

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Centar za nove tehnologije Katedre za proizvodno mašinstvo
Laboratorija za kibernetiku i mehatronske sisteme - CMSys Lab
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, SRBIJA

Tehničko rešenje CMSysLab 2012-01

**EKSPERIMENTALNI SISTEM ZA OPTIČKU
TRIANGULACIJU STRUKTURIRANE
SVETLOSTI**

Beograd, januar 2013.

Specifikacija tehničkog rešenja u skladu sa Pravilnikom za vrednovanje rezultata istraživanja Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije:

Vrsta tehničkog rešenja	Laboratorijski prototip (M85)
Autori tehničkog rešenja	Prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. ing. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Vladimir Miković, dipl. inž. maš.
Naziv tehničkog rešenja	Eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti
Za koga je rađeno tehničko rešenje	Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu Tehničko rešenje je razvijeno u okviru projekta TR35007: Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju,
Ko koristi tehničko rešenje	Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Godina realizacije tehničkog rešenja	2012.
Verifikacija rezultata	Od strane recenzenata: Prof. dr Janko Hodolič, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad Prof. dr Miroslav Pilipović, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Ko je prihvatio tehničko rešenje	Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Primena rezultata	Laboratorija za Kibernetiku i mehatronske sisteme, Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

1. OBLAST NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI

Tehničko rešenje se odnosi na oblast robotike i interakcije robota sa njegovim okruženjem. Pored mehaničke interakcije preko kontaktne sile koja deluje na vrh robota, drugi vrlo značajan prostor za interakciju robota sa okruženjem jeste vizuelna informacija, odnosno veštačko gledanje (machine vision).

Kao i kod čoveka, vizuelnom informacijom robot prikuplja potrebne informacije o geometriji objekata koji ga okružuju i njihovim relativnim odnosima statičke i dinamičke prirode. Vizuelna informacija je od suštinskog značaja za autonomno ponašanje robota u mnogim proizvodnim procesima. Robotsko zavarivanje je karakterističan primer.

2. TEHNIČKI PROBLEM

Sistem veštačkog gledanja se sastoji iz: 1)modula za akviziciju vizuelne informacije preko optoelektričnog senzora, 2)modula za obradu senzorskih signala i 3)modula za prepoznavanje objekata i generisanje njihovih ravanskih ili prostornih modela. Sistem veštačkog gledanja je vrlo kompleksan, zato što je vrlo teško obezbediti idealne optičke uslove, odnosno potpunu eliminaciju senki, refleksija i drugih oblika poremećaja i zato što je količina informacija koju generiše optički sistem enormno velika i zahteva veliki obim izračunavanja. Poseban problem je prepoznavanje oblika i na osnovu toga generisanje ravanskih i prostornih modela objekata. Da bi se razrešili navedeni problemi razvijen je veliki spektar tehnika softverskog, hardverskog ili kombinovanog tipa. U okviru ovog tehničkog rešenja razmatra se tehnika akvizicije geometrijske informacije na bazi strukturane svetlosti.

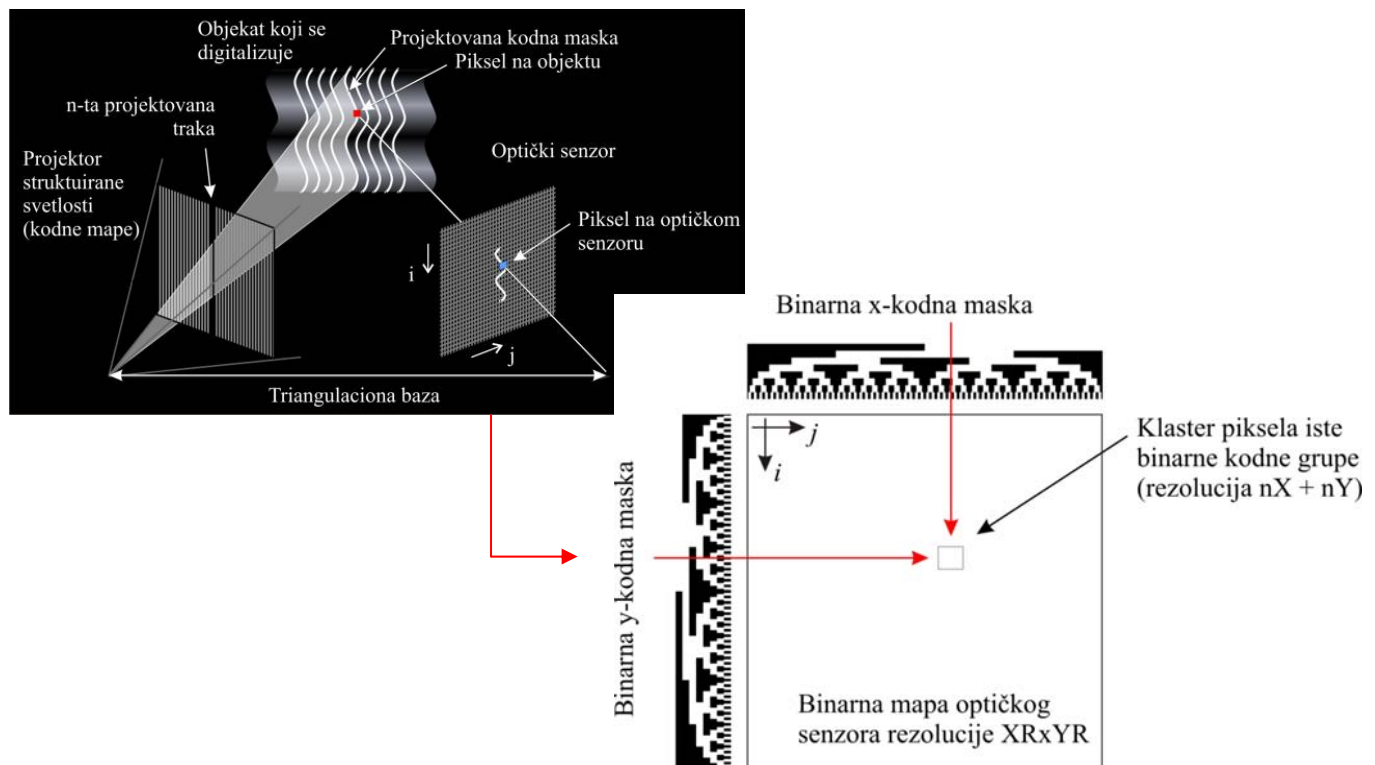
3. STANJE TEHNIKE

Idealni sistem veštačkog gledanja, pogodan za sve slučajeve primene u industrijskoj praksi, uključujući i robotiku, ne postoji. Naprotiv, realno stanje stvari je takvo da su sistemi veštačkog gledanja objektivno posmatrano bliži svom razvojnom početku nego terminalnoj fazi. Sistemi veštačkog gledanja su vrlo kompleksna istraživačka oblast tehnike, koja već par decenija predstavlja oblast neprekidnih i vrlo dinamičnih istraživanja. U oblasti robotike primenjuju se različiti sistemi veštačkog gledanja koji se generalno dele na dve oblasti: 1)Sistemi koji su bazirani na triangulacionim tehnikama i 2)Sistemi koji su bazirani na netriangulacionim tehnikama. Kod prve grupe moguće je generisanje treće dimenzije i konsekvantno, gradnja prostornih modela. Triangulacioni sistemi veštačkog gledanja predstavljaju osnovni istraživački okvir u kojem je nastalo ovo tehničko rešenje.

Triangulacija se najčešće sprovodi na bazi laserskog izvora svetlosti tačkastog ili linijskog tipa. Senzori realizovani na ovom principu predstavljaju dugi niz godina industrijski standard, mada se u ovoj oblasti paralelno odvijaju intenzivna razvojna istraživanja u cilju unapredjenja proizvoda. Najnovija istraživanja su fokusirana na triangulaciju strukturane svetlosti, odnosno svetlosti koja u sebi sadrži precizan i apriori poznat kodni zapis. Osvetljavanjem scene strukturanom svetlošću moguće je sistematsko potiskivanje velikog broja poremećaja (senke, i refleksije, posebno) i ekstremno brza akvizicija geometrije scene ili izolovanog objekta koji se posmatra. Dakle, sistemi veštačkog gledanja bazirani na triangulaciji strukturane svetlosti predstavljaju tehnologiju visokih performansi po pitanju robusnosti i brzine i zato je ova tehnologija vrlo interesantna za robotiku i primenu sistema veštačkog gledanja u realnom vremenu. U istraživačkom smislu, ovo je nova tehnologija koja nije u potpunosti istražena i predstavlja oblast intenzivnih istraživačkih i razvojnih aktivnosti. Tehničko rešenje koje se ovde opisuje je rezultat napora projektnog tima na projektu TR35007 da se ova tehnologija kroz određene istraživačke i laboratorijsko-eksperimentalne aktivnosti uvede u istraživački, a zatim i industrijski prostor Srbije.

4. KONCEPT TEHNIČKOG REŠENJA

Koncept optičke triangulacije strukturirane svetlosti je prikazan na slici 1. On počiva na izvornom konceptu određivanja distance do objekta koji se posmatra pomoću triangulacije i taj princip se danas široko koristi kod laserskih senzora za beskontaktno merenje distance, tačkastog i linijskog tipa. U slučaju triangulacije strukturirane svetlosti postoje dve suštinske razlike, odnosno ekstenzije koncepta laserskih triangulacionih senzora. Prvo, triangulacija je ravanskog tipa, sa paralelnom primenom tačkaste triangulacije nad uredjenim skupom tačkastih elemenata, odnosno piksela, koji čine senzitivnu matricu 2d optoelektričnog pretvarača. Druga bitna razlika je u tome što svetlosni izvor emituje kodiranu svetlost. Pod pojmom kodirane svetlosti ovde se podrazumeva svetlost koja u vremenskom i/ili frekvencijskom domenu sadrži precizno definisan sistem označavanja svakog od emitovanih piksela, takod da se u idealnom slučaju omogućava jedinstveno uspostavljanje veze izmedju emitovanog piksela kojim se osvetljava scena, odnosno objekat od interesa i primljenog piksela, odnosno piksela svetlosnog odraza scene koji je projektovan na diskretni 2d optoelektrični pretvarač. Utisnuti kodni sadržaj u svetlosni izvor omogućava paralelnu triangulaciju i omogućava korekciju poremećaja koji se normalno javljaju zbog niza nesavršenosti u celokupnom optičkom sistemu za triangulaciju strukturirane svetlosti.



Slika 1: Koncept triangulacije strukturirane svetlosti i koncept generisanja binarne kodne mape Gray-ovog cikličnog koda.

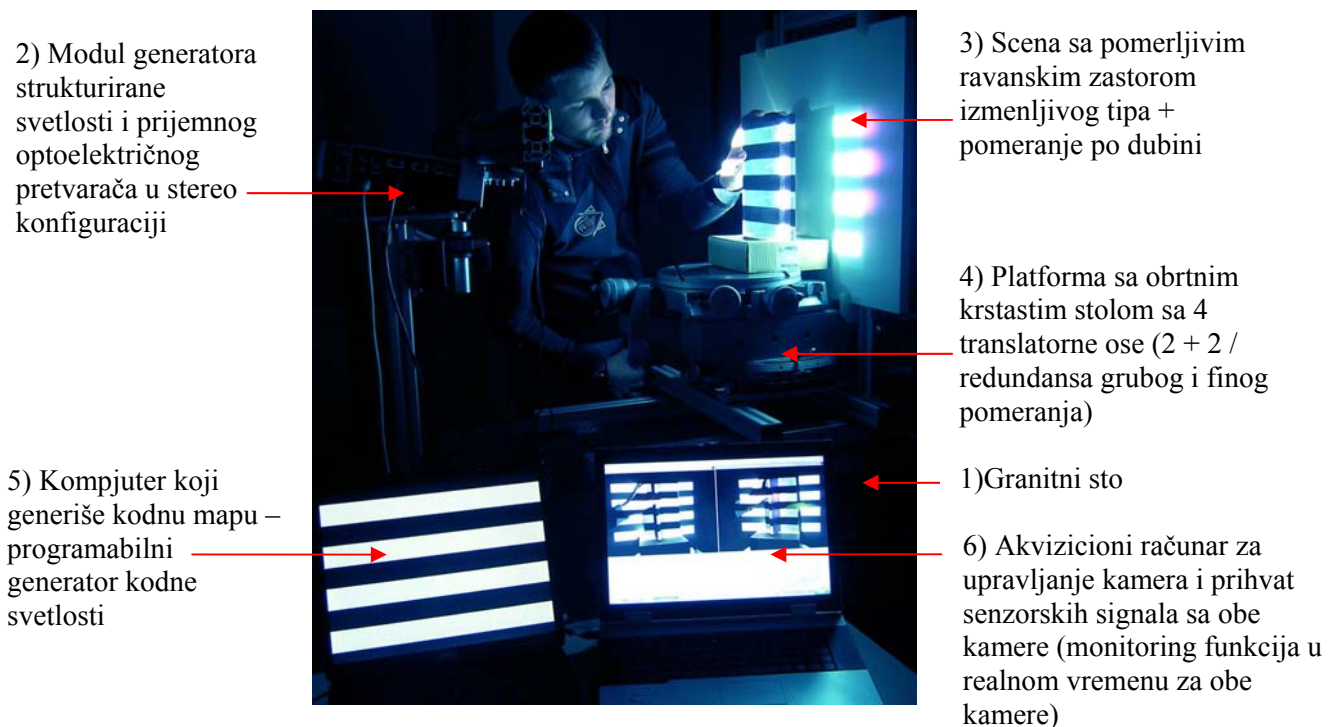
U okviru ovog tehničkog rešenja usvojen je koncept kodiranja baziran na projekciji serije od n 2d binarnih mapa. Te binarne mape se sastoje od dva podskupa: 1) n_H binarnih mapa kodiranih po x-osi i 2) n_V binarnih mapa kodiranih po y-osi, pri čemu važi da je $n = n_H + n_V$ i $n_H = n_V$. Superponiranjem odraza koje prihvata optički senzor za seriju ovih kodnih mapa svakom pikselu se dodeljuje odgovarajući binarna kodna grupa na osnovu koje je moguća lokacija tog piksela. Kodiranje skupa binarnih mapa ostvareno je pomoću Gray-ovog cikličnog koda. Triangulacijom strukturirane svetlosti, odnosno obradom senzorskih signala koje generiše optoelektrični pretvarač, generiše se prostorni oblak tačaka. Taj oblik tačaka se

dalje koristi za generisanje prostornog modela scene, odnosno objekta čija se digitalizacija vrši.

5. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Tehničko rešenje se sastoji iz specifičnog mernog hardvera i ekstenzivog skupa softverskih rutina za obradu senzorskog signala koji generiše optoelektrični pretvarač. Na slici 2 prikazan je hardverski sistem razvijenog tehničkog rešenja, odnosno stacionarnog laboratorijskog prototipa za eksperimentalnu validaciju koncepta.

Hardverski sistem se sastoji iz sledećih funkcionalnih modula: 1) noseća struktura u obliku granitnog stola, 2) modul optičkog sistema koji čine programabilni izvor za projekciju monohromatskih i kolor svetlosnih mapa i par digitalnih kolor kamera u stereo konfiguraciji, rezolucije 640x480 piksela, sa nosačem koji omogućava slobodni izbor triangulacione baze i podešavanje kompletnog optičkog modula u odnosu na scenu, 3) scena sa izmenljivim ravanskim zastorom koji može da se precizno translatorno pomera po dubini, 4) platforma sa obrtnim krstastim stolom sa 4 translatorne ose za podešavanje u ravni, pri čemu su ose u oba pravca redundantne (2 + 2) zbog potrebe grubog i finog podešavanja, 5) PC kompjuter koji generiše kodnu mapu – programabilni generator kodne svetlosti binarnog, monohromatskog i kolor tipa i 6) PC kompjuter sa odgovarajućim USB interfejsom za upravljanje radom kamera i prihvatanje senzorskih signala sa kamera uz monitoring funkciju u realnom vremenu za obe kamere.



Slika 2: Konfiguracija hardverskog sistema tehničkog rešenja.

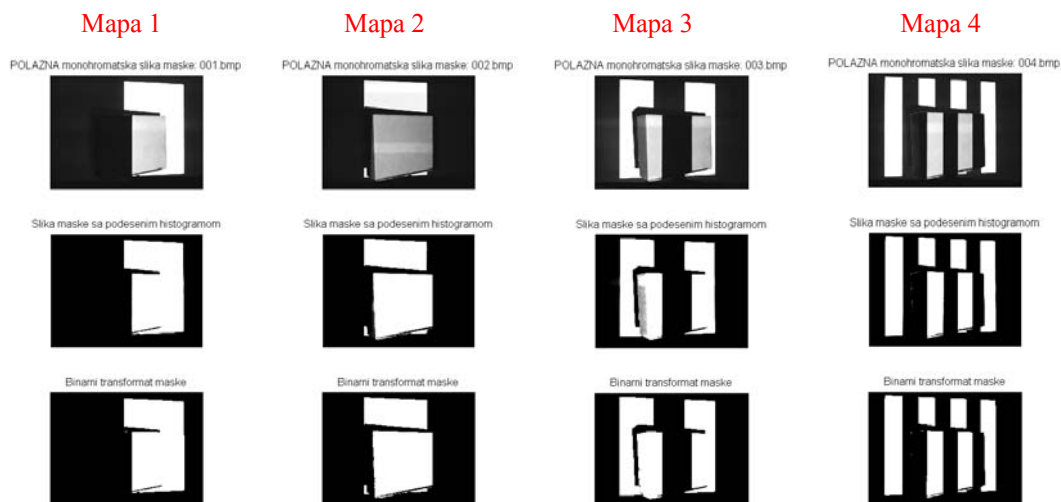
Softverski sistem koji je sastavni deo tehničkog rešenja se sastoji iz skupa rutina neophodnih za ostvarivanje sledećih funkcionalnosti: 1) rutine za generisanje kodnih mapa, 2) rutine za kalibraciju optičkog sistema unutar zadanog mernog prostora (bazirani na Hough-ovoj transformaciji binarne slike), 3) rutine za kalibraciju triangulacionog sistema linearnog i nelinearnog tipa, 4) rutine za automatsku obradu / poboljšavanje slike (filtracija, korekcija histograma i slično) i transformaciju kolor u monohromatski format slike sa algoritmom baziranim na adaptivnom pragovanju, 5) rutine za triangulaciju (generisanje treće dimenzije)

klasterovanih kodnih grupa zadate prostorne rezolucije i formiranje prostornog oblaka tačaka, 6) rutine za generisanje prostornog modela uniformnom prostornom diskretizacijom (uniformna mreža), 7) rutine za manuelnu korekciju prostornog modela eliminacijom rasutih tačaka i 8) rutine za presvlačenje generisanog virtuelnog prostornog modela kolor mapom realnog objekta – formiranje prostorne 'kože' koja se nanosi na površinu modela. Navedene rutine su u celosti realizovane u Matlab razvojnom okruženju uz primenu odgovarajućih interfejsa za interakciju sa komponentama optičkog hardvera.

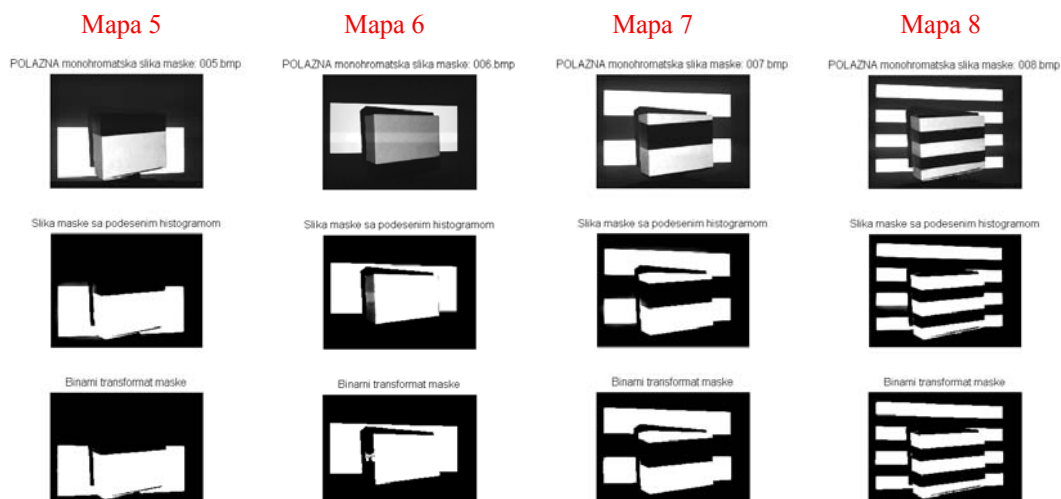
Zbog kompleksnosti matematičkog aparata i obimnosti algoritama prevedenih u odgovarajući Matlab kod, dalje se navodi jedan jednostavan primer koji u celosti ilustruje funkcionalnost realizovanog tehničkog rešenja.

Na slici 3 prikazan je konkretan slučaj serije binarnih kodnih mapa za je je $n_H = 4$ i $n_V = 4$ što daje prostornu rezoluciju od $n = n_H + n_V = 8$. To znači da se ukupan prostor zahvaćen optičkim senzorom diskretno pokriven prostor zahvaćen optičkim senzorom diskretizuje na 256 klastera piksela sa istim kodni sadržajem.

Мапе кодирание по х оси:

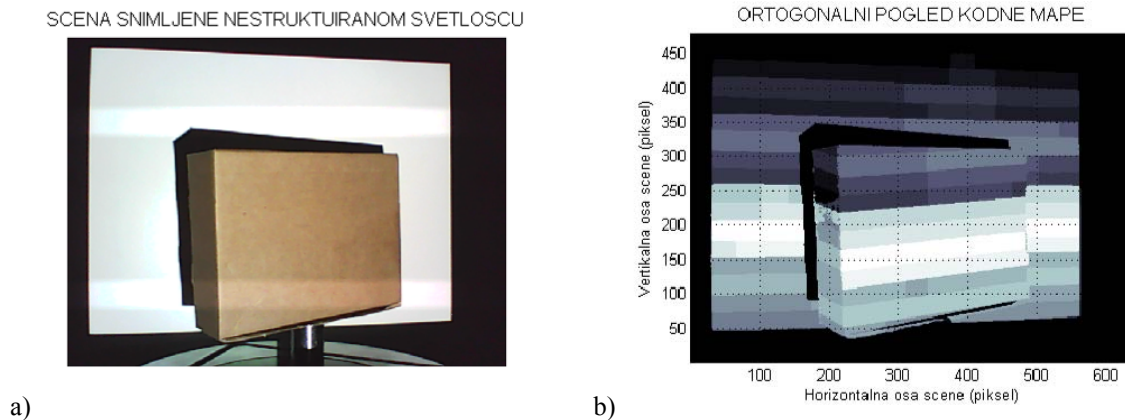


Мапе кодирание по у оси:



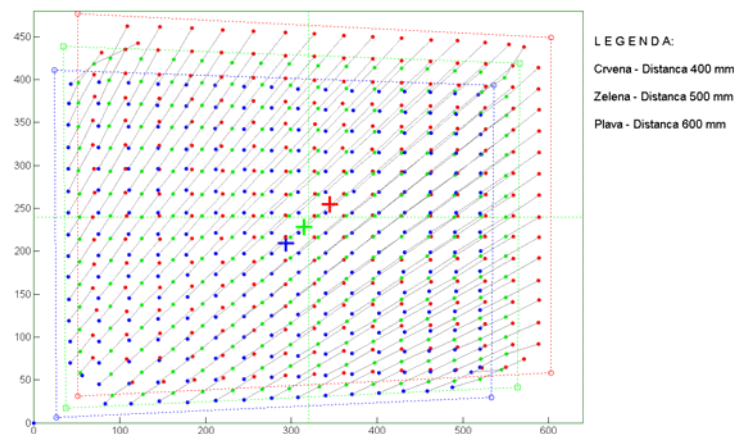
Слика 3: Prikaz skupa projektovanih binarnih kodnih mapa rezolucije n-8 koje dele ukupan prostor scene na 256 podprostora. Svaka od ukupno 8 mapa prikazana je u svom izvornom monogromatskom obliku, zatim u monohromatskom obliku sa podesenim histogramom i na kraju binarni transformat koji se dalje obrađuje.

Na slici 4 je prikazan originalni zapis scene i scena sa superponiranim kodnim mapama, pri čemu je nijansom sivog prikazan decimalni ekvivalent kodnog sadržaja piksela. Jasno se uočavaju klasteri piksela sa istim kodnim sadržajem, kojih ukupno ima 256.



Slika 4: Originalna kolor slika scene sa prizmom kao objektom koji se digitalizuje i njen transformat koji nastaje kao rezultat projekcije skupa od 8 kodnih maski.

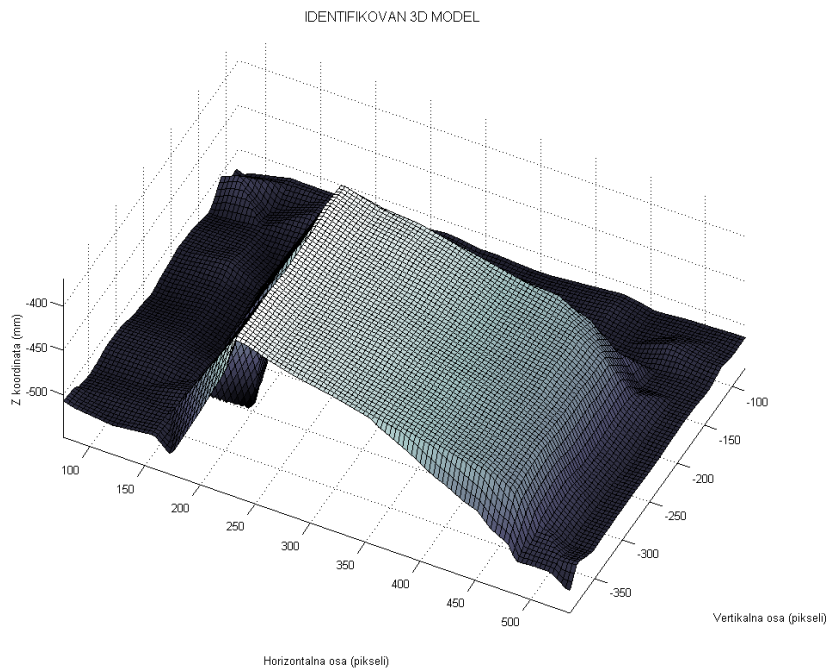
Deformacija projektovanog skupa kodnih maski na slici 4b je očigledna. Ta deformacija je nastala kao posledica dislokacije pojedinih piksela koja nastaje zbog trodimenzionalnosti scene. Za generisanje prostornog modela, odnosno dodeljivanja z-koordinata svakom pikselu u funkciji njegove dislokacije neophodno je da se generiše odgovarajuća transformaciona matrica koja će uzeti u obzir geometrijske i optičke specifičnosti sistema u celini. Ova transformaciona matrica je izvedena procesom kalibracije nad poljem centara klastera. Deo ove procedure je prikazan na slici 5 gde je dat ravanski prikaz polja pomeraja za tri pozicije projekcione ravni (400, 500 i 600 mm) i osmorbitnu rezoluciju kodne mape.



Slika 5: Polje pomeraja centara klastera automatski generisano kalibracionom procedurom optičkog sistema i triangulacionog u tri ravni: 400, 500 i 600 mm, za slučaj osmorbitne prostorne rezolucije kodne mape.

Na slici 6 prikazan je prostorni model koji se izvodi iz generisanog prostornog oblaka tačaka, koji je izveden iz deformisana rezultatne ravanske kodne mapie prikazane na slici 4b. Prostorni modle je generisan uniformnom mrežom sa 9396 tačaka.

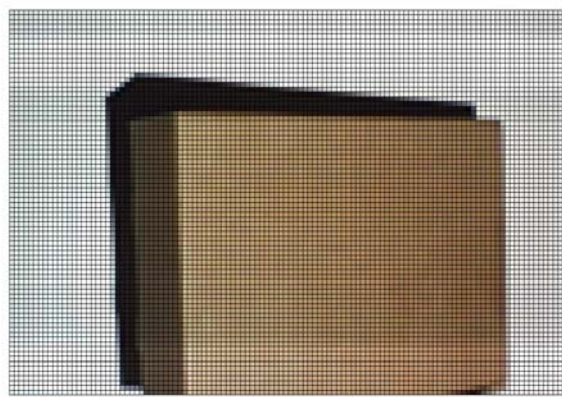
Daljom obradom, na slici 7 je prikazan model sa slike 6 na koji je utisnuta polazna kolor slika scene zabeležena kamerom, odnosno, generisan model je obučen u kožu originala, čime je dobijen utisak fotorealističnosti. Stepem dobijene vernosti može se proceniti na slici 8, gde se porede originalna slika (kolor fotografija scene) i ortogonalna projekcija fotorealističnog modela datog na slici 7.



Slika 6: Prostorni model scene sa prizmom u središtu koji je izveden triangulacijom deformisane kodne mape osmorbitne rezolucije prikazane na slici 4b.

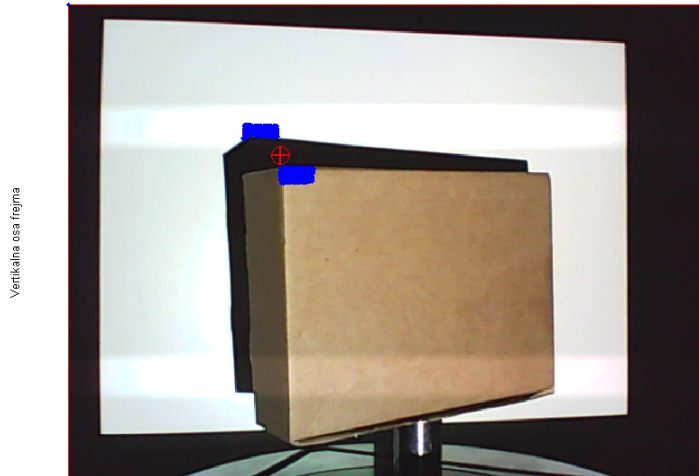


Slika 7: Prostorni model prizme sa slike 6 'obučen u originalnu kožu', preuzetu sa polazne kolor fotografije scene koja se analizira.



Slika 8: Poredjenje originalne fotografije scene sa prizmom (levo) i ortogonalne projekcije generisanog prostornog modela, prikazanon na slici 7.

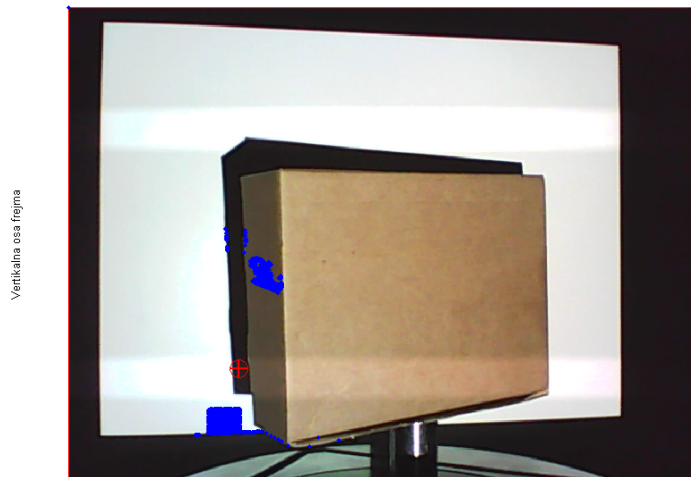
PRIKAZ KLASTERA: Kodna grupa = 102; Broj piksela u klasteru = 905



a)

Horizontalna osa frema

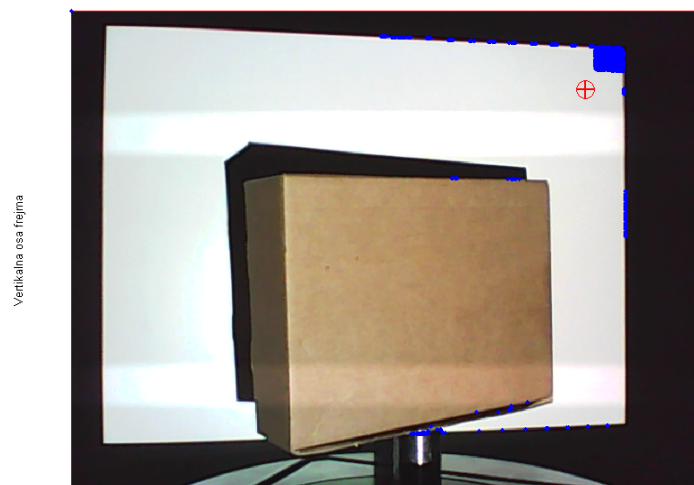
PRIKAZ KLASTERA: Kodna grupa = 130; Broj piksela u klasteru = 1385



b)

Horizontalna osa frema

PRIKAZ KLASTERA: Kodna grupa = 8; Broj piksela u klasteru = 875



c)

Horizontalna osa frema

(a) Greške tipa ivičnog cepanja klastera na dva klastera koja nastaje kao posledica interferencije geometrije objekta koji se digitalizuje i kodne maske koja se na njega projektuje. Ovu grešku je praktično nemoguće eliminisati jer ivica kao geometrijski primitiv tipa diskontinuiteta zahteva beskonačnu rezoluciju. Najkorektnija strategija u ovom slučaju je eliminacija ovakvog klastera i njegova zamena klasterom koji će biti generisan iz nekog drugog pogleda. Slika pokazuje ivično cepanje klastera na dva nekompaktna klastera i centar klastera koji je korektno izračunat matematički, ali sa aspekta modeliranja nije prihvatljiv jer generiše nelogičnu z-koordinatu.

(b) Greške tipa nehomogenosti klastera izazvanog neuniformnošću osvetljenosti. Klaster je nekompaktan i poseduje unutrašnju strukturu koja obuhvata nekoliko dobro definisanih podklastera. Za razliku od slučaja pod (a) ovu grešku je moguće korigovati. Prvi kriterijum je kriterijum kompaktnosti, na osnovu kojeg se može prepoznati greška ovog tipa. Drugi kriterijum je susednost. Na bazi tog kriterijuma moguće je sprovesti subklastersku analizu i precizno razdvojiti piksele na dve klase: 1) pikseli koji su korektno kodirani i 2) pikseli koji imaju grešku u kodu. Za piksele iz prve klase određuje se centar klastera, dok se za drugu klasu piksela vrši korekcija greške koda i dodeljivanje odgovarajućem klasteru.

(c) Greške tipa rasipanja izazvanog optičkim šumom ili refleksijama. Klaster se sastoji iz jednog dobro definisanog jezgra i većeg broja rasutih piksela koji ne formiraju kompaktne podstrukture relevantne za ovu vrstu klastifikacije. Mnoštvo i nekompaktnost ukazuju na uzrok greške ove vrste. To je šum koji je nastao lokalnim refleksijama ili drugim oblicima poremećaja koji su između ostalog, posledica i električnog dela sistema za generisanje strukturanog svetla i sistema za njegovu akviziciju. Grešku ove vrste je moguće prepoznati i izvršiti klasifikaciju na dobro kodirane i loše kodirane piksele. Ipak, pitanje korekcije greške, koja je moguća, ostaje otvoreno zбо malog dobitka i velike štete izazvane obimnim izračunavanjima.

Slika 9: Tipične greške klasterovanja izazvane poremećajima.

Prostorni model prikazan na slici 6 je u osnovi grub, odnosno male tačnosti, jer je generisan prostornom rezolucijom od 8 bita, čime se originalna scena deli na 256 pravougaonih podprostora, odnosno regiona, sa po 1200 miksele, nominalno. Bolji rezultat je jednostavno ostvariv. Povećanjem prostorne rezolucije, raste i kvalitet. Sa opremom koja je korišćena, realno je ostvariva rezolucija od 12 bita, odnosno particija scene na 4096 jednakih regiona, što je za red veličine manji prostorni kvant. Ipak, u takvim uslovima treba očekivati povećanje poremećaja izazvanih nesavršenošću optičkog sistema.

Na slici 9 prikazani su tipični slučajevi grešaka koje se pojavljuju u formiranju kodnih klastera. Plave tačke na slici 8 označavaju piksele sa istim binarnim kodom. Lako se uočavaju greške tipa ivičnog cepanja klastera na dva klastera (a), zatim nehomogenost klastera izazvana neuniformnošću osvetljenosti (b), i greške rasipanja izazvanog optičkim šumom ili refleksijama (c). Binarne kodne grupe dodeljene svakom od piksela omogućavaju dodatne manipulacije što predstavlja specifičnost strukturirane svetlosti i triangulaciju ove vrste čini vrlo potentnom za primenu u teškim uslovim koji postoje u industrijskoj proizvodnji. Dodatne manipulacije podrazumevaju inteligentne tehnike klasterovanja, kojima se proverava kodni sadržaj piksela i takav piksel eliminiše iz dalje analize ili se koriguje greška. Suština je u prostornoj susednosti kodnih grupa koja je posledica primene Gray-ovog cikličnog koda, slično kao i kod Karnoovih mapa.

6. ZAKLJUČAK

Tehničko rešenje: **Eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti**, izvedeno je u obliku laboratorijskog prototipa, koji je kao univerzalna eksperimentalna platforma stacionarnog tipa koncipiran i namenjen za razvoj i praktičnu verifikaciju inovativnih rešenja sistema robotskog gledanja baziranog na optičkoj triangulaciji strukturirane svetlosti. Tokom 2012. godine, tehničko rešenje je instalirano u Laboratoriji za Kibernetiku i mehatronske sisteme, Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Tehničko rešenje je u celosti nastalo kao rezultat samogradnje na projektu TR35007 i sastoji se iz specijalizovanog hardvera (mehanika i odgovarajuća elektronika koja obuhvata programabilni izvor strukturirane svetlosti i optoelektrone pretvarače u stereo konfiguraciji) i softvera (za obradu senzorskih signala i generisanje odgovarajućeg geometrijskog modela scene/objekta koji se digitalizuje u formi prostornog oblaka tačaka i iz toga izvedenog primarnog triangulacionog modela u STL formatu) u obliku skupa rutina.

Tehničko rešenje je pokazalo: 1) punu praktičnu izvodljivost razvijenog koncepta sistema veštačkog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti sa ugrađenom kodnom mapom u obliku Gray-ovog binarnog koda, 2) punu primenljivost u laboratorijskim uslovima i 3) potrebnu fleksibilnost u smislu otvorenosti za sprovođenje različitih algoritama triangulacije strukturirane svetlosti.

Realizovano tehničko rešenje je pokazalo puni potencijal primene koncepta triangulacije strukturirane svetlosti za robotsko gledanje na proizvodnim zadacima kao što je robotsko zavarivanje, kroz primenu specifičnih algoritama generisanja visokopreciznih modela na bazi niskorezolutne akvizicije, korigovanjem apriornih informacija dobijenih iz konstruktivne dokumentacije objekta koji se digitalizuje. Specifični algoritmi u ovom slučaju podrazumevaju algoritme interaktivne ravanske aproksimacije skupa kvazikomplanarnih tačaka unutar identifikovanog oblaka tačaka i iz toga daljeg identifikacije lokacije šava čisto analitičkim operacijama nad identifikovanim ravnima i nalaženjem njihovog preseka. Ovakav pristup je pogodan jer poseduje inherentnu primenljivost u realnom vremenu zbog malog obima potrebnih izračunavanja.

7. 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)

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 98/3
ДАТУМ: 24.01.2013.

На основу захтева руководиоца пројекта проф.др Петра Петровића бр. 98/1 од 17.01.2013. године, одлуке о именовану рецензената и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 24.01.2013. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење рађено у оквиру пројекта ТР 35007, под насловом: **„Експериментални систем за оптичку триангулацију структуриране светлости“**, чији су аутори: проф.др Петар Петровић, дипл.инж.маш. Иван Данилов, дипл.инж.маш. Никола Лукић и дипл.инж.маш. Владимир Миковић, а позитивну рецензију поднели: проф.др Јанко Ходолич, ФТН Нови Сад и др Мирослав Пилиповић, ред.проф. у пензији.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



ПРОДЕКАН
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ


Проф.др Војкан Лучанин

Odlukom Istraživačko-stručnog veća Mašinskog fakulteta u Beogradu br. 98/2 od 17.01.2013. godine imenovani smo za recenzente tehničkog rešenja **Eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti**, autora: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš. i Vladimir Miković, dipl. inž. maš. Na osnovu predloga ovog tehničkog rešenja podnosimo sledeći:

IZVEŠTAJ

Tehničko rešenje: **Eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti**, koje su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš. i Vladimir Miković, dipl. inž. maš., opisano je na 11 stranica A4 formata pisanih sa 12pt singl proreda, sadrži 9 slika. Sastavljeno je od šest poglavlja i spiska korišćene literature. Naslovi poglavlja su:

1. Oblast na koju se tehničko rešenje odnosi
2. Tehnički problem
3. Stanje tehnike
4. Koncept tehničkog rešenja
5. Detaljan opis tehničkog rešenja
6. Zaključak

Eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti razvijen je kroz dvogodišnje istraživačko-razvojne aktivnosti na projektu TR 35007 sa ciljem stvaranja multifunkcionalne eksperimentalne platforme za rano pokazivanje praktične upotrebljivosti koncepta optičke triangulacije strukturirane svetlosti u zadacima akvizicije geometrije nedovoljno struktuiranog radnog prostora industrijskog robota u izvršavanju tipičnih zadataka proizvodnog tipa u kontekstu industrijske proizvodnje multivarijantnih proizvoda, uključujući i pojedinačnu proizvodnju i proizvodnju unikatnih proizvoda. Ovaj eksperimentalni sistem je smešten u širi okvir generičkih istraživanja u domenu proizvodnih tehnologija i posebno robotike, u cilju izgradnje nove generacije proizvodnih tehnoloških entiteta za novu proizvodnu paradigmu masovne kastomizacije.

U prvom poglavlju se navode osnovne informacije o zahtevima adaptivnog ponašanja robotskog sistema u uslovima multivarijantne proizvodnje malog obima, sa posebnim fokusom na senzore veštačkog gledanja i varijantne tehnologije koje su u tom domenu razvijane dugi niz godina u laboratorijskim uslovim i sa više ili manje uspeha primenjivane u industrijskoj praksi.

U drugom poglavlju definiše se suština problema akvizicije geometrije radnog prostora u okviru jednog robotskog sistema koji radi u tipičnim industrijskim uslovima u kojima se pojavljuje niz optičkih poremećaja koji usložnjavaju efikasnu spregu robota i njegovog okruženja. U tom kontekstu se razmatra koncept struktuirane svetlosti, odnosno svetlosti sa ugrađenim poznatim kodnim signalom, koja se zatim na različite načine projektuje u radni prostor odnosno njegov deo, scenu/region koja je od interesa u nekom konkretnom trenutku. Na primer, to je sekvenca identifikacije geometrije sastavnih delova jednog sklopa koji se robotski zavaruje i dalje, precizna lokacija šava, kao ključne informacije za izvršavanje postavljenog zadatka, a sve u kontekstu širokog spektra nepreciznosti i nesavršenosti, počev od grešaka geometrije sastavnih delova (makro i mikro), preko termičkih deformacija sklopa zbog enormnog unosa enrgije, pa do nesavršenosti koje dolaze od samog robotskog sistema. Autori su u ovom delu posebno razmatrali aspekte autonomnosti robota, kao ključnog zahteva koji se postavlja pred roboski sistem u okviru nove proizvodne paradigme masovne kastomizacije.

U trećem poglavlju se daje precizni pregled stanja tehnike i istraživanja u oblasti senzora veštačkog gledanja, baziranih na triangulaciji struktuirane svetlosti.

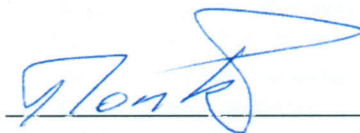
U četvrtom poglavlju se detaljno navodi koncept tehničkog rešenja, gde se ukupni prostor koji zahvata tehnologija strukturirane svetlosti redukuje na slučaj binarnih kodnih mapa, baziranih na Gray-ovom cikličnom kodu. Za ovaj slučaj triangulacije autori su detaljno obrazložili tehničku suštinu rešenja, osnovne algoritme i detalje relevantne za generisanje programskog koda koji je implementiran na eksperimentalnoj instalaciji.

U okviru petog poglavlja navodi se detaljan opis hardvera i softvera razvijenog rešenja, koje u delu hardvera obuhvata: 1)kompjuterizovani optički sistem za generisanje binarnih kodnih maski utisnute u svetlosni izvor koji osvetljava scenu od interesa, 2)sistem kamera koje se preko USB interfejsa sprežu sa akvizicionim računarom i 3)radni sto sa obrtnom platformom za precizno pozicioniranje objekta koji se digitalizuje, odnosno čija se geometrija i lokaciju u prostoru identifikuju. U delu softvera, opisan je skup složenih i tehnički zahtevnih rutina za akviziciju, kalibraciju, primarnu obradu, generisanje oblaka tačaka i na kraju generisanje prostornih geometrijskih modela kojima se u celosti dvodimenzionalnih zapisi optičkih senzora prevode u trodimenzionalne objekte.

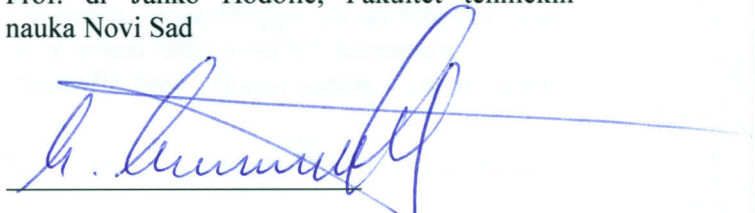
U zaključku se navodi da je razvijeni eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti fizički realizovan, testiran i uveden u laboratorijsku primenu u okviru Laboratorije za kibernetiku i mehatronske sisteme, Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Razvijena eksperimentalna instalacija, nastala kao rezultat samogradnje uz vrlo mali obim investicija, predstavlja potentnu platformu za razvoj i egzaktnu eksperimentalnu validaciju različitih sistema za veštačko gledanje, koji su bazirani na optičkoj triangulaciji strukturirane svetlosti. Pored primene na projektu TR35007, u čijem okviru je nastala, ova eksperimentalna instalacija je značajna i za digitalizaciju dentalnih proteza koje su jedan od istraživačkih ciljeva na interdisciplinarnom projektu TR35020 i koji se realizuje na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.

MIŠLJENJE

Autori tehničkog rešenja: **Eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti** koji je razvijen (koncipiran, projektovan i proizveden samogradnjom) na projektu TR 35007, su jasno prikazali kompletnu strukturu i sadržaj tehničkog rešenja. Prikazane mogućnosti eksperimentalne instalacije, njenog hardvera i softvera, specifičnosti i istraživačke prednosti u odnosu na instalacije slične vrste koje se primenjuju u vodećim svetskim laboratorijama, predstavljaju nov doprinos naučnim i inženjerskim znanjima. Sa zadovoljstvom predlažemo Istraživačko-stručnom veću Mašinskog fakulteta u Beogradu da novorazvijenu opremu: **Eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti**, autora: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš. i Vladimir Miković, dipl. inž. maš., prihvati kao novo tehničko rešenje, relevantno za korpus tehnoloških znanja Srbije u oblasti industrijskih tehnologija.



Prof. dr Janko Hodolić, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad



Prof. dr Miroslav Pilipović, Mašinski fakultet Univerziteta u Beograd

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 98/2
ДАТУМ: 17.01.2013.

На основу захтева руководиоца пројекта проф.др Петра Петровића бр. 98/1 од 17.01.2013. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 17.01.2013. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења рађеног у оквиру пројекта ТР 35007, под насловом: **„Експериментални систем за оптичку триангулацију структуриране светлости“**, чији су аутори: проф.др Петар Петровић, дипл.инж.маш. Иван Данилов, дипл.инж.маш. Никола Лукић и дипл.инж.маш. Владимир Миковић, именују:

- проф.др Јанко Ходолич, ФТН Нови Сад и
- др Мирослав Пилиповић, ред.проф. у пензији.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



ПРОДЕКАН
ЗА НАУЧНО ИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ

Проф.др Војкан Лучанин

ИСТРАЖИВАЖКО-СТРУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ
Проф. др Војкан Лучанин
Продекан за научно-истраживачку делатност

Предмет: Предлог за избор рецензената техничког решења

Молим Истраживачко-стручно веће да за Техничко решење:

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ СИСТЕМ ЗА ОПТИЧКУ ТРИАНГУЛАЦИЈУ
СТРУКТУИРАНЕ СВЕТЛОСТИ**

аутори:

1. Проф. др Петар Б. Петровић дипл. инж.
2. Иван Данилов дипл. инж., докторант
3. Никола Лукић дипл. инж., докторант
4. Владимир Миковић, дипл. инж.

реализовано у оквиру пројекта ТР35007 који финансијски подржава Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у периоду 2011. - 2014. године, именује два рецензента.

Наш предлог је да рецензију овог техничког решења обаве:

1. Проф. др Јанко Ходолич, Факултет техничких наука у Новом Саду
2. Проф. др Проф. др Мирослав Пилиповић, Машински факултет Универзитета у Београду

С поштовањем,

Проф. др Петар Б. Петровић
Руководилац пројекта ТР35007