



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

ROBOTIZOVANI SISTEMI ZA BESKONTAKTNU DIMENZIONU METROLOGIJU BAZIRANI OPTIČKOJ TRIANGULACIJI - Deo 1: Koncept

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 generisanje ključnih informacionih sadržaja za regulaciju nekih od procesnih veličina u realnom vremenu. Rad je podeljen na dva dela. U prvom delu navode se konceptualne osnove i osnovna arhitektura sistema, razmatraju ključni aspekti sprege ova dva sistema, i detaljno obrazlazu dva ekstremna koncepta optičkih triangulacionih sistema - sistemi bazirani na laserskoj triangulaciji i sistemi bazirani na triangulaciji struktuirane svetlosti. Predloženi koncept je praktično implementiran kroz izgradnju dve univerzalne laboratorijske instalacije za demonstraciju i eksperimentalnu validaciju.

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 stvarne 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 industrija u kojima se kao proizvod ili polufabrikat javljaju sklopovi dobijeni nekom od tehnika zavarivanja - zavarene metalne konstrukcije [4] Kod zavarenih sklopova identifikacija geometrije je ključni zahtev sa aspekta izvodljivosti automatizacije procesa uopšte, ili izvodljivosti procesa na racionalnim osnovama, ostvarenog kvaliteta finalnog proizvoda na makro i mikro nivou i ekonomičnosti proizvodnje u celini.

Ugradnjom optičkog senzora na vrh standardnog industrijskog robota, najčešće antropomorfne konfiguracije, dobija se moćan tehnološki sistem, izuzetne fleksibilnosti i respektivne tačnosti, sa potencijalom primenljivosti u okviru jednog vrlo širokog spektra 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 valorizaciju u realnim industrijskim uslovima. Ti zadaci se mogu svrstati u sledeće grupe:

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

- 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 modela objekta koji se skenira;
- Izgradnja virtuelnog metrološkog modela sistema robot-senzor-objekat koji se skenira za potrebe simulacije nominalnog radnog zadatka robota i senzorskog sistema, detekcija kolizionih situacija ili drugih oblika neregularnih stanja robotskog metrološkog sistema;
- Obrada senzorskih signala i generisanje parcijalnog/ukupnog ravanskog ili prostornog modela skeniranog objekta ili izračunavanje karakterističnih mera;
- Provera kompletnosti dela ili sklopa;
- 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 nudi vrlo širok spektar različitih tehnologija [1], [5]. Iz tog skupa mogu se izdvojiti tehnologije pogodne za primenu u kontekstu robotizovanog skeniranja koje se razmatra u ovom radu, gde se posebno izdvajaju: 1) tačkasti CCD ili PSD laserski sistemi spekularnog ili difuznog tipa, bazirani na jednostrukoj, dvostrukoj, ili cirkularnoj optičkoj triangulaciji, 2) konfokalni tačkasti laserski sistemi, 3) CCD ili CMOS profilometarski sistemi bazirani na linijskoj optičkoj triangulaciji, i 4) triangulacioni sistemi sa struktuiranim (kodiranim) izvorom bele svetlosti. Pregled prethodno navedenih senzorskih tehnologija navodi se u okviru [2] i [7]. Svi navedeni senzorski sistemi poseduju potrebnu kompaktnost i metrološku robusnost za ugradnju na vrh manipulacionog robota i primenu u industrijskoj sredini. Sa metrološke tačke gledišta, industrijski robot u ovakvom sistemu ima funkciju programabilne pokretne platforme za kretanje/manipulaciju senzorskog sistema u prostoru i njegovo dovođenje u optimalnu poziciju. U određenim situacijama zahteva se kombinacija dva različita senzorska sistema (često različite fizičke prirode, kao što je kombinacija optičkog i induktivnog senzora u konfiguraciji diferencijalnog para) čime se dobijaju hibridna rešenja sa sasvim novim, unapređenim metrološkim performansama.

U ovom ekstenzivnom radu saopštava se deo rezultata koji su ostvareni u okviru projekta MA14035 INTOSA², gde su razvijene konceptualne osnove jednog robotizovanog sistema za 3d digitalizaciju objekata kompleksne geometrije na bazi CCD laserskog senzora sa tačkastom optičkom triangulacijom i na bazi triangulacionog senzora sa struktuiranim izvorom svetlosti, za opštu primenu na linijama za montažu u automobilskoj industriji, industriji komponenta, uključujući i kontrolu geometrije proizvoda u ekstremnim situacijama, kao što su otkovci u vrućem stanju ili zavareni sklopovi u svim fazama montaže. Praktična upotrebljivost ovog koncepta proverena je i demonstrirana u laboratorijskim uslovima u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu.

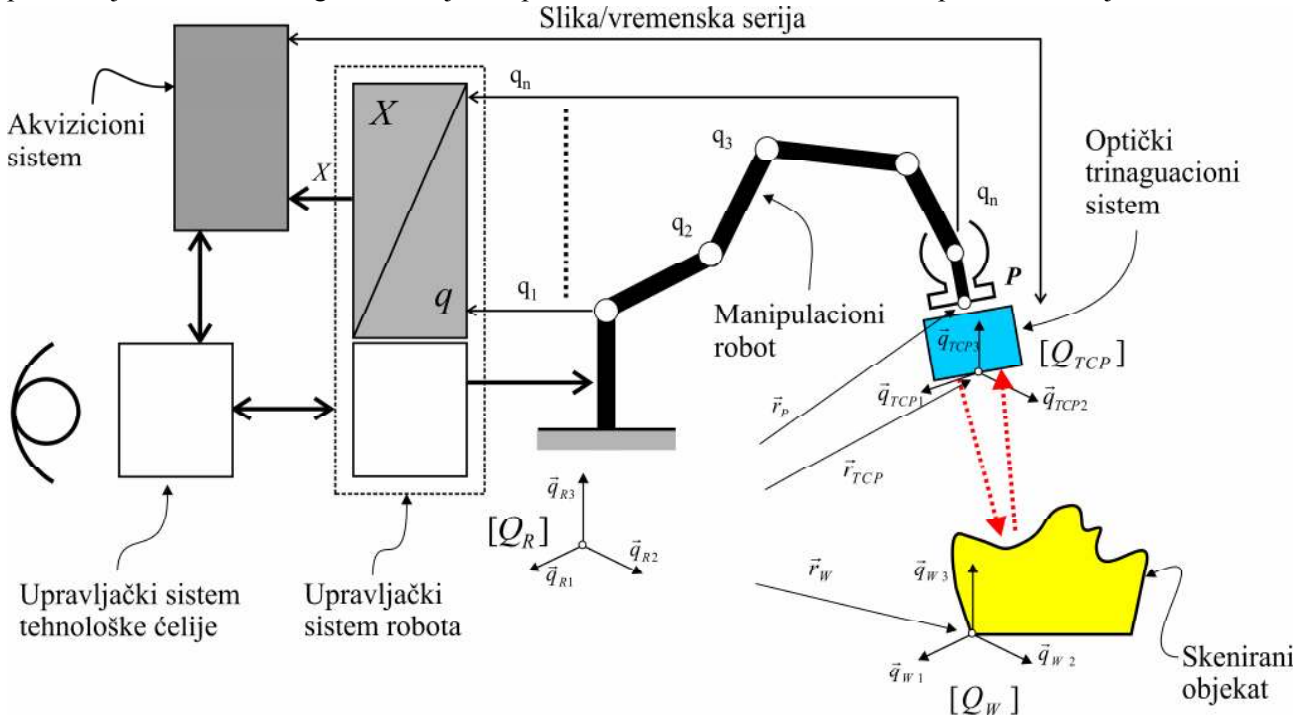
2. KONCEPT SISTEMA

Merni sistem se sastoji iz: 1) industrijskog robota odgovarajuće kinematske konfiguracije, 2) optičkog triangulacionog sistema i 3) akvizicionog sistema za kondicioniranje i prikupljanje senzorskih 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 kolinearnost i/ili ortogonalnost sa glavnim osama simetrije terminalne priključne ploče robota.

Integracija robota i triangulacionog 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 triangulacionog senzora. Akvizicioni sistem vrši sinhronizovanu akviziciju unutrašnjih koordinata robota očitavanjem koordinata enkodera aktuatora upravljivih stepeni slobode robota i merne distance do objekta koji se digitalizuje. U sukcesivnim trenucima uzorkovanja akvizicioni sistem povlači i memoriše vektor koji ima $(n+1)$ elemenata, gde je sa n označen broj aktivnih

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.

stepeni slobode robota. Od akvizicionog sistema se zahteva da poseduje funkciju diskontinualnog povlačenja enkoderskih signala i sa njima uparene merene distance, kada se to planom merenja zahteva.



Slika 1. Koncept robotskog mernog sistema.

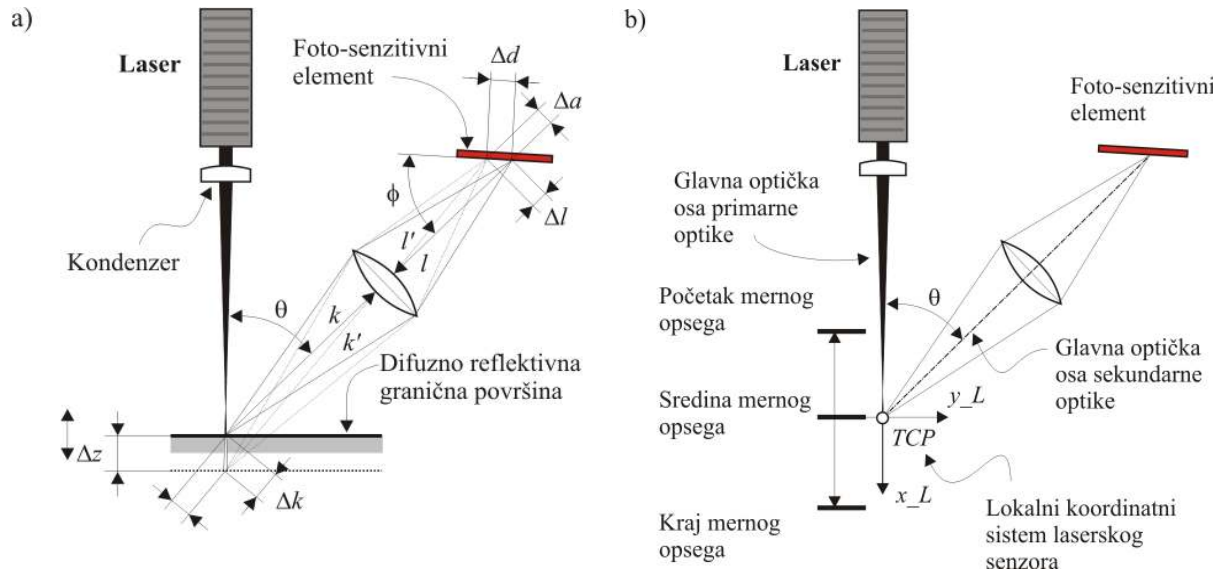
Po pravilu, zadatak skeniranja se sastoji iz niza sekvenci repozicije vrha robota, koje mogu ali ne moraju da dalje imaju svoju podstrukturu, odnosno kretanja po nekoj lokalnoj trajektoriji ili druge oblike podsekvenci skeniranja i podsekvenci repozicije vrha robota. Svaka od sekvenci kao izlazni rezultat generiše vektor jedne konture ili ravansku sliku, 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.

Akvizionni sistem može da bude deo ćelijskog kontrolera, ili da se locira u sloju odmah ispod ćelijskog kontrolera. U svakom slučaju on je nadređen mikroprocesorskom sistemu trinagulacionog senzorskog sistema i u hijerarhijskom smislu paralelizovan sa upravljačkim sistemom robota.

3. SISTEMI BAZIRANI NA LASERSKOJ TRIANGULACIJI

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 koji se digitalizuje. Optička osa primarnog optičkog sistema je značajna u tehnološkom smislu, jer se za nju vezuje jedna od osa lokalnog koordinatnog sistema. U slučaju difuzne triangulacije, emitovani svetlosni snop prečnika od 10 do 100 μ m, reflektuje se u svim pravcima, pokoravajući se Lambertovom zakonu difuzne refleksije [3]. Jedan deo reflektovane svetlosti reflektuje se i u pravcu glavne 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, može se postići ekstremno visoka tačnost i rezolucija, uključujući i podmikronski nivo. Brzina skeniranja se kreće od nekoliko stotina odmeraka u sekundi pa do nekoliko desetina kHz. Trinagularni senzori ove vrste se odlikuju velikom robusnošću i metrološkom stabilnošću. Za primenu u industrijskim uslovima, posebno je značajna neosetljivost na ambijentalnu svetlost, kao i svetlost koju može da zrači površina samog objekta koji se digitalizuje. U zavisnosti od izabranih konstrukcionih karkateristika optičkog sistema senzora, ostvaruju se različiti merni opsezi, od nekoliko milimetara pa do nekoliko metara, kao i njihova projekcija u odnosu na telo senzora (takozvana *stand off distance*), koja se takođe kreće u razmerama mernog opsega. Ovde treba naglasiti, da se specijalnim konstrukcijama mogu ostvariti i kombinacije sa velikom

projektovanom distancom mernog opsega uz istovremenu malu vrednost mernog opsega, što je vrlo pogodno za primenu u delikatnim situacijama, kao što je merenje zagrejanih objekata ili teško pristupačnih zona, uz zadržavanje potrebne rezolucije, koja je uvek funkcija mernog opsega (MO) i kreće se do 2^{-14} MO.



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

Pomeraj granične površine objekta, Δz , proporcionalan je pomeraju Δd težišne tačke fokusirane svetlosti koja pada na fotosenzitivni pretvarač. Ova zavisnost se jednostavno izvodi primenom elementarnih trigonometrijskih relacija [2]:

$$\Delta d = \Delta z \frac{l}{k} \sin \theta \quad (1)$$

Ova jednačina je aproksimativna i izvedena je pod pretpostavkom da je Δz mala veličina, a da θ ostaje konstantno tokom merenja. Uzimajući u obzir žižnu daljinu sekundarnog sabirnog sočiva f može se izračunati potreban ugao zakretanja fotosenzitivnog pretvarača, ϕ , a odatle i korigovana relacija (1), koja iskazana eksplicitno po Δz sada glasi:

$$\Delta z = \frac{1 \sin \phi}{m \sin \theta} \Delta d \quad (2)$$

pri čemu je:

$$m = \frac{f}{k - f} \quad (2a)$$

$$\tan \phi = \frac{1}{m} \tan \theta \quad (2b)$$

Ugao između primarne i sekundarne optičke ose θ , i udaljenost sekundarnog sočiva k , predstavljaju konstruktivne veličine senzora. Merena distanca se na osnovu (2) dalje izračunava iz:

$$z = z_0 + \Delta z = z_0 + \frac{1 \sin \phi}{m \sin \theta} \Delta d \quad (3)$$

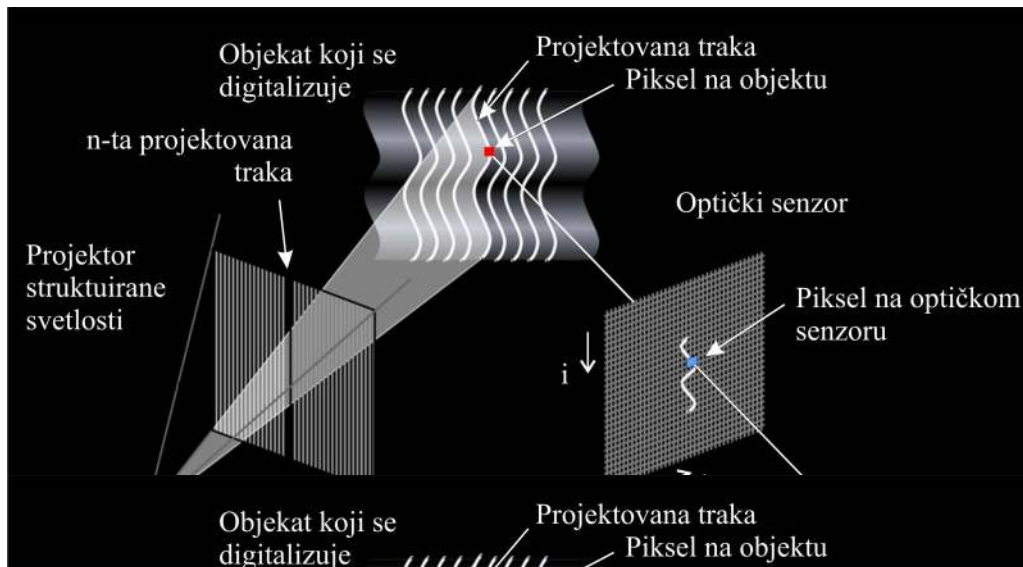
Relacije (2b) i (3) su aproksimativne i one su prvenstveno namenjene za ove vrste senzora. Konačna zavisnost između distance Δz i odgovarajućeg pomeraja Δd fokusiranog odraza laserskog zraka određuje se kalibracijom.

4. SISTEMI BAZIRANI NA TRIANGULACIJI STRUKTUIRANE SVETLOSTI

Kod senzorskih sistema baziranih na strukturanoj svetlosti, objekat koji se digitalizuje se osvetljava ravanskim izvorom svetlosti. Ovaj izvor poseduje mogućnost da generiše i na objekat projektuje dvodimenzionalnu mapu, unapred poznatog i u potpunosti definisanog sadržaja [7], [8]. Najčešće je to

pravilna mreža horizontalnih ili vertikalnih traka, monohromatske, polihromatske ili bele svetlosti, sa unapred poznatim i precizno definisanim profilom osvetljenosti. Projekcijom ovakve mape deo prostora u kome se nalazi osvetljeni objekat se segmentira snopom svetlosnih ravni. Projektovana mapa može da bude i u obliku ortogonalne mreže, kao i u obliku mreža neuniformne strukture. Ovakava svetlost se naziva strukturiranom svetlošću, u smislu da ona predstavlja neku precizno uređenu ravansku strukturu, kojom se kodira neki informacioni sadržaj i utiskuje u svetlost koju emituje izvor triangulacionog senzorskog sistema. Taj informacioni sadržaj se projektuje na objekat koji se digitalizuje. U svetlosnom odrazu koji nastaje spekularnom ili difuznom refleksijom, struktura ulazne svetlosti se deformiše i tako menja kodirani informacioni sadržaj. Suština ove tehnologije se sastoji u tome da se upoređivanjem emitovanog informacionog sadržaja i informacionog sadržaja svetlosnog odraza od objekta koji se digitalizuje, a koji se registruje nekim dvodimenzionalnim senzorskim sistemom, generiše neki novi informacioni sadržaj iz koga je moguće jednoznačno izračunati treću dimenziju osvetljenog dela površi tog istog objekta.

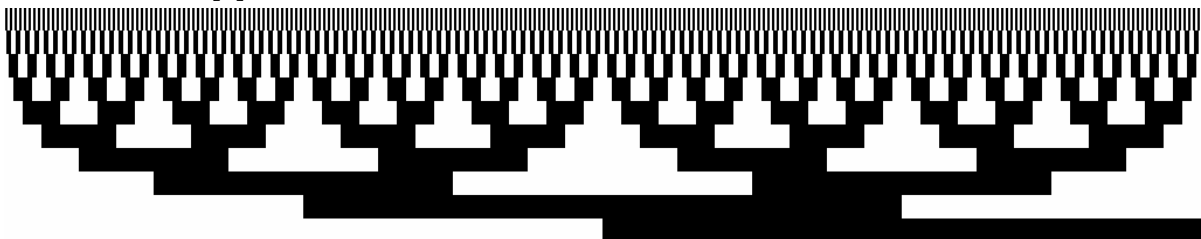
Izračunavanje, odnosno dodavanje treće dimenzije dvodimenzionalnom svetlosnom odrazu se izvode primenom elementarnog principa optičke triangulacije, u ovom slučaju nad dvodimenzionalnim skupom tačaka.



Slika 3. Princip funkcionisanja triangulacije strukturiranom svetlošću.

Funkcija triangulacionog sistema ove vrste obuhvata tri karakteristina zadatka.

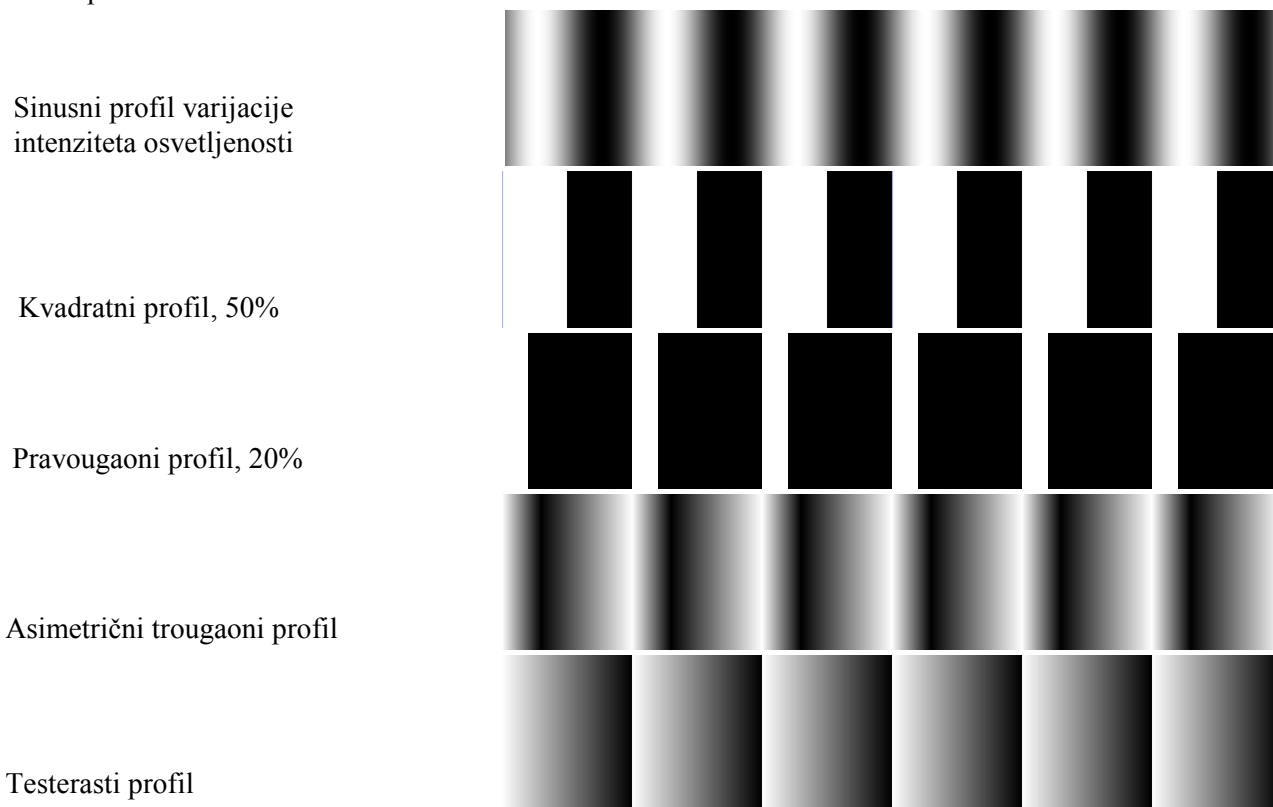
Prvi zadatak je zadatak generisanja strukturirane svetlosti, koji u opštem slučaju obuhvata jednu sekvencu proizvoljne dužine različito kodiranih mapa, koje se usmeravaju i odgovarajućim kolimacionim optičkim sistemom fokusiraju u podprostor u kome je lociran objekat koji se digitalizuje. Primer jedne sekvence mapa koja se sastoji iz uniformnog niza belih i crnih linija binarnog profila intenziteta svetlosti prikazana je na slici 4. U konkretnom slučaju je to sekvencu dužine deset mapa kodiranih Grejovim cikličnim kodom [9].



Slika 4. Sekvenca mapa jednog generatora strukturirane svetlosti izvedena primenom Grejovog cikličnog koda sa binarnim profilom osvetljenosti.

Profil intenziteta svetlosti može da bude drugačiji od binarnog. Na slici 5 prikazani su varijantni oblici profila osvetljenosti koji se mogu primeniti kod kodiranja različitih monohromatskih mapa, uključujući sekvencu mapa čija je osnova generisana korišćenjem Grejovog koda (navedena na slici 4). Utiskivanjem ovakvog koda u projektovanu svetlost postižu se posebni efekti u modulu za prepoznavanje oblika, odnosno u delu dekodiranja svetlosnog odraza od objekta koji se digitalizuje.

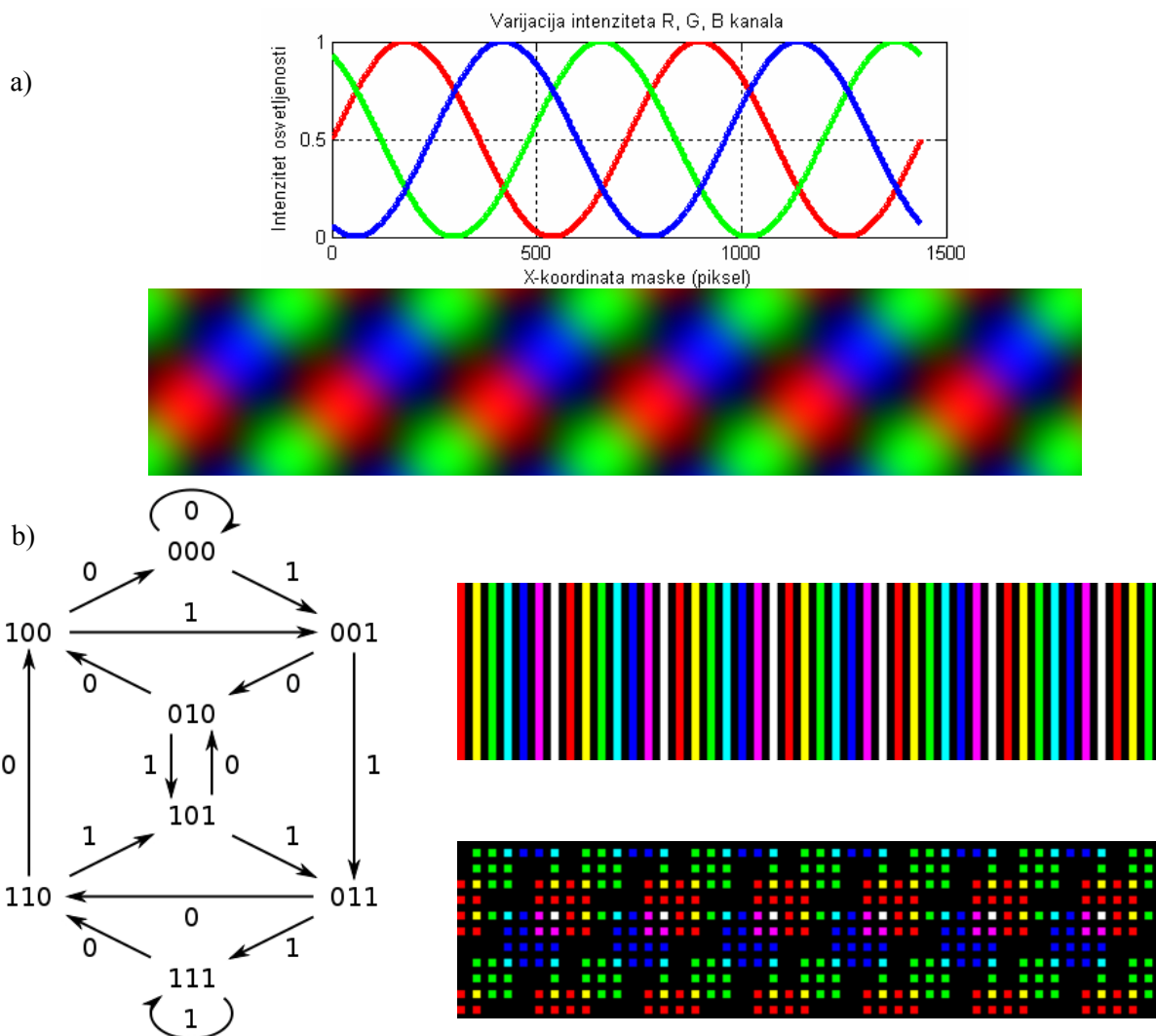
Uvođenjem višekanalne RGB strukture u kodiranje svetlosne mape pruža nove mogućnosti za dekodiranje svetlosnog odraza. Monohromatska mapa se može posmatrati kao superponirana trokanalna RGB mapa, u kojoj su sva tri kanala međusobno jednaka. Uvođenjem faznog pomaka, bez promene profila intenziteta po pojedinim kanalima, projektovana svetlost iz monohromatskog prelazi u kolor domen. Relaksacijom ograničenja jednakosti profila osvetljenosti može se formirati kolor mapa proizvoljne strukture, vrlo visokog informacionog sadržaja, kojim se može značajno redukovati problem dekodiranja svetlosnog odraza i izgradnja algoritama velike robusnosti za izračunavanje treće dimenzije. Na slici 6a je prikazan princip generisanja ortogonalne RGB kolor mape primenom faznog pomaka kao i opšti slučaj neograničene manipulacije kolor kanalima na primeru baziranom na posebnom kodu izvedenom iz De Bruijn-ovih sekvenci trećeg reda nad dimenzijama R, G i B, uz određene modifikacije koje obezbeđuju maksimalnu distancu između sukcesivnih članova kodnog niza (slika 6b) [6]. U drugom slučaju primenjen je binarni profil intenziteta svetlosti.



Slika 5. Neki od varijantnih profila osvetljenosti monohromatskom svetlošću.

Drugi zadatak se sastoji iz dva zadatka nižeg reda, od kojih se prvi odnosi na kalibraciju podprostora u kome se nalazi zona fokusa primarnog i sekundarnog optičkog sistema, a drugi na određivanje prostorne transformacione matrice.

Za razliku od kalibracije laserskih triangulacionih senzora sa tačkastom triangulacijom, kalibracija sistema sa optičkom triangulacijom strukturirane svetlosti je višestruko kompleksniji zadatak. Kalibracionim procesom vrši se kompenzacija sferne i hromatske aberacije primarne i sekundarne optike mernog sistema. Na ovaj način potiskuje se inherentna i po pravilu nepoznata greška optičkog sistema senzora. Takođe, kalibracijom se istovremeno vrši identifikacija stvarnih geometrijskih konstanti mernog sistema u celini (lokacija i orijentacija primarnog i sekundarnog optičkog sistema u prostoru, pre svega). Istovremeno ostaruje se i zadatak identifikacije transformacione matrice kojom se dvodimenzionalna projekcija zahvaćenog odraza dekodira i prevodi u trodimenzionalni prostor. Ovo je vrlo delikatan matematički zadatak, koji pored matematičke kompleksnosti sadrži i računsku kompleksnost, posebno kod visokorezolutnih sistema. Dok su kalibracione matrice kojima se kompenzuju optičke aberacije konstanta za jedan senzorski sistem, transformaciona matrica je spregnuta sa usvojenim kodom koji generiše uređenje strukturirane svetlosti koja se u konkretnom slučaju primenjuje. U opštem slučaju, u radu sa strukturiranom svetlošću, primenjuju se sekvence od desetak ili više sukcesivnih mapa, što zahteva poznavanje isto tolikog broja transformacionih matrica. Savremeni personalni računari mogu sa jednostavnošću da manipulišu ovakvim matricama, tako da računaska kompleksnost u osnovi ne predstavlja problem. Bitna je samo činjenica neophodnosti postojanja ovakvog modula velike računске snage.



Slika 6. Kodiranje primenom manipulacije i superpozicije RGB kanalima. a) Manipulacija faznim pomakom i iz toga generisana ortogonalno superponirana mapa. b) Slobodna manipulacija faznim pomakom i intenzitetom; mapa kodirana na bazi modifikovanih De Bruijn-ovih sekvenci u linijskoj i ortogonalno superponiranoj formi.

Mape navedene na slikama 5 i 6 su potpuno parametrizovanog oblika i preuzete su iz specijalno razvijenog softverskog modula za generisanje i projekciju strukturane svetlosti u okviru demonstracione instalacije koja se gradi u Centru za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu i čiji je razvoj deo istraživačkih aktivnosti u okviru projekta MA14035.

Ključni funkcionalni zadatak senzorskog sistema baziranog na optičkoj triangulaciji strukturane svetlosti sadržan je u trećem zadatku. U okviru ovog zadatka vrši se analiza zahvaćenog odraza optoeletričnim pretvaračem na prijemnoj strani senzorskog sistema. U osnovi ovaj zadatak se svodi na zadatak matematičkog prepoznavanja oblika, odnosno prepoznavanje izmenjenih sadržaja kodiranih u projektovanoj strukturalnoj svetlosti. Prepoznavanje oblika je u osnovi najsloženiji zadatak analize slike generalno. Kada se radi o odrazima nastalim refeleksijom nestruktuirane svetlosti, na današnjem nivou razvoja tehnika za obradu signala, ne postoji algoritam opšte primenljivosti, koji bi sa prihvatljivom robusnošću bio primenljiv u industrijskim uslovima. Upravo u ovom detalju se nalazi i puni inženjerski smisao koncepta strukturane svetlosti. Kodirani informacioni sadržaj koji u sebi nosi strukturana svetlost u sistem za prepoznavanje oblika unosi dovoljan apriorni informacioni kontekst da se osnovni problem prepoznavanja oblika relaksira do te mere, da operativno raspoloživa znanja iz oblasti analize signala omogućavaju relaksaciju pouzdanih i dovoljno robusnih modula za obradu primljenog sadržaja i na osnovu toga, generisanje digitalnog modela objekta. Konkretno, nad prepoznatim izmenjenim kodnim sadržajem sadržanim u zahvaćenom odrazu projektovane strukturane svetlosti, sprovodi se aberaciona korekcija, a zatim primenom identifikovane transformacione matrice dvodimenzionom sadržaju se dodaje treća dimenzija i tako formira prostorni oblak tačaka na nivou rezolucije optičkog sistema ili, određenim

tehikama, na subpikselskoj rezoluciji. Usvojeni sistem kodiranja strukturane svetlosti kao i struktura sekvence projektovanih mapa određuje tačnost sistema. Takođe, tačnost sistema je određena kvalitetom kalibracionog procesa.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan koncept sistema za robotizovnu digitalizaciju prostornih objekata kompleksne geometrije baziranog na primeni tačkastih laserskih i linijskih senzora sa jednostrukom triangulacijom. Prikazana je struktura sistema i diskutovani kritični detalji kao i sistem za akviziciju i obradu senzorskih signala. Paralelno, razmatran je i koncept jedne nove tehnologije optičke digitalizacije prostornih objekata primenom strukturane svetlosti. Za razliku od laserskog izvora svetlosti, strukturana svetlost u sebi sadrži kodiranu apriornu informaciju, koja se kasnije koristi za ekstrakciju treće dimenzije iz svetlosnog odraza zahvaćenog prijemnim dvodimenzionim optoelektričnim pretvaračem. Pokazani su osnovni sadržaji ove tehnologije i osnovni zadaci.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Петровић П., Лукач Ж., Новаковић Г., Тирић Д., (2003) Примена ласерских проксиметара са оптичком триангулацијом код мерења дебљине металкордног гумираног платна, Техника, година 52, број 1, стр. 1-10, ИССН 0040-2176.
- [3] Petrović, P., *Rubberized Cord Thickness Measurement Based on Laser Triangulation – Part I: Technology*, FME Transaction, Vol 35, pp: 77-84., November 2007
- [4] 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.
- [5] Schwenke, H., et al., *Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering*, Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 2, pp: 685-699, 2002.
- [6] Fechteler, P., Eisert, P., Rurainsky, J.: Fast and High Resolution 3D Face Scanning Proc. of ICIP 2007
- [7] Wilke, W., Segmentierung und Approximation großer Punktwolken, PhD Dissertation, Technischen Universität Darmstadt - Fachberich Mathematik, 2002.
- [8] Bouguet, J-Y., Visual methods for three_dimensional modeling, California Institute of Technology Pasadena_California, 1999.
- [9] Wu, H.B., Chen, Y ., Wu, at all., 3D Measurement Technology by Structured Light Using Stripe-Edge-Based Gray Code, Journal of Physics: Conference Series 48 (2006) 537–541 (International Symposium on Instrumentation Science and Technology)

Robotized Systems for Non-Contact Dimensional Metrology Based On Optical Triangulation – Part 1: Concept

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. In the first part conceptual framework and basics of system architecture are given, the key aspects of the two systems interface are considered and two extreme optical triangulation systems concepts (systems based on point configuration and laser light source and systems based on spatial triangulation and structured light source) are elaborated. Proposed concept is practically implemented through development of two universal laboratory installations for demonstration and experimental validation.

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