



P.B. Petrović, Ž. Jakovljević, V. Miković¹

ROBOTIZOVANI SISTEMI ZA BESKONTAKTNU DIMENZIONU METROLOGIJU BAZIRANI OPTIČKOJ TRIANGULACIJI - Deo 2: Praktična implementacija i validacija

Rezime

U okviru ovog rada izlažu se konceptualni okviri jedne nove klase metroloških sistema baziranih na integraciji industrijskog robota i široke palete senzora za beskontaktnu 3d dimenzionu metrologiju i skeniranje/digitalizaciju, koji su bazirni na optičkoj triangulaciji. Industrijski robot kao univerzalna manipulaciona platforma oprema se senzorskim sistemom i integriše u proizvodni proces sa zadatkom praćenja dimenzionih karakteristika objekta koji se proizvodi i generisanja ključnih informacionih sadržaja za regulaciju nekih od procesnih veličina u realnom vremenu. Rad je podeljen na dva dela. U drugom delu navode se ključni aspekti metodoloških i računskih okvira za obradu senzorskih signala i generisanje 3d digitalnog modela skeniranog objekta u realnom vremenu. Takođe, navode se osnovne prednosti i ograničenja varijantnih triangulacionih sistema uz odgovarajuću komparativnu analizu. Predloženi koncept je praktično implementiran kroz izgradnju dve univerzalne laboratorijske instalacije za demonstraciju eksperimentalnu validaciju. U drugom delu ovog rada navode se detalji eksperimentalnih instalacija i sprovedenih eksperimenata.

Ključne reči: Industrijski robot, optička triangulacija, 3d digitalizacija

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. 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.

U okviru ovog rada saopštava se deo rezultata koji su ostvareni u okviru projekta MA14035 INTOSA²[1, 2] u okviru koga su razvijene konceptualne osnove jednog robotizovanog sistema za 3d digitalizaciju objekata kompleksne geometrije na bazi CCD laserskog senzora sa tačkastom optičkom trinangulacijom za primenu na linijama za montažu u automobilskoj industriji i za kontrolu geometrije otkovaka u okviru robotizovanih ćelija za obradu kovanjem [3, 4]. Praktična upotrebljivost ovog koncepta

¹ Prof. dr Petar B. Petrović, Mr. Živana Jakovljević, Vladimir Miković, Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija; e-mail: pbpetrovic@mas.bg.ac.rs

² Istraživanja su realizovana u okviru projekta MA14035: **Primena inteligentnih senzorskih sistema u razvoju integrisane automatizacije realnih i virtuelnih procesa proizvodnog preduzeća - INTOSA**, koji finansijski podržava Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

proverena je i demonstrirana u laboratorijskim uslovima u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu.

2. OBRADA SENZORSKOG SIGNALA

Signal generisan laserskom triangulacijom je po svojoj prirodi vremenska serija. U većini slučajeva to je kompletna vremenska serija, mada u radu sa optički delikatnim objektima, kao što su delovi izrađeni od elastomera, posebno u slučaju polufabrikata kada je u pitanju sveže kalandrirana gumena smeša, moguća je pojava nevalidnih merenja. U okviru ovog rada ne razmatra se slučaj nekompletnih vremenskih serija.

Signal generisan triangulacijom strukturane svetlosti je dvodimenzionalni stacionarni signal.

U oba slučaja, nezavisno da li se radi o vremenskoj seriji ili dvodimenzionalnom stacionarnom signalu, neophodna je odgovarajuća obrada pre nego što se senzorski signali uvedu u sistem za generisanje digitalnog 3d modela objekta. Obrada senzorskih signala se može grupisati u pet zadataka:

- Uklanjanje šuma i mikrogeometrijskih detalja teksture u vremenskom domenu;
- Transformacija vremenskog u prostorni domen;
- Diskretizacija konture, površi u prostornom domenu;
- Superpozicija parcijalnih elemenata u prostornom domenu i formiranje konačnog digitalnog modela;
- Dopunska obrada trodimenzionalnog modela.

Ključni zahtev za obe vrste signala je fazna korektnost i mogućnost multirezolucijske analize. Tehnike bazirane na vejevlet transformaciji ispunjavaju oba navedena zahteva, uključujući i mogućnost delimične ili potpune rekonstrukcije polaznog vektora.

Diskretnom vejevlet transformacijom (DWT – Discrete Wavelet Transform) [5] 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.

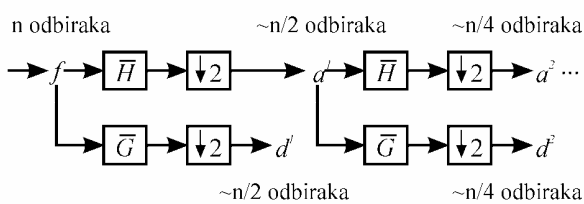
$$f = A_j f + \sum_{j=1}^J D_j f = \sum_n a_n^j \phi_{j,n} + \sum_j \sum_n d_n^j \psi_{j,n} \quad (1)$$

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 vejevleta $\psi_{j,k}$ u signalu. Ovi koeficijenti se izračunavaju na osnovu relacija (2) i (3) pomoću brzog jednoprolaznog hijerarhijskog algoritma – takozvane šeme filtriranja koja omogućuje reverzibilnost filtracije i algoritam za inverznu vejevlet transformaciju (IDWT).

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

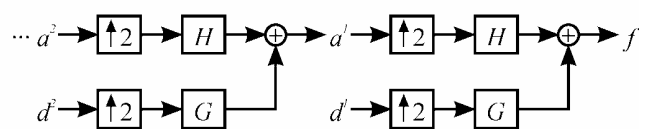
$$a_j^k = \sum_n \overline{h_{n-2k}} a_n^{j-1} \quad (3)$$

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

Korišćenjem šeme filtriranja [6] prikazane na Slici 1a koeficijenti detalja d_n^j se izračunavaju na osnovu koeficijenata aproksimacije a_n^{j-1} i to njihovim filtriranjem visokofrekventnim filtrom \overline{G} a zatim uzimanjem svakog drugog odbirka. Analogno, koeficijenti aproksimacije a_n^j se izračunavaju filtriranjem koeficijenata a_n^{j-1} niskofrekventnim filtrom \overline{H} i uzimanjem svakog drugog odbirka. Filteri H, G, \overline{H} i \overline{G} čiji su impulzni 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 vejevleta. 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 1b. 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,

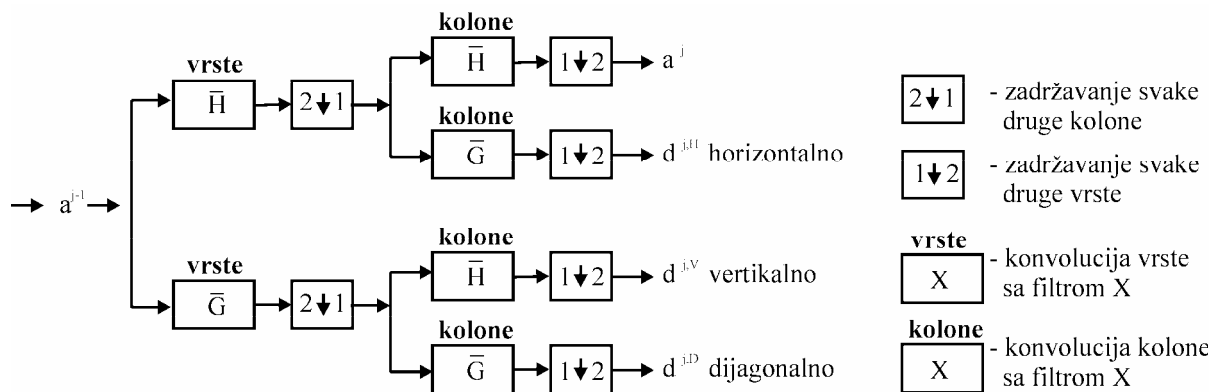
a zatim se vrši konvolucija ovako dobijenih sekvenci sa filterima H i G i rezultujuće sekvence se, konačno, sabiraju. Algoritam za izvođenje IDWT može se iskoristiti za izračunavanje aproksimacije signala na rezoluciji (nivou DWT) $J - A, jf$ ako se koeficijenti detalja $d_n^j, j \in [1, J]$ tokom proračuna proglaše za nule. Detalji $D_j f$ se mogu izračunati na sličan način.

Postojanje IDWT je izuzetno značajno za deкупlovanje šuma, mikrogeometrije teksture površine dela koji se skenira i njegove makrogeometrije. Pravilnim izborom veјvleta koji će se koristiti u DWT reprezentaciji polaznog signala kao i nivou transformacije – J moguće je navedene komponente prepoznati na određenim nivoima aproksimacije ili detalja signala.

Diskretna veјvlet transformacija ima svoju ekstenziju na više dimenzionalne signale, pa se može upotrebiti i za analizu dvodimenzionog signala – slike [5]. Digitalna slika je predstavljena matricom slike S dimenzija $m \times n$, gde je m broj vrsta, a n broj kolona. Šema filtriranja za izvođenje DWT digitalne slike S je prikazana na slici 2 i izvodi se u dva koraka:

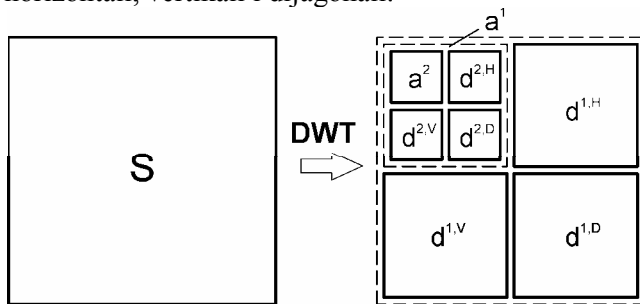
Korak 1 Jednodimenziona veјvlet transformacija svake vrste matrice S

Korak 2 Jednodimenziona veјvlet transformacija kolona matrice koja je izračunata u prethodnom koraku



Slika 2: Šema filtriranja za proračun dvodimenziove DWT

DWT na dva nivoa slike S se može vizuelizovati na način prikazan na slici 3. Pri tom a^1 i a^2 podslike predstavljaju verziju početne slike na 2 i 4 puta nižim rezolucijama. $d^{1,H}$, $d^{1,V}$ i $d^{1,D}$ predstavljaju detalje po horizontali, vertikali i dijagonalni.



Slika 3: Vizuelizacija dvodimenziove DWT

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. 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.

3. TEHNOLOŠKA OGRANIČENJA I OBLAST PRIMENE

Robotizovano skeniranje bazirano na laserskoj triangulaciji i triangulaciji strukturane svetlosti su dve komplementarne senzorske tehnologije koje imaju ekstremno veliki potencijal primenljivosti u različitim segmentima industrije, direktno na proizvodnim linijama ili u laboratorijskim uslovima. Generalno, laserski izvor svetlosti je mnogo otporniji na ambijentalnu svetlost i zato poseduje potrebnu robusnost za industrijske uslove eksploatacije. Problem sa ovom tehnologijom je brzina prikupljanja informacija. Posebno kod tačkastih trinagulacionih senzora, potpuna digitalizacija jednog složenog prostornog objekta u visokoj rezoluciji je zadatak koji zahteva velike vremenske resurse. Situacija je značajno povoljnija u

slučaju linijskih triangulacionih senzora, profilometra. Ipak, tačnost i mogućnost rada sa dinamičkim metama je na strani tačkastih triangulacionih senzora.

Senzori bazirani na optičkoj triangulaciji struktuirane svetlosti poseduju potencijal ekstremno brze akvizicije velikog broja tačaka. U okviru jedne sekunde, moguće je preuzeti milione tačaka, bez ikakvog pomeranja vrha robot. Ovakve performanse su daleko iznad performansi laserskih triangulacionih senzora i čine ih gotovo idealnim za zadatke tipa identifikacije zapremniskih deformacija zavarenih konstrukcija ili kompletnosti zavarenih konstrukcija. Tipičan primer su zavarene konstrukcije koje se sreću u auto industriji, konkretno u proizvodnji autobusa, gde sklopovi poput kostura autobusa mogu da sadrže više stotina pozicija, zavarenih u jednu složenu rešetkastu strukturu. Elementarni zadatak kontrole prisustva svakog od ovih elemenata u sklopu kostura je vrlo kompleksan zadatak ukoliko se on realizuje vizuelnom kontrolom. Nasuprot tome, jedan sistem za digitalizaciju baziran na optičkoj triangulaciji struktuirane svetlosti zadatak ovog tipa rešava rutinski i istovremeno, uz informaciju kompletnosti daje informaciju odstupanja od nominalnog plana, uključujući i odstupanja izazvana termičkim deformacijama. Osnovni problem u ovom slučaju je uticaj ambijentalne svetlosti na koju ova tehnologija generalno ima mali imunitet.

Pored prethodno razmatranih generalnih aspekata tehnološke vrednosti senzorskih sistema, bitno je fokusirati se na robotizovani sistem za digitalizaciju u celini, odnosno na neke od aspekata interakcije senzorskog sistema i manipulacionog robota. Među najznačajnijim su lociranje senzora i izbor/određivanje TCP robotskog sistema, i planiranje trajektorije skeniranja. U ovom kontekstu, tehnologija triangulacionih senzora baziranih na struktuiranoj svetlosti je znatno manje zahtevna. Ova vrsta senzora je praktično stacionarnog tipa. Potrebno je i dovoljno da robot sa nekoliko poza, po pravilu nikada više od 10, dovede optički sistem u zahtevani ugao gledanja i time se kompletan manipulacioni zadatak zaokružuje. Robot se praktično ponaša kao fotograf koji zna svoju poziciju u koordinatnom sistemu radne stanice. U slučaju laserske triangulacije situacija je drugačija i manipulacioni robot ima složeniji zadatak.

U tehnološkom smislu, kod određivanja TCP robota u nekom konkretnom slučaju primene laserskog triangulacionog senzora, pogodno je da se jedna od osa senzora poklopi sa glavom 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 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 se prihvatljiva degradacija ostvaruje ukoliko je inklinacija 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 ili bele keramike, inklinacija u navedenom intervalu generiše grešku od 0.2% mernog opsega, što za slučaj mernog opsega od 100 mm iznosi čak 200 μ m. Ova vrednost 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 validan rezultat.

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 ugaonom repozicijom optičkog trougla uvek kada je to fizički izvodljivo bar u jednoj ortogonalnoj ravni. Upravo mogućnost zadovoljenja prethodna tri uslova simbiozu robota i laserskog triangulacionog senzora čini visokovrednim tehnološkim entitetom.

4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Ovde se navode dve grupe praktične verifikacije sistema za robotizovano skeniranje. Prva se odnosi na slučaj laserskog triangulacionog sistema a druga na slučaj triangulacionog sistema baziranom na struktuiranoj svetlosti.

4.1 Laserska triangulacija

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:	±0.08% MO
Rezolucija:	6 μm
Maksimalna brzina uzorkovanja:	2.5 kHz
Laserska dioda	
Talasna dužina: 100 mm	670nm,
Max. snaga:	crvena
Klasa lasera:	1mW
	2(II)
Dozvoljeni intenzitet ambijentalne svetlosti:	10.000lx
Prečnik laserske tačke na sredini MO:	60μm
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

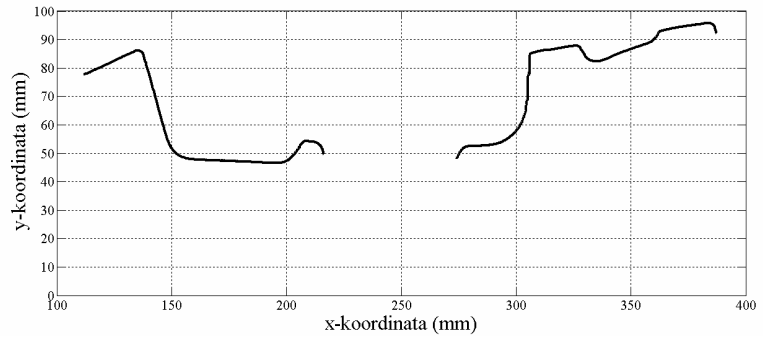
Tabela 1: Tehničke karakteristike laserskog triangulacionog senzora ME optoNCDT 1700-100

upravljanja robota. U konkretnom slučaju ta greška iznosi ± 0.142 mm što je 40% veće od greške koju specificira proizvođač, a koja iznosi ± 0.1 mm u potpunom 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 [5]. Dekomponovani signal, odnosno niz njegovih aproksimacija i korespondentnih detalja prikazan je na slici 7.

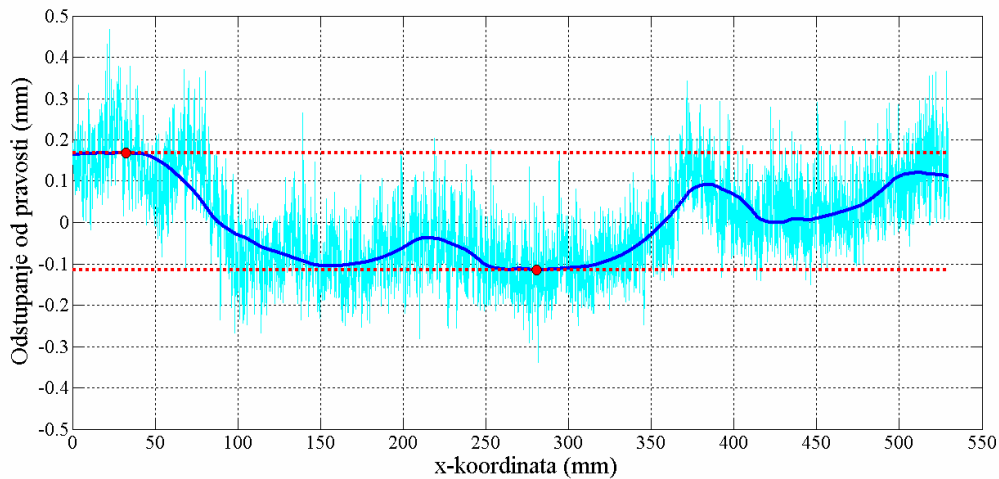
Primer konture skeniranog poprečnog preseka otkovka kućišta ležajne jedinice prednjeg točka automobila u finalnom obliku prikazan je na slici 5. Kontura je skenirana brzinom od 100 mm/sec što daje prostornu rezoluciju od 40μm. Prikazane su samo one tačke koje su vidljive u horizontalnoj ravni ortogonalne 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



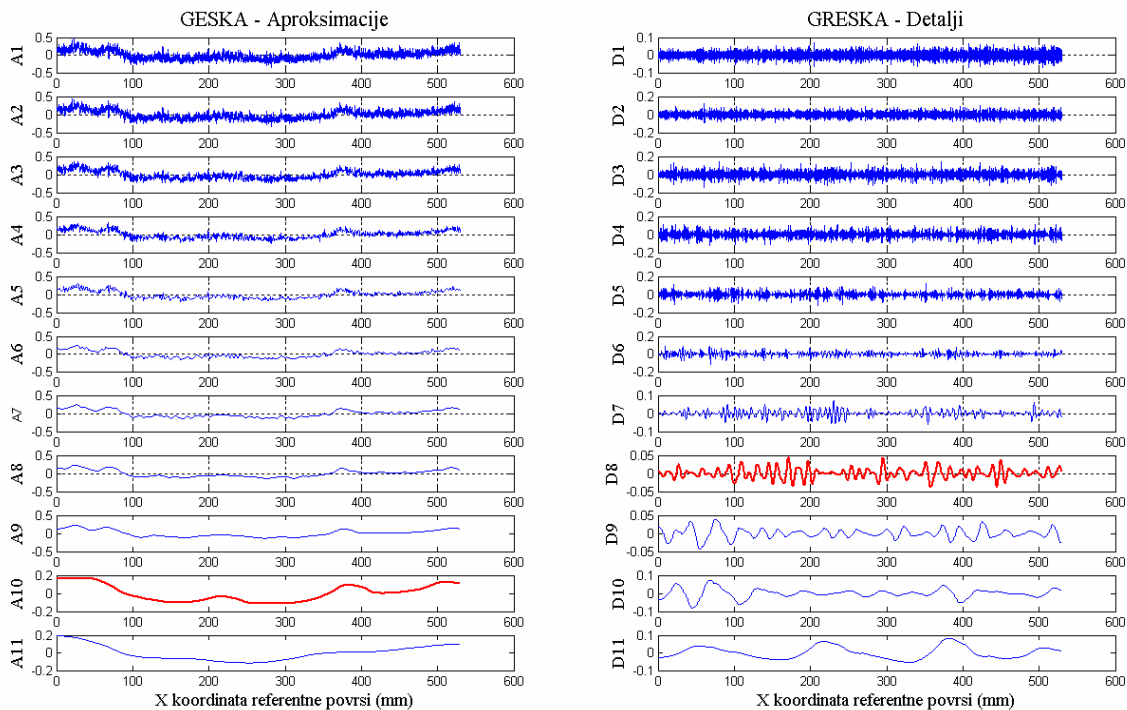
Slika 4: Demonstraciona instalacija razvijena za potrebe eksperimentalne verifikacije kritičnih istraživačkih sadržaja koncepta robotizovanog skeniranja objekata kompleksne prostorne geometrije primenom laserskih triangulacionih senzora.



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.



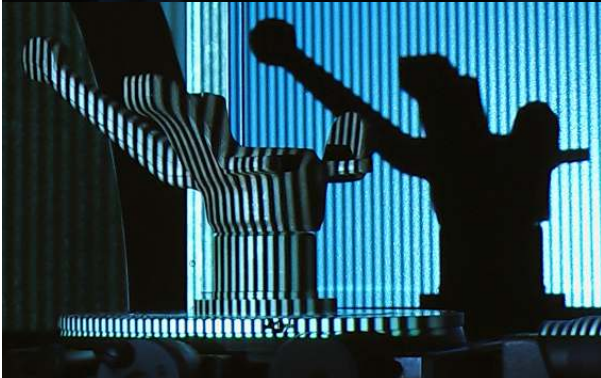
Slika 6: Identifikovana greška robota u horizontalnoj ravni na nivou radnog stola. Multirezolucijskom analizom izdvojena je bazna komponenta greške ostvarene trajektorije robota (tamno plava); Originalni signal sadrži visokofrekventne komponente šuma koji dolazi od laserskog senzora i šum + vibracije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



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



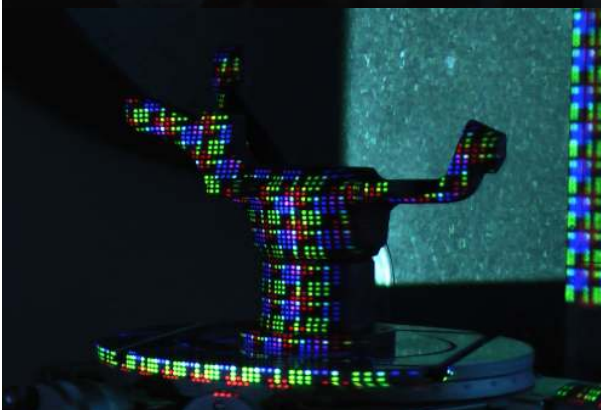
Otkovak osvetljen monohromatskom mapom sa sinusnim profilom variranja intenziteta osvetljenosti u vertikalnom pravcu - generisana je horizontalna mreža neuniformne osvetljenosti po vertikalnoj osi.



Otkovak osvetljen monohromatskom mapom sa sinusnim profilom variranja intenziteta osvetljenosti po horizontalnom pravcu - generisana je vertikalna mreža neuniformne osvetljenosti po horizontalnoj osi.



Otkovak osvetljen kolor mapom generisanom modifikovanom De Bruijn-ovom sekvencom variranja RGB kanala po horizontalnoj osi - generisana je horizontalna mreža uniformno osvetljenih traka minimalne logičke distance.



Otkovak osvetljen kolor mapom generisanom modifikovanom De Bruijn-ovom sekvencom variranja RGB kanala po dve ortogonalne ose - generisana je horizontalna mreža uniformno osvetljenih kvadratnih polja minimalne logičke distance.

Slika 8: Primeri varijantnih oblika monohromatskih i kolor mapa projektovanih na otkovak koji se digitalizuje triangulacijom strukturane svetlosti.

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

4.2 Triangulacija struktuirane svetlosti

Eksperimenti ove vrste rađeni su na stacionarnom demonstracionom sistemu koji se sastoji iz: 1) optičkog sistema za generisanje i akviziciju reflektovane struktuirane svetlosti, 2) granitnog radnog stola opremljenog preciznim obrtnim pozicionerom, 3) pribora za kalibraciju i izračunavanje transformacionih matrica i 4) računarskog sistema za akviziciju i obradu senzorskih signala, sa ekstenzivnim softverskim sistemom. Ova instalacija je razvijena za potrebe eksperimentalne verifikacije koncepta robotizovanog skeniranja, na bazi struktuirane svetlosti koja je u fazi realizacije u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu. Na slici 8 prikazani su preliminarni primeri uspostavljanja funkcije sistema za generisanje struktuirane svetlosti za slučaj otkovka koji je razmatran u okviru 4.1.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan koncept sistema za robotizovnu digitalizaciju prostornih objekata kompleksne geometrije baziranog na primeni tačkastih laserskih senzora sa jednstrukom triangulacijom i senzora sa optičkom triangulacijom struktuirane svetlosti. Navedeni su osnovni elementi tehnološke vrednosti i upotrebljivosti, kao i ključni sadržaji vezani za primarnu obradu senzorskih signala. Praktična funkcionalnost predloženog koncepta eksperimentalno je verifikovana u laboratorijskim uslovima. Razvijeni sistem ima opštu primenljivost na linijama za montažu proizvoda srednjeg i velikog gabarita, kao i na proizvodnim linijama za izradu zavarenih konstrukcija, delova od plastičnih masa, odlivaka i otkovaka.

LITERATURA

- [1] Petrović, P., Milanov, M., Nijemčević, S., Stojović, M., Spasić, Ž., Pilipović, P., Jakovljević, Ž., Primena ineligentnih senzorskih sistema u razvoju integrisane automatizacije realnih i virtuelnih procesa proizvodnog preduzeća – rekapitulacija rezultata na projektu MA14035, Zbornik radova 35. JUPITER konferencija, 28. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala, Beograd 2009, str. 1.1-1.11, ISBN: 978-86-7083-666-2.
- [2] Petrović, P., B., Milanov, M., Vićentić, A., Stojović, M., Spasić, Ž., Pilipović, M., Jakovljević, Ž., Baltić, P., Primena ineligentnih senzorskih sistema u razvoju integrisane automatizacije realnih i virtuelnih procesa proizvodnog preduzeća – rekapitulacija rezultata na projektu MA14035, 36. JUPITER Konferencija, Beograd 2010
- [3] Petrović, P., B., Jakovljević, Ž., Miković, V., Robotizovani sistemi za beskontaktnu dimenzionu metrologiju bazirani optičkoj triangulaciji-Deo 1: Koncept, 36. JUPITER Konferencija, Beograd 2010
- [4] Petrović, P., Jakovljević, Ž., 3D digitalizacija objekata kompleksne geometrije integracijom laserskog triangulacionog senzora i industrijskog robota (Rad po pozivu), Zbornik radova, 33. Savetovanje proizvodnog mašinstva SCG, Beograd, jun, 2009., str. 219-224, ISBN: 978-86-7083-662-4
- [5] Daubechies I., Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics. 61, SIAM, Philadelphia, 1992
- [6] Mallat, S., G., A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol II, No. 7, pp: 674-693, July 1989.

Robotic Systems for Non-Contact Dimensional Metrology Based On Optical Triangulation – Part 1: Practical Implementation and Validation

Abstract: *This paper gives conceptual framework of a new class of metrology systems based on integration of industrial robot and a huge range of sensors for non-contact 3d dimensional metrology and scanning/digitalization which are based on optical triangulation. Industrial robot as universal manipulation platform is equipped with sensor system and integrated into manufacturing process with the task of manufactured object dimension surveillance and generation of key information contents for regulation of certain process variables in real time. The paper consists of two parts. The second part gives the key aspects of methodological and computational framework for sensor signal processing and generation of 3d digital model of scanned object in real time. Basic advantages and restrictions of variant triangulation systems with comparative analysis are given also. Proposed concept is practically implemented through development of two universal laboratory installations for demonstration and experimental validation. The second part of this paper gives details of experimental installations and conducted experiments.*

Key words: *Industrial robot, optical triangulation, 3d digitalization*