimenzija (A, B, C i D). Svaki predmet je jednom slikan. Dobivene slike su obrađene u dva odabrana softvera (Matlab s prilagođenim kodom i NI Vision). U oba softvera pokrenut je postupak određivanja dimenzije u x i y smjeru te su dimenzije prikazane u pikselima. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 9.

Tablica 9 Usporedba rezultata u dva softvera

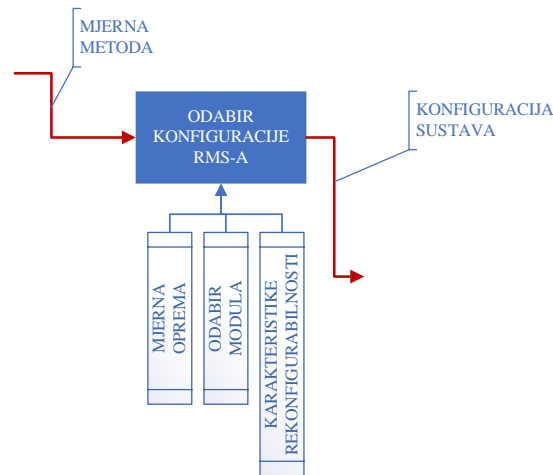
| Predmet | NI Vision | | Matlab | | Razlika, % | |
|----------|-----------|------|--------|------|------------|------|
| | x | y | x | y | x | y |
| A | 381 | 1438 | 381 | 1452 | 0,00 | 0,96 |
| B | 476 | 1446 | 475 | 1453 | 0,20 | 0,50 |
| C | 961 | 1686 | 959 | 1685 | 0,20 | 0,06 |
| D | 650 | 773 | 649 | 770 | 0,15 | 0,39 |

Danom usporedbom, zaključeno je kako je postupak dobivanja dimenzije u softveru NI Vision zadovoljavajući, a ujedno brži i praktičniji. Postignuti rezultati određivanja dimenzije predmeta i ruba predmeta su jednaki kao i u Matlabu, odnosno razlika između dobivenih rezultata je manja od 1 %. Rezultat mjerenja jednog predmeta dobiven NI Vision softverom prikazan je na slici 3.37. U donjem lijevom kutu vidljivi su rezultati u pikselima te su isti prikazani u zadnjem redu tablice 9.



Slika 3.37 Primjer prikaza rezultata u odabranom softveru NI Vision

Provedenom analizom u ovom poglavlju može se zaključiti da je *odabir konfiguracije sustava* korak koji za ulazne parametre ima *odabranu mjernu metodu, mjernu opremu, detaljan odabir modula* uz zadovoljavanje *karakteristika rekonfigurabilnosti* (slika 3.38). Izlazni podatak ovog koraka je definirana konfiguracija od koje će se sastojati RMS, a kojega je potrebno složiti u cjelinu (izvedba sustava).



Slika 3.38 Odabir konfiguracije RMS-a

3.6. Izvedba sustava i provedba mjerenja

Pri *izvedbi sustava* potrebno je ovisno o određenoj grupi proizvoda postaviti sve komponente odabrane konfiguracije RMS-a prema postavljenim zahtjevima za mjerenje određene grupe.

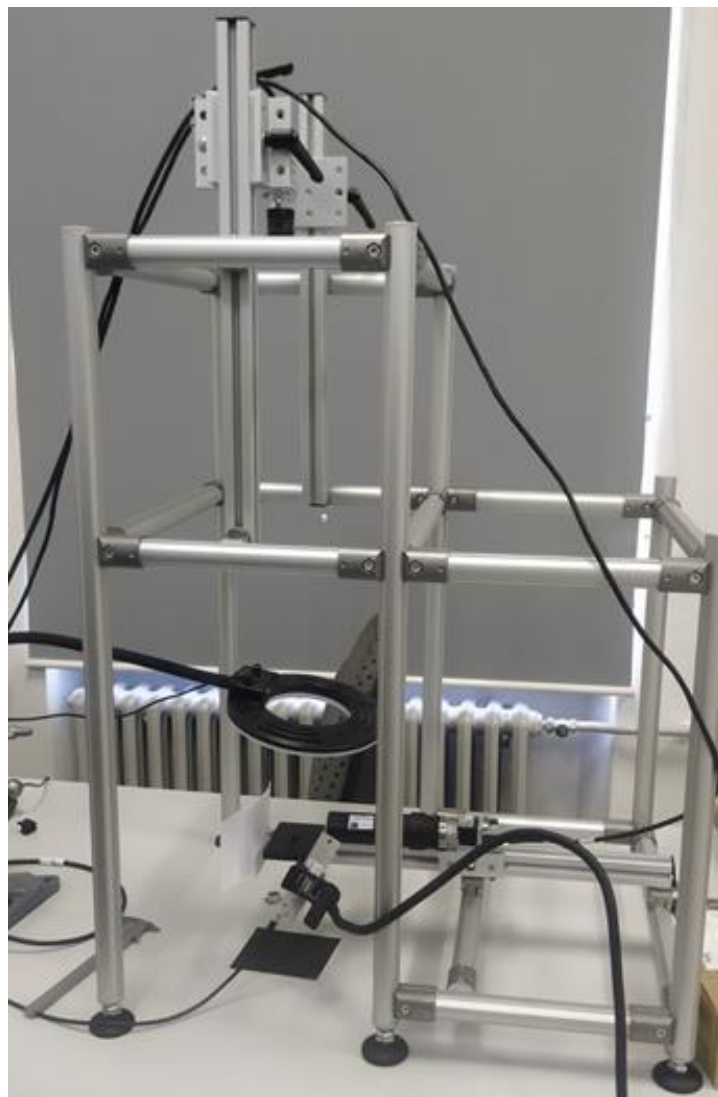
Isti je ujedno i izveden te postavljen na stol u Laboratoriju za tehnička mjerenja (slika 3.39) gdje su se i provodila mjerenja prikazana u ovom radu.

Prije postavljanja predmeta za kontrolu na predviđeno mjesto, potrebno je dobro postaviti opremu, a ovisno o uvjetima koji se moraju zadovoljiti za slikanje predmeta za analizu. Slike moraju biti što bolje kvalitete kako bi se dobile sve potrebne informacije iz postavljenih zahtjeva. Pri tome rezolucija kamere mora biti zadovoljavajuća. Potrebno je prilagoditi opremu i njenu poziciju ovisno o dimenzijskim zahtjevima predmeta koji se kontrolira. To podrazumijeva veličinu senzora/kamere, količinu osvjetljenja, računalo i softver koji se za to može koristiti.

Postavljanje komponenti:

- Osigurati ravnost podloge.

- Osigurati da boja podloge bude u kontrastu s predmetom kada se snima.
- Osigurati okomitost kamere prema površini predmeta koja se snima.
- Osigurati zadovoljavajuće osvjetljenje, to podrazumijeva: izbjeći stvaranje sjene predmeta na podlozi, izbjeći utjecaj refleksije, dovoljno osvijetliti predmet kako bi se vidjele potrebne karakteristike koje treba kontrolirati, osigurati dovoljan kontrast između podloge na kojoj se nalazi predmet i ruba predmeta prilikom osvjetljavanja.
- Ukoliko se slika predmet pod kutom, osigurati da softver koji se koristi može kompenzirati pogrešku koja se pri tome javlja.
- Osigurati pravilno umjeravanje sustava prije početka mjerenja.



Slika 3.39 Izvedeni RMS postavljen na radnom stolu u laboratoriju

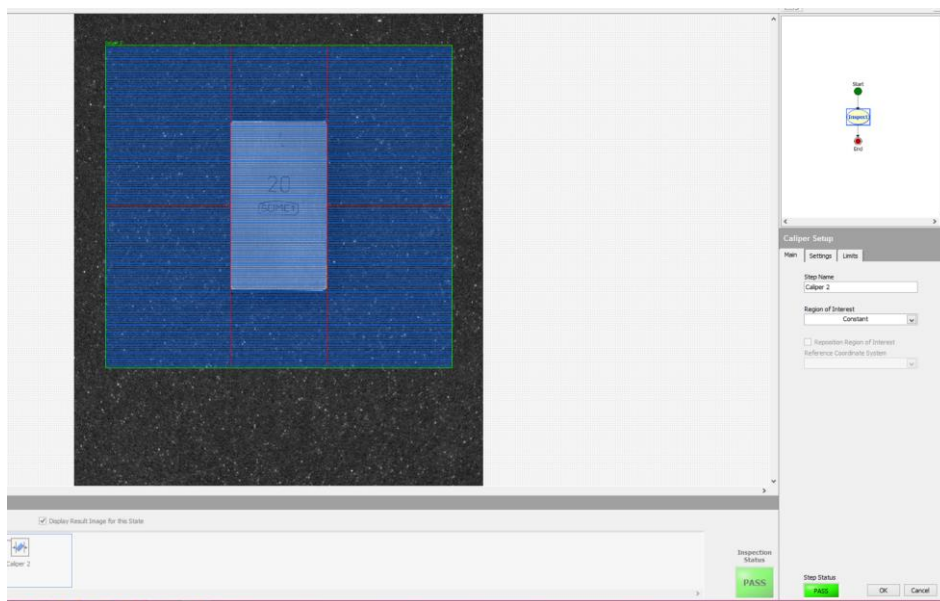
Kako bi se pravilno prenijela dimenzija sa slike u realne dimenzije, potrebno je na pravilan način pretvoriti broj piksela sa slike u zahtijevanu mjernu jedinicu (primjerice milimetar).

Prvi korak prilikom umjeravanja je slikati referentni predmet - etalon pod istim uvjetima i s istom opremom, na mjestu daljnje provedbe mjerenja. Zatim je potrebno provjeriti da li je slika zadovoljavajuće kvalitete (bistra, svi detalji se jasno vide), ako nije, potrebno je provjeriti ponovno postavljanje svih komponenti kako bi se osigurali bolji uvjeti. Provjeriti osvjetljenje, kameru, objektiv, računalo i sam softver. Ukoliko i dalje slika nije zadovoljavajuće kvalitete, provjeriti kakve mogućnosti pruža softver za obradu slike i koriste li se tehnike za poboljšanje slike (*NI Vision for LabVIEW User Manual, 2005*).

Najčešće pogreške koje se pojavljuju su uzrokovane nepravilnim postavljanjem predmeta mjerenja, uzrok mogu biti podloga, predmet, postolje kamere ili sama pozicija kamere. Mogu nastati nelinearna izobličenja zbog aberacija u objektivu kamere (*NI Vision for LabVIEW User Manual, 2005*).

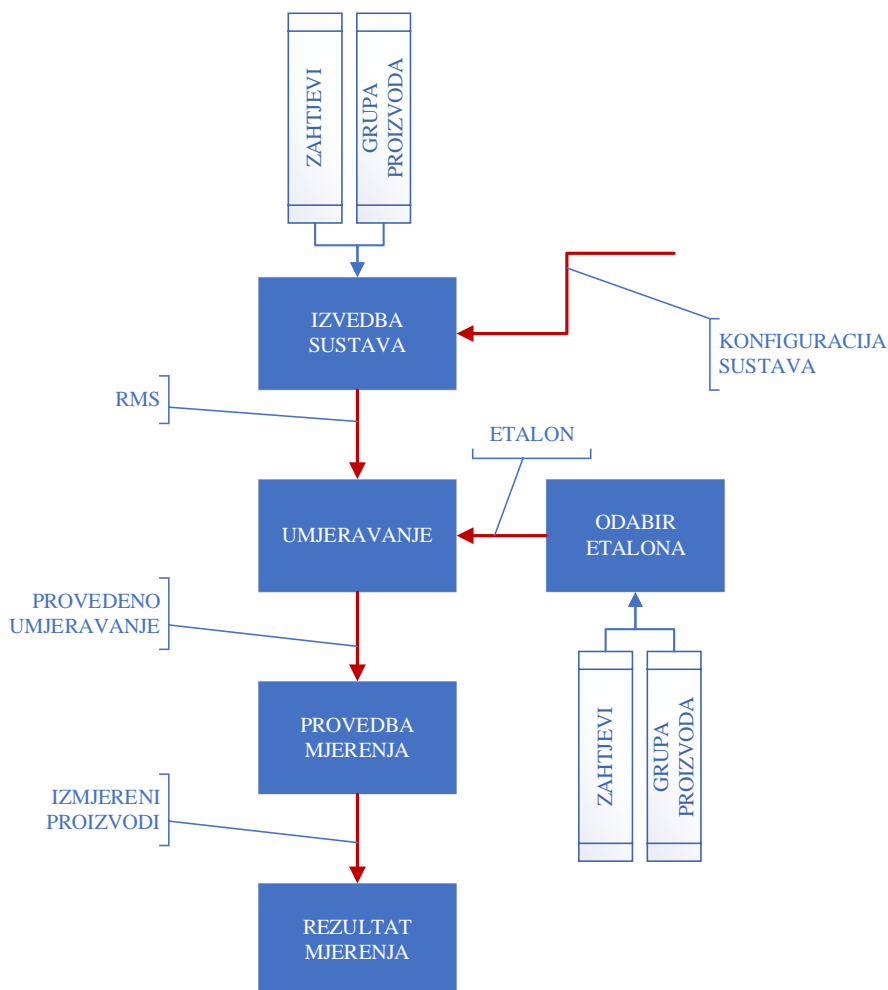
Prilikom podešavanja programa potrebno je pratiti upute ovisno o programu koji se koristi. U u odabranom softveru NI Vision korišteni su već predefimirani alati za mjerenje koje je potrebno programirati prema postavljenim zahtjevima mjerenja. Prije svega potrebno je odrediti područje interesa (dio slike ili cijela slika) u kojem je potrebno odrediti dimenziju ili neku značajku predmeta (slika 3.40).

Tijekom programiranja softvera potrebno je unijeti sve postavljene zahtjeve poput potrebne tolerancije unutar koje se proizvod smatra zadovoljavajućim ili ne, prikaz podataka na zaslonu te način spremanja rezultata mjerenja i slično.



Slika 3.40 Postavke mjerenja dimenzije u odabranom softveru

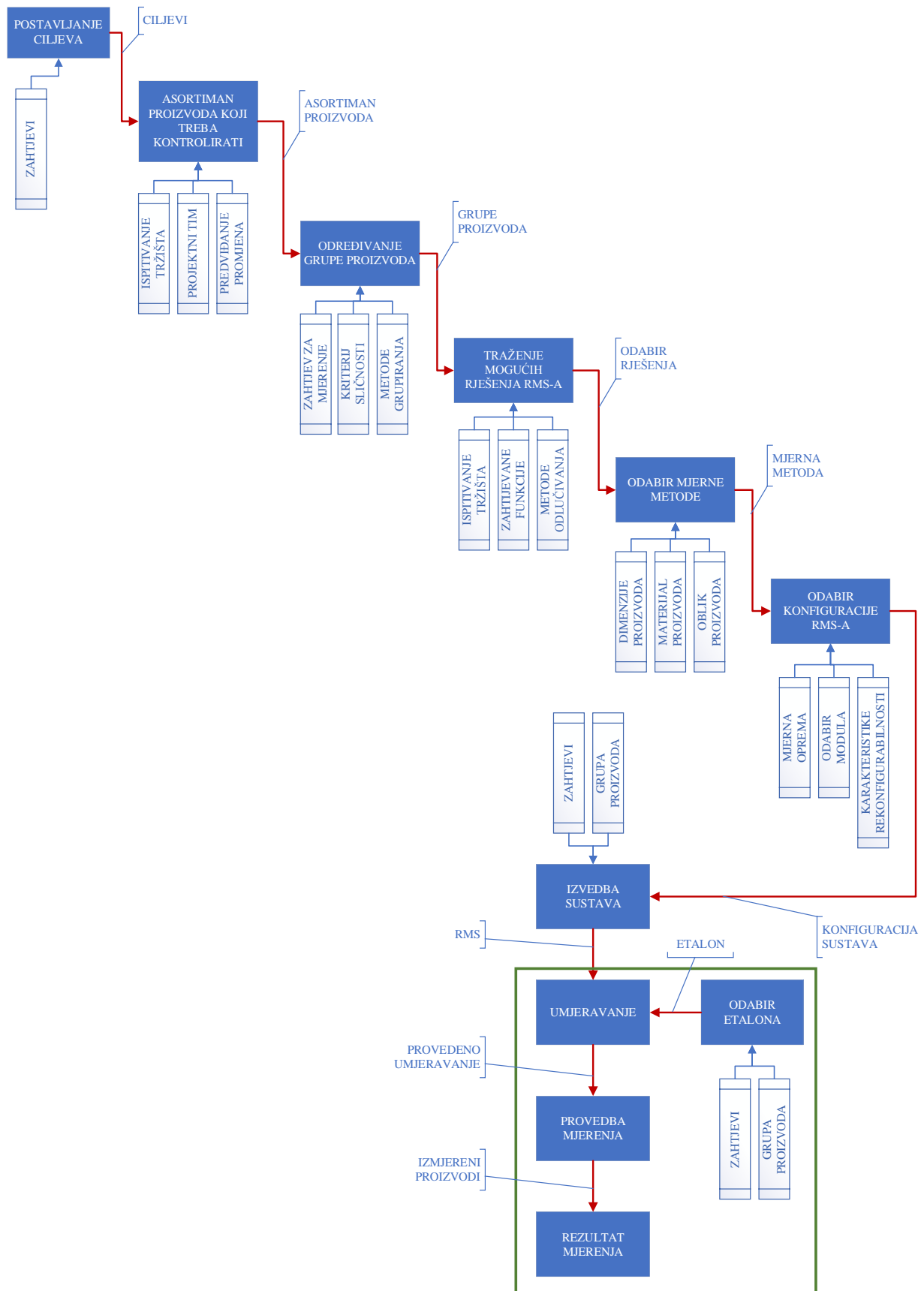
Izvedba sustava (slika 3.41) sa svim pripadajućim komponentama iz prethodno odabrane konfiguracije RMS-a ovisi o grupi predmeta koja u određenom trenutku dolazi na kontrolu i postavljenim zahtjevima sustava. Nakon izvedbe sustava moguće je provoditi mjerenja. Za provedbu mjerenja sustav je potrebno umjeriti te će ova tema metodološki obraditi u poglavlju 4.



Slika 3.41 Izvedba sustava i provedba mjerenja

3.7. Predložena metodologija projektiranja RMS-a

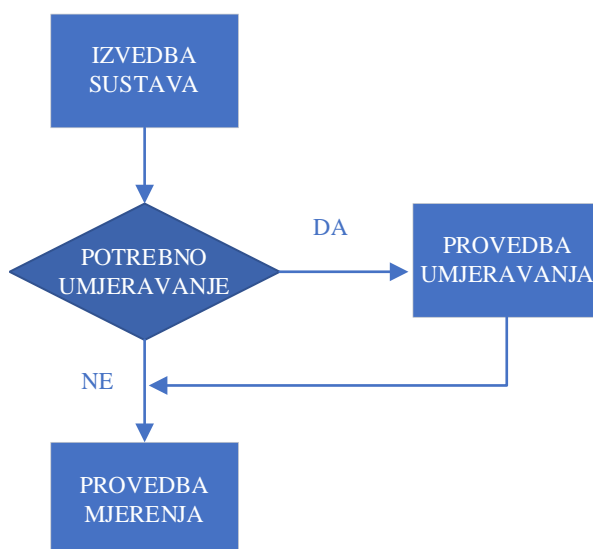
Temeljem provedene analize osnovnih koraka predložene metodologije, u ovom poglavlju prikazan je cjeloviti dijagram metodologije projektiranja rekonfigurabilnog mjernog sustava, sa svim uključenim elementima (slika 3.42). Zeleno obilježen dio biti će detaljnije metodološki objašnjen u idućem poglavlju.



Slika 3.42 Dijagram toka metodologije projektiranja RMS-a

4. METODOLOGIJA UMJERAVANJA REKONFIGURABILNOGA MJERNOG SUSTAVA

U ovom poglavlju analizirana je metodologija umjeravanja rekonfigurabilnoga mjernog sustava uz prikaz na primjeru. Osnovni koraci (slika 4.1) dijagrama toka predložene metodologije započinju *izvedbom sustava* na kojem će provoditi mjerenje, a završni korak je *provedba mjerenja* uz dobivene rezultate mjerenja. Ukoliko je *potrebno umjeravanje* sustava, potrebno ga je provesti prije *provedbe mjerenja*. U nastavku poglavlja opisati će se detaljnije korak *provedbe umjeravanja* uz prikaz na primjeru.



Slika 4.1 Tok postupka mjerenja i umjeravanja RMS-a

Prvi korak u postizanju točne dimenzije dobivene vizijskim sustavom je postupak umjeravanja sustava. Umjeravanje je definirano kao „skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima“, a etalon je “ostvarenje definicije dane veličine s iskazanom vrijednošću veličine i mjerne nesigurnosti“ (Runje, 2014).

Kod RMS-a se postavlja pitanje njegovog umjeravanja te same točnosti sustava. Umjeravanje može biti složeno na način da ne usporava rad sustava, dakle trebalo bi biti potpuno olakšano i

pojednostavljeno. Teži se da brzina umjeravanja bude u vremenskom ograničenju koje je prihvatljivo te da postignuta točnost mjerenja bude u prihvatljivim granicama. Za umjeravanje sustava potrebno je predložiti tok postupka umjeravanja, a time i određivanje grupe proizvoda na kojoj se provodi mjerenje, a za koju je umjeravanje namijenjeno. Sustav je potrebno umjeriti na način da brzo i pouzdano mjeri zahtijevane značajke u grupi proizvoda. Za potrebe umjeravanja potrebno je odrediti etalon kojim će se sustav umjeriti te etalon kojim će se provjeriti točnost sustava, a sve kako bi se sustav mogao implementirati u industrijsko okruženje. Ukoliko etalon nije dostupan potrebno ga je prema definiranim zahtjevima izraditi te umjeriti.

4.1. Dostupnost etalona i dosadašnja istraživanja mjerenja i umjeravanja vizijskih sustava

Pojedini autori bavili su se istraživanjima vezanima za umjeravanje vizijskih sustava u kontroli kvalitete. Primjerice autori Aggarwal et al. (1993) su zaključili da je vizijski sustav koristan u dobivanju informacija koje se koriste u industrijskoj kontroli kvalitete. Prepoznali su primjenu strojnog vida zbog brzine, točnosti, pouzdanosti i robusnosti mjerenja te mogućnosti da rade u uvjetima u kojima čovjek ne može. Napravili su sustav vizijske kontrole koji pomaže pri umjeravanju moment ključa.

Primjena strojnog vida uključuje zadatke poput provjere, mjerenja, prepoznavanja i pozicioniranja proizvoda, a raznovrsnost njegove primjene pokazali su i autori Vinet i Zhedanov (2011).

Kod pitanja točnosti kamere i njenog umjeravanja još su 1987. godine autori (R. Y. Tsai, 1987) došli do zaključka da je pogreška kamere i objektiva koje su oni koristili $\pm 0,3$ piksela, a bavili su se umjeravanjem 3D vizijskog sustava.

Hemming i Lehto (2002) su radili sustav za umjeravanje komparatora vizijskim sustavom jer je cijena umjeravanja mikrometarskog mjerila, komparatora ili pomičnog mjerila približno jednaka onoj za novi instrument i pri tome su koristili crveno LED kružno osvjetljenje te su prilagodbom na određenu visinu postigli minimalnu sjenu i odsjaj. Koristili su CCD optički senzor s rezolucijom 752 px x 582 px i 50 mm Rainbow G50 objektiv.

Y. Huang et al. (2009) su iskoristili vizijski sustav za kontrolu instrumentne ploče u automobilima, pri čemu se vizijski sustav osposobio za prepoznavanje teksta i simbola.

Zuperl et al. (2016) su predstavili prototip za vizualno mjerenje debljine sloja u višeslojnim metalnim materijalima, a debljina sloja određuje se softverom na temelju metalografskih slika u nekoliko sekundi.

Pri upotrebi vizijskih sustava rijetko se spominje određivanje njihove mjerne nesigurnosti. Na mjernu nesigurnost utječu brojni parametri jer se radi o vrlo složenom mjernom sustavu. Između ostalog na mjernu nesigurnost utječe određivanje ruba predmeta, osvjetljenje, sam operater, objekt mjerenja, kamera kojom se mjeri i njena oprema pa je ovaj proces vrlo zahtjevan. Jedna od primjera izračuna mjerne nesigurnosti vizijskog sustava dao je Hemming (2007) koji je umjeravao mikrometarsko mjerilo uz pomoć kamere. Mjernom nesigurnošću u strojnom vidu bave se autori Brandner i Thurner (2005).

Za umjeravanje telecentrične leće autori D. Li i Tian (2013) koriste keramičku ploču s ucrtanim kružnim uzorcima. Za sada je poznat samo jedan softver koji nudi umjeravanje telecentrične leće uz smanjenje distorzije do 14 puta (*Opto-E*, 2021).

Mjerenje je postupak vrednovanja značajki onoga što se mjeri iskazujući rezultat broječanom vrijednošću ili opisom. Definicija mjerenja prema (JCGM 200:2012, 2012): „Mjerenje je proces eksperimentalnoga dobivanja jedne ili više vrijednosti veličine koje se mogu razumno pripisati veličini“. Iz pogleda metrologije svako mjerenje mora biti sljedivo do osnovne mjerne (SI) jedinice i imati svoju mjernu nesigurnost (Hemming, 2007). Kako se u ovom radu govori o dimenzijskim mjerenjima važno je napomenutu važeću definiciju metra koja je osnovna SI jedinica za dimenziju. Kroz povijest definicija metra se mijenjala od 1795. sve do zadnje izmjene iz 1983. godine kada je metar određen na „Općoj konferenciji za utege i mjere“, a sve zbog pojave lasera i metoda za određivanje njihove frekvencije. Današnja definicija metra glasi: „jedan metar jednak je duljini puta koji u vakuumu prijeđe svjetlost za vrijeme od $1/299\,792\,458$ sekunde“. Potrebno je postići sljedivost do definicije metra određivanjem mjerne nesigurnosti. Sljedivost je definirana kao: „svojstvo mjernog rezultata kojim se rezultat dovodi u vezu s navedenim referencijskim etalonima (državnim ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja od kojih svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti“ i time se osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini.

Prema literaturi (*Umjeravanje / Hrvatska Enciklopedija, 2021*) drugi naziv za umjeravanje je kalibriranje i baždarenje. Umjeravanjem se u literaturi koja se bavi strojnim vidom označava postupak određivanja odnosa metra i piksela, odnosno faktor pretvorbe mjerne jedinice između snimljene fotografije i stvarnih koordinata snimljenog predmeta. Pojam umjeravati označava određivanje odnosa između vrijednosti predstavljene mjerom ili pokazane mjerilom i pripadne poznate vrijednosti mjerene fizikalne veličine. Kako bi mjerna oprema bila pouzdana potrebno ju je u pravilnim intervalima ili kada se uoči potreba (uslijed neke promjene) umjeriti. Kako bi umjeravanje bilo što jednostavnije i brže potrebno je koristiti etalon odgovarajućih karakteristika. Definicija mjernog etalona je „stvarna mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti neke veličine kako bi mogao poslužiti kao referenca“ (Runje, 2014).

Neki od postojećih sustava za umjeravanje vizijskih sustava su (Demant et al., 2013):

- stakleni objekti s urezanim oznakama
- metalni izradci, obrađeni sa specificiranim dimenzijama
- metalni limovi s precizno izbušenim provrtima.

Poželjno je da se umjeravanje sustava provodi u istim uvjetima u kojima će biti provedena i daljnja mjerenja, a to podrazumijeva iste postavke kamere, isto osvjetljenje i istu opremu i iste uvjete u okolini. Poznato je da temperatura okoline, opreme te samog mjernog predmeta ima utjecaj na postignut rezultat mjerenja. Dio šuma kamere ovisi o temperaturi senzora i raste s njom. Izvor topline je i sama kamera koja se ugrijava tijekom rada. Industrijske kamere imaju manje rasipanje energije, odnosno manje zagrijavanje kamere. Autori Pan et al. (2013) ističu važnost temperature okoline, kamere i predmeta mjerenja kao utjecaj na rezultat mjerenja. Potreban je minimalno 1 sat rada kamere da bi se dostigla njena radna temperatura zbog smanjenja utjecaja termalne deformacije mehaničkih komponenti unutar kamere na geometriju mjerenja. Potrebno je ostaviti etalon da mu se stabilizira temperatura na srednju temperaturu koja je određena za mjerno područje, no ako se to ne dogodi potrebno je provesti korekciju rezultata (*VDI/VDE 2634 Part 2, 2012*).

Trenutno ne postoji norma prema kojoj se provodi umjeravanje i sljedivost optičkog sustava za mjerenje, stoga je najbliže tome *VDI/VDE 2634* priručnik. Prvi dio ovog priručnika odnosi se na sustave koji sadrže kameru i koncept triangulacije (*VDI/VDE 2634 Part 1, 2002*).

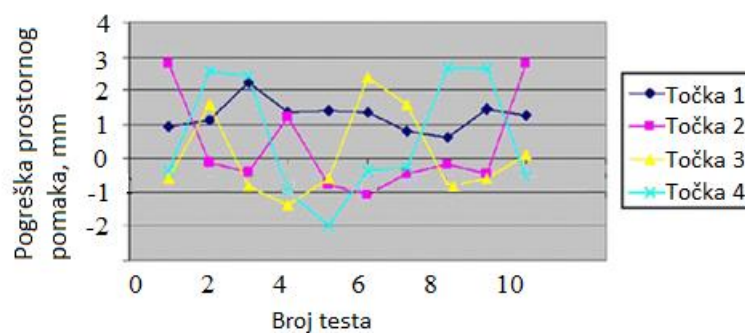
Autori Moru i Borro (2021) u svom radu navode 4 parametra koja utječu na pojavu pogreške u procesu umjeravanja industrijske kamere: fokus, vrijeme ekspozicije, kut kalibracijske ploče, broj slika. Provodili su istraživanje endocentričnom i telecentričnom lećom.

Autori He et al. (2020) navode da su etaloni za umjeravanje precizno proizvedeni 3D objekti s pravilnim i pravokutnim ravninama te su skupi i uglavnom se koriste u laboratorijskim ispitivanjima. Stoga se često može vidjeti umjeravanje preko ploče za umjeravanje s ucrtanim oznakama.

Autori Davrajh i Bright (2010) su u svom istraživanju proveli jednu provjeru točnosti na sustavu koji su izradili na način da su odredili 10 mjerenja na 4 točke u području interesa s koordinatama (20, 20, 10), (35, 80, 5), (50, 50, 15) i (100, 70, 10). Sustav su koristili za mjerenje predmeta na slici 4.2 (b), dok su umjeravanje provodili na referentnom predmetu prikazanom na slici 4.2 (a). Na slici 4.3 prikazani su dobiveni rezultati mjerenja prostornog pomaka označeni različitim bojama.



Slika 4.2 Primjer referentnog predmeta (a) i gotovog proizvoda (b) (Davrajh and Bright 2010)



Slika 4.3 Primjer rezultata provjere sustava (Davrajh and Bright 2010)

Pogreška u prostornom pomaku kreće se u rasponu od 5 mm. Iz navedenog rada zaključeno je da se mora provesti detaljnija analiza pogreške i uzroka pogreške sustava koji se predlaže, a neophodne su i smjernice za određivanje točnosti takvog sustava koji koristi kameru.

Umjeravanje mora biti složeno na način da ne usporava rad sustava, mora biti potpuno olakšano, pojednostavljeno i brzo. Kako se teži da proizvodni sustav brzo odgovara na promjene na tržištu, u skladu s time se zahtjevi brzine odgovora prenose i na kontrolu kvalitete proizvoda koji izlaze iz sustava. Ako se kontrolni sustav dobro konstruira oko neke grupe proizvoda, on pruža točno potrebnu brzinu kontrole i točnost koja je potrebna za bilo koju konfiguraciju grupe proizvoda. Cilj ovakvog sustava je da se omogući masovna prilagodba, da se olakša uvođenje novih dijelova i tehnologija u proizvodni sustav, a sve s ciljem da se vrijeme proizvodnje i kontrole kvalitete skрати, a kvaliteta proizvoda poboljša. Kako bi jedan takav sustav bio rekonfigurabilan treba, između ostaloga, sadržavati određene module, a koji moraju biti standardizirani i lako dostupni te da se njihovim slaganjem omoguće sve potrebne konfiguracije. S obzirom na to da se sustav mijenjanjem modula transformira iz jedne u drugu konfiguraciju postavlja se pitanje njegove točnosti i načina umjeravanja za novo postavljenu konfiguraciju.

4.2. Definiranje zahtjeva i projektiranje etalona

U ovom poglavlju opisana su preliminarna mjerenja provedena na izvedenom RMS-u s ciljem dobivanja potrebne informacije o potrebama umjeravanja sustava za izabrane grupe predmeta i definiranjem zahtjeva etalona.

Slika je napravljena s očekivanim omjerom piksela, odnosno senzor kamere ima precizno definiran broj piksela i prilikom prebacivanja na računalo održava se očekivani omjer. Faktor pretvorbe između veličine piksela u stvarnom svijetu i na slici se radi preko odgovarajućeg referentnog objekta – etalona, posebno odabranog za tu namjenu. Nakon odabira etalona potrebno je poznavati postupak slikanja i mjerenja (Demant et al., 2013).

Mjerene su dimenzije duljine predmeta kvadratnog oblika poznatih dimenzija te promjera predmeta poznatih dimenzija, uz promjene referentnog predmeta pomoću kojega je sustav umjeren. Svrha prikazanih umjeravanja sustava u ovom poglavlju je da se dođe do zaključka o tome kojih dimenzija i oblika etalon mora biti da bi se umjerio projektirani RMS za određenu grupu proizvoda. Postojeća rješenja na tržištu poput postojećih referentnih predmeta ne zadovoljavaju sve potrebne zahtjeve.

Kako bi se utvrdio utjecaj etalona na rezultate mjerenja RMS sustava korišteni su etaloni duljine poznati pod nazivom planparalelne granične mjerke. Korišteno je 11 planparalelnih graničnih mjerki nazivnih duljina od 5 mm do 20 mm (slika 4.4). Etaloni su izdvojeni iz seta planparalelnih graničnih mjerki (slika 4.5), Navedeni etaloni duljine korišteni su i za umjeravanje mikrometarskog mjerila korišteng u dijelu istraživanja.



Slika 4.4 11 planparalelnih graničnih mjerki nazivnih duljina od 5 mm do 20 mm



Slika 4.5 Set planparalelnih graničnih mjerki

Potrebno je odrediti dimenziju pojedinog predmeta dobivenu na izvedenom RMS-u te je usporediti s poznatom dimenzijom predmeta. Kako bi se odredila dimenzija u mm, potrebno je umjeriti sustav te odrediti odnos px/mm. Prilikom umjeravanja određen je omjer px/mm i iznosi kod svih umjeravanja $1 \text{ px} = 0,02 \text{ mm}$. Za umjeravanje su korištene planparalelne granične mjerke nazivnih duljina navedenih u tablici 10.

Tablica 10 Etaloni poznate nazivne duljine za umjeravanje sustava

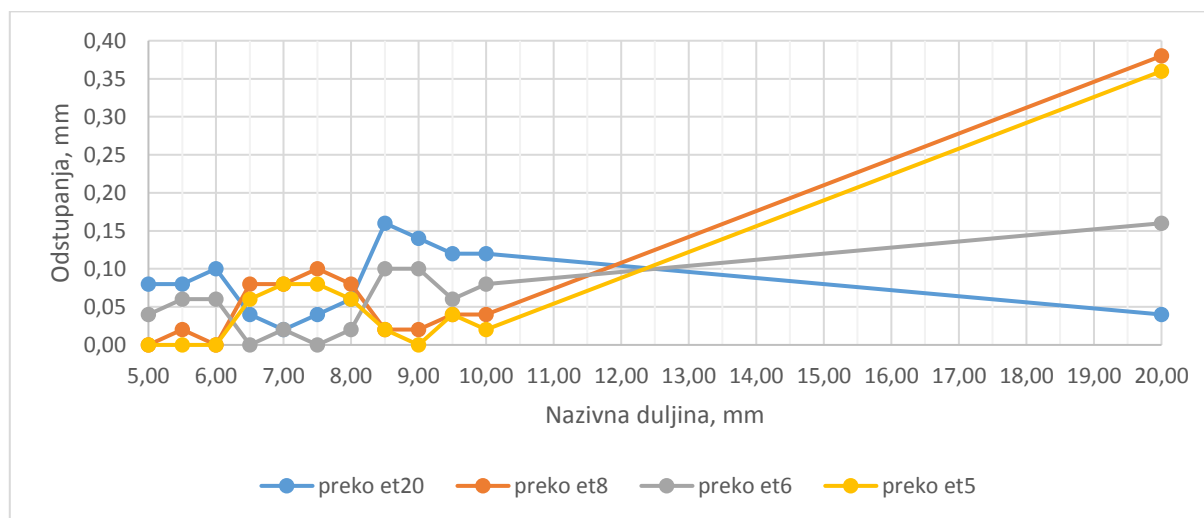
| Naziv | Nazivna duljina, mm |
|-------------|---------------------|
| et5 | 5,00 |
| et6 | 6,00 |
| et8 | 8,00 |
| et20 | 20,00 |

Dimenzije koje su se ovim načinom provjeravale te utvrđena odstupanja prikazana su u tablici 11 te grafom na slici 4.6. Vidljivo je da od 12 izmjerenih predmeta, prilikom umjeravanja nekim od navedenih etalona, postoje razlike u dimenzijama.

Tablica 11 Dimenzije predmeta koji su mjereni i utvrđena odstupanja

| Mjerena nazivna duljina, mm | Odstupanje pri umjeravanju s et5, mm | Odstupanje pri umjeravanju s et6, mm | Odstupanje pri umjeravanju s et8, mm | Odstupanje pri umjeravanju s et20, mm |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 5,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,08 |
| 5,50 | 0,00 | 0,06 | 0,02 | 0,08 |
| 6,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,10 |
| 6,50 | 0,06 | 0,00 | 0,08 | 0,04 |
| 7,00 | 0,08 | 0,02 | 0,08 | 0,02 |
| 7,50 | 0,08 | 0,00 | 0,10 | 0,04 |
| 8,00 | 0,06 | 0,02 | 0,08 | 0,06 |
| 8,50 | 0,02 | 0,10 | 0,02 | 0,16 |
| 9,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,14 |
| 9,50 | 0,04 | 0,06 | 0,04 | 0,12 |
| 10,00 | 0,02 | 0,08 | 0,04 | 0,12 |
| 20,00 | 0,36 | 0,16 | 0,38 | 0,04 |

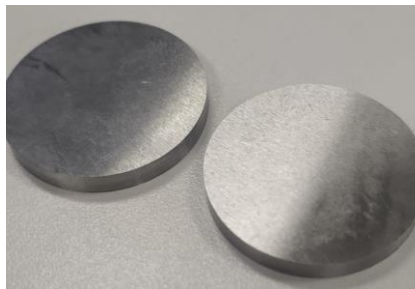
Provedenim preliminarnim mjerenjem vidljivo je da na pogrešku u mjerenju utječe dimenzija predmeta koji se mjeri. Zaključuje se da etalon koji se koristi za umjeravanje vizijskog sustava mora dimenzijski biti što sličniji veličini koja se kasnije na tom sustavu mjeri.



Slika 4.6 Prikaz utvrđenog odstupanja mjerenja korištenjem različitih veličina etalona

Za razliku od predmeta iz prethodnih mjerenja, provedeni su pokusi na predmetima koji nisu iste visine. Predmeti su kružnog oblika poznatih dimenzija promjera 38,00 mm, 40,00 mm i 42,00 mm i visine 3,00 mm ili 5,00 mm (slika 4.7). Za ovu svrhu izrađeni su predmeti zahtijevanih karakteristika:

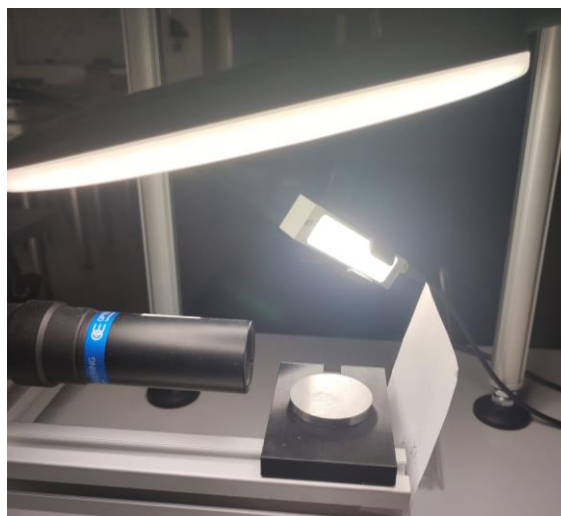
- materijal je poboljšan čelik 42CrMo4
- zaštićeni su sredstvom za podmazivanje i konzerviranje tako da ne dobiju patinu
- mjere su unutar tolerancije $\pm 0,005$ mm
- na rubovima predmeta nije napravljeno skošenje.



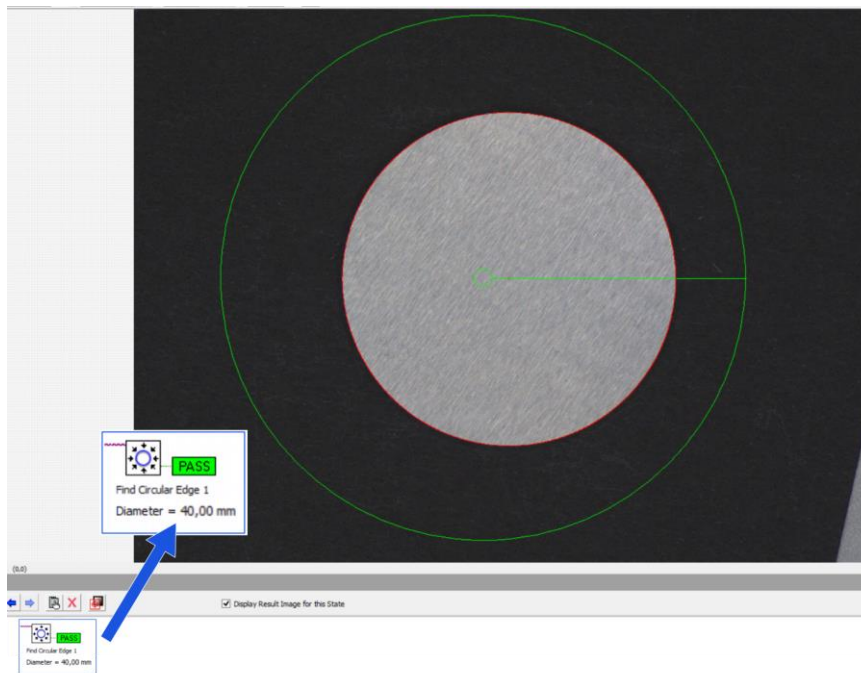
Slika 4.7 Grupa proizvoda 2, predmeti kružnog oblika

Mjerenja su se provela sa istim hardverskim postavkama RMS-a kao i prethodna skupina predmeta (slika 4.8). U ovom dijelu preliminarnih mjerenja, sustav se umjeravao jednim od predmeta te su provedena mjerenja preostalih predmeta.

Slika 4.9 prikazuje primjer prikaza rezultata jednog izmjenog predmeta. U donjem lijevom kutu vidljiva je dimenzija koja je izmjerena RMS-om te je mjera prikazana u milimetrima.



Slika 4.8 Predmet postavljen na mjesto mjerenja



Slika 4.9 Primjer prikaza dimenzije promjera izmjereneog predmeta

Slika 4.10 pokazuje rezultate dobivene prilikom umjeravanja sustava na dva načina, odnosno sa dva etalona koji se razlikuju u dimenzijama visine za 2 mm (visina 1: 5,00 mm, visina 2: 3,00 mm).

Dimenzije predmeta za umjeravanje:

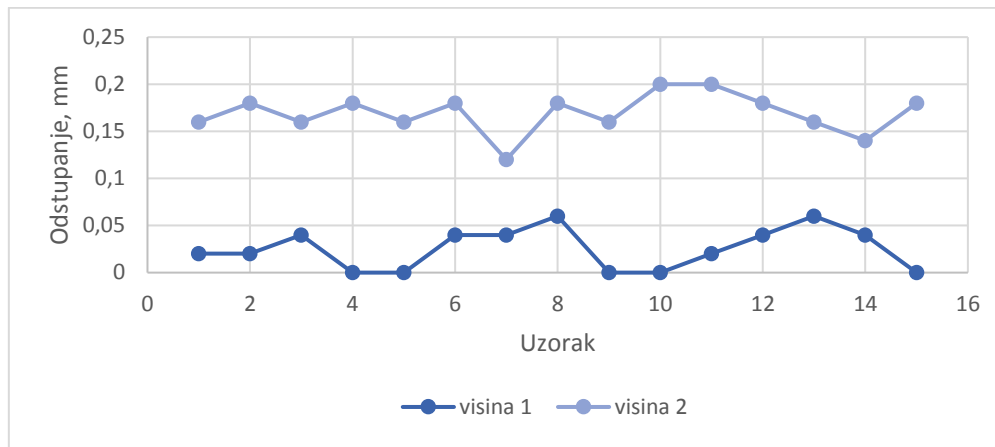
- visina 1: $\text{Ø } 38,00 \text{ mm} \times 5,00 \text{ mm}$
- visina 2: $\text{Ø } 38,00 \text{ mm} \times 3,00 \text{ mm}$.

Dimenzije uzoraka mjerenja:

- uzorci 1-5: $\text{Ø } 38,00 \text{ mm} \times 5,00 \text{ mm}$,
- uzorci 6-10: $\text{Ø } 40,00 \text{ mm} \times 5,00 \text{ mm}$
- uzorci 11-15: $\text{Ø } 42,00 \text{ mm} \times 5,00 \text{ mm}$.

Uzorci koji su mjereni su visine 5 mm. Vidljivo je da je odstupanje veće na svim uzorcima kada je sustav umjeren s visinom 2. Najveće odstupanje se javlja kada su uzorci iste visine kao i etalon kojim je sustav umjeren je na uzorku 8, koji je dimenzija $\text{Ø } 40,00 \text{ mm} \times 5,00 \text{ mm}$. Općenito su utvrđena odstupanja većeg iznosa u uzorcima koji nisu jednakog promjera kao i predmeta za umjeravanje. Preliminarna mjerenja ponovljena su u drugoj kombinaciji uzoraka (sada su visine 3 mm) dok su predmeti za umjeravanje ostali isti, no visina 1 sada predstavlja

visinu od 3,00 mm, a visina 2 visinu od 5,00 mm. Slika 4.11 pokazuje rezultate dobivene prilikom umjeravanja.



Slika 4.10 Prikaz utvrđenog odstupanja korištenjem etalona različite visine (predmet 5)

Dimenzije predmeta za umjeravanje:

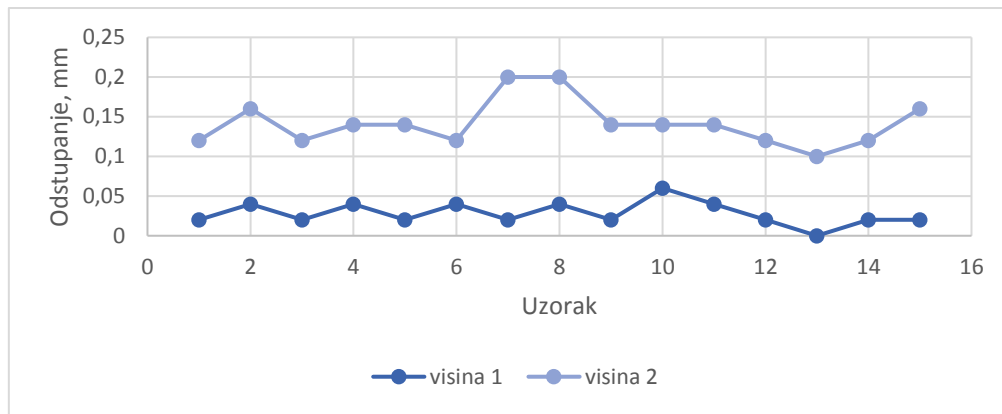
- visina 1: Ø 38,00 mm x 3,00 mm
- visina 2: Ø 38,00 mm x 5,00 mm.

Dimenzije uzoraka mjerenja:

- uzorci 1-5: Ø 38,00 mm x 3,00 mm
- uzorci 6-10: Ø 40,00 mm x 3,00 mm
- uzorci 11-15: Ø 42,00 mm x 3,00 mm.

Vidljivo je da je odstupanje veće na svim uzorcima kada je sustav umjeren s etalonom visine 2 mm. Najveće utvrđeno odstupanje, kada su uzorci iste visine kao i etalon kojim je sustav umjeren, je manje od svih utvrđenih odstupanja koja su dobivena prilikom mjerenja dimenzija predmeta koji nisu iste visine kao i etalon kojim je sustav umjeren.

Rezultati se u oba slučaja podudaraju, dakle razlika visina od 2 mm značajno utječe na pogrešku mjerenja. U ovom slučaju je zaključeno da veličina etalona mora biti što sličnija dimenzijama predmeta koji se mjeri.



Slika 4.11 Prikaz utvrđenog odstupanja korištenjem etalona različite visine (predmet 3)

Postoje određeni zahtjevi za etalonom, oni moraju biti opisani detaljno i jasno te su u nastavku opisani kroz primjer iz ovog rada (slika 4.12).

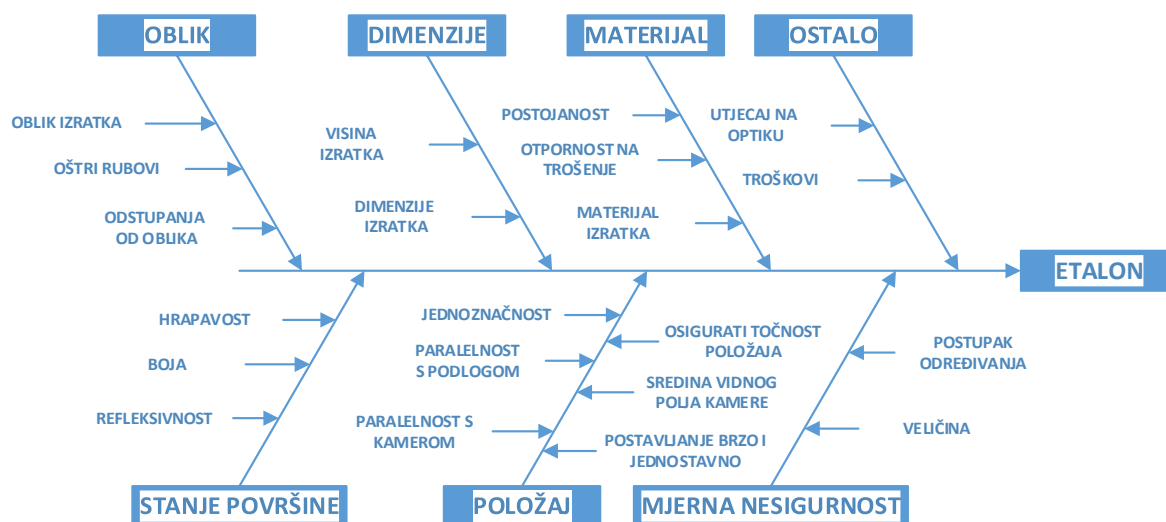
Prilikom mjerenja optičkim uređajem poželjno je imati dvije vrste etalona za različite namjene:

- Etalon 1 kojim se sustav umjerava, odnosno određuje se odnos piksela i mjerne jedinice za duljinu (mm).
- Etalon 2 kojim se provjerava točnost mjernog sustava umjerenog Etalomom 1 (test prihvaćanja sustava).

Kako bi se proveo test prihvatljivosti mjerne opreme umjeravanje se provodi na etalonu koji je provjeren točnijom mjernom metodom. Etaloni se moraju moći provjeriti kontaktnom metodom pa bi oblik etalona trebao imati geometrijske karakteristike koje se tako mogu provjeriti (pravilnih kružni ili ravnih linija, oštih rubova koji se mogu jasno definirati i odvojiti, odnosno sfera i površina koje se mogu mjeriti na drugim mjernim uređajima).

Osim samog izgleda etalona treba jasno definirati karakteristike mjernog sustava poput potrebne jačine svjetla, dimenzijskih karakteristika mjernih objekata, tipa senzora koji se koristi, tipa i duljine dobivanja slike (engl. *image acquisition*), tipa i oblika značajki koje se analiziraju te neke vanjske uvjete koji utječu na mjerenje poput temperature, vlažnosti, vibracija, vanjskog osvjetljenja, prašine, elektromagnetskih smetnji i slično.

Etalon po svojim karakteristikama površine ne smije utjecati na točnost rezultata. Pogreška samog etalona mora biti manja od moguće pogreške sustava kako ne bi utjecala na točnost rezultata. Mjerni etalon za ispitivanje točnosti mjernog sustava mora biti umjeren u istim uvjetima i mjernim sredstvom više razine točnosti.



Slika 4.12 Zahtjevi etalona

Potrebno je osigurati da su oprema i etalon postavljeni na odgovarajući način.

Test prihvatanja etalona služi da bi se definirala točnost nekog mjernog sustava. Test prihvatanja radi se pomoću dodatnog etalona te se temelji na rezultatima dobivenim iz mjerenja tog etalona, stoga etalon mora biti osmišljen na način da svojim izgledom ne utječe na kvalitetu mjerenja. Posebice se to odnosi na kvalitetu izrade rubova predmeta mjerenja i materijal koji zadovoljava optičke zahtjeve. Materijal od kojega je etalon izrađen trebao bi biti postojan (čelik, keramika) (VDI/VDE 2634 Part 2, 2012). Maksimalna veličina pogreške koja se dobije prilikom mjerenja etalona na takvom sustavu je ustvari mjera za kvalitetu sustava.

Općenito kod umjeravanja mjernog sustava preko etalona i određivanja njegove maksimalne pogreške (primjerice umjeravanje pomičnog mjerila), ta pogreška se ispituje u laboratorijskim uvjetima, no kod optičkih mjernih sustava postoji iznimka, etalon se može mjeriti u uvjetima u kojima se predviđa rad takvog sustava.

Potrebno je definirati postupke izvršavanja testa prihvatanja etalona koji će moći lako i brzo dokazati točnost mjernog sustava, a pri tome će ga moći koristiti i operater koji radi na sustavu. Uz osmišljavanje testa potrebno je napisati upute za sustav prije njegovog korištenja, odnosno umjeravanje sustava preko etalona.

Pri provođenju testa prihvatanja potrebno je uzeti u obzir vrijeme zagrijavanja kamere, način na koji se ona postavlja (okomitost), način postavljanja etalona (okomitost, pozicija, stezna naprava koja ne smije utjecati na devijacije prilikom zagrijavanja i slično) i uvjete u okolini.

Potrebno je sačuvati sve rezultate mjerenja prilikom izvještavanja o testu, a prilikom testiranja dozvoljeno je ponavljanje jednog mjerenja.

Pogreška mjerenja se definira kao razlika izmjerene i umjerene vrijednosti. Rezultat je potrebno i grafički prikazati. Pri određivanju etalona njegova pogreška mora biti manja od 1/5 maksimalne dozvoljene pogreške mjernog sustava koji se ispituje, odnosno prilikom osmišljavanja etalona njegova točnost mora biti 5 puta veća od maksimalne dozvoljene pogreške mjernog sustava koji se umjerava i pri tome etalon mora posjedovati certifikat kako bi se mogla dokazati mjerna sljedivost do višeg ranga etalona, odnosno do definicije metra. Parametar kvalitete mjernog sustava bit će ispunjen ako pogreška ne prekoračuje određeni maksimum koji je definiran (prema zahtjevima kupca mjernog sustava).

Značajke koje se provjeravaju optički moraju imati minimalnu ovisnost mjerenja o veličini slike. Površina objekta koji se snima mora biti paralelna s optičkom ravninom (Badali et al., 2005). Izvor pogreške određuje se iz mjernih rezultata, eksperimentalno, iz podataka dobivenih u tablicama ili iz iskustva (Hemming i Lehto, 2002).

4.2.1. Smjernice za odabir etalona prilikom umjeravanja na RMS-u

Sukladno proučenoj literaturi te provedenim eksperimentalnim mjerenjima predlaže se da etalon koji se odabire za umjeravanje ovakvog tipa RMS-a ima navedene karakteristike kako bi bio primjenjiv za dimenzionalna mjerenja strojnim vidom:

- Etalon treba oblikom i veličinom odgovarati predmetima mjerenja.
- Etalon mora oblikom i veličinom odgovarati primjeni softverskog paketa za mjerenje.
- Materijal i refleksivnost svjetlosti etalona moraju biti istih ili sličnih karakteristika predmeta mjerenja i pri tome odgovarati softverskim komponentama sustava.
- Odabrani materijal ne smije mijenjati svojstva s vremenom uporabe etalona za određenu grupu proizvoda.
- Rubovi moraju biti jasno vidljivi na podlozi na kojoj stoji predmet.
- Površinska hrapavost predmeta treba biti približno jednaka površinskoj hrapavosti predmeta mjerenja.
- Odstupanje od oblika i položaja značajki koje se mjere mora biti manja od zahtijevane točnosti predmeta mjerenja.

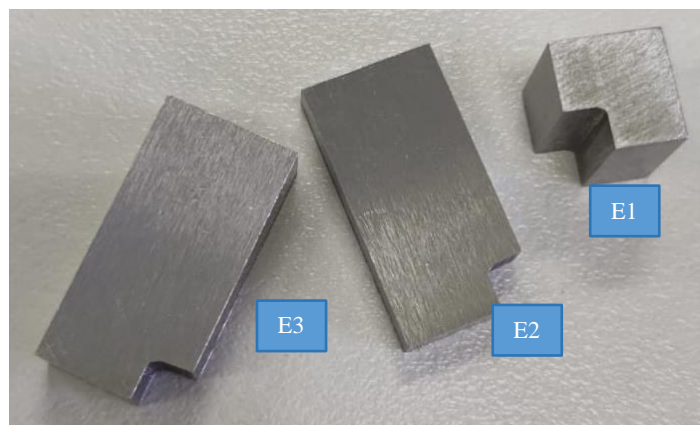
- Na etalonu mora biti jasno označena dimenzija koja se preko njega umjerava.
- Prije uporabe opreme i etalona potrebno je pričekati da se temperatura ujednači na radnu temperaturu, ukoliko su bili pohranjeni na mjestu različite temperature okoline.
- Etalon mora biti zaštićen od raznih okolišnih uvjeta prilikom korištenja.
- Etalone je potrebno skladištiti u zatvorenim kutijama kako ne bi na sebe prikupljali prašinu, prljavštinu i vlagu kada se ne koriste.
- Prije uporabe potrebno je provjeriti stanje površina (korozija, oštećenje, istrošenost).

4.3. Izrada etalona za odabrane grupe proizvoda

Za provedeno istraživanje, a primjenjujući saznanja iz provedenih eksperimenata i spoznaja iz proučene literature modeliran je set od tri etalona prema postavljenim zahtjevima, te su oni ujedno i izrađeni (slika 4.13).

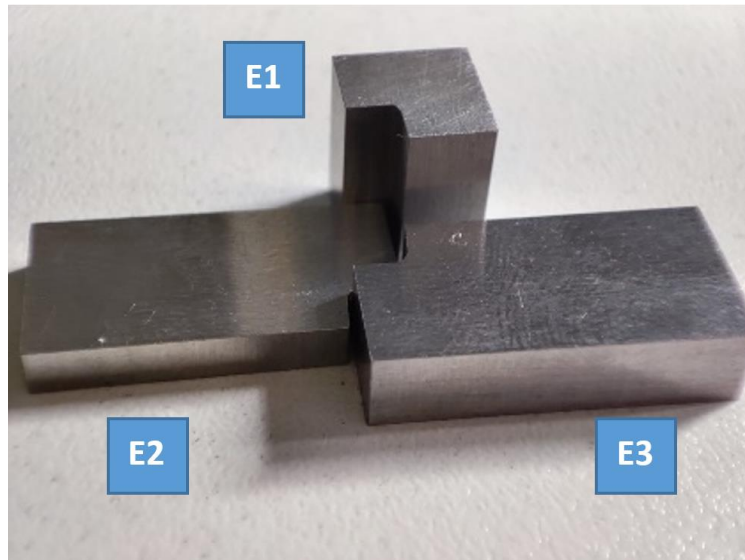
Dimenzije izrađenih etalona su:

- etalon 1 (E1) dimenzija 8,00 mm x 8,00 mm, visine 10,00 mm
- etalon 2 (E2) dimenzija 10,00 mm x 20,00 mm, visine 3,00 mm
- etalon 3 (E3) dimenzija 10,00 mm x 20,00 mm, visine 5,00 mm.



Slika 4.13 Izrađeni etaloni

Etaloni dimenzijama odgovaraju grupama proizvoda koje su mjerene. Ima dvije različite visine ovisno o predmetima koji su tih visina. Dimenzijski je uzeto u obzir da kada su složeni jedan do drugog mogu biti vidljivi kamerama na odgovarajući način za umjeravanje iz više pozicija (slika 4.14).



Slika 4.14 Predloženi etaloni za ove tri grupe proizvoda

Ovim načinom slaganja omogućeno je da se iz jedne slike dobiju podaci o umjeravanju za više grupa predmeta. Primjerice etalon koji stoji uspravno, (E1) prilagođen je za umjeravanje grupe proizvoda 3, gdje se umjeravanje i mjerenje provodi pomoću skupa modula koji sadrži telecentrični objektiv.

Način na koji su etaloni posloženi doprinosi tome da etalon može biti slikan bez pozadine drugog etalona, odnosno mora se vidjeti jasan rub predmeta u odnosu na pozadinu na kojoj se slika. Potrebno je da pozadina bude u drugačijoj boji od predmeta slikanja (primjerice bijela ili crna). Rubovi su oštri, bez skošenja. Napravljeni su od materijala koji bojom i refleksijom odgovara predmetima mjerenja. Također sadrži ravne glatke okomite površine koje se mogu izmjeriti i kontaktno i beskontaktno.

Tijekom vremena potrebno je ponoviti umjeravanje, odnosno utvrditi vremenski period za ponovno umjeravanje (ovisno o uvjetima okoline, samoj opremi, dostupnoj svjetlosti). Vizualno provjeravanje komponenti sustava treba provoditi prije svakog mjerenja, radi utvrđivanja pravilnog rada svih komponenti.

Komponente RMS ne smiju mijenjati poziciju od umjeravanja do mjerenja predmeta, kako niti za vrijeme mjerenja jedne grupe proizvoda.

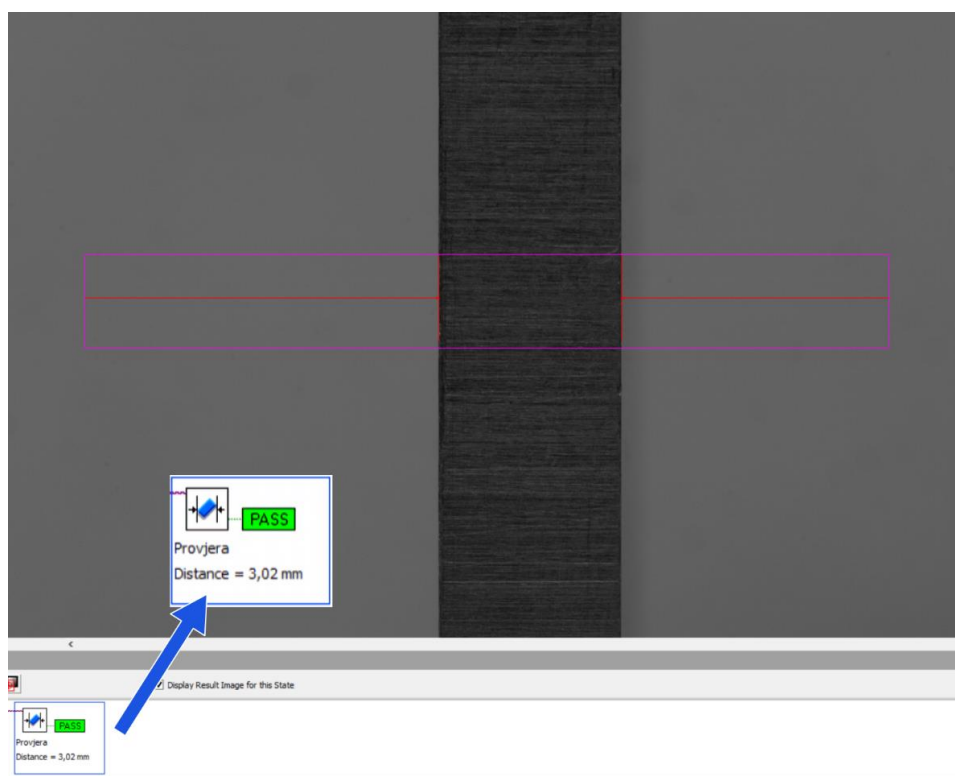
4.3.1. Provedba umjeravanja RMS-a predloženim etalonom

Izrađenim etalonom iz skupine odabranih etalona, umjeren je rekonfigurabilni mjerni sustav. Etalon je postavljen na predviđenu poziciju i postavljeni su svi elementi sustava u konfiguraciju kojom će se provoditi daljnja mjerenja dimenzija RMS-om. Ovakvim načinom postavljenog RMS-a i njegovog umjeravanja dobiveni je omjer piksela i milimetra koji je bitan za daljnja mjerenja, a on iznosi 0,02 mm/px.

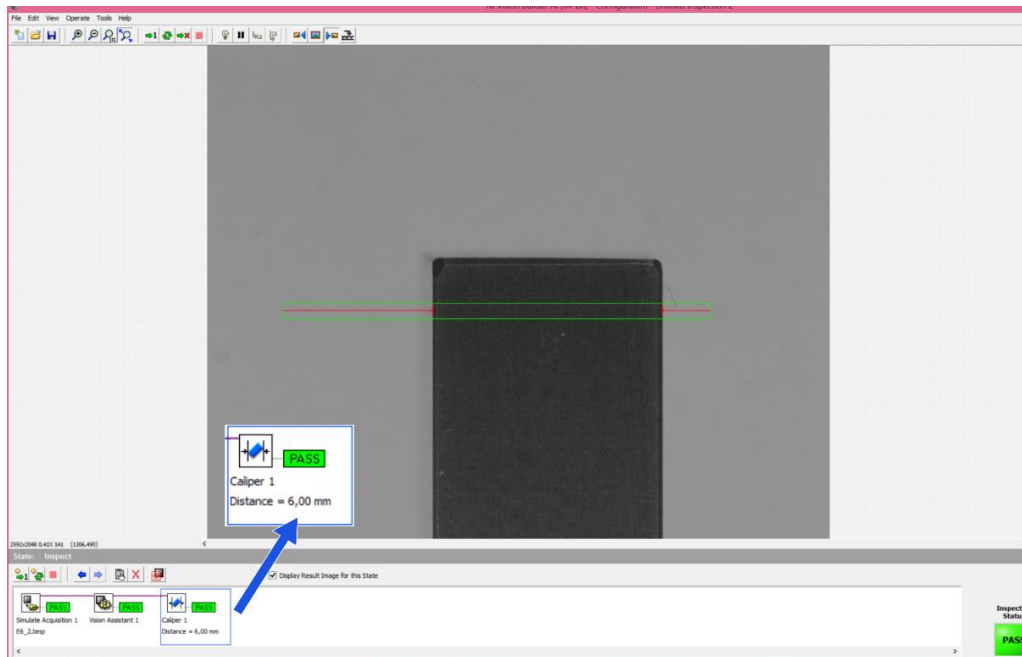
Nakon provedenog postupka umjeravanja, RMS sustavom su mjerene duljine dva etalona iz seta planparalelnih graničnih mjerki. Mjerene su duljine 3,00 mm i 6,00 mm.

Maksimalno odstupanje duljine u iznosu od 0,02 mm utvrđeno je na duljini 3 mm. Rezultati mjerenja prikazani su slikama 4.15. i 4.16. Utvrđeno je da RMS sustav nakon umjeravanja osigurava rezultate mjerenja tražene točnosti.

Interpretacija rezultata: parametar kvalitete je zadovoljen ako pogreška ne prelazi maksimalno dozvoljenu pogrešku mjerenja u apsolutnom iznosu (određenu zahtjevom kupca ili korisnika). Mjerenje se može ponoviti jednom.



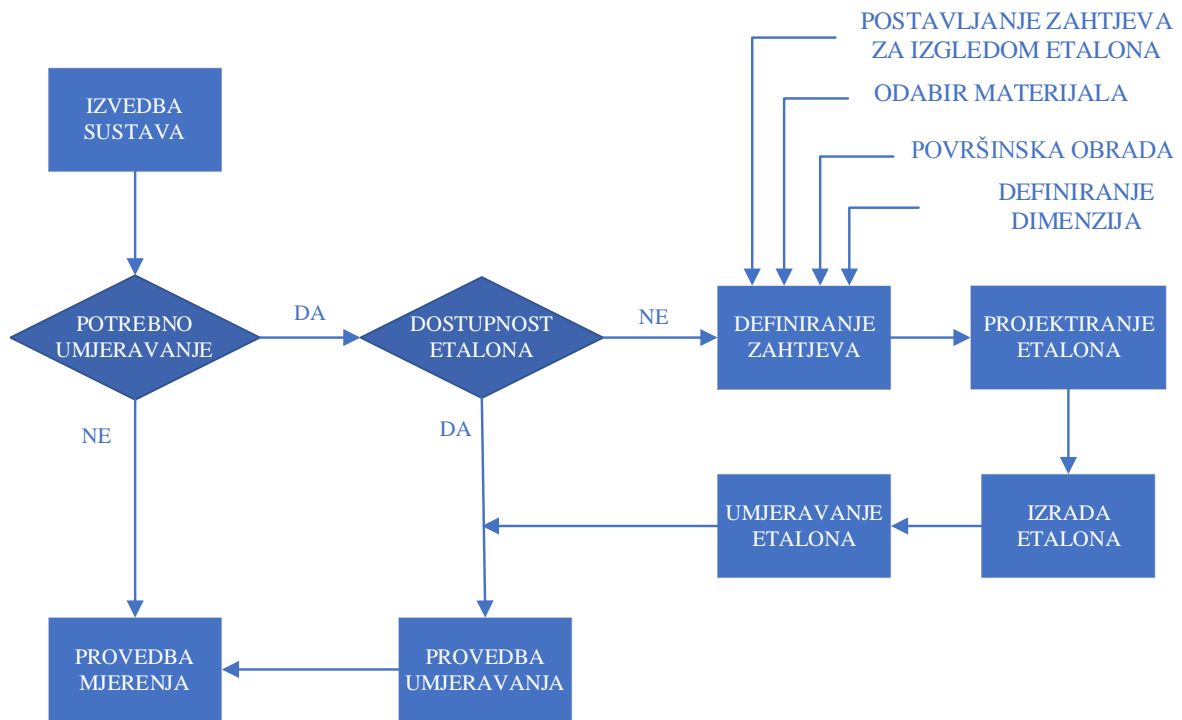
Slika 4.15 Provedba mjerenja duljine planparalelne granične mjerke duljine 3,00 mm



Slika 4.16 Provedba mjerenja duljine planiparalelne granične mjerke duljine 6,00 mm

4.4. Predložena metodologija umjeravanja RMS-a

Temeljem provedene analize osnovnih koraka predložene metodologije projektiranja RMS-a koji obuhvaća dio provedbe mjerenja i umjeravanja RMS-a, u ovom poglavlju prikazan je cjeloviti dijagram metodologije umjeravanja rekonfigurabilnog mjernog sustava, sa svim uključenim elementima (slika 4.17). Ovisno o izvedbi sustava na kojem će se provoditi mjerenja odlučuje se o potrebi umjeravanja takvog sustava. Ukoliko umjeravanje nije potrebno, moguće je prijeći na idući korak – provedbu mjerenja koja daje rezultat mjerenja. Ukoliko potreba za umjeravanjem postoji, potrebno je istražiti načine umjeravanja i dostupnost etalona potrebnog za umjeravanje. Ukoliko etalon ne postoji potrebno ga je definirati i izraditi te umjeriti u ovlaštenom laboratoriju. Umjerenim etalom moguće je provesti umjeravanje sustava koji će provoditi daljnja mjerenja. Provedba mjerenja biti će prikazana na primjeru u 5. poglavlju kroz primjenu projektiranog sustava na odabranim grupama proizvoda.



Slika 4.17 Metodologija umjeravanja RMS-a

5. PRIMJENA PROJEKTIRANOG RMS-A NA ODABRANOM PRIMJERU

Temljem uspostavljene metodologije projektiranja i umjeravanja rekonfigurabilnoga mjernog sustava izrađen je RMS. Na izvedenom RMS-u prikazanom kroz prethodna poglavlja, provedena su mjerenja i prikazani dobiveni rezultati na odabranom primjeru. Opisane su postavke RMS-a za pojedinu grupu proizvoda na kojoj se provodi mjerenje te su dani rezultati provedenih mjerenja. U prvoj grupi proizvoda prikazana je i analiza mjernog sustava te primjena sustava na proizvodima iz realnog okruženja.

5.1. Opis postupka mjerenja RMS-om na grupi proizvoda 1

Provelo se mjerenje na postavljenom RMS-u uz umjeravanje izrađenim setom etalona za grupu proizvoda. Ovu grupu čine proizvodi nepoznate dimenzije, žice zavarene elektrootpornim zavarivanjem. Žice su zavarene na način da čine mrežu koja predstavlja proizvod, a iz kojega je potrebno odrezati uzorke za provedbu mjerenja (slika 5.1).

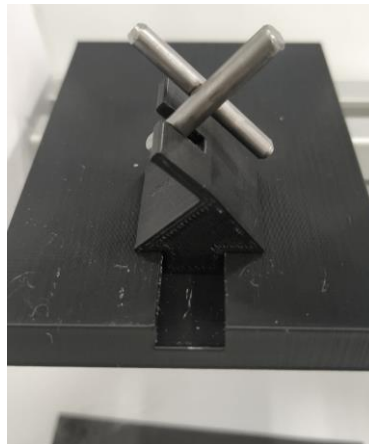


Slika 5.1 Grupa 1, žice različitih promjera spojene elektrootpornim zavarivanjem

Dvije žice spojene su elektrootpornim zavarivanjem pod pravim kutom. Radi ispitivanja kvalitete zavara i korozijske postojanosti žice, potrebno je odrediti dubinu penetracije žice u

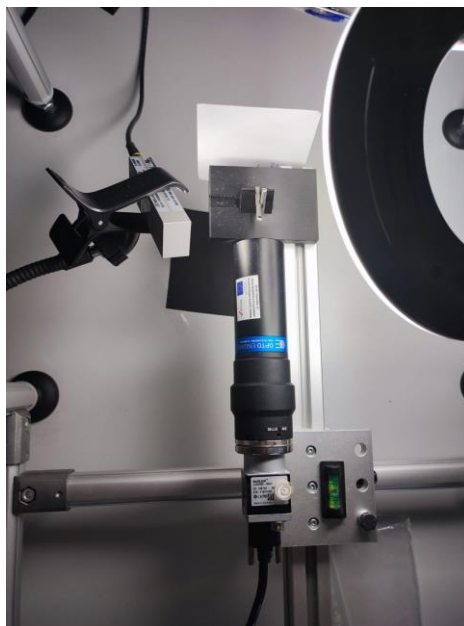
žicu. Dimenzije žice se kreću u promjerima od 3 mm do 4 mm. Za svaku novu promjenu promjera žice potrebno je prilagoditi RMS na odgovarajući način promjenom modula.

U tu svrhu izrađen je jedan modul koji služi za umetanje predmeta mjerenja prilikom slikanja, a radi održavanja same pozicije predmeta (slika 5.2). Postavke kamere, osvjetljenja i naprave prikazane su na slici 5.3. Potrebno je postaviti određene module na predefinirano mjesto (modul za prihvat žice se mijenja ovisno o žici za koju je potrebno provesti mjerenje, modul koji nosi kameru s objektivom se pomiče ovisno o dimenziji žice i promjeni fokusa).



Slika 5.2 Modul u koji je postavljen jedan proizvod iz grupe

Radi specifičnosti mjerenja penetracije i izgleda grupe proizvoda odabrani su moduli objektivna i osvjetljenja (telecentrični objektiv, pripadajuća kamera, LED osvjetljenje).



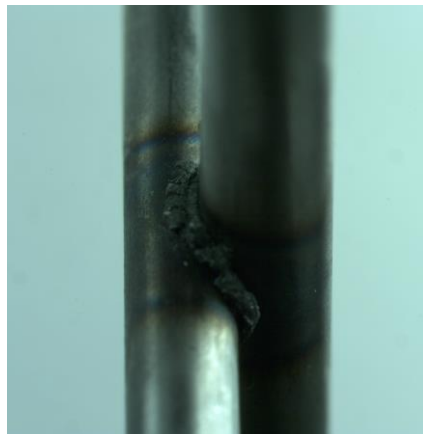
Slika 5.3 Postavke kamere i osvjetljenja na postavljenoj RMS

Slika 5.4 prikazuje način na koji se grupa proizvoda 1 postavlja u modul za prihvatanje te grupe u odnosu na postavljenu kameru.



Slika 5.4 Grupa proizvoda koji se kontrolira s pripadajućim modulima

Slika 5.5 dobivena je navedenim postavkama prvo u softveru Pylon koji se koristi za pokretanje kamere, a zatim je prenesena u softver NI Vision za dobivanje dimenzije mjerenja te je određena dimenzija koja je zahtijevana.

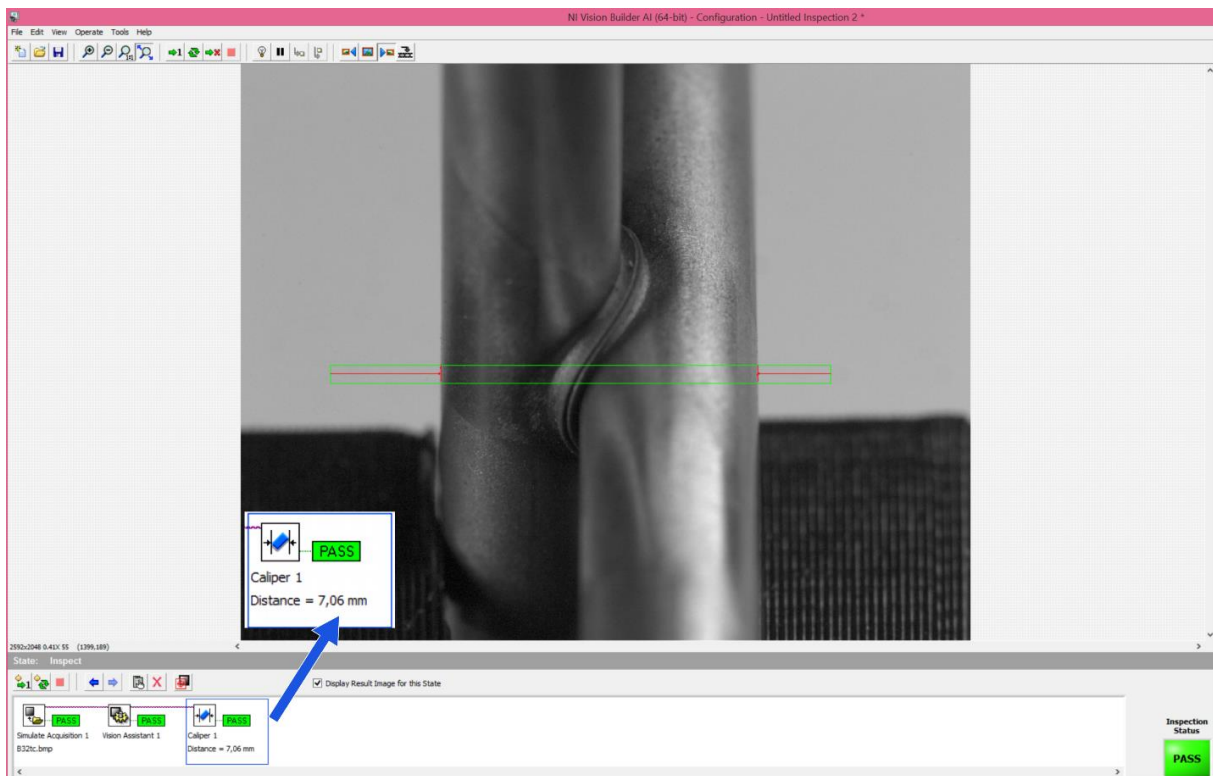


Slika 5.5 Slika dobivena telecentričnim objektivom i određenim postavkama RMS-a

5.1.1. Potvrda odabira modula RMS-a

Telecentrični objektiv se pokazao kao dobar izbor kod preciznih mjerenja manjih dimenzija. Ima konstantno povećanje neovisno o udaljenosti predmeta mjerenja od samog objektivna te dovoljno veliku rezoluciju, a malu distorziju (W. Li et al., 2019).

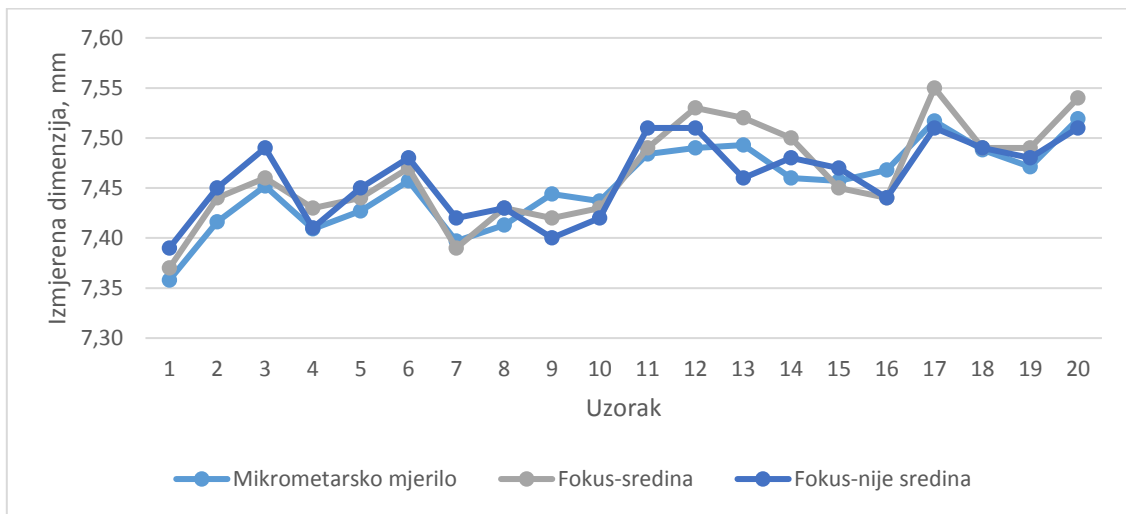
Predmet mjerenja mora biti slikan na način da je u fokusu telecentričnog objektiva kako bi rubovi na slici bili što oštrije i jasno vidljivi. Zbog specifičnosti izgleda i položaja predmeta mjerenja za pretpostaviti je da problematičan može biti rub pri različitim udaljenostima od kamere. Stoga su provedena eksperimentalna mjerenja da se pokaže utječe li mala promjena fokusa na rezultat mjerenja i da se zaključi koji dio predmeta je potrebno staviti u fokus. Mjerilo se 20 uzoraka na način da je fokus smješten na sredinu predmeta mjerenja, odnosno na spoju između dviju žica (slika 5.6), zatim drugi puta na način da fokus nije na sredini. Mjerenja su uspoređena s rezultatima koji su se za iste uzorke dobili mjerenjem s digitalnim mikrometarskim mjerilom, a rezultati su prikazani na slici 5.7. Digitalno mikrometarsko mjerilo je umjereno planparalelnim graničnim mjerkama.



Slika 5.6 Mjerenje grupe uzoraka RMS-om - prikaz u softveru s fokusom u sredini predmeta

Najveća pogreška i u jednom i u drugom slučaju je iznosila 0,04 mm. Kao referentna vrijednost za određivanje pogreške uzeta je mjera dobivena mikrometarskim mjerilom. Iz navedenoga je zaključeno da je pogreška mjerenja u rasponu od 2 piksela, dok je prosječna vrijednost pogreške iznosila 0,02 mm što odgovara 1 pikselu.

Zaključeno je da mala promjena fokusa ne utječe značajno na rezultat. Daljnja mjerenja provela su se na način da je fokus bio na sredini predmeta na slici.



Slika 5.7 Izmjere dobivene promjenom fokusa na RMS-u i izmjera na mikrometarskom mjerilu

5.1.2. Analiza mjernog sustava

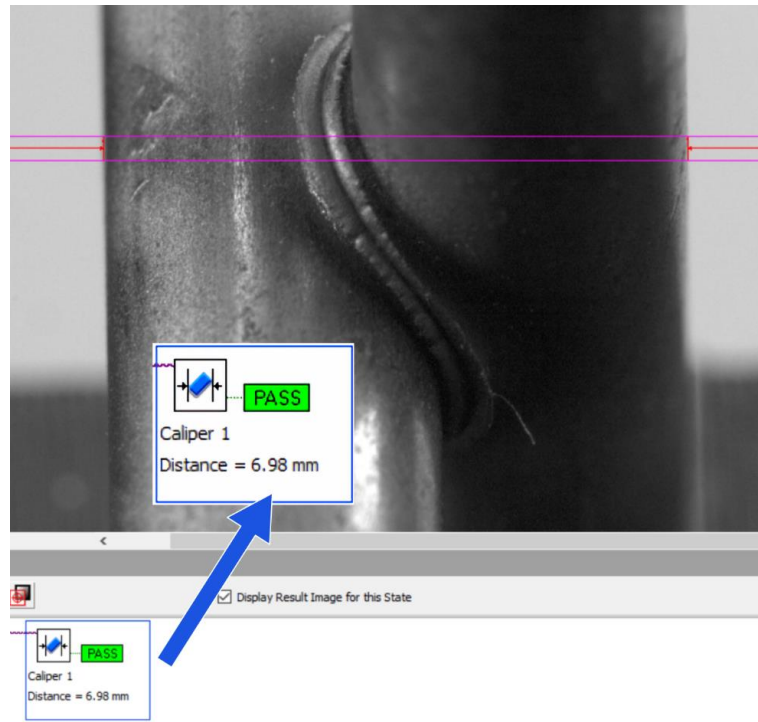
Kako bi se usporedile mjerne karakteristike predloženog RMS-a s mjernim karakteristikama drugog mjernog sredstva (digitalno mikrometarsko mjerilo) potrebno je provesti analizu mjernog sustava. Predložena analiza pokazati će je li predloženi mjerni sustav u mogućnosti točno i precizno razlikovati proizvode. U tu svrhu slučajnim odabirom odabrano je 6 proizvoda iz grupe 1. Mjerenja su provela dva operatera (mjeritelja) obučena za rad na RMS-u, a svaki uzorak mjeren je dva puta (ukupno 24 mjerenja). Isti predmeti mjereni su s digitalnim mikrometarskim mjerilom (slika 5.8).

Analizom će se utvrditi koliko je dio varijacije procesa, posljedica varijacije mjernog sustava.

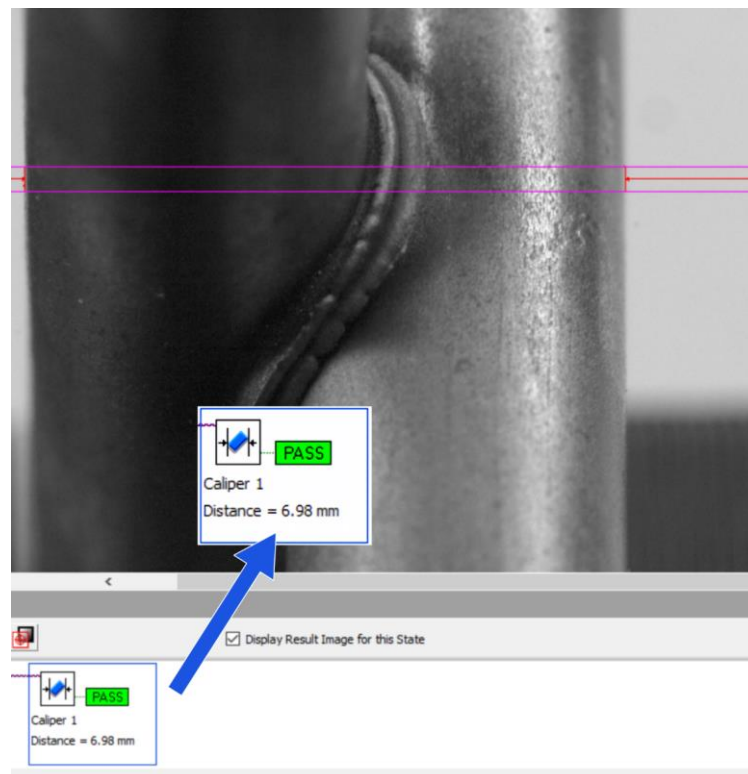


Slika 5.8 Mjerenje predmeta 1 s digitalnim mikrometarskim mjerilom

Iz slike 5.9 i slike 5.10 vidljiv je primjer mjerenja jednog uzorka u dva ponavljanja od strane jednog operatera na RMS-u.

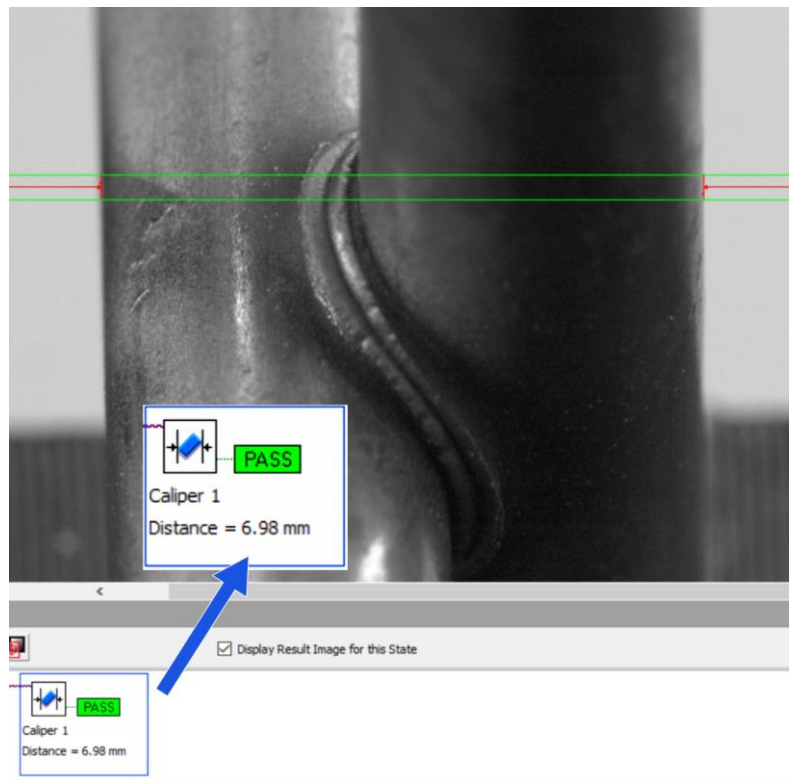


Slika 5.9 Prikaz mjerenja proizvoda od strane operatera 1, prvi put

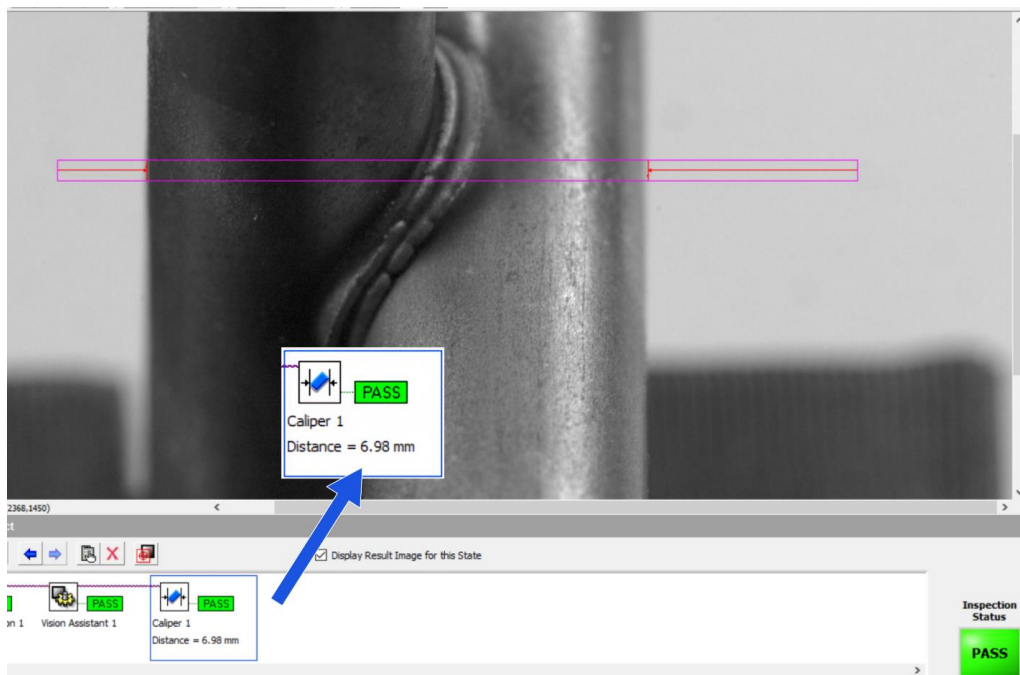


Slika 5.10 Prikaz mjerenja proizvoda od strane operatera 1, drugi put

Zatim, na slici 5.11 i slici 5.12, vidljiv je primjer mjerenja istog uzorka u dva ponavljanja od strane drugog operatera na istom sustavu. Svi rezultati dobivenih mjerenja prikazani su u tablici 12.



Slika 5.11 Prikaz mjerenja proizvoda od strane operatera 2, prvi put



Slika 5.12 Prikaz mjerenja proizvoda od strane operatera 2, drugi put

Rezultati oba operatera su uspoređeni s istim redoslijedom mjerenja, ali provedenim s digitalnim mikrometarskim mjerilom te je u tablici 12 prikazana razlika dobivenih rezultata na dva sustava. Provedena je analiza mjernog sustava u statističkom softveru Minitab, a rezultati su prikazani na slici 5.13 i slici 5.14. Provedena analiza pokazuje da nema utjecaja operatera na rezultat mjerenja i da najveći dio varijacije nosi razlika između proizvoda. Za provedeni primjer i zahtijevanu toleranciju od $\pm 0,05$ mm sustav se pokazao kao zadovoljavajući jer je kriterij za ocjenu kvalitete mjernog sustava R&R u tolerancijskome polju manji od 10 % (4,14 %), što je vidljivo iz dobivene analize. Također je vidljivo iz da su glavni izvori varijabilnosti mjernog sustava predmeti mjerenja.

Tablica 12 Rezultati provedenog testiranja radi provjere utjecaja operatera

| Part | Operater | Digitalno mikrometarsko mjerilo, mm | RMS, mm | Razlika, mm |
|------|----------|-------------------------------------|---------|-------------|
| 1 | 1 | 7,306 | 7,32 | 0,014 |
| 1 | 1 | 7,306 | 7,32 | 0,014 |
| 2 | 1 | 6,881 | 6,88 | -0,001 |
| 2 | 1 | 6,882 | 6,88 | -0,002 |
| 3 | 1 | 6,974 | 6,98 | 0,006 |
| 3 | 1 | 6,974 | 6,98 | 0,006 |
| 4 | 1 | 6,920 | 6,90 | -0,020 |
| 4 | 1 | 6,920 | 6,90 | -0,020 |
| 5 | 1 | 7,258 | 7,26 | 0,002 |
| 5 | 1 | 7,259 | 7,26 | 0,001 |
| 6 | 1 | 6,855 | 6,86 | 0,005 |
| 6 | 1 | 6,854 | 6,86 | 0,006 |
| 1 | 2 | 7,306 | 7,32 | 0,014 |
| 1 | 2 | 7,305 | 7,32 | 0,015 |
| 2 | 2 | 6,881 | 6,88 | -0,001 |
| 2 | 2 | 6,881 | 6,88 | -0,001 |
| 3 | 2 | 6,975 | 6,98 | 0,005 |
| 3 | 2 | 6,976 | 6,98 | 0,004 |
| 4 | 2 | 6,921 | 6,90 | -0,021 |
| 4 | 2 | 6,921 | 6,90 | -0,021 |
| 5 | 2 | 7,259 | 7,26 | 0,001 |
| 5 | 2 | 7,260 | 7,26 | 0,000 |
| 6 | 2 | 6,855 | 6,86 | 0,005 |
| 6 | 2 | 6,855 | 6,86 | 0,005 |

Gage R&R

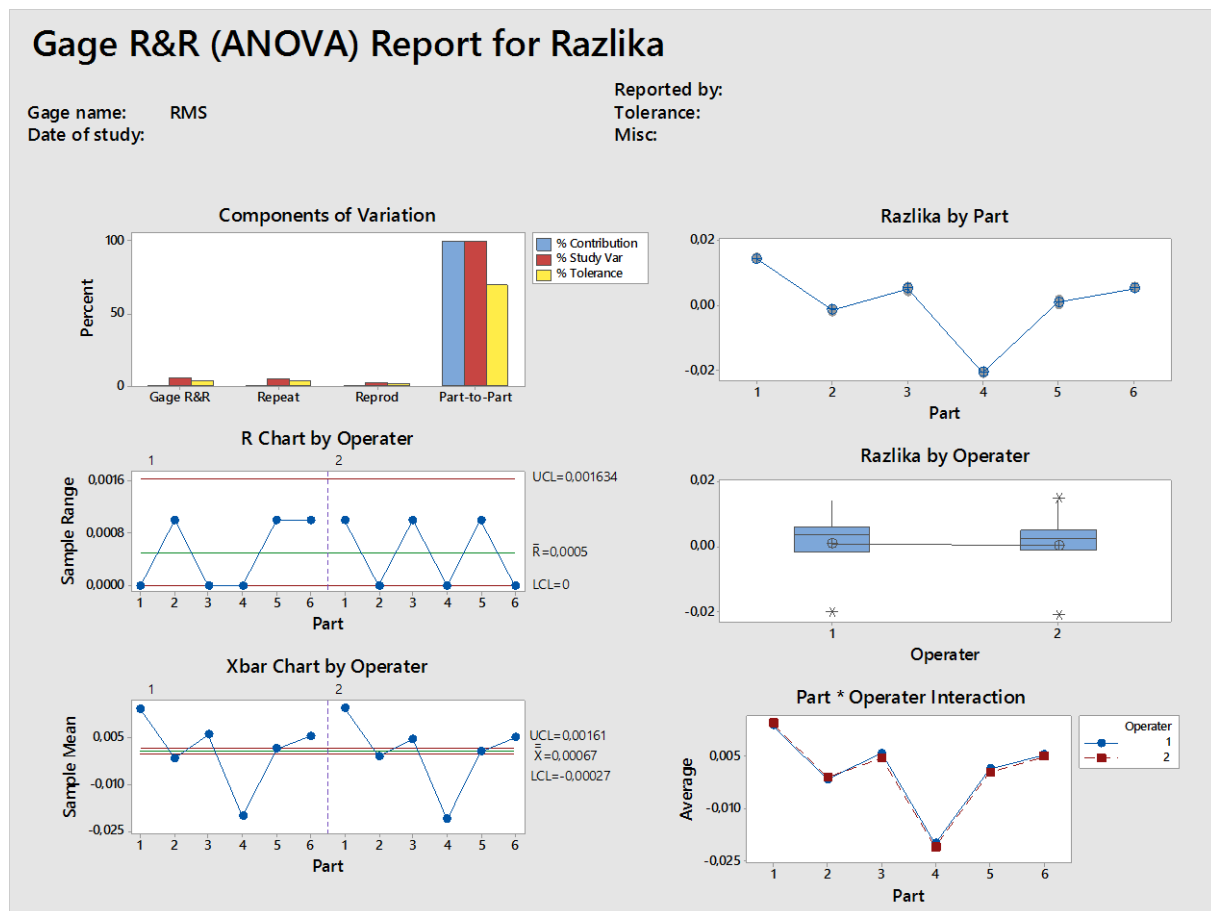
| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|-----------|-------------------------------|
| Total Gage R&R | 0,0000005 | 0,35 |
| Repeatability | 0,0000004 | 0,28 |
| Reproducibility | 0,0000001 | 0,07 |
| Operator | 0,0000001 | 0,07 |
| Part-To-Part | 0,0001356 | 99,65 |
| Total Variation | 0,0001360 | 100,00 |

Process tolerance = 0,1

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 × SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0,0006896 | 0,0041373 | 5,91 | 4,14 |
| Repeatability | 0,0006183 | 0,0037101 | 5,30 | 3,71 |
| Reproducibility | 0,0003052 | 0,0018311 | 2,62 | 1,83 |
| Operator | 0,0003052 | 0,0018311 | 2,62 | 1,83 |
| Part-To-Part | 0,0116435 | 0,0698610 | 99,83 | 69,86 |
| Total Variation | 0,0116639 | 0,0699834 | 100,00 | 69,98 |

Number of Distinct Categories = 23

Slika 5.13 ANOVA tablica provedene analize, prikaz iz softvera



Slika 5.14 Grafička analiza podataka izmjerenih na RMS-u, prikaz iz softvera

Općenito kriteriji za prihvaćanje kvalitete mjernog sustava u tolerancijskom polju (T) ili ukupnoj varijaciji (TV) su dani u tablici 13, te ja također navedena dobivena vrijednost iz ovog primjera koja pokazuje zadovoljavanje kriterija.

Tablica 13 Kriterij za ocjenu kvalitete mjernog sustava R&R u tolerancijskom polju ili ukupnoj varijaciji (Runje, 2014)

| % T, % TV | Mjerni sustav je | Vrijednost dobivena u analizi RMS – a, % |
|--------------------|-------------------------|---|
| < 10 | Zadovoljavajući | 4,147 |
| Od 10 do 30 | Granični | |
| > 30 | Ne prihvatljiv | |

Kriteriji za ocjenu kvalitete mjernog sustava R&R za postotak doprinosa prikazan je u tablici 14, uz dobivenu vrijednost iz ovog primjera koja pokazuje također zadovoljavanje kriterija.

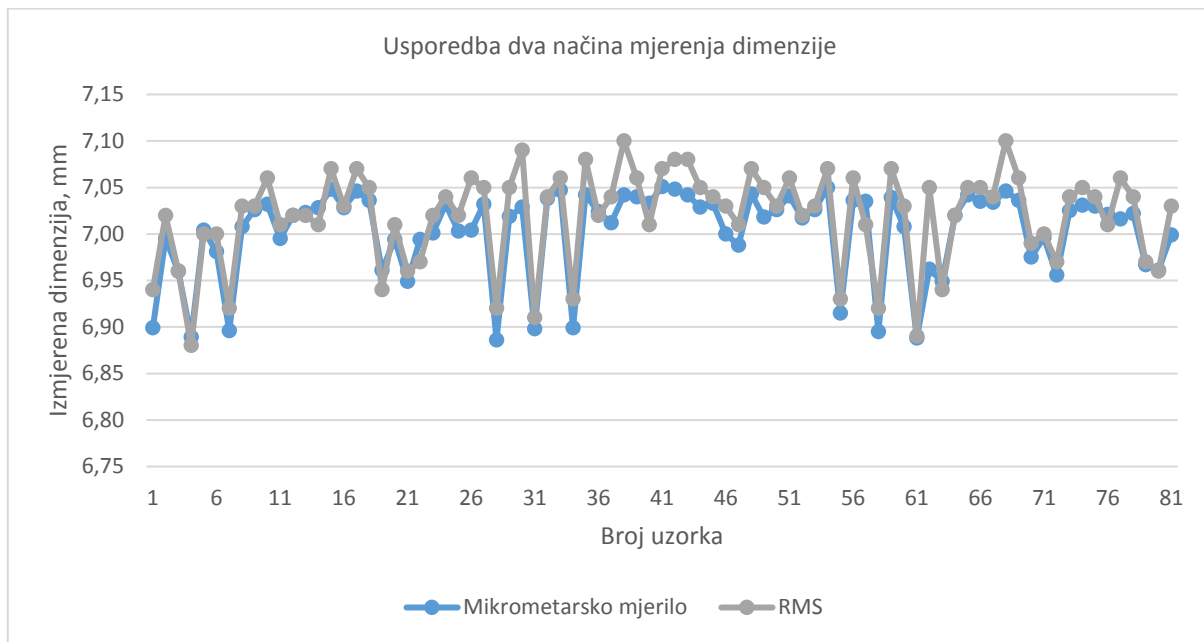
Tablica 14 Kriterij za ocjenu kvalitete mjernog sustava R&R za postotak doprinosa (Runje, 2014)

| Doprinos, % | Mjerni sustav je | Vrijednost dobivena u analizi RMS – a, % |
|--------------------|-------------------------|---|
| < 1 | Zadovoljavajući | 0,35 |
| 1 - 9 | Granični | |
| > 9 | Ne prihvatljiv | |

5.1.3. Provedba mjerenja na RMS-u radi praćenja procesa izrade dijelova

U ovom poglavlju prikazan je primjer praćenja procesa izrade dijelova grupe proizvoda iz realnog okruženja, a istovremeno je prikazana usporedba dobivenih rezultata RMS –om te s digitalnim mikrometarskim mjerilom. Mjeren je 81 uzorak dobiven procesom elektrootpornog zavarivanja. Rezultati dobivenih izmjera su prikazani na slici 5.15. Plavom bojom označeni su dobiveni rezultati mjereni mikrometarskim mjerilom, dok su sivom rezultati dimenzije dobiveni RMS-om.

Maksimalna pogreška, odnosno razlika između ova dva načina mjerenja na provedenom 81 uzorku iznosila je 0,08 mm i to na uzorku broj 62.

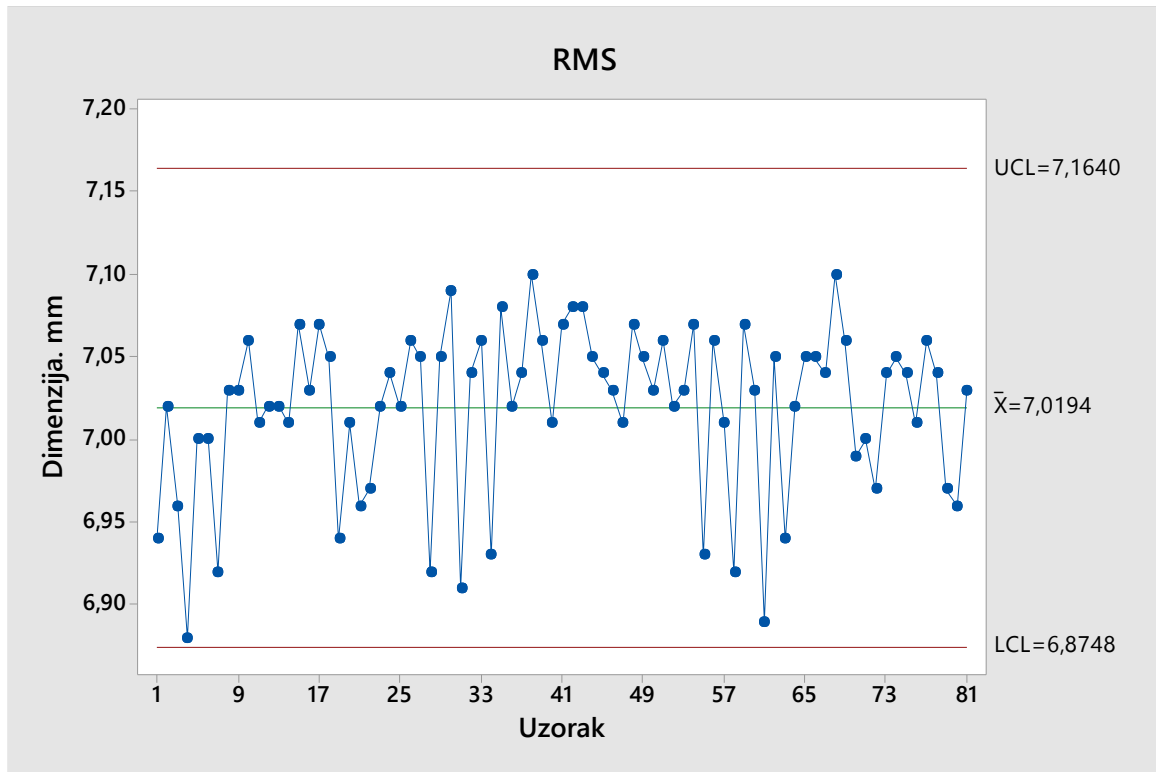


Slika 5.15 Usporedba rezultata mjerenja mikrometarskim mjerilom i RMS-om

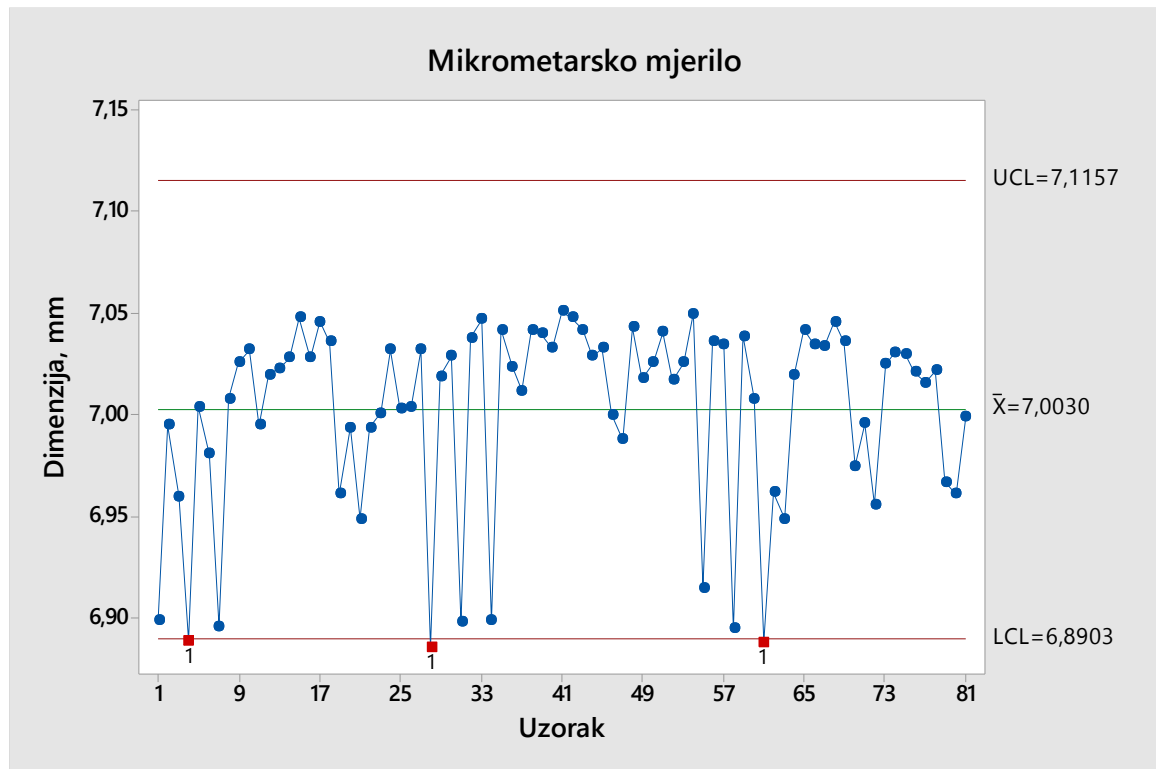
Praćenje varijacija procesa izrade navedenih proizvoda kroz vrijeme prikazano je kontrolnim kartama. Kontrolne karte koriste se u analizi stabilnosti promatranog procesa. Slika 5.16 predstavlja individualnu kontrolnu kartu podataka dobivenih mjerenjem RMS-om, dok slika 5.17 prikazuje individualnu kontrolnu kartu za iste podatke, ali dobivene mjerenjem mikrometarskim mjerilom. Sve izmjerene vrijednosti na RMS-u su unutar kontrolnih granica te je raspon granica 0,29 mm. Kod kontrolne karte za podatke dobivene mikrometarskim mjerilom, neke od vrijednosti izlaze iz kontrolnih granica, ali raspon granica je i manji odnosno 0,22 mm. U primjeru se može zaključiti da je potrebno podesiti proces izrade dijelova kako bi se on doveo u stanje pod kontrolom. Kada podatci izlaze izvan kontrolnih granica u kontrolnim kartama, potrebno je potražiti uzrok tome.

Nakon utvrđivanja ili dovođenja procesa u stanje statističke kontrole, moguće je raditi daljnje analize poput procjene sposobnosti procesa.

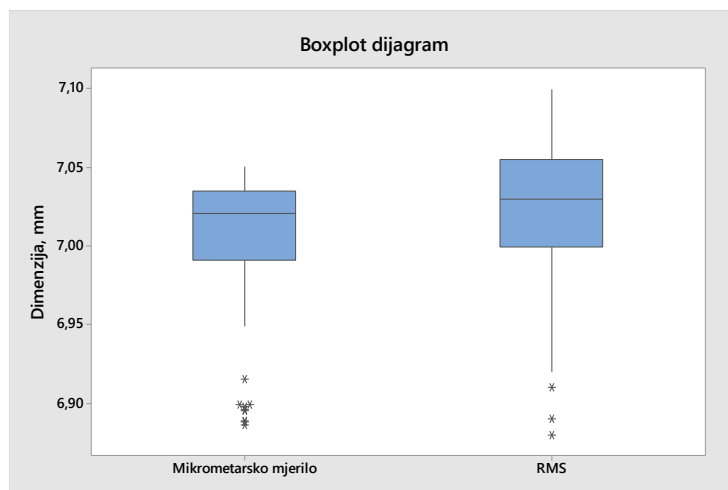
Osim navedenog prikaza, i boxplot dijagram može biti dobar prikaz za podatke dobivene izmjerama na ova dva sustava. Slika 5.18 pokazuje da je raspon rezultata dobivenih mjerenjem RMS-om veći od raspona rezultata dobivenih mikrometarskim mjerilom.



Slika 5.16 Kontrolna karta individualnih izmjera dobivenih RMS-om

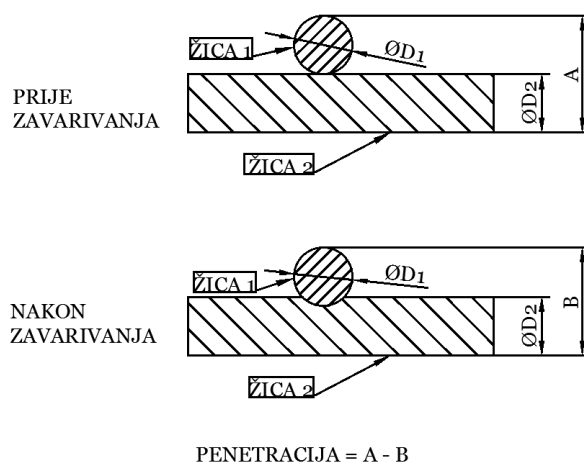


Slika 5.17 Kontrolna karta individualnih izmjera dobivenih mikrometarskim mjerilom

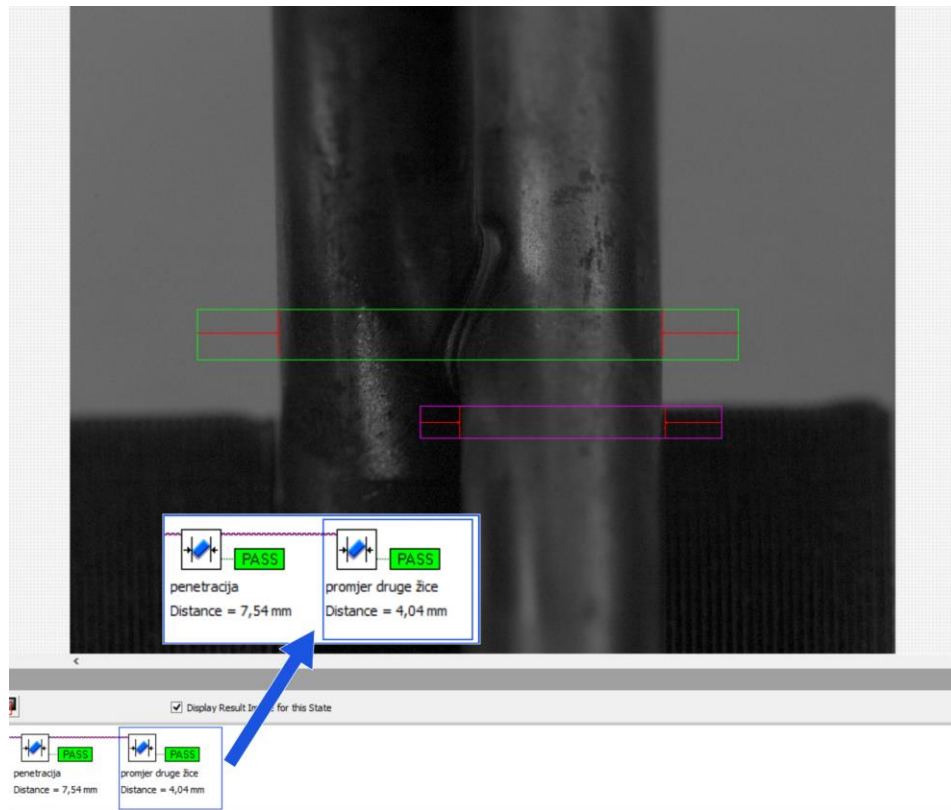


Slika 5.18 Boxplot dijagram usporedbe dva načina mjerenja

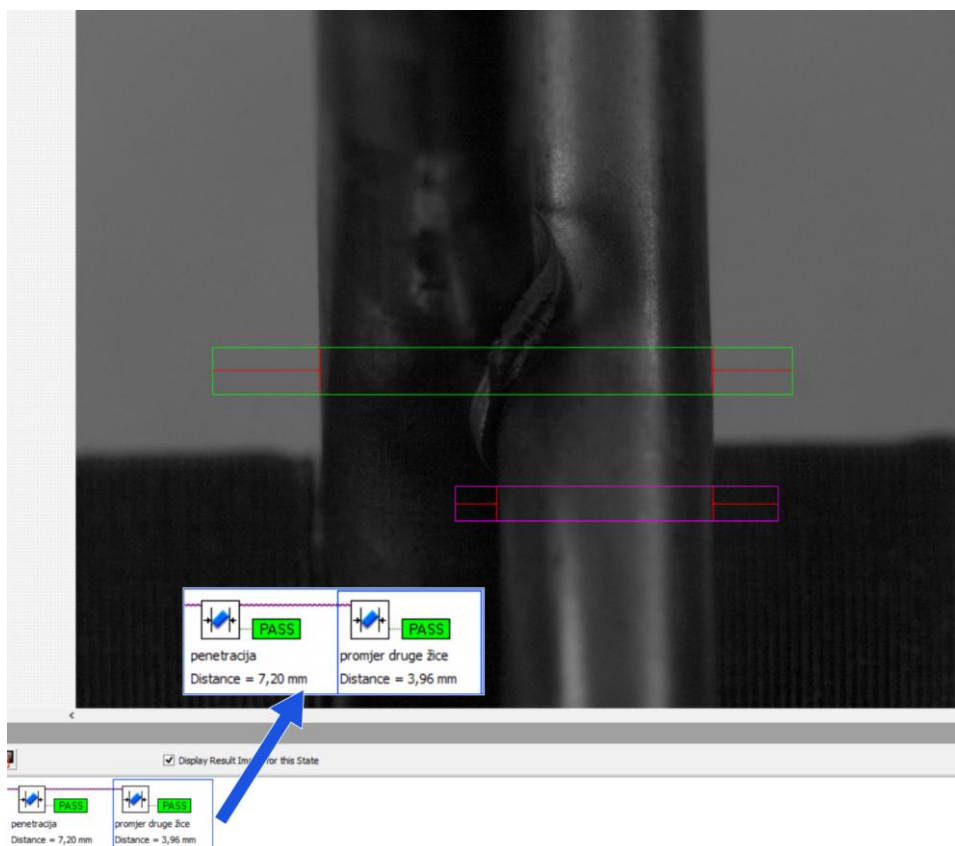
Dodatna prednost ovakvog predloženog sustava je da se iz jedne slike može istovremeno dobiti više podataka, primjerice poput dimenzije pojedine žice ukoliko je potrebno određivanje točne penetracije žice u žicu (slika 5.19), te dobivanje podataka o izgledu zavora (slika 5.20 i slika 5.21). Vidljivo je da se promjer pojedine žice razlikuje. Utjecajem raznih parametara prilikom proizvodnje žice, odrezivanja i na kraju zavarivanja žice pokazalo se da postoji raspon u dimenzijama promjera žice te je za točno određivanje penetracije potrebno osmisliti jednostavan način za mjerenjem svake pojedine žice nakon zavarivanja te njihove penetracije. Ovakav način provjere penetracije iziskuje veći vremenski period ukoliko se koristi konvencionalna metoda mjerenja mikrometarskim mjerilom. RMS se u ovom slučaju pokazao kao dobro rješenje, jer je osim navedenoga, zadovoljen još jedan zahtjev, a to je fotografija izgleda zavora. Fotografije samog izgleda i karakteristika koje će se procjenjivati temeljem izgleda zavora, predmet su daljnjih istraživanja.



Slika 5.19 Penetracija žice prilikom zavarivanja

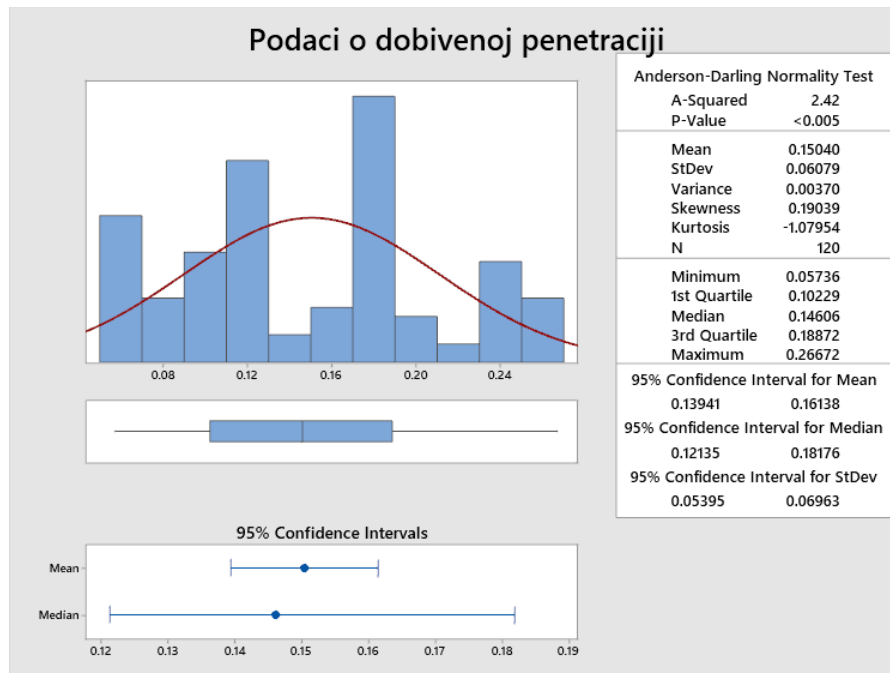


Slika 5.20 Primjena RMS-a



Slika 5.21 Primjena RMS-a

U realnom industrijskom okruženju postavio se zahtjev za mjerenjem penetracije 120 uzoraka iz grupe proizvoda 1. Uzorci su izmjereni na predloženom RMS-u te je njihov rezultat prikazan dijagramom na slici 5.22.



Slika 5.22 Primjer skupine podataka za izračun penetracije u realnom okruženju

5.2. Opis postupka mjerenja RMS-om na grupi proizvoda 2

Grupu 2 čine proizvodi kojima je potrebno odrediti dvije dimenzije (slika 5.23). Proizvodi su mjerne rašlje, a dimenzije koje treba provjeriti su dimenzije otvora „ide“ i otvora „ne ide“.



Slika 5.23 Proizvodi grupe 2

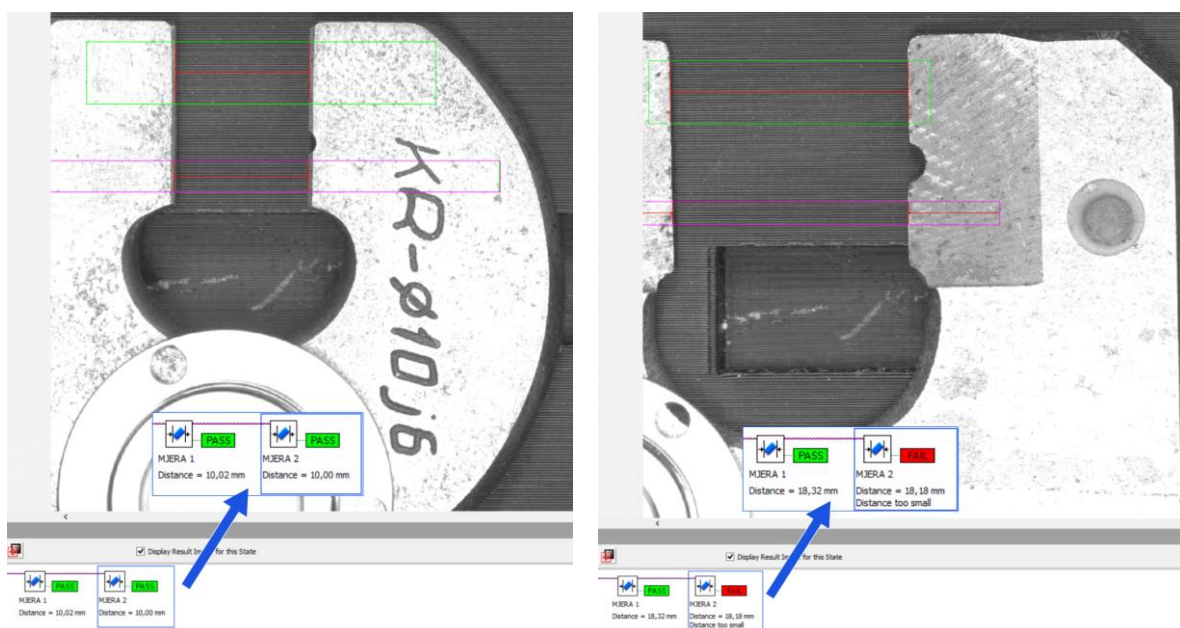
Promjenom grupe proizvoda, potrebno je rekonfigurirati RMS. Za grupu 2, RMS se postavlja na način da se za dobivanje slike proizvoda koristi samo kamera 1, postavlja se drugi modul za prihvat predmeta mjerenja, koristi se drugo osvjetljenje (promjena modula i pozicije pojedinih modula). Program je prilagođen za mjerenje zahtijevanih dimenzija promjenom postavki u softveru za obradu slika. Za umjeravanje se u softveru za obradu slika odabire umjeravanje etalonom E3.

Rezultati dobiveni mjerenjem zahtijevanih dimenzija na grupi 2 prikazani su u tablici 15.

Tablica 15 Rezultati mjerenja RMS-om na grupi 2

| Naziv | Mjera 1, mm | Mjera 2, mm |
|-------------------|-------------|-------------|
| Proizvod 1 | 20,04 | 20,00 |
| Proizvod 2 | 10,02 | 10,00 |
| Proizvod 3 | 17,02 | 17,00 |
| Proizvod 4 | 18,32 | 18,18 |

Primjeri dobivenih izmjera pojedinih proizvoda iz grupe prikazani su na slici 5.24. Mjera 1 prikazuje dimenziju na otvoru „ide“, dok mjera 2 prikazuje dimenziju na otvoru „ne ide“. U softveru su namještene zadane tolerancije koje određena mjera mora zadovoljiti te je dan prikaz iz softvera proizvoda koji su zadovoljili zadane tolerancije („*pass*“) i proizvoda koji nisu („*fail*“).



Slika 5.24 Primjer mjerenja proizvoda 2 i 4

5.3. Opis postupka mjerenja RMS-om na grupi proizvoda 3

Grupu 3 čine proizvodi - žetoni kojima je potrebno odrediti dimenziju promjera te visinu (slika 5.25).



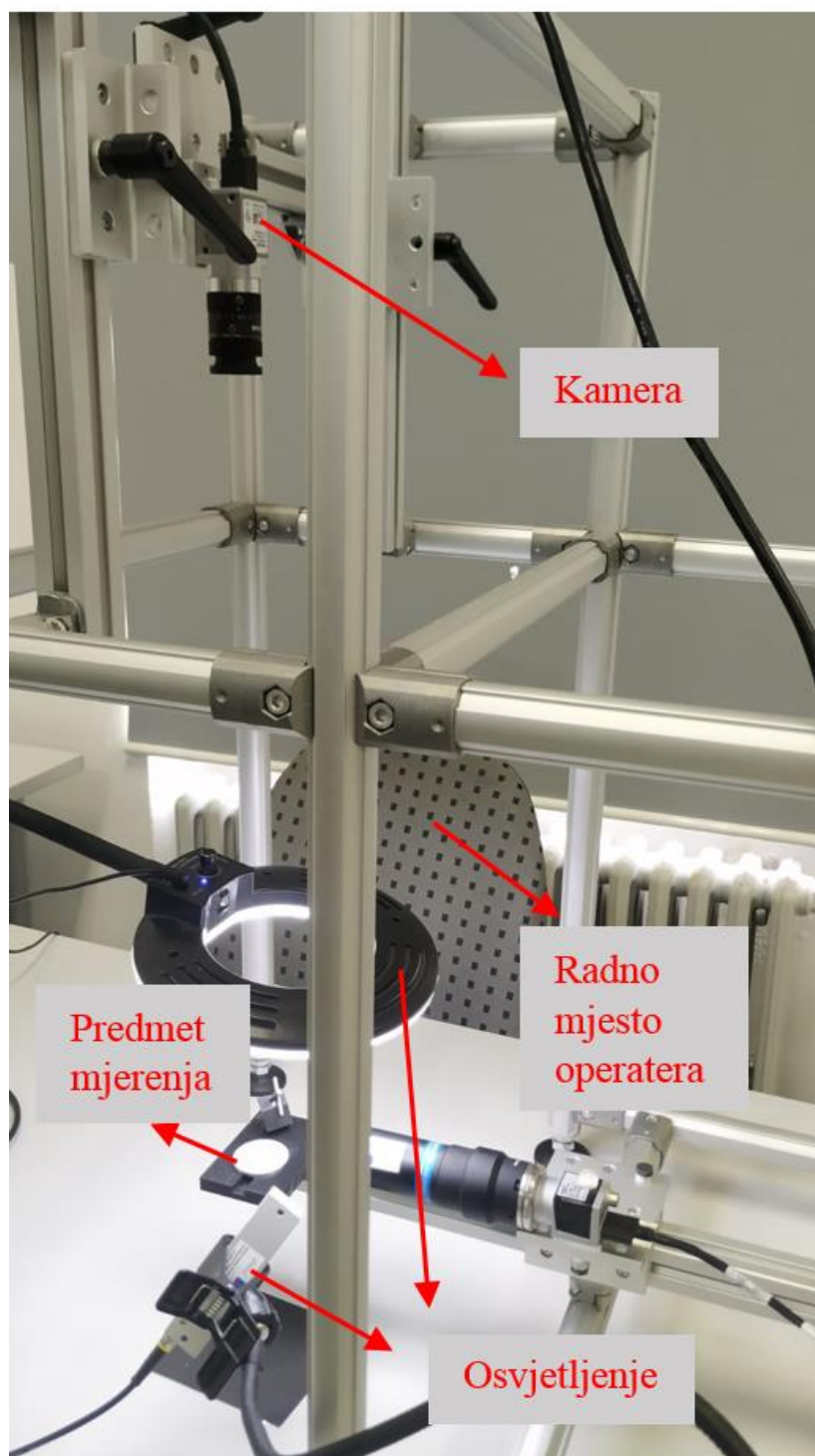
Slika 5.25 Proizvodi grupe 3

Za grupu 3 potrebno je rekonfigurirati RMS na način da se za dobivanje slike proizvoda (slika 5.26) koriste kamera 1 i kamera 2, modul za prihvatanje proizvoda ostaje isti, dodaje se drugo osvjetljenje u odnosu na konfiguraciju za grupu 2. U softveru za obradu slika se koristi program prilagođen za mjerenje zahtijevanih dimenzija promjera i visine. Za umjeravanje se u softveru odabire umjeravanje etalonima E1 i E2.

Rezultati dobiveni mjerenjem dimenzija proizvoda iz grupe 3 prikazani su u tablici 16.

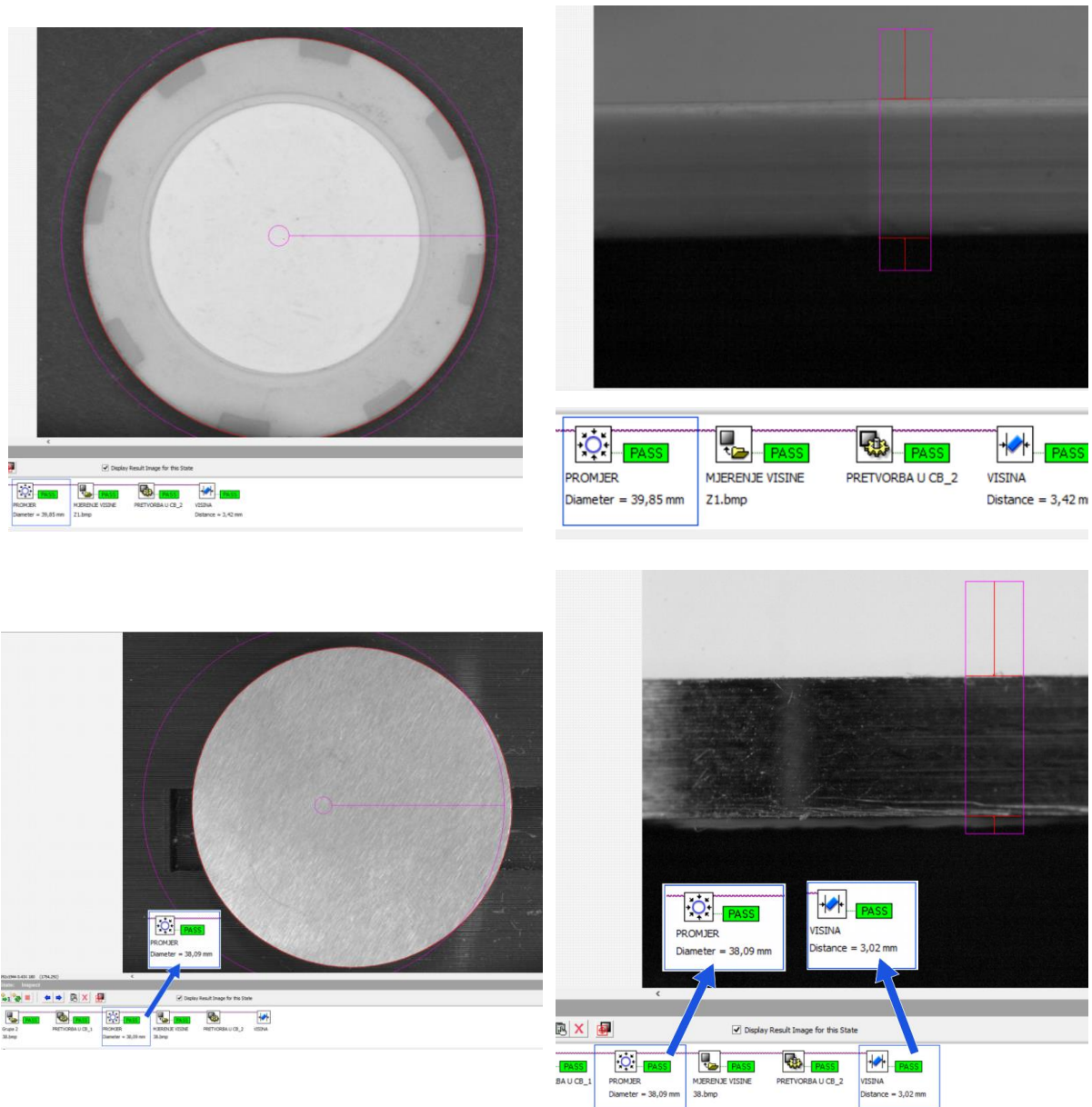
Tablica 16 Rezultati mjerenja RMS-om na grupi 3

| Naziv proizvoda | Promjer, mm | Visina, mm |
|-----------------|-------------|------------|
| Proizvod 5 | 40,10 | 2,98 |
| Proizvod 6 | 40,02 | 3,26 |
| Proizvod 7 | 39,92 | 3,40 |
| Proizvod 8 | 42,04 | 2,98 |
| Proizvod 9 | 38,09 | 3,02 |
| Proizvod 10 | 39,85 | 3,42 |



Slika 5.26 Postavke RMS-a za mjerenje proizvoda grupe 3

Primjeri dobivenih izmjera pojedinih proizvoda iz grupe 3 prikazani su na slici 5.27. Prikazana su dva različita proizvoda uz dobivene dimenzije koje su bile zahtijevane.



Slika 5.27 Primjer mjerenja proizvoda 10 – promjer i visina

RMS konfiguriran za grupu proizvoda 3 daje rezultate visine i promjera unutar kratkog vremenskog perioda (< 1 s/kom) te jasnom porukom na zaslonu daje prikaz proizvoda koji je ili nije unutar zahtijevane tolerancije („*pass*“ ili „*fail*“).

5.4. Analiza rezultata mjerenja

Prema prethodno opisanoj metodologiji projektiranja i umjeravanja, izveden je RMS i postavljen u Laboratoriju za tehnička mjerenja. Asortiman proizvoda na kojima je bilo potrebno provesti mjerenja je, prema prethodno opisanoj analizi u poglavlju 3.2., podijeljen u 3 grupe

proizvoda. Tijekom mjerenja konfiguracija rekonfigurabilnoga mjernog sustava je mijenjana ovisno o grupi proizvoda na kojoj je potrebno provesti mjerenja. Za odabrani primjer zahtijevana razina mjerne točnosti iznosi 0,1 mm. Provedena su mjerenja za sve tri grupe proizvoda. Dobiveni rezultati mjerenjem na RMS-u prve grupe proizvoda ujedno su provjereni i uspoređeni s mjerenjima dobivenim digitalnim mikrometarskim mjerilom. Ovom usporedbom utvrđeno je najveće odstupanje izmjera dobivenih RMS-om i mikrometarskim mjerilom od 0,04 mm što ovaj mjerni sustav čini prihvatljivim za provedbu mjerenja na zadanom asortimanu proizvoda. Ovim putem je utvrđeno da je izvedenim sustavom moguće provesti potrebna mjerenja uz zahtijevanu mjernu točnost u zadanom procesu izrade dijelova čime je potvrđena njegova primjenjivost u realnom proizvodnom okruženju.

Pored spomenutih značajki RMS-a u određivanju dimenzijskih značajki proizvoda, na odabranom primjeru je pokazana još jedna značajna prednost vizijskog sustava u odnosu na druge mjerne sustave za određivanje dimenzijskih značajki proizvoda, a to je mogućnost spremanja i kasnije analize slike izratka, u cilju određivanja kvalitete drugih, ne dimenzijskih značajki proizvoda.

6. ZAKLJUČAK

Istraživanja u ovom radu potaknuta su trendovima tržišta da se proizvodi individualiziraju prema potrebama i zahtjevima kupaca, a u skladu s time dešavaju se promjene u proizvodnim sustavima. Neizostavan dio svakog proizvodnog sustava je dio vezan uz osiguravanje kvalitete. Iako postupci osiguravanja kvalitete ne doprinose izravno vrijednosti proizvoda, potrebno ih je učiniti primjenjivima i dostupnima. Reakcije na pojavu pogreške proizvoda u današnje vrijeme trebaju biti što brže, pogrešku je potrebno otkriti i pravodobnom reakcijom smanjiti proizvodnju novih proizvoda s mogućnošću pojave nesukladnih jedinica. Proučavanjem potreba tržišta te potrebom za uvođenjem 100 % kontrole kvalitete proizvoda, uočena je potreba za osmišljavanjem koncepta rekonfigurabilnoga mjernog sustava. Svrha takvog sustava je da se prilagodi varijacijama proizvoda, a da pri tome ne utječe na brzinu provedbe kontrole, odnosno proizvodnje.

Istraživanja rekonfigurabilnih sustava u ovom radu čine podlogu za razvoj metodologije projektiranja te metodologije umjeravanja rekonfigurabilnog mjernog sustava koji će odgovoriti na postavljene zahtjeve. Istraživani su pojedini elementi projektiranja sustava prema zahtjevima te su isti obrazloženi i potkrijepljeni primjerom. Dan je pregled postojećih sustava koji su dominantni na tržištu te u usporedbi s potrebama tržišta naglasak je stavljen na sustave koji se prilagođavaju konceptu rekonfigurabilnosti.

Kroz drugo poglavlje ovog rada predstavljena su prikupljena saznanja o mogućnostima, karakteristikama i načelima rekonfigurabilnih sustava u sklopu proizvodnih sustava, te su ista primijenjena u razvoju metodologije projektiranja mjernih sustava. Mjerni i kontrolni sustavi mogu biti rekonfigurabilni u sklopu rekonfigurabilnog proizvodnog sustava, a mogu biti rekonfigurabilnog tipa neovisno o proizvodnom sustavu.

U trećem poglavlju analizirani su svi elementi koji zajedno čine cjelovitu metodologiju projektiranja rekonfigurabilnog mjernog sustava. Nakon preliminarnih istraživanja i predloženih koncepata oko formiranih grupa, projektiran je rekonfigurabilni mjerni sustav. U radu je prikazana metodologija odabira sustava sagledavanjem dostupnih resursa, proizvoda za koje je potrebno provesti kontrolu kvalitete i mogućnosti u skladu s postavljenim zahtjevima.

Za svaki od osnovnih koraka razvijene metodologije prikazane su ulazne i izlazne značajke, koje su detaljno analizirane kroz potpoglavlja. Na temelju prikazane metodologije, projektiran je rekonfigurabilni mjerni sustav. Odabir svakog pojedinog elementa RMS-a je prikazan u radu. Analizirane su spoznaje iz metodologije konstruiranja rekonfigurabilnih sustava te su istraženi utjecaji na formiranje potrebne grupe proizvoda za koje bi sustav bio konstruiran. Odabirom proizvoda koji čine grupu proizvoda, proveda se analiza dodjeljivanja svakog od proizvoda pojedinoj grupi. Istraženi su zahtjevi za mjerenjem pojedinih značajki te su formirane tri grupe proizvoda.

RMS je konstruiran na način da brzo odgovara na promjene u strukturi ili softveru, a sve u svrhu kako bi se prilagodio potrebnoj dinamici mjerenja i mjeriteljskim zahtjevima određene grupe proizvoda. Dizajnom sustava omogućena je skalabilnost sustava kao odgovor na eventualno postavljene zahtjeve za novim proizvodima koje će biti potrebno kontrolirati. Dizajn je prilagođen odabranim grupama proizvoda, no dovoljno je fleksibilan da se lako može promijeniti ili nadograditi. Dizajn sustava usklađen je sa svim karakteristikama i načelima rekonfigurabilnosti.

U odabranom primjeru mjerni sustav je baziran na osnovnim elementima fotogrametrije i strojnog vida. Radi potrebe evaluacije odabranog softvera, osmišljen je poseban način provjere jednog zatvorenog sustava za analizu slike, koji je također prikazan kroz ovo istraživanje.

U zaključku trećeg poglavlja prikazana je metodologija projektiranja RMS-a. Dio metodologije koji se odnosi na provedbu mjerenja projektiranim RMS-om detaljno je analiziran u idućem poglavlju.

Četvrto poglavlje prikazuje analizu pojedinih elemenata izvedbe mjerenja i umjeravanja sustava. Kroz potpoglavlja su analizirane značajke pojedinih koraka koji zajedno čine metodologiju umjeravanja RMS-a.

Izvedeni mjerni sustav da bi bio primjenjiv i da bi se na njemu mogla provoditi precizna mjerenja potrebno je umjeriti. Pojam umjeriti u sustavu koji koristi strojni vid u osnovi označava određivanje odnosa između vrijednosti broja piksela na dobivenoj slici i odnosa poznate vrijednosti mjerene fizikalne veličine prikazane u milimetrima. Prilikom umjeravanja određen je omjer px/mm te on iznosi $1 \text{ px} = 0,02 \text{ mm}$. Da bi umjeravanje bilo omogućeno potrebno je koristiti odgovarajući referentni predmet, odnosno etalon. Koncipiranom metodologijom za umjeravanje sustava, definirano je umjeravanje sustava za pojedinu grupu

proizvoda. Prikazana je primjena metodologije za određivanje etalona za umjeravanje točno određenog RMS-a. Koncipirani etalon je izrađen i u nastavku korišten kao primjer pri provedbi umjeravanja izvedenog sustava. Prikazanim načinom određivanja etalona, njegove izrade i primjene, smanjena je mogućnost pogreške sustava prilikom umjeravanja i kasnije samog postupka mjerenja.

Preliminarnim istraživanjima, slikajući razne predmete s različitim kombinacijama postavki sustava, došlo se do spoznaja o problemima koji utječu na kvalitetno mjerenje. Problemi vezani uz izgled predmeta, njegove karakteristike površine, obrade i dimenzija usko su povezane s odabirom modula u RMS-u. Odabir kamere i pripadajućeg objektiva bitni su za dobivanje kvalitetnog i primjenjivog mjernog sustava. Kako bi mjerenje bilo primjereno postavljenom zadatku po brzini provedbe i količini potrebno je koristiti etalon primjerenih karakteristika za potrebe umjeravanja sustava. Eksperimentalnim istraživanjima provedenim u radu prikazano je da etalon mora veličinom i oblikom zadovoljavati određene karakteristike predmeta koji se planira mjeriti ovakvim sustavom te je dan prikaz sa smjernicama o umjeravanju ovakvog sustava.

Kroz peto poglavlje prikazana je primjena projektiranog i izvedenog RMS-a na pojedinim predmetima iz asortimana proizvoda podijeljenih u 3 grupe. Tijekom mjerenja konfiguracija rekonfigurabilnog mjernog sustava je mijenjana ovisno o grupi proizvoda na kojoj je potrebno provesti mjerenja. Za odabrani primjer zahtijevana razina mjerne točnosti iznosi 0,1 mm. Dobiveni rezultati mjerenjem na RMS-u prve grupe proizvoda ujedno su provjereni i uspoređeni s mjerenjima dobivenim digitalnim mikrometarskim mjerilom. Provedena je analiza izvedenog sustava kojom je zaključeno da je moguće provesti potrebna mjerenja uz zahtijevanu mjernu točnost u zadanom procesu izrade dijelova, čime je potvrđena njegova primjenjivost u realnom proizvodnom okruženju.

Provedenim istraživanjem, na temelju koncipiranih metodologija, rekonfigurabilni mjerni sustav je projektiran i izveden, te su se na njemu provodila mjerenja u Laboratoriju za tehnička mjerenja.

Provedenim istraživanjem ostvaren je postavljeni osnovni cilj istraživanja:

- razvijena je metodologija projektiranja rekonfigurabilnoga mjernog sustava te je
- razvijena metodologija umjeravanja rekonfigurabilnoga mjernog sustava.

Obje razvijene metodologije, metodologije projektiranja RMS-a te metodologije umjeravanja RMS-a, u radu su pregledno prikazane kroz dijagram toka uz pripadajuća objašnjenja svakog koraka te popraćene primjerom.

Također, potvrđene su postavljene hipoteze i to:

(H1) – potvrđeno je da se projektiranjem rekonfigurabilnoga mjernog sustava može dobiti optimalni rekonfigurabilni mjerni sustav odnosno sustav koji zadovoljava sve postavljene mjerne zahtjeve u pogledu točnosti, brzine provedbe mjerenja, rekonfigurabilnosti i dr. sukladno navedenom u poglavlju 3.3.

(H2) – potvrđeno je da postupak umjeravanja ovisi o grupi proizvoda odnosno odabranim karakteristikama koje će se mjeriti. Dodatno je pokazano da je za uspješno umjeravanje potrebno koristiti odgovarajuće pripremljeni etalon.

Znanstveni doprinos provedenog istraživanja dan je u području mjeriteljstva primijenjenog kod rekonfigurabilnih mjernih uređaja koncipiranjem metodologije projektiranja rekonfigurabilnih mjernih sustava. Primjena koncipirane metodologije rezultira rekonfigurabilnim mjernim sustavom koji odgovara postavljenim zahtjevima s obzirom na točnost mjerenja uz zadovoljavanje vremena proizvodnog takta rekonfigurabilnog proizvodnog procesa te predviđenoj količini proizvoda. Nadalje, znanstveni doprinos je dan i u dijelu razvoja optimalnog modela za određenu grupu proizvoda te, posebice, razvojem metodologije umjeravanja rekonfigurabilnoga mjernog sustava na posebno definiranom i izrađenom etalonu.

Rezultati i provedeno istraživanje bi svoju primjenu trebali pronaći u proizvodnoj praksi što im daje osobitu vrijednost, u području analize rekonfigurabilnih sustava i njihove primjene te u istraživanjima i razvoju beskontaktnih mjerenja.

Na osnovi provedenih istraživanja predlaže se nastavak istraživanja dodavanjem novih modula u predloženi RMS kako bi imao mogućnost prilagodbe za potpuno nove grupe proizvoda te analizu njihovog utjecaja na proces umjeravanja rekonfigurabilnih sustava za novu grupu proizvoda.

Također se predlaže proširivanje istraživanja primjenom drugih metoda beskontaktnih mjerenja dodavanjem novih senzora posebno u cilju proširivanja mogućnosti mjerenja na kompleksnije površine predmeta. Predlažu se istraživanja vezana uz razvijanje prilagođenog softverskog

paketa za analizu i obradu slike unutar RMS-a te istraživanja vezana uz određivanje mjerne nesigurnosti RMS-a.

POPIS LITERATURE

- [1] *2-D Gaussian filtering of images - MATLAB imgaussfilt.* (n.d.). Internet 08/2019, <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imgaussfilt.html>
- [2] JCGM 200:2012 (2012). *Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM).*
- [3] Abdi, M. R., & Labib, A. W. (2010). A design strategy for reconfigurable manufacturing systems (RMSs) using analytical hierarchical process (AHP): A case study. *International Journal of Production Research*, 41(10), 2273–2299. <https://doi.org/10.1080/0020754031000077266>
- [4] Abdi, M. R., Labib, A. W., Abdiy, M. R., & Labiby, A. W. (2004). Grouping and selecting products: the design key of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs). *International Journal of Production Research*, 42(3), 521–546. <https://doi.org/10.1080/00207540310001613665>
- [5] Aggarwal, N., Doiron, T., & Sanghera, P. S. (1993). Vision System for Dial Gage Torque Wrench Calibration. *SPIE*, 2063, 77–85.
- [6] Aicardi, I., Chiabrandi, F., Maria Lingua, A., & Noardo, F. (2018). Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.006>
- [7] Al-Sultan, K. S. (1997). A hard clustering approach to the part family formation problem. *Production Planning & Control*, 8(3), 231–236. <https://doi.org/10.1080/095372897235280>
- [8] Anh-tuan Do, Kuo-Wei Lee, Wen-Hao Chang, Rung-Ye Lin, Quanf-Cherng Hsu (2017). *Three-dimensional measurement of spring-back characteristics for helical.* 118, 115–126. <https://doi.org/10.2495/CMEM170121>
- [9] Badali, A. P., Zhang, Y., Carr, P., Thomas, P. J., & Hornsey, R. I. (2005). Scale factor in digital cameras. *Photonic Applications in Biosensing and Imaging*, 5969(September 2005), 59692B. <https://doi.org/10.1117/12.632215>
- [10] Barhak, J., Djurdjanovic, D., Spicer, P., & Katz, R. (2005). Integration of reconfigurable inspection with stream of variations methodology. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4–5), 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.09.011>
- [11] *Basler Lens.* (n.d.). Internet 10/2022, <https://www.baslerweb.com/en/products/lenses/fixed-focal-lenses/basler-lens-c23-5028-5m-p-f50mm/>

- [12] Behringer Peter, & Dettmer, D. (2016). How Machine Vision Cameras Help Medicine. *Basler, I*, 1–10.
- [13] Beyerer, J., León, F. P., & Frese, C. (2016). *Machine Vision Automated Visual Inspection: Theory, Practice and Applications*. Springer. <https://doi.org/978-3-662-47794-6>
- [14] Bi, Z. M., Lang, S. Y. T., Shen, W., & Wang, L. (2008). Reconfigurable manufacturing systems: The state of the art. *International Journal of Production Research*, 46(4), 967–992. <https://doi.org/10.1080/00207540600905646>
- [15] Bi, Z. M., & Zhang, W. J. (2001). Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *International Journal of Production Research*, 39(13), 2867–2894. <https://doi.org/10.1080/00207540110054579>
- [16] Bi, Z., Xu, L. Da, & Wang, C. (2014). Internet of things for enterprise systems of modern manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1537–1546. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300338>
- [17] Bianco, G., Gallo, A., Bruno, F., & Muzzupappa, M. (2013). A comparative analysis between active and passive techniques for underwater 3D reconstruction of close-range objects. *Sensors*, 13(8), 11007–11031. <https://doi.org/10.3390/s130811007>
- [18] Böge, S. (2019). Vision Systems in the Context of Industry 4.0. *Basler* 1–5.
- [19] Bösemann, W. (2016). Industrial photogrammetry - Accepted metrology tool or exotic niche. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), 15–24. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-15-2016>
- [20] Brandner, M., & Thurner, T. (2005). Uncertainty in optical measurement applications: A case study. *Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement, AMUEM 2005*, 2005(3), 78–83. <https://doi.org/10.1109/amuem.2005.1594610>
- [21] Bright, G., & Davrajh, S. (2007). Automated apparatus for in-line inspection of mass produced custom parts. *Proceedings of the 2007 Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA 2007*.
- [22] Chen, I. M. (1994). *Theory and applications of modular reconfigurable robotic systems* (Doktorski rad). California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- [23] Chen, T., Catrysse, P. B., El Gamal, A., & Wandell, B. A. (2000). How small should pixel size be? *Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications*, 3965, 451. <https://doi.org/10.1117/12.385463>
- [24] Cheng, C. Y., Renn, J. C., Saputra, I., & Shi, C. E. (2022). Smart Grasping of a Soft Robotic Gripper Using NI Vision Builder Automated Inspection Based on

- LabVIEW Program. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 11(10), 737–744. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.10.737-744>
- [25] Coman, M., & Balan, R. (2010). Video camera measuring application using Matlab. *Solid State Phenomena*, 166–167, 139–144. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.166-167.139>
- [26] *Coordinate Measuring Machines / Mitutoyo America Corporation*. (n.d.). Internet 10/2022, <https://www.mitutoyo.com/products/coordinate-measuring-machines/>
- [27] Czichos, H. (2018). Measurement, testing and sensor technology: Fundamentals and application to materials and technical systems. In *Measurement, Testing and Sensor Technology: Fundamentals and Application to Materials and Technical Systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76385-9>
- [28] D'Apuzzo, N. (2006). Overview of 3D surface digitization technologies in Europe. *Three-Dimensional Image Capture and Applications VII*, 6056(August), 605605. <https://doi.org/10.1117/12.650123>
- [29] Dashchenko, A. I. (2006). Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories. In *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. <https://doi.org/10.1007/3-540-29397-3>
- [30] Davrajh, S., & Bright, G. (2010). An automated apparatus for dynamic inspection of mass-produced custom parts. *Assembly Automation*, 30(1), 47–55. <https://doi.org/10.1108/01445151011016064>
- [31] Davrajh, S., & Bright, G. (2013). Advanced quality management system for product families in mass customization and reconfigurable manufacturing. *Assembly Automation*, 33(2), 127–138. <https://doi.org/10.1108/01445151311306636>
- [32] Demant, C., Streicher-Abel, B., & Garnica, C. (2013). Industrial Image Processing. In *Industrial Image Processing* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33905-9>
- [33] *Dendrogram - Minitab*. (n.d.). Internet 01/2023, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/multivariate/how-to/cluster-observations/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/dendrogram/>
- [34] Dongyuan, G., Xifan, Y., & Qing, Z. (2008). Development of machine vision system based on BP neural network selflearning. *Proceedings of the International Conference on Computer Science and Information Technology, ICCSIT 2008*, 632–636. <https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2008.190>
- [35] Dutta, S., Pal, S. K., Mukhopadhyay, S., & Sen, R. (2013). Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(3), 212–232. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.02.005>
-

- [36] Eguia, I., Racero, J., Guerrero, F., & Lozano, S. (2013). Cell formation and scheduling of part families for reconfigurable cellular manufacturing systems using Tabu search. *Simulation*, 89(9), 1056–1072. <https://doi.org/10.1177/0037549713491590>
- [37] Elango, V., & Karunamoorthy, L. (2008). Effect of lighting conditions in the study of surface roughness by machine vision - An experimental design approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(1–2), 92–103. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0942-y>
- [38] ElMaraghy, H. A. (2009). Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. In *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-067-8>
- [39] Farid, A. M. (2017). Measures of reconfigurability and its key characteristics in intelligent manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(2). <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0983-7>
- [40] *Find minimum of function using genetic algorithm - MATLAB ga*. (n.d.). Internet 07/2019, https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html?searchHighlight=ga&s_tid=doc_srchtile
- [41] Fintel, R. von. (2015). Modern CMOS Cameras as Replacements for CCD Cameras. *Distribution, January*, 1–23. [https://doi.org/S0042-6989\(10\)00562-6](https://doi.org/S0042-6989(10)00562-6) [pii]r10.1016/j.visres.2010.11.009
- [42] Fonseka, C. L. S. C., & Jayasinghe, J. A. K. S. (2019). Implementation of an Automatic Optical Inspection System for Solder Quality Classification of THT Solder Joints. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 9(2), 353–366. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2864666>
- [43] Galan, R., Racero, J., Eguia, I., & Canca, D. (2007). A methodology for facilitating reconfiguration in manufacturing: The move towards reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(3–4), 345–353. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0461-2>
- [44] Goyal, K. K., Jain, P. K., & Jain, M. (2012). Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing system using NSGA II and TOPSIS. *International Journal of Production Research*, 50(15), 4175–4191. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.599345>
- [45] Gruen, A., & S.Huang, T. (2001). *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04567-1>
- [46] Gumasta, K., Kumar Gupta, S., Benyoucef, L., & Tiwari, M. K. (2011). Developing a reconfigurability index using multi-attribute utility theory. *International Journal of Production Research*, 49(6), 1669–1683. <https://doi.org/10.1080/00207540903555536>
-

- [47] Gupta, A., Jain, P. K., & Kumar, D. (2013). A novel approach for part family formation using K-means algorithm. *Advances in Manufacturing 2013 1:3, 1(3)*, 241–250. <https://doi.org/10.1007/S40436-013-0032-3>
- [48] *Hamamatsu Learning Center: Basic Properties of Digital Images*. (n.d.). Internet 11/2022, <https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/digitalimagebasics.html>
- [49] Han, J. H., Zhao, S. S., & Sun, W. (2007). Research on subpixel detecting on-line system based on machine vision for inner diameter of bearings. *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO*, 2049–2052. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2007.4522483>
- [50] Harding, K. (2013). Handbook of optical dimensional metrology. In *Handbook of Optical Dimensional Metrology*. CRC Press Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b13855>
- [51] Hassan, N., Davrajh, S., & Bright, G. (2011). Prioritization of part scheduling with modular quality control in hybrid manufacturing cells for mass customization. *IEEE AFRICON Conference, September*, 13–15. <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2011.6072168>
- [52] He, H., Li, H., Huang, Y., Huang, J., & Li, P. (2020). A novel efficient camera calibration approach based on K-SVD sparse dictionary learning. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107798>
- [53] Hemming, B. (2007). *Measurement Traceability and Uncertainty in Machine Vision Applications* (Doktorski rad). Helsinki University of Technology, Finland
- [54] Hemming, B., & Lehto, H. (2002). Calibration of dial indicators using machine vision. *Measurement Science and Technology*, 13(1), 45–49. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/1/306>
- [55] Ho, J. K. L., & Ranky, P. G. (1997). Object oriented modelling and design of reconfigurable conveyors in flexible assembly systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 10(5). <https://doi.org/10.1080/095119297131101>
- [56] Horvatić Novak, A. (2018). *Uspostavljanje sljedivosti kod računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu* (Doktorski rad). Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu.
- [57] Huang, T., Zheng, B., Zhang, J., Yi, C., Jiang, Y., Shui, Q., & Jian, H. (2021). Mango Surface Defect Detection Based on HALCON. *IAEAC 2021 - IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, 2021*, 2627–2631. <https://doi.org/10.1109/IAEAC50856.2021.9390783>
- [58] Huang, Y., McMurrin, R., Dhadyalla, G., Jones, R. P., & Mouzakitis, A. (2009). Model-based testing of a vehicle instrument cluster for design validation using
-

-
- machine vision. *Measurement Science and Technology*, 20(6).
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/065502>
- [59] *Image Processing in Industry 4.0 / Vision Campus*. (n.d.). Internet 03/2020,
<https://www.baslerweb.com/en/vision-campus/markets-and-applications/image-processing-industry-4-0/>
- [60] *ISO 5725-4:2020(en), Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 4: Basic methods for the determination of the trueness of a standard measurement method*. (n.d.). Internet 11/2022,
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5725:-4:ed-2:v1:en>
- [61] Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8), 651–666. <https://doi.org/10.1016/J.PATREC.2009.09.011>
- [62] Jovanovič, B., (2015). *Naprava za avtomatizirano kontrolno puš* (Magistarski rad). Maribor, Univerza v Mariboru.
- [63] Jurica Kuzmić. (2017). *Optimiranje evolucijskim algoritmima*.
http://repositorij.fsb.hr/7993/1/Kuzmić_2017_završni_preddiplomski.pdf
- [64] Katz, R. (2007). Design principles of reconfigurable machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(5–6), 430–439.
<https://doi.org/10.1007/s00170-006-0615-2>
- [65] Keser, T., Hocenski, Ž., & Hocenski, V. (2010). Intelligent machine vision system for automated quality control in ceramic tiles industry. *Strojarstvo*, 52(2), 105–114.
- [66] Koren, Y. (2010). The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems. In *Society*. John Wiley and Sons.
- [67] Koren, Y., Arbor, A., & Kota, S. (1999). *US Patent 5943750* (Patent No. 5943750).
- [68] Koren, Y., Gu, X., & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 121–136. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>
- [69] Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., & Van Brussel, H. (1999). Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48(2), 527–540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63232-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63232-6)
- [70] Koren, Y., & Shpitalni, M. (2010). Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 29(4), 130–141.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.01.001>
- [71] Krstajic, N., & Doran, S. J. (2006). *Physics in Medicine & Biology Focusing optics of a parallel beam CCD optical tomography apparatus for 3D radiation gel*
-

-
- dosimetry Focusing optics of a parallel beam CCD optical tomography apparatus for 3D radiation gel dosimetry.* <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/8/007>
- [72] Krygier, R. (2005). The Integration of Flexible , Reconfigurable Manufacturing with Quality. *3rd CIRP International Conference on Reconfigurable Manufacturing*, 1–3.
- [73] Łabudzki, R. (2011). The state of development of machine vision. *Tehnički Glasnik*, 5(1), 109–114.
- [74] Lee, S. W., Lee, S. Y., & Pahk, H. J. (2018). Precise edge detection method using sigmoid function in blurry and noisy image for tft-lcd 2d critical dimension measurement. *Current Optics and Photonics*, 2(1), 69–78. <https://doi.org/10.3807/COPP.2018.2.1.069>
- [75] Li, D., & Tian, J. (2013). An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(5), 538–541. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.12.008>
- [76] Li, W., Wu, J., Li, D., Tian, Y., & Tian, J. (2019). Telecentricity based measurement error compensation in the bilateral telecentric system. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 147, 106822. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.050>
- [77] Liao, G., & Xi, J. (2009). Pipeline weld detection system based on machine vision. *Proceedings - 2009 9th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, HIS 2009*, 3, 325–328. <https://doi.org/10.1109/HIS.2009.279>
- [78] Lina Zhang, A., Pei Wu, B., Tana Wuyun, C., Xinhua Jiang, D., Chuanzhong Xuan, E., & Yanhua Ma, F. (2018). Algorithm of sheep body dimension measurement and its applications based on image analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153(January), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.033>
- [79] Luke, E. A. (1993). Defining and measuring scalability. *Proceedings of Scalable Parallel Libraries Conference, SPLC 1993*, 183–186. <https://doi.org/10.1109/SPLC.1993.365568>
- [80] Maini, R., & Aggarwal, H. (2009). Study and comparison of various image edge detection techniques. *International Journal of Image Processing*, 3(1), 1–11.
- [81] Marković, M., Doboviček, S., Pavletić, D., & Runje, B. (2019). Concept of reconfigurable inspection system. *9 International Conference Mechanical Technologies and Structural Materials 2019*, (121). <https://www.bib.irb.hr/1024801>
- [82] Martin Gramatke. (2019). 2D or 3D Camera? Which 3D Camera Technology Fits Your Application?. *Basler*, 1–7.
-

-
- [83] Mehrabi, M. G., Galip Ulsoy, A., & Koren, Y. (2000). Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 1(1), 114–131. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2000.001330>
- [84] Mikac, T.(1994). *Optimizacija koncepta proizvodnog sustava* (Doktorski rad). Tehnički fakultet Rijeka, Sveučilište u Rijeci.
- [85] Mikac, T. (2004). *Organizacija i upravljanje proizvodnjom*. Tehnički fakultet Rijeka.
- [86] Mikac, T. (2007). *Planiranje i upravljanje proizvodnjom*. Tehnički fakultet Rijeka.
- [87] Milošević, M., Lukić, D., Borojević, S., Antić, A., & Đurđev, M. (2019). A Cloud-Based Process Planning System in Industry 4.0 Framework. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, April, 202–211. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18180-2_16
- [88] Moru, D. K., & Borro, D. (2021). Analysis of different parameters of influence in industrial cameras calibration processes. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 171, 108750. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108750>
- [89] NI Vision for LabVIEW User Manual. (2005). In *National Instruments*.
- [90] Niederjohann, D. B. (2014). Fundamentals of Image Processing Systems. *Distribution*, January, 1–23. [https://doi.org/S0042-6989\(10\)00562-6](https://doi.org/S0042-6989(10)00562-6) [pii]r10.1016/j.visres.2010.11.009
- [91] Nielson, P. C., & Kaufman, W. (1988). *Machine visual inspection device and method* (Patent No. 4,760,444).
- [92] Nozaki, T. (2007). *United States Patent* (Patent No. 7.239,735 B2).
- [93] Olabanji, O. M., & Mpofu, K. (2014). Comparison of weighted decision matrix, and analytical hierarchy process for CAD design of reconfigurable assembly fixture. *Procedia CIRP*, 23(C), 264–269. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2014.10.088>
- [94] *Opto-e*. (n.d.). Internet 05/2021, https://www.opto-e.com/media/downloads/docs/calibration_software_en.pdf
- [95] *Opto Engineering*. (n.d.). Internet 10/2022, <https://www.opto-e.com/en/products/tc2mhr-series/TC2MHRP016-C>
- [96] Pan, B., Yu, L., & Wu, D. (2013). High-Accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements with Bilateral Telecentric Lenses: Error Analysis and Experimental Verification. *Experimental Mechanics*, 53(9), 1719–1733. <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9774-x>
-

- [97] Peiponen, K.-E., Myllyla, R., & Priezzhev, A. V. (2009). Optical Measurement Techniques. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). Springer.
- [98] Pertuz, S., Puig, D., & Garcia, M. A. (2013). Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. *Pattern Recognition*, 46(5), 1415–1432. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.11.011>
- [99] *Product Definitions for Smart Manufacturing / NIST*. (n.d.). Internet 10/2022, <https://www.nist.gov/programs-projects/product-definitions-smart-manufacturing>
- [100] Renna, P. (2017). A Decision Investment Model to Design Manufacturing Systems based on a genetic algorithm and Monte-Carlo simulation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(6), 590–605. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2016.1187299>
- [101] Rodríguez-González, P., Rodríguez-Martín, M., Ramos, L. F., & González-Aguilera, D. (2017). 3D reconstruction methods and quality assessment for visual inspection of welds. *Automation in Construction*, 79, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.002>
- [102] Runje, B. (2014). *Teorija i tehnika mjerenja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb.
- [103] Santosi, Z., Budak, I., Sokac, M., Hadzistevic, M., & Vukelic, D. (2019). Influence of high dynamic range images on the accuracy of the photogrammetric 3D digitization: A case study. *Advances in Production Engineering And Management*, 14(3), 391–399. <https://doi.org/10.14743/apem2019.3.336>
- [104] Savio, E., De Chiffre, L., & Schmitt, R. (2007). Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2), 810–835. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.008>
- [105] Shahabi, H. H., & Ratnam, M. M. (2010). In-cycle detection of built-up edge (BUE) from 2-D images of cutting tools using machine vision. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(9–12), 1179–1189. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2180-y>
- [106] Shi, C., Zhang, J., & Teng, G. (2019). Mobile measuring system based on LabVIEW for pig body components estimation in a large-scale farm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156(November 2018), 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.042>
- [107] Shrivakshan, G. T. (2012). A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing. *International Journal of Computer Science Issues*, 9(5), 269–276.
- [108] Singh, A., Gupta, S., Asjad, M., & Gupta, P. (2017). Reconfigurable manufacturing systems: journey and the road ahead. *International Journal of Systems Assurance*
-

-
- Engineering and Management*, 8(s2), 1849–1857. <https://doi.org/10.1007/s13198-017-0610-z>
- [109] Steger, C., Ulrich, M., & Wiedemann, C. (2018). Machine Vision Algorithms and Applications. In *John Wiley & Sons* (2nd ed.).
- [110] Sun, Q., Hou, Y., & Tan, Q. (2016). A subpixel edge detection method based on an arctangent edge model. *Optik*, 127(14), 5702–5710. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.03.058>
- [111] Tang, C. H. H., Tang, H. E., & Tay, P. K. J. (2016). Low cost digital close range photogrammetric measurement of an as-built anchor handling tug hull. *Ocean Engineering*, 119, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.04.016>
- [112] Teubner, U., & Brückner, H. J. (2019). *Optical imaging and photography*. Walter de Gruyter GmbH.
- [113] Thomas, H. M., Devakumar, D., & Ravindran, P. B. (2007). *Three-dimensional image reconstruction for CCD camera based Optical Computed Tomography Scanner*. 2965–2967.
- [114] Tsai, M. J., & Ann, N. J. (2008). An automatic golf head robotic welding system using 3D machine vision system. *Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts, ARSO*. <https://doi.org/10.1109/ARSO.2008.4653620>
- [115] Tsai, R. Y. (1987). A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(4), 323–344. <https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087109>
- [116] *Turbo Stress Basler pilot GigE Cameras Help to Inspect Turbine Blades in Aircraft Engines*. (n.d.). Internet 01/2021, https://farazankavosh.com/wp-content/uploads/2019/03/BAS1102_Turbo_Stress.pdf
- [117] *umjeravanje | Hrvatska enciklopedija*. (n.d.). Internet 03/2021, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=63149>
- [118] Uran, V. (2021). *Utjecaj skalabilnosti na optimalno formiranje višepredmetnih rekonfigurabilnih proizvodnih sustava* (Doktorski rad). Tehnički fakultet Rijeka, Sveučilište u Rijeci.
- [119] *VDI/VDE 2634 Part 1*. (2002). Optical 3D measuring systems - Imaging systems with point-by-point probing.
- [120] *VDI/VDE 2634 Part 2*. (2012). Optical 3D measuring systems - Optical systems based on area scanning.
-

- [122] Veža, I. (2016). *Projekt - Inovativno pametno poduzeće Laboratorij Learning Factory na FESB-u*. Sveučilište u Splitu.
- [123] Vuković, A., Ikonić, M., & Doboviček, S. (2010). Reconfigurable Manufacturing System and the Need for New Taylorism. *Engineering Review*, 30 (2), 71–82.
- [124] Wang, Z., Bovik, A. C., & Lu, L. (2002). Why is image quality assessment so difficult? *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Orlando, FL, USA, 2002, pp. IV-3313-IV-3316, doi: 10.1109/ICASSP.2002.5745362.
- [125] *Web of Science [v.5.34] - Web of Science Core Collection Basic Search*. (n.d.). Internet 03/2020, http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do;jsessionid=A2E5554CFC294E4A365A251D4E680754?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=C1oR4az3eFemnBfL718&preferencesSaved=
- [126] Weisstein, E. W. (n.d.). *L²-Norm*. Wolfram Research, Inc. Internet 07/2019, <http://mathworld.wolfram.com/L2-Norm.html>
- [127] Wu, Y., Zhang, X., & Fang, F. (2020). Automatic Fabric Defect Detection Using Cascaded Mixed Feature Pyramid with Guided Localization. *Sensors*, 20(3), 871. <https://doi.org/10.3390/s20030871>
- [128] Xiao, G., Li, Y., Xia, Q., Cheng, X., & Chen, W. (2019). Research on the on-line dimensional accuracy measurement method of conical spun workpieces based on machine vision technology. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 148, 106881. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106881>
- [129] Xing, B., Eganza, J., Bright, G., & Potgieter, J. (2006). Reconfigurable manufacturing system for Agile manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 12(PART 1). <https://doi.org/10.3182/20060517-3-fr-2903.00265>
- [130] Yang, Y., Pan, L., Ma, J., Yang, R., Zhu, Y., Yang, Y., & Zhang, L. (2020). A High-Performance Deep Learning Algorithm for the Automated Optical Inspection of Laser Welding. *Applied Sciences*, 10(3), 933. <https://doi.org/10.3390/app10030933>
- [131] Zhang, Z., Chen, Z., Shi, J., Jia, F., & Dai, M. (2010). Surface roughness vision measurement in different ambient light conditions. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 39(1–3), 53–57. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2010.034730>
- [132] Ziou, D., & Tabbone, S. (1998). Edge detection techniques - an overview. *Advances in Mathematical Theory and Applications*, 8 (4), 537-559.
- [133] Zuperl, U., Radic, A., Cus, F., & Irgolic, T. (2016). Visual measurement of layer thickness in multi-layered functionally graded metal materials. *Advances in Production Engineering And Management*, 11(2), 105–114. <https://doi.org/10.14743/apem2016.2.213>
-

POPIS OZNAKA I KRATICA

| | |
|----------|--|
| f | fokus, žarišna daljina, mm |
| i_{ij} | razina sive boje na originalnoj slici |
| o_{ij} | intenzitet sive boje na pojedinom pikselu |
| u | udaljenost od objekta, mm |
| v | udaljenost od ravnine, mm |
| 2D | dvodimenzionalnost |
| 3D | trodimenzionalnost |
| AHP | analitički hijerarhijski procesi (engl. <i>analytic hierarchy process</i>) |
| AVIS | sustav automatske kontrole na temelju vizijskog sustava (engl. <i>Automated Visual Inspection System</i>) |
| CCD | (engl. <i>charge-coupled device</i>) |
| CIM | računalno integrirana proizvodnja (eng. <i>Computer-integrated manufacturing</i>) |
| CMOS | (engl. <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>) |
| CNC | računalom podržano numeričko upravljanje (engl. <i>computer numerical control</i>) |
| CPS | (engl. <i>Cyber – Physical System</i>) |
| CT | računalna tomografija (eng. <i>Computed Tomography</i>) |
| FPS | kadri u sekundi (engl. <i>frames per second</i>) |
| FS | fleksibilni sustav |
| GA | genetski algoritam |
| GIGE | (engl. <i>Gigabit Ethernet</i>) |
| ICT | informacijsko komunikacijske tehnologije (eng. <i>information and communications technology</i>) |
| IOT | Internet stvari (eng. <i>Internet of things</i>) |
| KMU | koordinatni mjerni uređaj |
| LED | svjetleća dioda (eng. <i>Light Emitting Diode</i>) |
| LS | linijski sustav |
| PLC | programabilni logički kontroler (eng. <i>programmable logic controller</i>) |

| | |
|-----|---|
| RGB | crvena, zelena, plava (eng. <i>red, green, blue</i>) |
| RMS | rekonfigurabilni mjerni sustav |
| RPS | rekonfigurabilni proizvodni sustav |
| RS | rekonfigurabilni sustav |
| R&R | Ponovljivost i obnovljivost (engl. <i>Repeatability and Reproducibility</i>) |
| USB | opća serijska sabirnica (eng. <i>Universal Serial Bus</i>) |
| VR | virtualna stvarnost (eng. <i>Virtual reality</i>) |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1.1 Trendovi u proizvodnji..... | 3 |
| Slika 2.1 Povezanost potreba tržišta i odabira proizvodnog sustava (Koren, 2010)..... | 7 |
| Slika 2.2 Područje primjene rekonfigurabilnih proizvodnih sustava (Dashchenko, 2006)..... | 11 |
| Slika 2.3 a) Primjeri modela i prototipa rekonfigurabilnih alatnih strojeva za promjenu kapaciteta b) Primjeri modela i prototipa rekonfigurabilnih alatnih strojeva za promjenu funkcionalnosti (Dashchenko, 2006)..... | 18 |
| Slika 2.4 Robot kao primjer rekonfigurabilnog stroja (Dashchenko, 2006)..... | 19 |
| Slika 2.5 Mjerni trnovi i rašlje – princip „ide/ne ide“..... | 20 |
| Slika 2.6 Specijalna mjerna naprava po principu „ide/ne ide“..... | 21 |
| Slika 2.7 Koordinatni mjerni uređaj (Coordinate Measuring Machines, 2022)..... | 21 |
| Slika 2.8 Odnos ukupnog broja izgubljenih podataka i količine izmjerenih podataka (Krygier 2005)..... | 22 |
| Slika 2.9 Model rekonfigurabilnog inspeksijskog stroja (Koren, 2010)..... | 23 |
| Slika 2.10 Rekonfigurabilni inspeksijski stroj sa svojim optičkim sensorima kojeg je predstavio (Koren, 2010)..... | 23 |
| Slika 2.11 Vizijski sustavi i analiza slike kao dio koncepta Industrije 4.0 (Basler AG, 2020) | 25 |
| Slika 2.12 Prikaz pojmova od 1970 - 2019 godine..... | 26 |
| Slika 2.13 Prikaz pojmova 2010 – 2019 godine..... | 26 |
| Slika 2.14 Osnovne komponente strojnog vida..... | 27 |
| Slika 3.1 Osnovni koraci dijagrama toka predložene metodologije projektiranja RMS-a..... | 30 |
| Slika 3.2 Dio dijagrama toka osnovnih koraka - postavljanje ciljeva i asortiman proizvoda .. | 32 |
| Slika 3.3 Dijagram toka određivanja grupe proizvoda..... | 34 |
| Slika 3.4 Dobiveni dendrogram za određivanje grupa proizvoda..... | 36 |
| Slika 3.5 Pojedini proizvodi dodijeljeni u imenovane grupe..... | 38 |
| Slika 3.6 Dio dijagrama toka osnovnih koraka - određivanje grupe..... | 39 |
| Slika 3.7 Tok postupka određivanja konfiguracije sustava..... | 39 |
| Slika 3.8 Ishikawa dijagramom prikazani utjecajni faktori na predloženi sustav..... | 40 |
| Slika 3.9 Princip promjene rekonfiguracije sustava..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Slika 3.10 Tok postupka projektiranja optimalnog rekonfigurabilnog sustava..... | 42 |
| Slika 3.11 Preliminarni koncept RMS-a | 43 |
| Slika 3.12 Dio dijagrama osnovnih koraka – traženje mogućih rješenja RMS-a..... | 44 |
| Slika 3.13 Usporedba metoda mjerenja (Savio et al., 2007) | 46 |
| Slika 3.14 Slikoviti prikaz postupka mjerenja i umjeravanja..... | 47 |
| Slika 3.15 Dio dijagrama osnovnih koraka – odabir mjerne metode | 48 |
| Slika 3.16 Karakteristike rekonfigurabilnosti odabranog RMS-a | 49 |
| Slika 3.17 Model rekonfigurabilnog sustava..... | 51 |
| Slika 3.18 Model (a) i montirani dijelovi postolja (b)..... | 51 |
| Slika 3.19 Transportna traka u Laboratoriju za inteligentne strojeve i obradne sustave | 52 |
| Slika 3.20 Način čitanja i rada CMOS senzora i CCD senzora (Fintel, 2015) | 53 |
| Slika 3.21 Profil (a) slikan običnim (b) i telecentričnim objektivom (c) (Beyerer et al., 2016) | 56 |
| Slika 3.22 Spojeni sustav senzora i objektiva 50 mm | 57 |
| Slika 3.23 Spojeni sustav senzora i telecentričnog objektiva..... | 57 |
| Slika 3.24 USB 3.0 za spajanje komponenti | 58 |
| Slika 3.25 Odabrana LED rasvjeta (a) prstenasta, (b) kompaktna | 58 |
| Slika 3.26 Rasvjeta postavljena na RMS | 59 |
| Slika 3.27 Modul za prihvata predmeta mjerenja iz jedne grupe proizvoda..... | 59 |
| Slika 3.28 Postolje u koje se postavlja modul za prihvata | 60 |
| Slika 3.29 Određivanje pozicije piksela | 61 |
| Slika 3.30 Detalji fotografije (Hamamatsu Learning Center: Basic Properties of Digital Images, 2022)..... | 62 |
| Slika 3.31 Nijanse sive boje (Hamamatsu Learning Center: Basic Properties of Digital Images, 2022)..... | 63 |
| Slika 3.32 Histogram (a) dobiven od prikazane slike (b)..... | 64 |
| Slika 3.33 Rub predmeta u skali sive boje | 65 |
| Slika 3.34 Umjetno stvorena slika koja predstavlja: a) idealni predmet slikan na crnoj podlozi i b) realniji prikaz predmeta na crnoj podlozi | 67 |
| Slika 3.35 Prikaz jednog rješenja s grafičkim prikazom u Matlabu..... | 70 |
| Slika 3.36 Vrijednosti pojedinih rješenja kroz 10 ponavljanja | 70 |
| Slika 3.37 Primjer prikaza rezultata u odabranom softveru NI Vision | 71 |
| Slika 3.38 Odabir konfiguracije RMS-a..... | 72 |

| | |
|---|-----|
| Slika 3.39 Izvedeni RMS postavljen na radnom stolu u laboratoriju..... | 73 |
| Slika 3.40 Postavke mjerenja dimenzije u odabranom softveru | 74 |
| Slika 3.41 Izvedba sustava i provedba mjerenja | 75 |
| Slika 3.42 Dijagram toka metodologije projektiranja RMS-a..... | 76 |
| Slika 4.1 Tok postupka mjerenja i umjeravanja RMS-a | 77 |
| Slika 4.2 Primjer referentnog predmeta (a) i gotovog proizvoda (b) (Davrajh and Bright 2010) | 81 |
| Slika 4.3 Primjer rezultata provjere sustava (Davrajh and Bright 2010) | 81 |
| Slika 4.4 11 planparalelnih graničnih mjerki nazivnih duljina od 5 mm do 20 mm | 83 |
| Slika 4.5 Set planparalelnih graničnih mjerki | 83 |
| Slika 4.6 Prikaz utvrđenog odstupanja mjerenja korištenjem različitih veličina etalona..... | 84 |
| Slika 4.7 Grupa proizvoda 2, predmeti kružnog oblika | 85 |
| Slika 4.8 Predmet postavljen na mjesto mjerenja | 85 |
| Slika 4.9 Primjer prikaza dimenzije promjera izmjenog predmeta..... | 86 |
| Slika 4.10 Prikaz utvrđenog odstupanja korištenjem etalona različite visine (predmet 5) | 87 |
| Slika 4.11 Prikaz utvrđenog odstupanja korištenjem etalona različite visine (predmet 3) | 88 |
| Slika 4.12 Zahtjevi etalona..... | 89 |
| Slika 4.13 Izrađeni etaloni..... | 91 |
| Slika 4.14 Predloženi etaloni za ove tri grupe proizvoda..... | 92 |
| Slika 4.15 Provedba mjerenja duljine planparalelne granične mjerke duljine 3,00 mm..... | 93 |
| Slika 4.16 Provedba mjerenja duljine planparalelne granične mjerke duljine 6,00 mm..... | 94 |
| Slika 4.17 Metodologija umjeravanja RMS-a..... | 95 |
| Slika 5.1 Grupa 1, žice različitih promjera spojene elektrootpornim zavarivanjem | 96 |
| Slika 5.2 Modul u koji je postavljen jedan proizvod iz grupe..... | 97 |
| Slika 5.3 Postavke kamere i osvjetljenja na postavljeni RMS | 97 |
| Slika 5.4 Grupa proizvoda koji se kontrolira s pripadajućim modulima | 98 |
| Slika 5.5 Slika dobivena telecentričnim objektivom i određenim postavkama RMS-a..... | 98 |
| Slika 5.6 Mjerenje grupe uzoraka RMS-om - prikaz u softveru s fokusom u sredini predmeta | 99 |
| Slika 5.7 Izmjere dobivene promjenom fokusa na RMS-u i izmjera na mikrometarskom mjerilu | 100 |
| Slika 5.8 Mjerenje predmeta 1 s digitalnim mikrometarskim mjerilom | 100 |
| Slika 5.9 Prikaz mjerenja proizvoda od strane operatera 1, prvi put..... | 101 |

| | |
|--|-----|
| Slika 5.10 Prikaz mjerenja proizvoda od strane operatera 1, drugi put | 101 |
| Slika 5.11 Prikaz mjerenja proizvoda od strane operatera 2, prvi put | 102 |
| Slika 5.12 Prikaz mjerenja proizvoda od strane operatera 2, drugi put | 102 |
| Slika 5.13 ANOVA tablica provedene analize, prikaz iz softvera..... | 104 |
| Slika 5.14 Grafička analiza podataka izmjerenih na RMS-u, prikaz iz softvera..... | 104 |
| Slika 5.15 Usporedba rezultata mjerenja mikrometarskim mjerilom i RMS-om | 106 |
| Slika 5.16 Kontrolna karta individualnih izmjera dobivenih RMS-om | 107 |
| Slika 5.17 Kontrolna karta individualnih izmjera dobivenih mikrometarskim mjerilom | 107 |
| Slika 5.18 Boxplot dijagram usporedbe dva načina mjerenja | 108 |
| Slika 5.19 Penetracija žice prilikom zavarivanja | 108 |
| Slika 5.20 Primjena RMS-a..... | 109 |
| Slika 5.21 Primjena RMS-a..... | 109 |
| Slika 5.22 Primjer skupine podataka za izračun penetracije u realnom okruženju..... | 110 |
| Slika 5.23 Proizvodi grupe 2 | 110 |
| Slika 5.24 Primjer mjerenja proizvoda 2 i 4..... | 111 |
| Slika 5.25 Proizvodi grupe 3 | 112 |
| Slika 5.26 Postavke RMS-a za mjerenje proizvoda grupe 3 | 113 |
| Slika 5.27 Primjer mjerenja proizvoda 10 – promjer i visina | 114 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|-----|
| Tablica 1 Usporedba tradicionalnih sustava s RPS-om (Dashchenko, 2006) | 10 |
| Tablica 2 Popis predmeta za koje je potrebno provesti kontrolu | 31 |
| Tablica 3 Prikaz unesenih vrijednosti zahtjeva u softver za obradu podataka Minitab | 35 |
| Tablica 4 Podaci dobivene analize u softveru Minitab | 37 |
| Tablica 5 Bitne karakteristike odabranih senzora | 54 |
| Tablica 6 Bitne karakteristike odabranih objektivna..... | 56 |
| Tablica 7 Karakteristike vrste fotografije obzirom na bitnoj dubini | 62 |
| Tablica 8 Rješenje dobiveno GA u usporedbi s točnim unaprijed poznatim rješenjem..... | 69 |
| Tablica 9 Usporedba rezultata u dva softvera | 71 |
| Tablica 10 Etaloni poznate nazivne duljine za umjeravanje sustava | 83 |
| Tablica 11 Dimenzije predmeta koji su mjereni i utvrđena odstupanja | 84 |
| Tablica 12 Rezultati provedenog testiranja radi provjere utjecaja operatera | 103 |
| Tablica 13 Kriterij za ocjenu kvalitete mjernog sustava R&R u tolerancijskom polju ili ukupnoj varijaciji (Runje, 2014) | 105 |
| Tablica 14 Kriterij za ocjenu kvalitete mjernog sustava R&R za postotak doprinosa (Runje, 2014)..... | 105 |
| Tablica 15 Rezultati mjerenja RMS-om na grupi 2 | 111 |
| Tablica 16 Rezultati mjerenja RMS-om na grupi 3 | 113 |

ŽIVOTOPIS

Maja Vlatković (rođ. Marković) rođena je 24.06.1989. u Zagrebu. U Zagrebu je pohađala i završila Osnovnu školu Žuti brijeg te XV. gimnaziju. Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva upisuje na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci koji završava 2014. godine te stječe akademski naziv sveučilišne prvostupnice (baccalaurea) inženjerke strojarstva. Iste godine upisuje Diplomski sveučilišni studij strojarstva također na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Obranom diplomskog rada „Primjena programa SolidWorks u tehnologiji oblikovanja lima“ pod mentorstvom prof. dr. sc. Gorana Cukora, 2016.godine, stječe akademski naziv magistra inženjerka strojarstva. Tijekom studija počinje raditi studentski posao u struci u tvrtki Kvarnercad, gdje se i zapošljava nakon završenog studija kao projektant u strojarstvu. U svibnju 2017.godine zapošljava se na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci na Zavodu za industrijsko inženjerstvo i management na radno mjesto asistenta s punim radnim vremenom. U listopadu 2017. godine upisuje Poslijediplomski doktorski studij iz Tehničkih znanosti, znanstveno polje Strojstvo, modul Osiguranje kvalitete i vođenje tehničkih sustava, na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci te od tada sudjeluje u znanstveno-istraživačkom radu. U svrhu znanstvenog usavršavanja, boravila je tri mjeseca na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na Katedri za mjerenja i kontrolu. Od listopada 2021. je voditeljica Laboratorija za tehnička mjerenja na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.

Sudjeluje na dva znanstveno-istraživačka projekta. Autorica je ili koautorica nekoliko radova objavljenih u domaćim i stranim znanstvenim i stručnim časopisima. Služi se engleskim jezikom u govoru i pismu.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

1. Vlatković, M; Pavletić, D; Ištoković, D; Fabić, Marko, Reconfigurable Measuring System for Quality Control of Cross-Wire Welding Group of Products // *Metals*, 12 (2022), 7; 1083, 13 doi:.org/10.3390/met12071083
2. Vlatković, Maja; Čabrijan, Ivana; Pavletić, Duško; Doboviček, Sandro, Measuring setdown output parameter of cross-wire welded mesh with reconfigurable measuring system // "Mechanical Technologies and Structural Materials 2022" / Jozić, Sonja ; Lela, Branimir ; Gjeldum, Nikola (ur.). Split: Croatian Society for Mechanical Technologies, 2022. str. 169-174
3. Čabrijan, Ivana; Vlatković, Maja; Krulčić, Elvis; Pavletić, Duško, Modelling of process parameters in cross-wire welding of S235 steel wire using Design of Experiments // "Mechanical Technologies and Structural Materials 2022" / Jozić, Sonja ; Lela, Branimir ; Gjeldum, Nikola (ur.). Split: Croatian Society for Mechanical Technologies, 2022. str. 13-20 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
4. Čabrijan, Ivana; Vrtovšnik, Domagoj; Vlatković, Maja; Pavletić, Duško, Analysis of the Cross-Wire Welding Process Stability // *Tehnički glasnik - Technical journal*, 16 (2022), 2; 240-245 doi:.org/10.31803/tg-20220407192100
5. Rabar, Denis; Pavletić, Duško; Doboviček, Sandro; Vlatković, Maja, Dry-docking performance measurement model – multi criteria non parametric approach // *Ships and Offshore Structures*, 17 (2021), 6; 1286-1293 doi:.org/10.1080/17445302.2021.1907085
6. Ištoković, David; Perinić, Mladen; Vlatković, Maja; Brezočnik, Miran, Minimizing Total Production Cost in a Hybrid Flow Shop: a Simulation-Optimization Approach // *International Journal of Simulation Modelling*, 19 (2020), 4; 559-570 doi:10.2507/ijssimm19-4-525
7. Fabić, Marko; Pavletić, Duško; Šterpin Valić, Graciela; Marković, Maja, Moderating impact of complexity on process management of turnaround project // *Management and Production Engineering Review*, 10 (2019), 4; 25-36 doi:10.24425/mper.2019.131442

8. Marković, Maja; Doboviček, Sandro; Pavletić, Duško; Runje, Biserka, Concept of reconfigurable inspection system // 9 International Conference Mechanical Technologies and Structural Materials 2019. Split, Hrvatska, 2019. str. (121)-(126)
9. Salopek, Goran; Dunder, Marko; Perinić, Mladen; Ištoković, David; Jurković, Zoran; Marković, Maja, Advantages of additive manufacturing in production of gears for planetary reducers // Proceedings of 8th International Conference "Mechanical Technologies and Structural Materials" MTSM 2018 / Jozić, Sonja ; Lela, Branimir (ur.). Split: Croatian Society for Mechanical Technologies, 2018. str. 167-172
10. Bazina, Tomislav; Marković, Maja; Pavletić, Duško; Jurković, Zoran, Primjena strojnog vida za detektiranje i prepoznavanje proizvoda dobivenih ubrizgavanjem u kalup // Mechanical Technologies and Structural Materials / Jozić, Sonja ; Lela, Branimir (ur.). Split: Hrvatsko društvo za strojarske tehnologije, 2017. str. 1-10