



**UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET  
Katedra za proizvodno mašinstvo  
Beograd, Srbija**



**33. SAVETOVANJE PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE  
SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM**

**33<sup>rd</sup> CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING OF SERBIA  
WITH FOREIGN PARTICIPANTS**

# **ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS**

Generalni pokrovitelj / Sponsor General

SKUPŠTINA GRADA BEOGRADA  
ASSEMBLY OF THE CITY OF BELGRADE

MINISTARSTVO ZA NAUKU I TEHNOLOŠKI RAZVOJ REPUBLIKE SRBIJE  
MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT, REPUBLIC OF  
SERBIA

Beograd, 16-17. jun 2009.

ZBORNİK RADOVA 33.SAVETOVANJA PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE, SA  
MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM  
Beograd, 2009.  
PROCEEDINGS OF THE 33<sup>rd</sup> CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING OF  
SERBIA WITH FOREIGN PARTICIPANTS  
Belgrade, 2009.

---

*Izdavač:* MAŠINSKI FAKULTET

Kraljice Marije 16  
11120 Beograd  
Srbija

*Publisher:* FACULTY OF MECHANICAL  
ENGINEERING  
Kraljice Marije 16  
11120 Belgrade  
Serbia

*Za izdavača:*  
*For publisher:*

Prof.dr Milorad MILOVANČEVIĆ, dekan Fakulteta

*Glavni i odgovorni urednik:* Prof.dr Ljubodrag TANOVIĆ  
*Editor:*

*Recenzentski tim:*  
*Reviewers team:*

Dr Milisav KALAJDŽIĆ, red.prof.  
Dr Pavao BOJANIĆ, red.prof.  
Dr Žarko SPASIĆ, red.prof.  
Dr Miroslav PILIPOVIĆ, red.prof.  
Dr Miloš GLAVONJIĆ, red.prof.  
Dr Vidosav MAJSTOROVIĆ, red.prof.  
Dr Dragan MILUTINOVIĆ, red.prof.  
Dr Ljubodrag TANOVIĆ, red.prof.  
Dr Bojan BABIĆ, red.prof.  
Dr Petar PETROVIĆ, red.prof.  
Dr Zoran MILJKOVIĆ, vanr.prof.  
Dr Radovan PUZOVIĆ, docent

*Tehnička obrada:*  
*Technical treatment:*

Mr Mihajlo Popović  
Nikola Slavković, dipl.ing.  
Goran Mladenović, dipl.ing.

*Rukopis predat u štampu:*

01.06.2009. godine

*Manuscript submitted for publication:*

June 01.2009

*Izdanje:*

prvo

*Printing:*

1<sup>st</sup>

*Tiraž:*

200 primeraka

*Circulation:*

200 copies

Odobreno za štampu odlukom dekana  
128/09 od 25.05.2009. godine

*Štampa:* Planeta print doo

*Printed by:* 11000 Beograd, Ruzveltova 10, tel.: 011 3088 129

**ISBN: 978-86-7083-662-4**

---

Izdavanje Zbornika radova, organizovanje i održavanje 33. Savetovanja proizvodnog mašinstva Srbije pomogao je pokrovitelj **Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije**  
Financing of the Proceedings was sponsored by the **Ministry of Science and Technological Development of the Republic of Serbia**

---

<b>Čiča, Đ., Zeljković, M., Golubović, V., Globočki Lakić, G.</b> IDENTIFIKACIJA PARAMETARA VEZE DINAMIČKIH SISTEMA KORIŠĆENJEM FUNKCIJE FREKVENTNOG ODZIVA .....	165
<b>Simonović, S.</b> KONSTRUISANJE ZA FLEKSIBILNU MASOVNU PROIZVODNJU .....	169
<b>Kheifetz, M., Koukhta, S., Liakhovich, A., Alekseeva, T.</b> DESIGNING OF MANUFACTURING PROCESSES ON THE BASIS OF USE STRUCTURAL ANALYSIS .....	173
<b>Pejović, B., Todić, A., Mičić, V.</b> ANALIZA DINAMIČKOG OPTEREĆENJA KOD PRENOSNIKA MAŠINA ALATKI U PRELAZNOM PERIODU .....	177
<b>Janković, M., Munćan, J.</b> ANALIZA ČVRSTOĆE VRATILA I OSOVINA I TENDENCIJA NJENOG USAVRŠAVANJA .....	183

## SEKCIJA C / SECTION C:

<b>Pilipović, M., Spasić, Ž.</b> VIRTUELNA PROIZVODNJA-VIRTUELNO PROIZVODNO MAŠINSTVO? ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> )	189
<b>Dimić, Z., Kvirgić, V., Živanović, S., Krošnjar, A.</b> KONCEPT UPRAVLJANJA PETOOSNOG VERTIKALNOG STRUGARSKOG OBRADNOG CENTRA UPRAVLJAČKIM SISTEMOM OTVORENE ARHITEKTURE .....	195
<b>Jurković, Z., Brezočnik, M., Sekulić, M.</b> MODELIRANJE PROCESA OBRADE REZANJEM PRIMENOM GENETSKIH ALGORITAMA .....	199
<b>Erić, M., Tadić, B., Mitrović, S.</b> MOGUĆI PRAVCI OSTVARIVANJA REINŽENJERINGA TEHNOLOŠKIH PROCESA MALIH PREDUZEĆA .....	203
<b>Sovilj, B., Brezočnik, M., Sovilj Nikić, I., Kovač, P.</b> MODELIRANJE FUNKCIJE POSTOJANOSTI ALATA PRIMENOM GENETSKOG ALGORITMA I PLANA EKSPERIMENTA PRI IZRADI PROFILA .....	207
<b>Drndarević, D., Petrović, S., Milivojević, M., Panić, S.</b> MODELOVANJE PROCESA METALURGIJE PRAHA POMOĆU NEURONSKIH MREŽA.....	211
<b>Jovanović, J., Đukić, R.</b> UPRAVLJANJE PROIZVODNIM PROCESIMA KORIŠĆENJEM APLIKATIVNOG SOFTVERA MS PROJECT.....	215
<b>Petrović, P., Jakovljević, Ž.</b> 3D DIGITALIZACIJA OBJEKATA KOMPLEKSNE GEOMETRIJE INTEGRACIJOM LASERSKOG TRIANGULACIONOG SENZORA I INDUSTRIJSKOG ROBOTA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	219
<b>Đukić, R., Bradić, Z., Jovanović, J., Stefanović, M.</b> PLANIRANJE PROIZVODNJE SLOŽENOG PROIZVODA.....	225
<b>Movrin, D., Skakun, P., Vilotić, D., Plančak, M., Maravić, I., Jovičić, R.</b> OPTIMIZACIJA PROCESA KOVANJA PNEUMATSKE STEZALJKE NUMERIČKOM SIMULACIJOM.....	229
<b>Jovišević, V., Jokanović, S., Borojević, S.</b> MODELIRANJE I SIMULACIJA PROIZVODNIH PROCESA PRIMJENOM PROGRAMSKOG SISTEMA TECNOMATIX PLANT SIMULATION .....	233
<b>Cvetković, S.</b> MODELIRANJE SISTEMA TOKOVA MATERIJALA .....	237
<b>Randelović, S., Milosavljević, P., Stanković, B.</b> SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA ALUMINIJUMA PRIMENOM FEM ADAPTIVNIH METODA ....	241
<b>Koreshkov, V., Kheifetz, M., Liakhovich, A., Tochilo, V.</b> COMBINED PROCESSING CONTROL ON THE BASIS OF STATISTIC AND STRUCTURAL ANALYSIS.....	245
<b>Brzaković, R., Marjanović, Z.</b> RAČUNARSKI SISTEMI ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNjom.....	249

### 3D DIGITALIZACIJA OBJEKATA KOMPLEKSNE GEOMETRIJE INTEGRACIJOM LASERSKOG TRIANGULACIONOG SENZORA I INDUSTRIJSKOG ROBOTA

*Rezime: U okviru ovog rada izlažu se konceptualni okviri nove klase metroloških sistema baziranih na integraciji industrijskog robota i laserskih triangulacionih senzora za beskontaktno dimenziono merenje. Navodi se osnovna arhitektura sistema, razmatraju ključni aspekti sprege ova dva sistema i navode metodološki okviri za obradu senzorskih signala i generisanja 3d digitalnog modela skeniranog objekta složene prostorne geometrije. U cilju provere praktične upotrebljivosti izgrađena je demonstraciona laboratorijska instalacija na kojoj su sprovedeni odgovarajući eksperimenti i provere.*

*Ključne reči: Industrijski robot, laserski triangulacioni senzor, 3d digitalizacija*

### 3D DIGITALIZATION OF OBJECTS HAVING COMPLEX GEOMETRY USING INTEGRATED LASER TRIANGULATION SENSOR AND INDUSTRIAL ROBOT

*Resume: This paper gives conceptual framework for new class of metrology systems based on integration of industrial robot and laser triangulation sensors for contactless dimensional measurement. The basic architecture of system is given together with the key points of the interface of these two systems and methodological framework for sensor signals processing and generation of 3D digital model of scanned object with complex spatial geometry. For the purpose of practical verification, laboratory installation is developed and experiments were carried out.*

*Key words: Industrial robot, laser triangulation sensor, 3D digitalization*

#### 1. UVOD

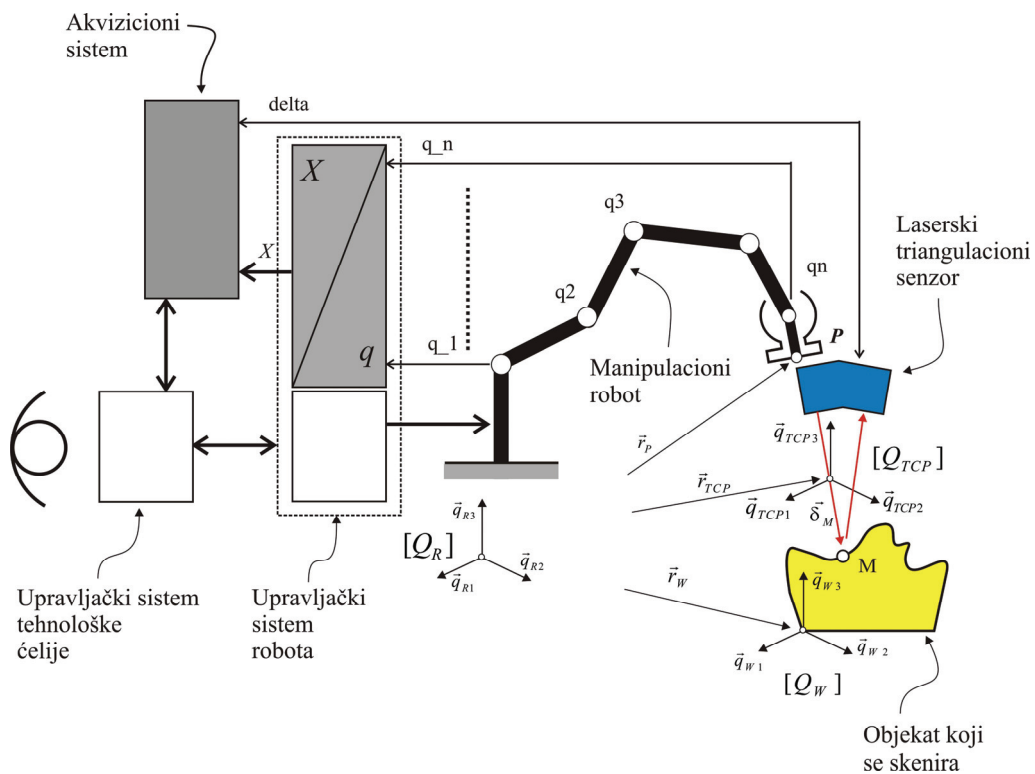
Ekstremno male serije i ekstremno visoka varijantnost proizvoda, koja je karakteristična za aktuelno stanje tržišta u kontekstu masovne personalizacije proizvoda, nameće pred savremene proizvodne sisteme, posebno u delu procesa završne montaže, delikatne tehnološke zahteve, među kojima je jedan od najkritičnijih identifikacija kvaliteta geometrije dela, komponente ili neke međufaze u formiranju sklopa koji se montira. Savremeni standardi kvaliteta nameću potrebu da se praktično nad svakim delom/komponentom koji se uvodi u proces mora sprovesti neka vrsta identifikacije njegovih geometrijskih svojstava. Slično je i sa sklopom koji se montira, gde se gotovo za sve međufaze takođe sprovodi identifikacija ostvarenih geometrijskih svojstava, prepoznaju odstupanja od nominala i sprovode korektivne intervencije ukoliko su one neophodne. Ovo je tipična situacija za mnoge industrije, počev od industrije automobila, bele tehnike, elektronike, pa do proizvoda kao što su zaverene metalne konstrukcije [6]. Kod zavarenih metalnih konstrukcija, gde se proces zavarivanja javlja kao jedan od osnovnih procesa tehnologije montaže, identifikacija geometrije je ključni zahtev sa aspekta izvodljivosti procesa, ostvarenog kvaliteta finalnog proizvoda i ekonomičnosti proizvodnje u celini.

Ugradnjom optičkog senzora na vrh standardnog industrijskog robota, najčešće antropomorfne konfiguracije, dobija se moćan tehnološki sistem, izuzetne fleksibilnosti i izuzetne tačnosti, sa potencijalom realizacije jedne vrlo široke klase tehnoloških zadataka za domen dimenzione metrologije u industrijskim uslovima, direktno na proizvodnoj liniji. Očigledan tehnološki potencijal koji nastaje ovakvom simbiozom istovremeno otvara niz inženjerskih zadataka i izazova. Rešavanje ovih zadataka je neophodan uslov za njegovu praktičnu valorzaciju u realnim

industrijskim uslovima. Ti zadaci se mogu svrstati u sledeće grupe:

- Izbor optimalnog senzorskog sistema za konkretan slučaj primene;
- Planiranje optimalne trajektorije i profila brzine, posebno razvoj interaktivnih alata za generisanje trajektorije na bazi nominalnog geometrijskog objekta koji se skenira;
- Izgradnja virtuelnog metrološkog modela sistema robot-senzor-objekat koji se skenira za potrebe simulacije radnog zadatka robota i senzorskog sistema;
- Obrada senzorskih signala i generisanje ravanskog ili prostornog modela skeniranog objekta;
- Autonomna kompenzacija greške pozicije i orijentacije objekta koji se skenira, uključujući i zadatak prepoznavanja i lociranja objekta koji se skenira u radnom prostoru robota;
- Kalibracija sistema i mapiranje i kompenzacija greške robota.

Tehnologija beskontaktnih optičkih senzora koji su pogodni za primenu u konkretnom slučaju nudi sledeće mogućnosti: 1) tačkasti CCD ili PSD laserski sistemi bazirani na jednostrukoj ili dvostrukoj optičkoj triangulaciji, 2) konfokalni tačkasti laserski sistemi, 3) CCD ili CMOS profilometarski sistemi bazirani optičkoj triangulaciji i 4) triangulacioni sistemi sa struktuiranim (kodiranim) izvorom bele svetlosti. Pregled prethodno navedenih senzorskih tehnologija navodi se u okviru [7] i [2]. Svi navedeni senzorski sistemi su kompaktni i jednostavno se ugrađuju na vrh robota. Sa metrološke tačke gledišta, industrijski robot u ovakvom sistemu ima funkciju programabilne platforme za kretanje/manipulaciju senzorskog sistema u prostoru. U mnogim situacijama zahteva se kombinacija dva različita senzorska sistema čime



Slika 1: Koncept robotizovanog mernog sistema.

se dobijaju hibridna rešenja sa sasvim novim, unapređenim metrološkim performansama.

U okviru ovog rada saopštava se deo rezultata koji su ostvareni u okviru projekta MA14035 INTOSA<sup>1</sup> u okviru koga su razvijene konceptualne osnove jednog robotizovanog sistema za 3d digitalizaciju objekata kompleksne geometrije na bazi CCD laserskog senzora sa tačkastom optičkom triangulacijom za primenu na linijama za montažu u automobilske industriji i za kontrolu geometrije otkovaka u okviru robotizovanih ćelija za obradu kovanjem. Praktična upotrebljivost ovog koncepta proverena je i demonstrirana u laboratorijskim uslovima u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu.

## 2. KONCEPT SISTEMA

Merni sistem se sastoji iz: 1) industrijskog robota odgovarajuće kinematske konfiguracije, 2) laserskog triangulacionog senzora i 3) akvizicionog sistema za kondicioniranje senzora i prikupljanje podataka (slika 1). Senzor se priključuje na vrh robota,  $P$ , preko odgovarajućeg adaptera. Mada je u opštem slučaju senzor moguće priključiti na proizvoljan način, iz praktičnih razloga pogodno je da se senzor ugradi tako da se obezbedi kolinearost i/ili ortogonalnost sa glavnom osama simetrije terminalne priključne ploče robota.

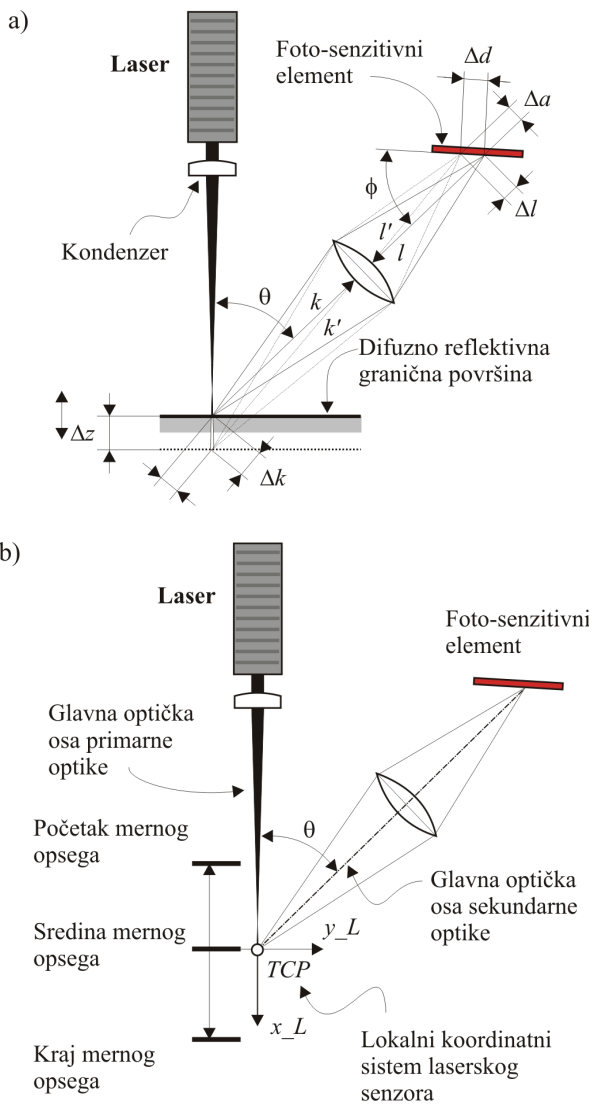
Tipična konstrukcija laserskog senzora sa optičkom triangulacijom prikazana je na slici 2. Princip rada senzora je u osnovi jednostavan. Poluprovodnički laser male snage, najčešće sa maksimalnom snagom od 1mW generiše monohromatsku koherentnu svetlost koja se kroz primarni optički sistem kolimira na površinu objekta čija se površina skenira. Optička osa primarnog optičkog sistema je značajna u tehnološkom smislu, jer se za nju vezuje jedna od osa

lokalnog koordinatnog sistema. Emitovani svetlosni snop prečnika od 10 do 100 $\mu$ m, reflektuje se u svim pravcima, pokoravajući se Lambertovom zakonu difuzne refleksije [4]. Jedan deo reflektovane svetlosti reflektuje se i u pravcu optičke ose sekundarnog optičkog sistema, koji zahvaćeni deo svetlosti fokusira na optoelektrični pretvarač. Tačka na koju pada fokusirana svetlost zavisi od udaljenosti površi objekta koji se skenira. Primenom triangulacione geometrije se na osnovu informacije o lokaciji te tačke u odnosu na lokalni koordinatni sistem linijskog pretvarača izračunava nepoznata distanca. Primenom visokorezolutnih linijskih CCD ili CMOS digitalnih pretvarača, uz odgovarajuće algoritme za primarno procesiranje senzorskog signala ostvaruje se rezolucija i tačnost na podmikronskom nivou. Brzina skeniranja se kreće od nekoliko stotina odmeraka u sekundi pa do nekoliko desetina kHz. Triangulacioni senzori ove vrste se odlikuju velikom robusnošću i metrološkom stabilnošću. U zavisnosti od izabranih konstrukcionih karakteristika optičkog sistema senzora, ostvaruju se različiti merni opsezi, kao i njihova projekcija u odnosu na telo senzora (*stand off distance*).

U tehnološkom smislu, kod određivanja TCP robota u konkretnom slučaju primene, pogodno je da se jedna od osa poklopi sa glavnom osom primarnog optičkog sistema, i da se za koordinatni početak lokalnog koordinatnog sistema laserskog senzora izabere tačka sredine mernog opsega. Ovu činjenicu treba koristiti kod planiranja trajektorije robota, tako što treba težiti da se TCP odnosno, koordinatni početak lokalnog koordinatnog sistema laserskog senzora uvek nađe na površini objekta koji se skenira. Drugi zahtev, koji je od posebnog značaja za tačnost ukupnog mernog sistema, vezan je za ograničenje koje nameće koncept optičke triangulacije. Modeliranje i kalibracija laserskog senzora se uvek izvode pod uslovom da je glavna osa emitovanog i kolimiranog laserskog snopa ortogonalna na površinu objekta čija se distanca meri. Odstupanje od ortogonalnosti degradira tačnost laserskog sistema, što ima svoje jasno utemeljenje u Lambertovom zakonu difuzne refleksije. Pored toga, inklinacija merene površi smanjuje energiju reflektovane

<sup>1</sup> Projekat MA14035: **Primena inteligentnih senzorskih sistema u razvoju integrisane automatizacije realnih i virtuelnih procesa proizvodnog preduzeća - INTOSA**, dvogodišnji projekat za oblast tehnološkog razvoja koji finansijski podržava Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije

svetlosti, što u određenim slučajevima može da ima drastične reperkusije na rad pretvaračkog sklopa senzora, koji zbog nedovoljne pobude može da ostane bez validnog merenja. Generalno pravilo je da inklinacija bude unutar intervala od  $\pm 15^\circ$ . Ovo je posebno značajno kada objekat poseduje jako reflektivnu površinu i/ili površinu sa izraženom teksturom. Za slučaj referentne površine od belog papira, inklinacija u navedenom intervalu generiše grešku od 0.2% mernog opsega, što za slučaj mernog opsega od 100 mm iznosi čak 200 $\mu$ m, što se mora smatrati respektivnom greškom. Ukoliko se inklinacija u oba pravca zadrži u intervalu od  $\pm 5^\circ$  onda greška nije veća od 0.12% mernog opsega senzora. Drugi problem se odnosi na problem senke odnosno pojavu fizičke prepreke koja u potpunosti ili delimično preseca optičku osu sekundarnog optičkog sistema, kada senzor ne može da generiše validni rezultat.



Slika 2. Princip funkcionisanja laserskog triangulacionog senzora (a) i definicija njegovog lokalnog koordinatnog sistema (b).

U oba prethodna problematična slučaja za funkcionisanje laserskog senzora, primena robota dobija svoj puni značaj. Inherentna svojstva manipulabilnosti omogućavaju da se pravilnim izborom trajektorije uvek obezbede: 1) ortogonalnost glavne optičke ose na površinu objekta koji se skenira, 2) lociranje početka TCP koordinatnog sistema laserskog senzora na površini objekta koji se skenira i 3) eliminacija problema senke uvek kada je to fizički izvodivo. Upravo mogućnost zadovoljenja prethodna tri

uslova simbiozu robota i laserskog triangulacionog senzora čini visokovrednim tehnološkim entitetom.

Integracija robota i laserskog senzora se u metrološkom smislu ostvaruje preko akvizicionog sistema. Akvizicioni sistem, odnosno PC ili neki drugi mikroprocesorski sistem opremljen odgovarajućim interfejsima i akvizicionim softverom, mora da ostvari funkciju komunikacije sa sistemom upravljanja robota i mikroprocesorskim sistemom laserskog senzora. Akvizicioni sistem vrši sinhronizovanu akviziciju unutrašnjih koordinata robota očitavanjem koordinata enkodera aktuatora upravljivih stepeni slobode robota i merne distance do objekta koji se skenira. U sukcesivnim trenucima uzorkovanja akvizicioni sistem povlači i memoriše vektor koji ima  $(n + 1)$  elemenata, gde je  $n$  označen broj aktivnih stepeni slobode robota. Od akvizicionog sistema se zahteva da poseduje funkciju diskontinualnog povlačenja enkoderskih signala i sa njima uparene merene distance, onda kada se to planom merenja zahteva. Po pravilu, zadatak skeniranja se sastoji iz niza sekvenci koje se sastoje iz podsekvenci skeniranja i podsekvenci repozicije robota. Svaka od sekvenci kao izlazni rezultat generiše vektor jedne konture, najčešće kao kontinualnu vremensku seriju. Ovakav modalitet rada podrazumeva postojanje bidirekcionne komunikacije između akvizicionog sistema sa jedne strane i upravljačkog sistema robota i laserskog senzora sa druge strane. Akvizicioni sistem može da bude deo čelijskog kontrolera ili da se locira u sloju odmah ispod čelijskog kontrolera. U svakom slučaju on je nadređen mikroprocesorskom sistemu laserskog senzora i u hijerarhijskom smislu paralelizovan sa upravljačkom sistemom robota.

### 3. OBRADA SENZORSKOG SIGNALA

Vremenske serije za svaku od skeniranih kontura zahtevaju odgovarajuću obradu pre nego što se uvedu u sistem za generisanje digitalnog 3d modela objekta. Obrada senzorskih signala se može grupisati u četiri zadatka:

- Uklanjanje šuma i mikrogeometrijskih detalja tekstuere u vremenskom domenu;
- Transformacija vremenskog u prostorni domen;
- Diskretizacija konture u prostornom domenu;
- Dekompozicija konture u prostornom domenu i formiranje njenog konačnog oblika;

Ključni zahtev kod izbora tehnike obrade vremenskih serija je fazona korektnost i mogućnost multirezolucijske analize. Tehnike bazirane na vejljet transformaciji ispunjavaju oba navedena zahteva, uključujući i mogućnost delimične ili potpune rekonstrukcije polaznog vektora.

Diskretnom vejljet transformacijom (DWT – Discrete Wavelet Transform) [3] signal  $f$  se prikazuje kao zbir njegove aproksimacije  $A_j f$  na određenoj rezoluciji  $J$  i detalja  $D_j f$ ,  $j \in [1, J]$  koji su mu oduzeti prilikom prelaska sa viših na niže rezolucije.

$$f = A_J f + \sum_{j=1}^J D_j f = \sum_n a_n^j \phi_{j,n} + \sum_j \sum_n d_n^j \psi_{j,n} \quad (1)$$

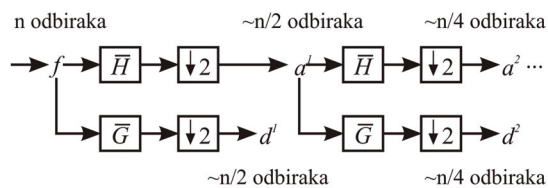
Aproksimacije i detalji signala su izraženi preko koeficijenata aproksimacije  $a_n^j$  i detalja  $d_n^j$  koji predstavljaju udeo odgovarajućih funkcija – funkcija skaliranja  $\phi_{j,n}$  i vejljeta  $\psi_{j,k}$  u signalu. Ovi koeficijenti se izračunavaju na osnovu relacija (2) i (3) pomoću brzog jednodimenzionalnog hijerarhijskog algoritma – takozvane šeme filtriranja koja omogućuje reverzibilnost filtracije i algoritam za inverznu vejljet transformaciju (IDWT).

$$d_j^k = \sum_n \overline{g_{n-2k}} a_n^{j-1} \quad (2)$$



$$a_j^k = \sum_n h_{n-2k} a_n^{j-1} \quad (3)$$

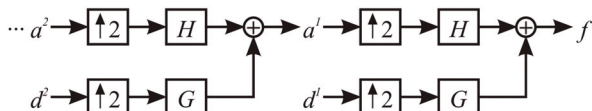
(a)



$\boxed{X}$  - konvolucija sa filtrom X

$\boxed{\downarrow 2}$  - zadržavanje svakog drugog odbirka

(b)



$\boxed{X}$  - konvolucija sa filtrom X

$\boxed{\uparrow 2}$  - Dodavanje nule između svaka dva odbirka

Slika 3: Šema filtriranja za proračun: (a) direktne DWT; (b) inverzne DWT

Korišćenjem šeme filtriranja prikazane na Slici 3 koeficijenti detalja  $d_n^j$  se izračunavaju na osnovu koeficijenata aproksimacije  $a_n^{j-1}$  i to njihovim filtriranjem visokofrekventnim filtrom  $\bar{G}$  a zatim uzimanjem svakog drugog odbirka. Analogno, koeficijenti aproksimacije  $a_n^j$  se izračunavaju filtriranjem koeficijenata  $a_n^{j-1}$  niskofrekventnim filtrom  $\bar{H}$  i uzimanjem svakog drugog odbirka. Filteri  $H$ ,  $G$ ,  $\bar{H}$  i  $\bar{G}$  čiji su impulсни odzivi dati koeficijentima  $(h_n)$ ,  $n \in \mathbb{Z}$  i  $(g_n)$ ,  $n \in \mathbb{Z}$  predstavljaju simetrične konjugovane filtere i izračunavaju se na osnovu odabranog vejvleta. Reverzibilan algoritam za izračunavanje signala  $f$  na osnovu koeficijenata  $a_n^j$  i  $d_n^j$ , tj. za izvođenje IDWT, se može opisati šemom filtriranja datom na Slici 3b. Koeficijenti aproksimacije  $a_n^{j-1}$  se izračunavaju tako što se između svaka dva koeficijenta  $a_n^j$  i  $d_n^j$  ubacuje po jedna nula, a zatim se vrši konvolucija ovako dobijenih sekvenci sa filterima  $H$  i  $G$  i rezultujuće sekvence se, konačno, sabiraju. Algoritam za izvođenje IDWT može se iskoristiti za izračunavanje aproksimacije signala na rezoluciji (nivou DWT)  $J - Af$  ako se koeficijenti detalja  $d_n^j$ ,  $j \in [1, J]$  tokom proračuna proglašavaju za nule. Detalji  $Df$  se mogu izračunati na sličan način.

Postojanje IDWT je izuzetno značajno za dekoplovanje šuma, mikrogeometrije teksture površine dela koji se skenira i njegove makrogeometrije [4]. Pravilnim izborom vejvleta koji će se koristiti u DWT reprezentaciji polaznog signala kao i nivoa transformacije  $-J$  moguće je navedene komponente prepoznati na određenim nivoima aproksimacije ili detalja signala.

Prelaz iz vremenskog u prostorni domen u opštem slučaju narušava uniformnost diskretizacije konture. U zavisnosti od oblika trajektorije skeniranja i lokalnih svojstava površi objekta koji se skenira, u većoj ili manjoj meri dolazi do narušavanja uniformnosti diskretizacije senzorskih signala koja je postojala u vremenskom domenu, sa pojavom nagomilavanja tačaka u nekim delovima konture i njihovog razređivanja u drugim delovima konture. Problem se rešava tako što se inicijalni vektor konture u prostornom domenu ponovo diskretizuje primenom odgovarajućih interpolacionih algoritama [1]. Ova oblast je vrlo studiozno istraživana decenijama u kontekstu geometrijskog modeliranja prostornih

objekata i nije predmet istraživanja koja se prezentiraju u okviru ovog rada. U cilju zaokruživanja razvijenog koncepta u metodološkom smislu korišćeni su interpolatori nultog reda, ostavljajući prostor za primenu naprednijih tehnika u fazi generisanja digitalnog 3d modela u nekom od CAD okruženja.

#### 4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Na slici 4 prikazana je instalacija za eksperimentalnu verifikaciju koncepta robotizovanog skeniranja, koja je realizovana u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu. Sistem se sastoji iz 1) robota antropomorfne konfiguracije sa šest stepeni slobode, japanskog proizvođača Kawasaki, model JS10, 2) laserskog triangulacionog senzora nemačkog proizvođača Micro Epsilon, model optoNCDT 1700-100 (karakteristike su navedene u Tabeli 1), 3) PC akvizicionog sistema sa odgovarajućim interfejsima i softverskom podrškom i 4) radnog stola.

Merni opseg (MO):	100 mm
Početak mernog opsega ( <i>stand off</i> ):	70 mm
Linearnost:	$\pm 0.08\%$ MO
Rezolucija:	6 $\mu\text{m}$
Maksimalna brzina uzorkovanja:	2.5 kHz
Laserska dioda	
Talaska dužina: 100 mm	670nm, crvena
Max. snaga:	1mW
Klasa lasera:	2(II)
Dozvoljeni intenzitet ambijentalne svetlosti:	10.000lx
Prečnik laserske tačke na sredini MO:	60 $\mu\text{m}$
Temperaturna stabilnost:	0.01 % FSO/K
Radna temperatura:	0...+50 °C
Otpornost na vibracije (IEC 68-2-6):	2g/20...500Hz
Otpornost na udar (IEC 68-2-29):	15g / 6ms
Težina:	550g

Tabela 1: Tehničke karakteristike laserskog trinagulacionog senzora ME optoNCDT 1700-100

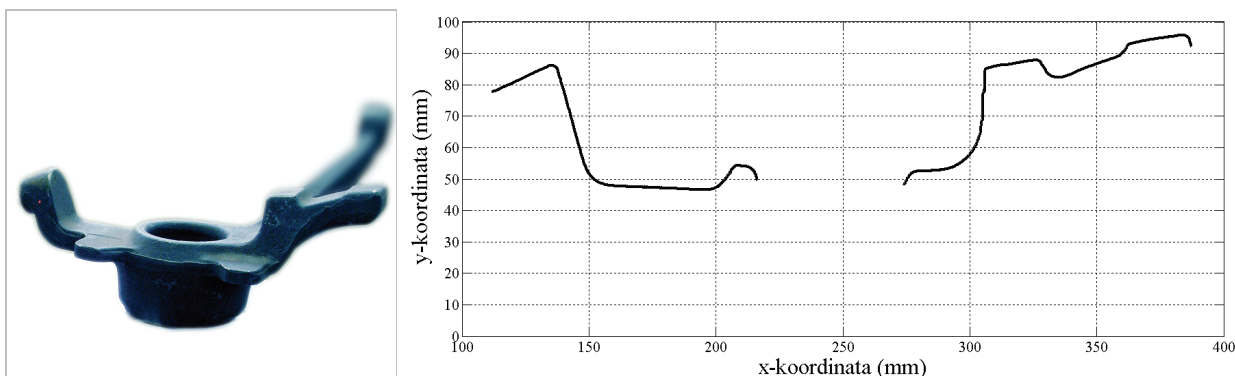
Primer konture skeniranog poprečnog preseka otkovka kućišta ležajne jedinice prednjeg točka automobila u finalnom obliku prikazan je na slici 5. Kontura je skenirana brzinom od 100 mm/sec što daje prostornu rezoluciju od 40 $\mu\text{m}$ . Prikazane su samo one tačke koje su vidljive u horizontalnoj ravni ortogonalne projekcije. U konkretnom slučaju, primenom ovakvog mernog sistema moguće je realizovati kontrolu svih tolerisanih mera otkovka neposredno posle uklanjanja venca opsecanjem, čime se ostvaruje funkcija kontrole procesa kovanja direktno na proizvodnoj liniji. Ovakav pristup omogućava brzu reakciju na pojavu odstupanja, čime se garantuje visok kvalitet i stabilnost proizvodnje. Na slici 6 je prikazana kalibraciona kriva robota na nivou radnog stola izvedena skeniranjem etalon lenjira dužine 500 mm. Uočava se prisustvo greške izazvane nesavršenostima manipulacionog robota koje dolaze od: 1) mehanike kinematskog lanca robota, 2) akcionog sistema i 3) sistema upravljanja robota. U konkretnom slučaju ta greška iznosi  $\pm 0.142$  mm što je 40% veće od greške koju specificira proizvođač, a koja iznosi  $\pm 0.1$  mm u kompletnom radnom prostoru. Kalibraciona kriva izvedena je primenom multirezolucijske analize originalnog signala prevedenog iz vremenskog u prostorni domen. Dekompozicija signala izvedena je na 11 nivoa pomoću DWT transformacije, korišćenjem db4 vejvleta [3]. Dekomponovani signal, odnosno niz njegovih aproksimacija i korespondentnih detalja pikan je na slici 7. Eliminacijom visokofrekventnih

sadržaja koji dolaze od robota i šuma u senzorskim signalima, dobijena je kalibraciona kriva. Pažljivom analizom signala detalja na svih 11 nivoa izabran je A10 nivo

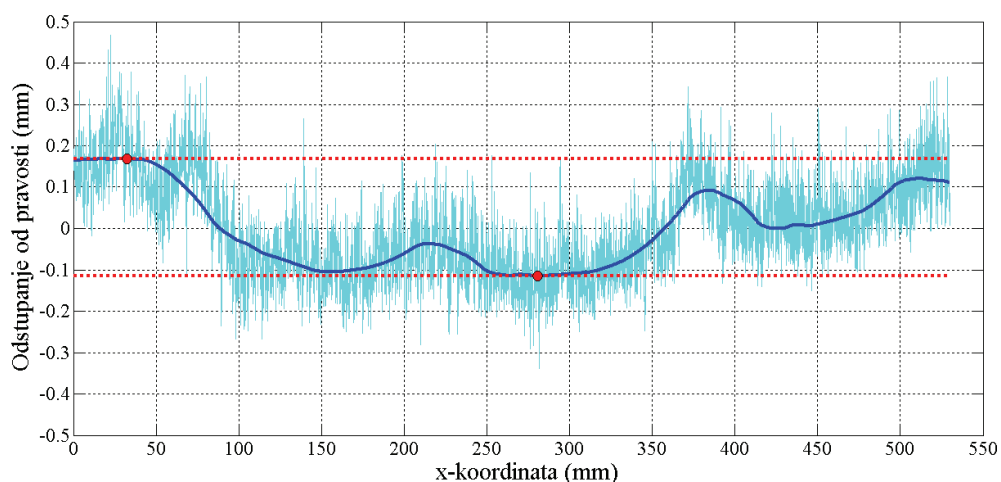
aproximacije kao dominantni nivo na kome se nalazi greška koja dolazi od nesavršenosti mehanike i upravljanja robota. Komponente greške koje dolaze od



Slika 4: Demonstraciona instalacija razvijena za potrebe eksperimentalne verifikacije kritičnih istraživačkih sadržaja koncepta robotizovanog skeniranja objekata kompleksne prostorne geometrije primenom laserskih triangulacionih senzora.

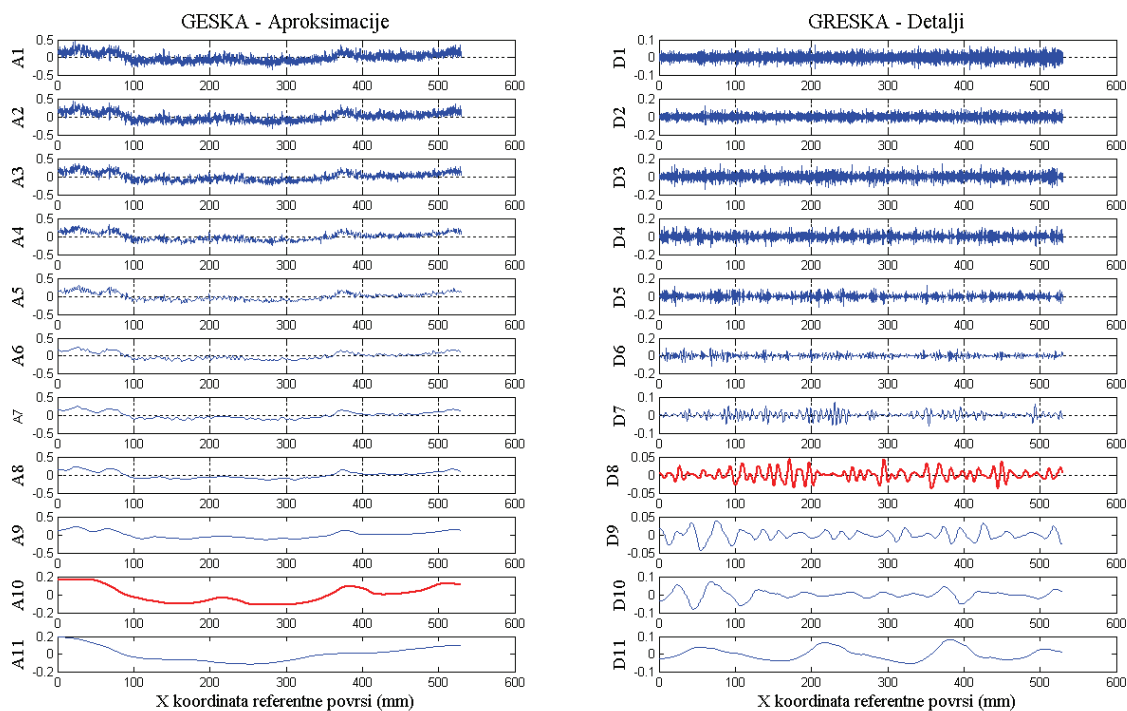


Slika 5: Primer skenirane finalne konture poprečnog preseka otkovka u glavnoj vertikalnoj ravni prevedene u prostorni domen. U levom uglu prikazana je fotografija skeniranog otkovka iz ugla koji pokazuje izgled skeniranog preseka.



Slika 6: Identifikovana greška robota u horizontalnoj ravni na nivou radnog stola. Multirezolucijskom analizom izdvojena je bazna komponenta greške ostvarene trajektorije robota (tamno plava); Originalni signal sadrži visokofrekventne komponente šuma koji dolazi od laserskog senzora i šum + vibracije koje dolaze od manipulacionog rebeta.





Slika 7: Dekomponovana signal greške kretanja vrha robota (u konkretnom slučaju odstupanje od pravosti) primenom DWT transformacije i db4 vejvleta.

vibracija vrha robota grupisane su oko D8 nivoa detalja. Visokofrekventne komponente greške koje dolaze od senzorskog sistema nalaze se na nivou D1 i niže. Greška metrološkog sistema u celini određena je greškom koju generiše manipulacioni robot.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan koncept sistema za robotizovnu digitalizaciju prostornih objekata kompleksne geometrije baziranog na primeni tačkastih laserskih senzora sa jedstrukom triangulacijom. Prikazana je struktura sistema i diskutovani kritični detalji kao i sistem za akviziciju i obradu senzorskih signala. Praktična funkcionalnost predloženog koncepta eksperimentalno je verifikovana u laboratorijskim uslovima primenom antropomorfnog manipulacionog robota sa 6 stepeni slobode i laserskim triangulacionim senzorom mernog opsega 100mm i brzinom uzorkovanja 2.5 kHz. Sistem je pokazao zadovoljavajuće ponašanje, a metrološke performanse su dominantno uslovljene tačnošću manipulacionog robota. U konkretnom slučaju ostvarena je tačnost bolja od  $\pm 200 \mu\text{m}$  u kompletnom radnom prostoru. Razvijeni sistem ima opštu primenljivost na linijama za montažu proizvoda srednjeg i velikog gabarita, kao i na proizvodnim linijama za izradu delova od plastičnih masa, odlivaka i otkovaka.

## Zahvalnica

Autori se zahvaljuju kompaniji ROBOTAKT iz Valjeva na privremenom ustupanju robota za potrebe sprovođenja eksperimentalne verifikacije razvijenog robotizovanog mernog sistema.

## 11. LITERATURA

[1] Bernardini, F., Bajaj, C., L., Chen, J., Schikore, D., R., Automatic Reconstruction of 3D CAD Models from Digital Scans, International Journal of Computational

Geometry and Applications, Vol. 9, No 4/5, pp: 327-369, August 1999

[2] D'Apuzzo, N., *Overview of 3D surface digitization technologies Europe2006*, Corner B.D., Li P., Tocheri M. (Eds.), Three-Dimensional Image Capture and Applications VI, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 6056, San Jose (CA), USA.

[3] Mallat, S., G., *A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation*, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol II, No. 7, pp: 674-693, July 1989.

[4] Petrović, P., Jakovljević, Ž., Novi koncept identifikacije procesa kalandriranja primenom multirezolucijske analize geometrije profila poprečnog preseka gumiranog korda, 30. Savetovanje proizvodnog mašinstva SCG, Zbornik radova, pp: 257-262, Vrnjačka Banja, 2005

[5] Petrović, P., *Rubberized Cord Thickness Measurement Based on Laser Triangulation – Part I: Technology*, FME Transaction, Vol 35, pp: 77-84., November 2007

[6] Reinhart G, Tekouo W. *Automatic programming of robot-mounted 3D optical scanning devices to easily measure parts in high-variant assembly*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009, doi:10.1016/j.cirp.2009.03.125.

[7] Schwenke, H., et al., *Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering*, Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 2, pp: 685-699, 2002

**Autori: Prof. dr Petar B. Petrović, mr Živana Jakovljević**, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 3302-435, Fax: +381 11 3370-364.  
E-mail: [pbpetrovic@mas.bg.ac.rs](mailto:pbpetrovic@mas.bg.ac.rs)  
[zjakovljevic@mas.bg.ac.rs](mailto:zjakovljevic@mas.bg.ac.rs)