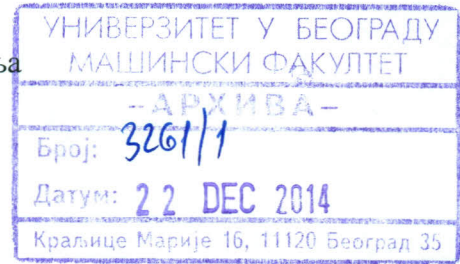


ИСТРАЖИВАЖКО-СТРУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ
Проф. др Војкан Лучанин
Продекан за научно-истраживачку делатност

Предмет: Предлог за избор рецензената техничког решења



Молим Научно-наставно веће да за Техничко решење:

**МУЛТИМОДАЛНИ СИСТЕМ РОБОТСКОГ ГЛЕДАЊА НА БАЗИ
ТРИАНГУЛАЦИЈЕ СТРУКТУРИРАНЕ СВЕТЛОСТИ ЗА ПРИМЕНУ У
РОБОТСКОМ ЗАВАРИВАЊУ**

аутори:

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

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 Стеван Станковски, Факултет техничких наука у Новом Саду
2. Проф. др Михајло Лазаревић, Машински факултет Универзитета у Београду

С поштовањем,

Проф. др Петар Б. Петровић
Руководилац пројекта ТР35007

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 3261/2
ДАТУМ: 26.12.2014.

На основу захтева др Петра Петровића, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 3261/1 од 22.12.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 25.12.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења под насловом: „**МУЛТИМОДАЛНИ СИСТЕМ РОБОТСКОГ ГЛЕДАЊА НА БАЗИ ТРИАНГУЛАЦИЈЕ СТРУКТУРИРАНЕ СВЕТЛОСТИ ЗА ПРИМЕНУ У РОБОТСКОМ ЗАВАРИВАЊУ**“, чији су аутори: проф. др Петар Б. Петровић, Иван Данилов, дипл.инж.маш. и Никола Лукић, дипл.инж.маш. именују:

- проф. др Михаило Лазаревић, Универзитет у Београду Машински факултет
- проф. др Стеван Станковски, Факултет техничких наука у Новом Саду

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



2 Д Е К А Н
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА


Проф. др Милорад Милованчевић

Odlukom Naučno-nastavnog veća Mašinskog fakulteta u Beogradu br. 3261/1 od 22.12.2014. godine imenovani smo za recenzente tehničkog rešenja **Multimodalni sistem robotskog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti za primenu u robotskom zavarivanju**, autora: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš. i Nikola Lukić, dipl. inž. maš. Na osnovu predloga ovog tehničkog rešenja podnosimo sledeći:

IZVEŠTAJ

Tehničko rešenje: **Multimodalni sistem robotskog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti za primenu u robotskom zavarivanju**, koje su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš. i Nikola Lukić, dipl. inž. maš., opisano je na 18 stranica A4 formata pisanih sa 12pt singl proreda, sadrži 8 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

Multimodalni sistem robotskog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti za primenu u robotskom zavarivanju, koji su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš. i Nikola Lukić, dipl. inž. maš., rezultat je višegodišnjih razvojnih aktivnosti u oblasti tehnologije robotizovane montaže i u tom okviru, tehnologije robotskog zavarivanja. Ovaj sistem je realizovan u okviru istraživačko-razvojnih aktivnosti na projektu TR 35007 **sa ciljem izgradnje eksperimentalne platforme za praktičnu proveru i demonstraciju novih pristupa u realizaciji sistema za robotsko elektrolučno zavarivanje, sa fokusom na adaptivno ponašanje robota u nedovoljno poznatom radnom okruženju. Nedovoljno poznato radno okruženje u ovom kontekstu podrazumeva različite oblike geometrijskih odstupanja/nesavršenosti, koje su takve da zahtevaju promene na nominalnom radnom zadatku. Ključni nosilac informacije o stanju okruženja u robotskom zavarivanju je sistem veštačkog gledanja, koji se u okviru ovog tehničkog rešenja koristi u širokom spektru svojih varijantnih oblika i integriše u jedan jedinstveni sistem. Upravo u integraciji različitih tehnologija veštačkog gledanja i njegova inherentna multimodalnost u radu predstavljaju osnovu inovativnosti i tehnološke vrednosti. Ovakvim pristupom stvaraju se uslovi za efektivnu primenu robota u maloserijskoj i/ili ekstremno varijantnoj proizvodnji, a to dalje omogućava i efektivnu primenu i u malim i srednjim preduzećima, kod kojih po prirodi stvari postoje problem finansijskih barijera i problem ljudskog resursa za primenu tehnologije robotskog zavarivanja.**

U prvom poglavlju se navode osnovna razmatranja o stanju tehnologije robotskog zavarivanja i konstatuje nedovoljan progres u tehnoloskom smislu u odnosu na vreme kada su prvi industrijski roboti počeli da se primenjuju na zadacima elektrolučnog zavarivanja (robotsko zavarivanje je jedna od prvih uspešnih primena industrijskih robota uopšte). Problem 'slepog' zavarivanja, odnosno odsustva efektivnog senzorskog i upravljačkog sistema koji omogućava prilagodjavanje robota odstupanjima geometrije sklopa koji se zavaruje je jedan od ključnih problema koji ograničavaju masovnu primenu robota u ovoj oblasti, koja inače, zbog rizika po zdravlje radnika nosi inherentni imperativ automatizacije.

U drugom poglavlju definiše se polazna osnova istraživačke problematike kroz sistematizaciju grešaka sklopa koji se zavaruje i definisanje osnovnih pristupa za njihovu efektivnu kompenzaciju.

U trećem poglavlju se daje pregled stanja tehnike, sa posebnim fokusom na senzorske sisteme za vizuelnu povratnu spregu i u tom kontekstu identifikuju ključni problemi.

U četvrtom poglavlju se opisuje koncept i daje kratak opis fizičke strukture tehničkog rešenja.

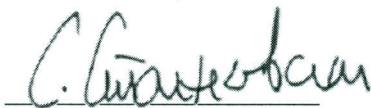
U okviru petog poglavlja navodi se detaljan opis hardvera i softvera razvijenog rešenja. Tehničko rešenje je modularno gradjeni i sastoji se iz sledećih modula/funkcionalnih podsistema: Modul 1 - multimodalni generator strukturirane svetlosti, Modul 2 – optički senzorski sistem za akviziciju geometrijske informacije sa integrisanim izvorom difuzne bele svetlosti velikog intenziteta, Modul 3 - Mikroprocesorski sistem za primarnu obradu signala u realnom vremenu sa opcionim IMU modulom za referenciranje senzorskog sistema u globalnom koordinatnom sistemu radnog zadatka, Modul 4 - računarski sistem za sekundarnu obradu signala i 3d vizuelizaciju radnog prostora (samo zona od primarnog tehnološkog interesa), Modul 5: *human-friendly* interfejs za spregu čoveka i robotskog sistema, Modul 6 - virtuelna mlaznica – simulator izvršavanja radnog zadatka u fizičkom prostoru na bazi laserskog tačkastog pokazivača. Moduli 1 do 3 su detaljno opisani u posebnim podpoglavljima. Moduli 4 do 6 su zbirno opisani u jednom podpoglavlju. Pored deskriptivnog opisa, navedeni su i odgovarajući analitički modeli i slike sa prikazima funkcije sistema veštačkog gledanja za sve karakteristične modove rada. Posebno je bitno da se naglasi da je ovo tehničko rešenje fizički spregnuto sa YASKAWA MA1400 antropomorfim robotom, specijalizovanim za operacije elektrolučnog zavarivanja i da su sve ekperimentalne probe ostvarene sa ovim robotom. Robot YASKAWA MA1400 je nabavljen kao kapitalna oprema od strane resornog ministarstva za nauku i tehnološki razvoj u okviru projekta TR35007.

U zaključku se navodi da je tehničko rešenje fizički realizovano, testirano i uvedeno u laboratorijsku primenu u okviru Laboratorije za kibernetiku i mehatronske sisteme, Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Zatim se daje rezime ključnih tehničkih performansi i posebno naglašava da je ovo tehničko rešenje nastalo kao rezultat samogradnje uz vrlo mali obim investicija. Takođe, konstatuje se i to da ovo tehničko rešenje predstavlja potentnu platformu za dalji razvoj i istraživanja u oblasti tehnologije adaptivnog robotskog zavarivanja.

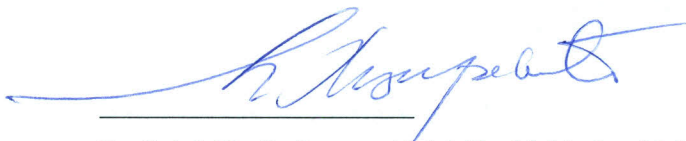
MIŠLJENJE

Autori tehničkog rešenja **Multimodalni sistem robotskog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti za primenu u robotskom zavarivanju**, koji je razvijen (koncipiran, projektovan i realizovan samogradnjom) na projektu TR 35007, precizno i kompletno su prikazali strukturu, sadržaj i upotrebnu vrednost tehničkog rešenja. Na osnovu tehničkih performansi i inovativnih sadržaja konstatujemo da ovo tehničko rešenje predstavlja relevantan naučni i stručni doprinos u oblasti industrijske automatizacije, tehnologije robotskog zavarivanja i proizvodne mehatronike. U tom smislu, sa zadovoljstvom predlažemo Naučno-nastavnom veću Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu da novorazvijeni eksperimentalni sistem: **Multimodalni sistem robotskog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti za primenu u robotskom zavarivanju**, koje su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš. i Nikola Lukić, dipl. inž. maš., prihvati kao novo tehničko rešenje, relevantno za korpus tehnoloških znanja Srbije u oblasti novih proizvodnih tehnologija, mehatronike i robotike.

Beograd, 12.01.2015. godine



Prof. dr Stevan Stankovski, Univerzitet u Novom Sadu,
Fakultet tehničkih nauka



Prof. dr Mihajlo Lazarević, Mašinski fakultet Univerziteta u
Beogradu

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 3261/3
ДАТУМ: 26.12.2014.

На основу захтева др Петра Петровића, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 3261/1 од 22.12.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 25.12.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење под насловом: „**МУЛТИМОДАЛНИ СИСТЕМ РОБОТСКОГ ГЛЕДАЊА НА БАЗИ ТРИАНГУЛАЦИЈЕ СТРУКТУРИРАНЕ СВЕЛОСТИ ЗА ПРИМЕНУ У РОБОТСКОМ ЗАВАРИВАЊУ**“, чији су аутори: проф. др Петар Б. Петровић, Иван Данилов, дипл.инж.маш. и Никола Лукић, дипл.инж.маш.

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



ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА


Проф. др Милорад Милованчевић

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 2014-02

**MULTIMODALNI SISTEM ROBOTSKOG
GLEDANJA NA BAZI TRIANGULACIJE
STRUKTURIRANE SVETLOSTI ZA PRIMENU U
ROBOTSKOM ZAVARIVANJU**

Beograd, januar 2015.

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, Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Ivan Danilov, dipl. inž. maš.
Naziv tehničkog rešenja	Multimodalni sistem robotskog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti za primenu u robotskom zavarivanju
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	2014.
Verifikacija rezultata	Od strane recenzenata: Prof. dr Stevan Stankovski, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Prof. dr Mihajlo Lazarević, 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 - CeNT, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

1. OBLAST NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI

Ovo tehničko rešenje odnosi se na oblast tehnologije robotskog zavarivanja. Konkretno, u pitanju je elektrolučno zavarivanje i rešavanje problema povratne sprege. Mada je robotsko zavarivanje jedna od najranijih primena robota u industrijskoj praksi, tu se decenijama nije pojavio suštinski napredak. Tipičan industrijski robot koji izvršava zadatak elektrolučnog zavarivanja (*arc welding*) radi kao otvoreni sistem, bez ikakve povratne sprege, podrazumevajući da se robotski sistem za zavarivanje: robot i alat za zavarivanje, sklop koji se zavaruje i pozicionier kojim se fiksira i po potrebi izvode dodatna manipulaciona kretanja sklopa koji se zavaruje, nalaze u stanju koje savršeno odgovara nominalnom, na osnovu kojeg je postaljen plan zavarivanja i generisan upravljački kod za kretanje robota tokom izvršavanja zadatka. Bez izuzetka, realnost je različita od nominala i to je jedan od ključnih razloga zbog kojeg su mnoge potencijalno uspešne aplikacije završile neuspehom. Bez povratne sprege, odnosno bez informacije o stvarnom stanju okruženja, u opštem slučaju zadatak zavarivanja ne može da bude uspešno realizovan.

Osnovni motiv za ovakvu istraživačko-razvojnu aktivnost je prepoznata realna potreba da se postojeće stanje 'slepog' robotskog sistema za elektrolučno zavarivanje radikalno unapredi uvodjenjem vizuelne povratne sprege i kognitivnih sadržaja koji se nad tom povratnom spregom dalje izgrađuju. Svaki iskorak u ovom okviru inherentno nosi veliku tehnološku vrednost, posebno u kontekstu nove proizvodne paradigme kastomizovane proizvodnje i šire primene robotske automatizacije u preduzećima mikro, male i srednje veličine.

2. TEHNIČKI PROBLEM

Osnovni zahtev u procesu robotskog zavarivanja je prepoznavanje odstupanja od nominala u geometriji sklopa koji se zavaruje i geometriji radnog mesta. Suština je u tome da se adaptivnim ponašanjem robotskog sistema kroz sve faze izvršavanja zadaka, odnosno: pre, tokom i posle njegovog izvodjenja, kompenzuju greške koje utiču na kvalitet procesa zavarivanja ili ga u potpunosti onemogućavaju. Ove greške se mogu grupisati u četiri osnovne grupe:

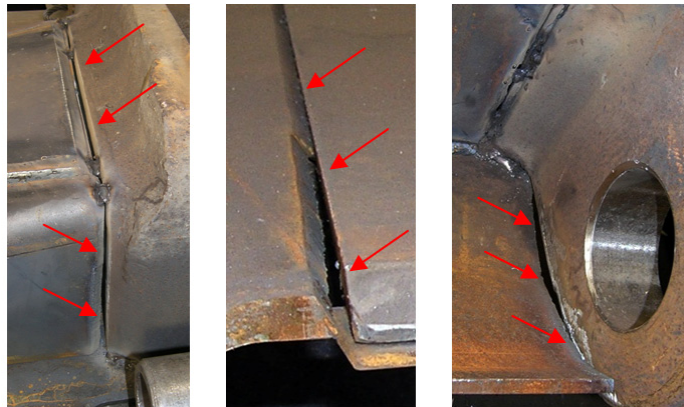
- Tip 1: Greške lokacije sklopa koji se zavaruje u odnosu na koordinatni sistem radnog prostora robota;
- Tip 2: Greške makro geometrije sklopa koji se zavaruje, uključujući i greške kompletnosti sklopa;
- Tip 3: Greška relativne lokacije spoja/šava u odnosu na lokalni koordinatni sistem sklopa koji se zavaruje;
- Tip 4: Greška mikrogeometrije spoja/šava;

Navedene greške, sem greške Tip 4, mogu da budu statičke i dinamičke. Pojava dinamičkih grešaka je posledica temperaturnih deformacija koje nastaju zbog enormnog unosa toplotne energije tokom procesa zavarivanja. To je posebno slučaj kod grešaka Tip 2 i Tip 3. U svim navedenim grupama nesavršenosti, vizuelna informacija je direktni nosilac informacija.

U cilju ilustrovanja problema, na slici 1 navodi se primer greške Tip 4 koji je identifikovan na papuči bagera iz proizvodnje kompanije Kolubara Metal iz Vreoca u sklopu realizacije studije izvodljivosti projekta robotizacije procesa zavarivanja ovog visokoodgovornog sklopa. Odstupanja ove vrste imaju strukturni karakter u odnosu na plan zavarivanja.

Tehnički problem koji se ovde javlja je vrlo kompleksan i sastoji se najmanje iz tri osnovne grupe problema: 1) izgradnja senzorskog sistema za generisanje vizuelne povratne sprege u

realnom vremenu, 2)izgradnja kognitivnog sistema za obradu senzorske informacije i donošenje odluka u realnom vremenu i 3)izgradnja efektivnog interfejsa koji će omogućiti jednostavu i intuitivnu interakciju čoveka i robotskog sistema.



Slika 1. *Primeri greške mikrogeometrije šava na sklopu papuče bagera iz proizvodnje kompanije Kolubara Metal, Vreoci. Ove greške su strukturnog tipa i zahtevaju promenu nominalnog plana zavarivanja.*

3. STANJE TEHNIKE

Da bi se smanjio stepen neizvesnosti robotskog sistema u izvršavanju zadatka elektrolučnog zavarivanja, najčešće se primenjuje trivijalno rešenje koje se sastoji u povećanju tačnosti geometrije sklopa koji se zavaruje. Ovaka pristup u većini slučajeva nije prihvatljiv, jer se sa povećanjem tačnosti značajno povećavaju troškovi izrade sastavnih delova sklopa kao i sistema za njegovo pozicioniranje, čime se poništavaju pozitivni efekti koji se postižu zamenom čoveka variocem, robotom variocem. Otvoreni sistem u bilo kom svom obliku nije dobro rešenje. Alternativa je zatvoreni sistem, odnosno sistem koji poseduje upravljačku povratnu spregu. Problem je u tome što se uvođenjem povratne sprege drastično povećava tehnička kompleksnost robotskog sistema u celini. Danas u industrijskoj praksi sistemi sa vizuelnom povratnom spregom se po pravilu ograničavaju na primenu triangulacionih senzora linijskog tipa. Oni se usmeravaju u zonu pretpostavljene lokacije šava (faktički nominalna lokacija) i zatim se na generisanom zapisu profila jednostavnim algoritmima pronalazi stvarna lokacija šava. Primena jednostavnih algoritama istovremeno podrazumeva rešavanje jednostavnih situacija, skoro bez izuzetka onih koje u skladu sa prethodno navedenom klasifikacijom odgovaraju grešci Tip 1. Pri tome, ti algoritmi najčešće mogu da zadovolje jednostavne geometrijske topologije poput ugaonog šava. Algoritmi ove vrste prepoznaju dva pravolinijska segmenta ugaonog šava i zatim se prostim geometrijskim relacijama pronalazi idealna lokacija šava, koja se nalazi u njihovom preseku. Medjutim, složene geometrijske topologije, ne mogu se rešiti ovakvim algoritmima, ne bar na za industrijsku praksu efektivan način. Upravo se u ovoj činjenici krije osnovni razlog zbog kojeg je tehnologija elektrolučnog robotskog zavarivanja koja se danas efektivno primenjuje u praksi vrlo malo napredovala u odnosu na vreme kada su ostvarivane prve robotske aplikacije ove vrste.

4. KONCEPT TEHNIČKOG REŠENJA

Ovo tehničko rešenje se odnosi na izgradnju specijalizovanog robotskog sistema za generisanje vizuelne povratne sprege, u kojem su integrisane različite optroničke tehnologije, koje obezbeđuju multimodalnu funkcionalnost senzorskog sistema.

Multimodalnost je suštinsko svojstvo ovog senzorskog sistema. Ona omogućava da se u nadređeni sistem (računar i čovek u simbiozi) prosledi vrlo složen, a samim tim i vrlo sadržajan informacioni sadržaj o stanju geometrije sklopa koji se zavaruje, ali uvek u meri

koja je objektivno potrebna za izvršavanje postavljenog radnog zadatka. Ovakav informacijski kanal ka fizičkom delu robotskog sistema se dalje, preko složenog sistema obrade senzorske informacije, spreže sa višim hijerarhijskim nivoima, koji sem primarne obrade signala uključuju i apstraktne funkcije planiranja radnog zadatka i dvosmerne interakcije sa operatorom koji nadzire i/ili upravlja robotskim sistemom. Kompleksnost ove vrste je suštinska razlika između postojećih tehnologija i inovativne tehnologije koja se kroz ovo tehničko rešenje uspostavlja. U toj kompleksnosti sadržana je velika tehnološka vrednost ovog tehničkog rešenja, a multimodalnost predstavlja osnovni inovativni sadržaj.

Multimodalni sistem robotskog gledanja se sastoji iz šest funkcionalnih celina - modula:

- Modul 1: Multimodalni generator strukturirane svetlosti,
- Modul 2: Optički senzorski sistem za akviziciju geometrijske informacije sa integrisanim izvorom difuzne bele svetlosti velikog intenziteta,
- Modul 3: Mikroprocesorski sistem za primarnu obradu signala u realnom vremenu sa opcionim IMU modulom za referenciranje senzorskog sistema u globalnom koordinatnom sistemu radnog zadatka,
- Modul 4: Računarski sistem za sekundarnu obradu signala i 3d vizuelizaciju radnog prostora (samo zona od primarnog tehnološkog interesa),
- Modul 5: *Human-friendly* interfejs za spregu čoveka i robotskog sistema,
- Modul 6: Virtuelna mlaznica – simulator izvršavanja radnog zadatka u fizičkom prostoru na bazi laserskog tačkastog pokazivača.

Ovaj sistem **ne uključuje funkciju upravljanja robotom**. Njegov osnovni zadatak je da robotskom sistemu za zavarivanje obezbedi ekstenzivnu vizuelnu informaciju o stanju stvari u realnom svetu i omogući efektivnu integraciju čoveka i njegovih misaonih funkcija (razumevanje/interpretacija stanja u fizičkom svetu i donošenje odluka). Šire posmatrano, ovo tehničko rešenje unosi kognitivne elemente u sistem za zavarivanje na način koji je dovoljno robusan da omogući njegovu praktičnu primenljivost u širokom spektru industrijskih primena.

5. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Na slici 2 prikazan je izgled prototipa razvijenog multimodalnog sistema robotskog gledanja specijalizovanog za zadatke robotskog elektrodušnog zavarivanja. Slika 2a prikazuje robotski sistem koji je baziran na antropomorfnom robotu sa 6 stepeni slobode Yaskawa MA 1400, koji je specijalizovan za zadatke elektrodušnog zavarivanja (terminalna ploča sa centralnim otvorom i šuplji završni segment, čime je omogućeno optimalno razvodjenje kablovskog paketa za elektrodušno zavarivanje). Na terminalnu ploču robota ugrađen je kompletan hardver senzorskog modula. Detalj hardvera prikazan je na slici 2b i on obuhvata: Modul 1, Modul 2 i Modul 3.

Robot YASKAWA MA1400 je nabavljen kao kapitalna oprema od strane resornog ministarstva za nauku i tehnološki razvoj u okviru projekta TR35007.

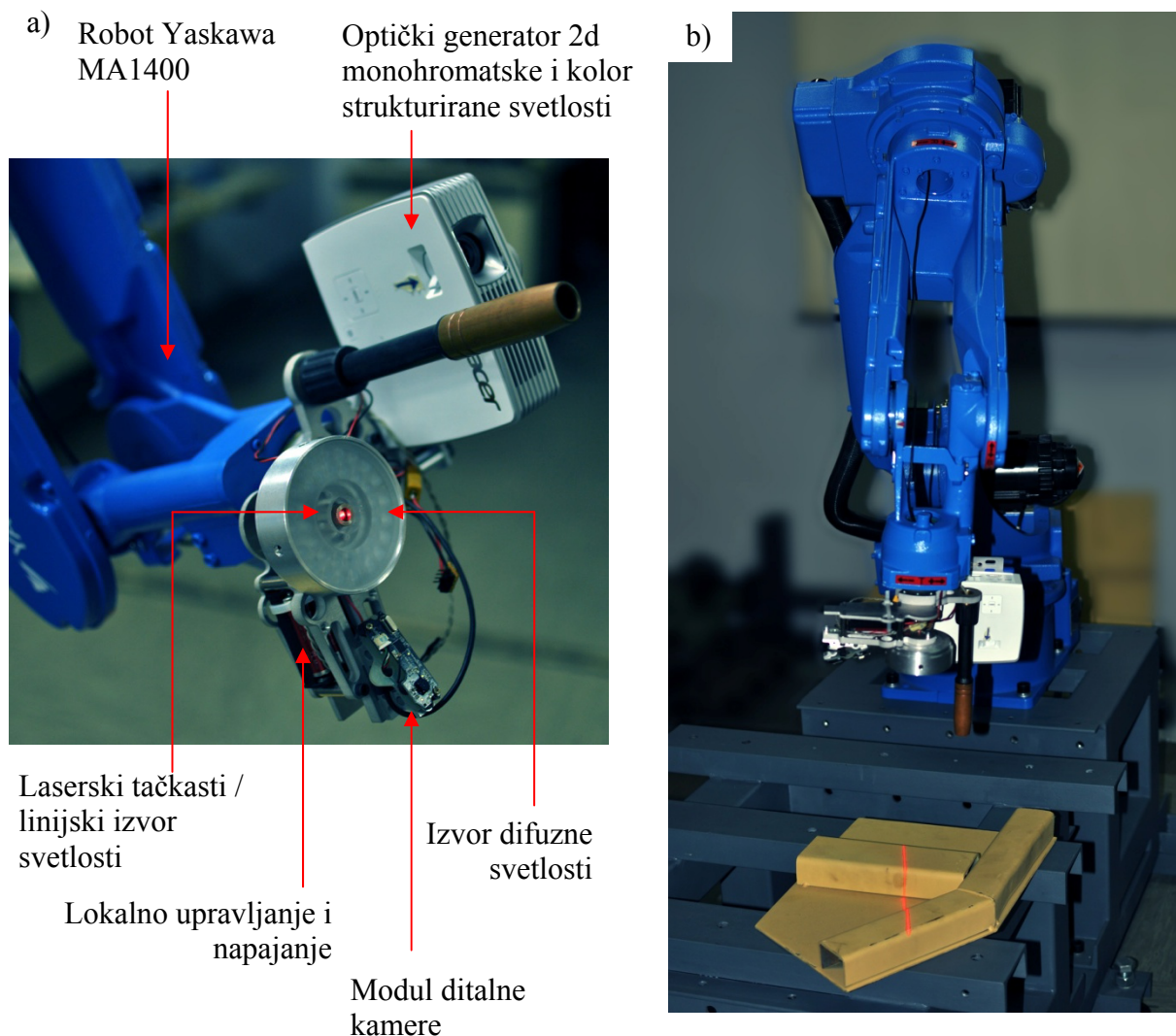
5.1. Modul 1: Multimodalni generator strukturirane svetlosti

Modul 1, odnosno multimodalni generator strukturirane svetlosti sastoji se iz sledećih funkcionalnih celina:

- Laserski tačkasti izvor svetlosti,
- Laserski linijski izvor svetlosti, i

- Optički generator 2d monohromatske i/ili kolor mape strukturirane svetlosti.

Navedene funkcionalne celine su u potpunosti programabilne i mogu se aktivirati automatski pomoću lokalnog upravljačkog sistema kojim se kontroliše rad multimodalnog sklopa generatora svetlosti.



Slika 2: Izgled realizovanog prototipa multimodalnog sistema robotskog gledanja specijalizovanog za zadatke robotskog elektro-lučnog zavarivanja: a) Detalji hardvera senzorskog modula koji se ugrađuje na vrh robota, b) Robotski sistem baziran na Yaskawa MA1400 robotu specijalizovanom za robotsko zavrivanje.

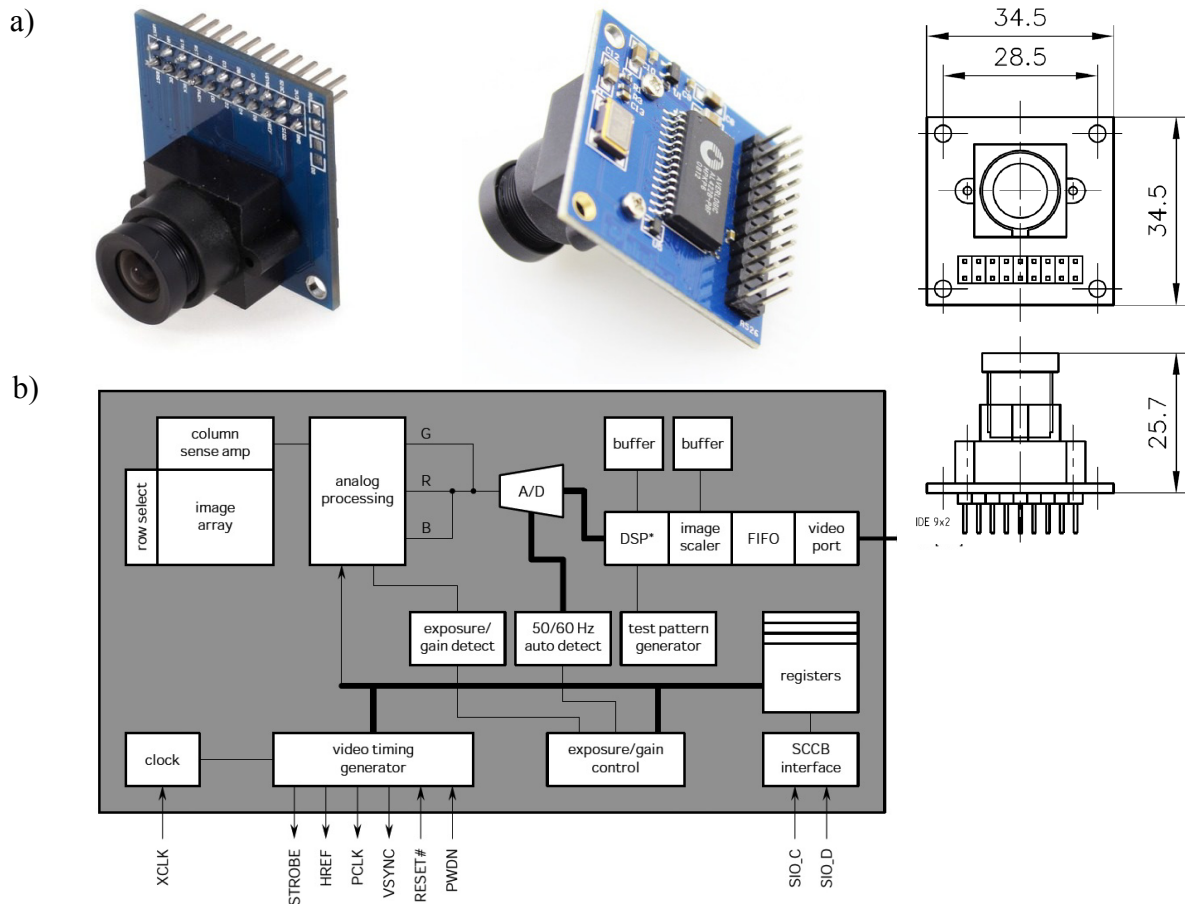
Kombinacija laserskog i nelaserskog (LED) izvora svetlosti nije redundantna. LED generatorom svetlosti moguće je jednostavno obezbediti tačkasti i linijski izvor svetlosti. Ova mogućnost je čak u izvesnom slučaju povoljnija od laserskog izvora, jer omogućava veliku fleksibilnost u smislu dimenzija tačke i linije, njene lokacije u prostoru, pa čak i boje. Međutim, LED izvor koji je dominantno namenjen za projektovanje 2d mape, poseduje jednu vrlo značajnu slabost, a to je intenzitet projektovane svetlosti. Ovaj nedostatak u konkretnom slučaju robotskog zavarivanja, gde se operiše sa objektima koji nisu prethodno optički pripremljeni/optimizovani, već se javljaju u svim svojim oblicima, počev od visokoreflektivnog pa do visokoabsorbativnog, ima izuzetno veliki tehnološki značaj. Iz tog razloga, multimodalni generator strukturirane svetlost sadrži ne samo linijski izvor laserske svetlosti, već i tačkasti, kako bi se postigla maksimalna koncentracija optičke energije i tako razrešile i najdelikatniji optički problemi.

Alternativno, umesto laserskog izvora moguće je primeniti specijalizovane LED izvore, koji generišu svetlosni snop velike snage tačkastog, linijskog ili proizvoljnog geometrijskog oblika. LED izvor svetlosti je generalno pogodniji za izgradnju optičkih senzora zbog toga što laserski izvor generiše probleme koji su povezani sa spekularnom refleksijom.

5.2. Modul 2: Optički senzorski sistem za akviziciju geometrijske informacije sa integrisanim izvorom difuzne bele svetlosti velikog

Optički senzorski sistem za akviziciju geometrijske informacije se sastoji iz jedne ili više kamera, koje preko objektiva konstantne fokalne dužine i odgovarajućeg vidnog polja prikupljaju informaciju o geometriji radnog prostora preko odraza svetlosne pobude koju generiše i u radni prostor usmerava multimodalni generator strukturirane svetlosti (Modul 1).

Minimalna konfiguracija optičkog senzorskog sistema se sastoji iz jedne kamere koja je ugrađena na način da sa izvorom svetlosti (Modul 1) čini triangulacioni sistem.



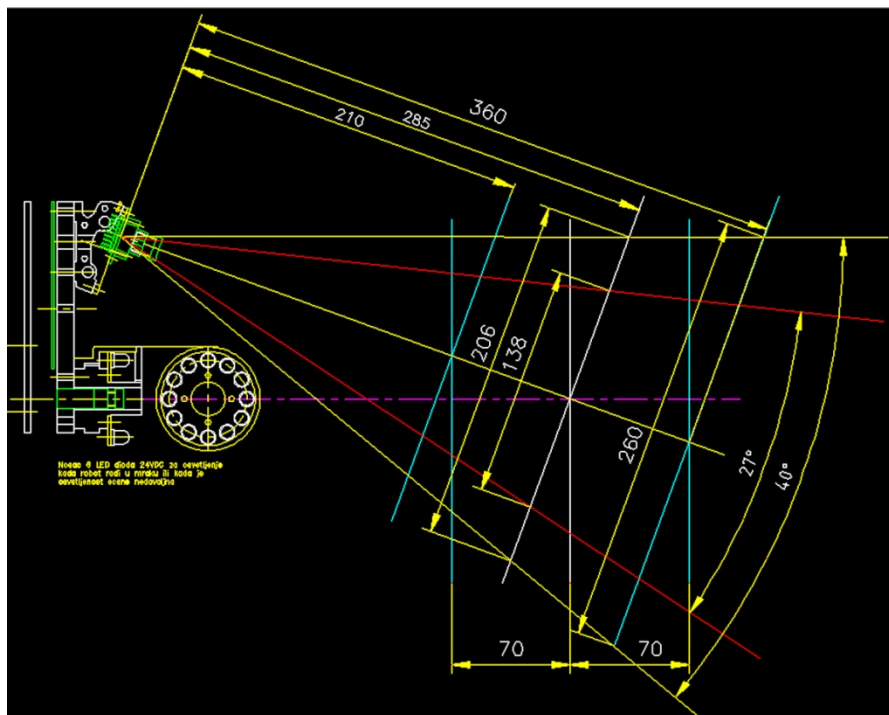
Slika 3: Senzorski modul baziran na OmniVision OV7670 kameri integrisanoj u jednom čipu: a) Izgled kamere sa M12 objektivom i gabaritne mere, b) Funkcionalna šema kamere.

Sa aspekta procesa zavarivanja sasvim su dovoljne kamere rezoulcije do 1 Mpixel-a. Prototip ovog tehničkog rešenja koji je prikazan na slici 2 realizovan je na bazi OmniVision OV7670 kolor kameri (*image sensor*) integrisanoj u jednom čipu. OmniVision OV7670 kolor kamera poseduje VGA rezoluciju, odnosno optičko polje u CMOS tehnologiji koje generiše ravansku matricu dimenzija 640x480 kolor piksela (0.3 Mpixel) sa maksimalno 30 fps (frejmova u sekundi). Osmobitnim A/D konvertorom analogni signal koji generiše optičko polje kovertuje se u ekvivalentni digitalni format. Kamera koristi YCbCr format, tako da je moguće generisati kolor zapis ili, koristeći samo Y komponentu, monohromatski. Pored YCbCr formata, kamera raspolaže i drugim formatima koji omogućavaju kompresiju originalnog konvertovanog RGB signala.

Izgled kamere i funkcionalna blok šema navode se na slici 3. Podaci kamere i objektiva:

Kamera	OmniVision OV7670
Aktivno senzorsko polje	640x480
Odnos	4:3
Crop factor CF	13.8
Veličina senzora	1/6" (2.36x1.76mm, dijagonala 3.14mm)
Veličina piksela	3.6 x 3.6 μ m
Broj frejmova u sekundi	max 30
Objektiv	
Fokalna dužina	3.6mm (ekvivalent 50mm na <i>full frame</i> 35mm)
FOV po dijagonali	47.1° (FOV = <i>field of view</i> / vidno polje)
FOV po horizontali	39.8°
FOV po vertikali	27.2°

Izborom niskorezolutne kamere (0.3Mpixel, VGA) i objektiva sa prethodno navedenim parametrima ostvarena je širina vidnog polja u najudaljenijoj ravni mernog prostora od 260mm, što znači da se sa VGA rezolucijom ostvaruje fizička rezolucija bolja od $260/640 = 0.4$ mm, (slika 4). Ovakva fizička rezolucija je dovoljna da generiše kvalitetnu vizuelnu povratnu spregu za potrebe planiranja i optimizacije procesa zavarivanja, pri čemu se komunikacioni i procesorski sistem previše neopterećuju, što omogućava efektivan rad u realnom vremenu sa 30 fps.



Slika 4: Triangulaciona geometrija optičkog sistema.

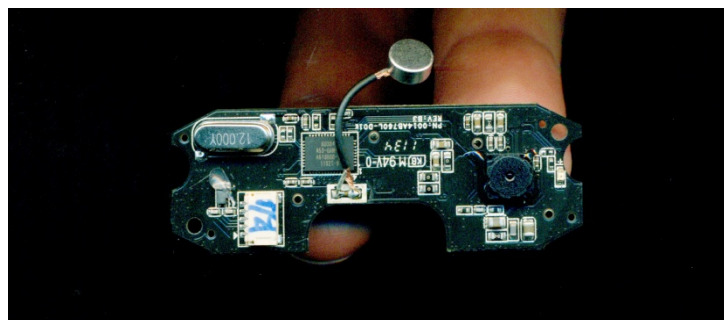
Kamera OmniVision OV7670 poseduje integrisani DSP modul i modul za skaliranje. Takodje, poseduje i SCCB upravljački interfejs koji je namenjen za upravljanje sistemskim funkcijama, tzv *image control*: *Exposure control*, *Gain control*, *White balance control*, *Band filter*, *Black-level calibration*, *Color saturation*, *Hue*, *Gamma*, *Sharpness* (isticanje ivičnih piksela), *Saturation level auto adjust*, *Noice reduction*, *Denoise level autoadjust* i *Defect correction*) i podešavanje sistemskih parametara.

Ova kamera je razvijena za primenu u mobilnim telefonima i PC multimedia sistemima kao specijalizovani, visokointegrirani sklop, vrhunskih performasi u svojoj klasi. Zbog masovne produkcije njena cena je vrlo niska, što u ovom konkretnom slučaju ima posebnu vrednost, jer omogućava da ovo tehničko rešenje bude široko dostupno, uključujući i primenu u SME sektoru. Postojeće stanje je takvo da je cena sistema za vizuelnu povratnu spregu po pravilu od 50 do 150% cene robota!

Korišćenjem SCCB interfejsa (Serial Camera Control Bus), upravlja se režimom rada kamere i na njenom izlazu generišu različiti formati frejmova (redukovana veličina frejma, monohromatski izlaz, ili frejm sa kontrolisanim nivoom osvetljenosti čime se olakšava dalja obradu signala). Kao lokalni kontroler korišćen je STMicroelectronic STM32 ARM Cortex 32 bitni mikrokontroler sa radnim taktom od 168 MHz. Ovaj mikrokontroler poseduje hardverske DCMI (*Digital Camera Interface*) i DMA sklopove za direktni prijem podataka (frejmova) od OmniVision OV7670 kamere, bez angažovanja CPU mikrokontrolera.

Alternativno, u cilju postizanja još kompaktnijeg i cenovno pogodnijeg rešenja, modul optičkog senzora je razvijan na bazi Logitech C170 kamere, takodje VGA rezolucije, ali sa USB serijskim izlazom za spregu sa nadređenim upravljačkim sistemom. Izgled Logitech C170 kamere prikazan je na slici 5. Podaci za kameru i pripadajući mikro objektiv su sledeći:

Kamera	Logitech C170
Rezolucija	640x480
Odnos	4:3
Crop factor CF	17.3
Veličina senzora	1/7" (2.04x1.53mm, dijagonala 2.55mm)
Objektiv	
Fokalna duzina	2.3mm (ekvivalent 40mm na full frame 35mm)
FOV po dijagonali	58°
FOV po horizontali	47.83°
FOV po vertikali	36.79°



Slika 5: Senzorski modul baziran na Logitech C170 kameri.

U cilju ostvarivanja potrebne autonomije po pitanju osvetljenja, ovaj modul opremljen je sopstvenim difuznim izvorom bele svetlosti upravljivog intenziteta, koji je optimalno fokusiran na merni prostor senzora.

5.3. Modul 3: Mikroprocesorski sistem za primarnu obradu signala

U okviru modula za primarnu obradu signala koji generiše modul 2 optičkog senzora, realizuju se dve grupe aktivnosti:

Preprocesor A: Primarna obrada sirovog frejma (*raw* format zapisa) i generisanje neorganizovanog skupa tačaka u 3d prostoru (oblak tačaka / *point cloud*) primenom

triangulacionih relacija nad odrazom projektovanog sadržaja na objekat koji se digitalizuje u obliku tačke, linije ili 2d kodirane mapa,

Preprocesor B: Spajanje/stapanje parcijalnih trodimenzionih skupova tačaka koje generiše Preprocesor A iz različitih pogleda na scenu / objekat / prostor koji se digitalizuje, primenom odgovarajućih algoritama za registraciju i komparaciju. Preprocesor B vrši registraciju i skupa tačaka modela generisanog u nekom CAD razvojnom paketu i skupa tačaka koje je generisao Preprocesor A. U ovom slučaju, moguće je uraditi i poredjenje, a odatle generisati i informaciju o grešci, kao lokalnoj kvantitativnoj meri sličnosti/razlučitosti. Transformacione matrice koje nastaju u procesu registracije mogu se takodje razumeti kao kvantitativne inoformacije o grešci pozicioniranja objekta koji se analizira u radnom prostoru robota (za razliku od prthodnog, one su globalnog karaktera i odnose se na kompletan skup tačaka, bez obzira na uspostavljene korespodencije!).

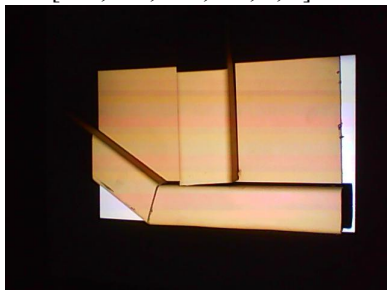
U okviru **Preprocesor A softverskog modula** operator može da, prema potrebi konkretne situacije, izabere jedan od 4 osnovna moda / režima obrade:

Mod 1: Direktni prenos kolor ili monohromatske slike bez prostorne digitalizacije.

Ovaj mod rada senzorskog sistema se koristi za potrebe vizuelizacije stanja radnog prostora / objekta i posebno detalja koji zahtevaju složenu obradu senzorskih signala i sa tim u vezi neophodna je intervencija operatora koji nadzire i upravlja radom robotskog sistema za zavarivanje. Da bi se ostvarili potrebni optički uslovi, scena se osvetljava lokalnim izvorom bele difuzne svetlosti. U ovom modu se ne izvodi 3d digitalizacija.

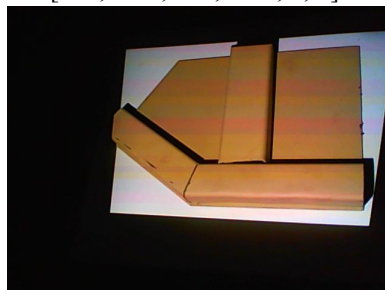
A1_EXP-10

RK1[970, -90, 350,180, 0, 0]



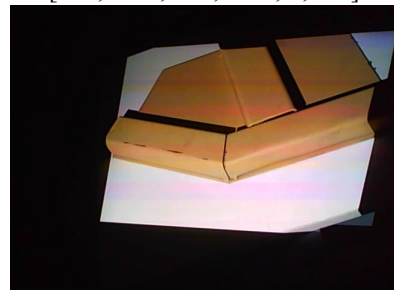
A2_EXP-10

RK2[944, -456, 350, -154, 0, 0]



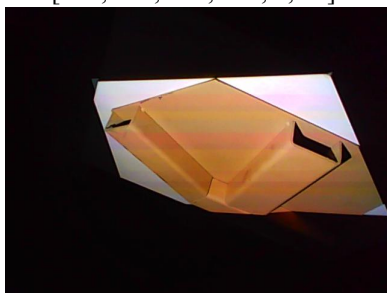
A3_EXP-10

RK3[695, -591, 210, -143, 0, -21]



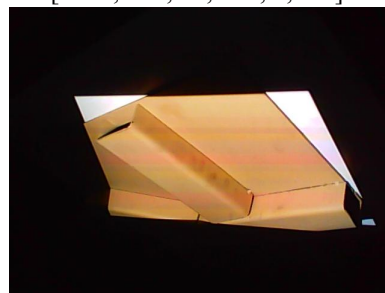
A4_EXP-10

RK4[517, 580, 115, 124, 4, 37]



A5_EXP-10

RK5[1226, 456, 55, 125, 3, -24]

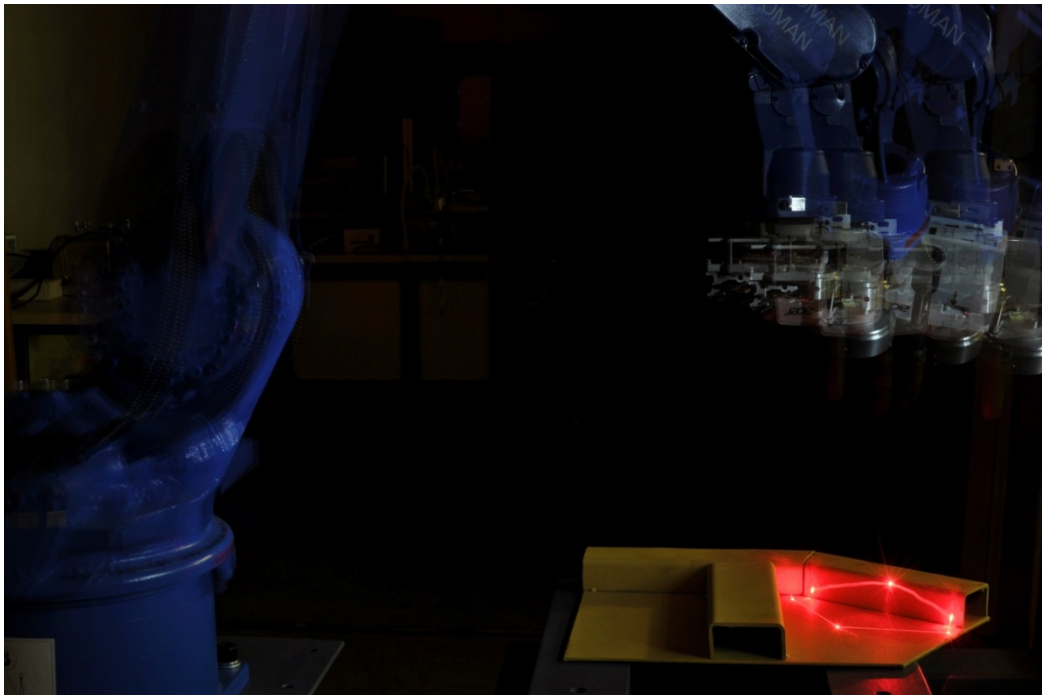


Slika 6.1: Izlaz koji se generiše u režimu Mod 1, pet pogleda na radni prostor/objekat (realni primer zavarenog sklopa iz proizvodnog kompanije Velpan iz Kikinde, kontejner NM10), vektor koordinata robota: $RKx [X, Y, Z, Rx, Ry, Rz]$.

Mod 2: Mod laserske ili LED tačkaste triangulacije.

U ovom modu rada laser ili projektor strukturirane svetlosti usmeravaju na scenu samo jednu svetlu tačku (kolimirani snop svetlosti). Odgovarajući algoritam koji podržava ovaj mod rada na osnovu zahvaćenog odraza optičkim sistemom, određuje distancu do objekta od kojeg se

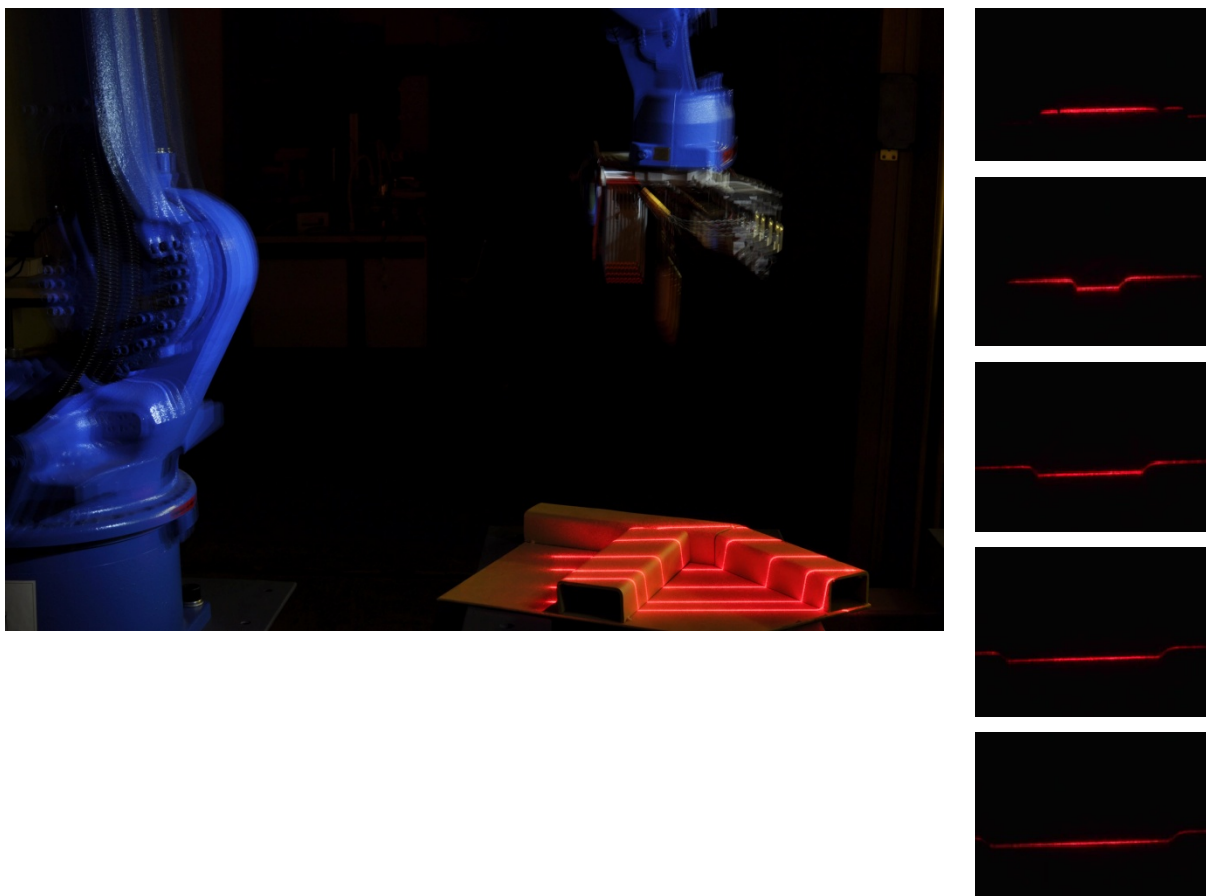
tačkasti svetlosni snop reflektuje koristeći elementarni algoritam triangulacije. U ovom modu, kamera se prevodi u monohromatski mod rada, a frejm koji se prosledjuje na izlaz kamere se redukuje na traku dužine 640 piksela i širine 5 do 10 piksela, u zavisnosti od optičkog stanja objekta čija se distanca određuje. Ovaj mod rada nije dovoljno produktivan za digitalizaciju, ali zato poseduje najveću robusnost po pitanju korespodencije piksela i inherentnu preciznost, tako da se može koristiti za potrebe kalibracije robotskog sistema ili baziranje sklopa koji se zavaruje. Mali broj frejmova u sekundi koje generišu izabrane kamere (30fps) ne dozvoljava kontinualno skeniranje, mada se pod određenim okolnostima i takav tip procedure može sprovesti (testovi su pokazali da se dobijaju sasvim zadovoljavajući rezultati, bez obzira na objektivna ograničenja koja ovde postoje). Umesto tačkastog izvora laserske svetlosti moguće je u ovom slučaju primeniti i linijski koji kamera redukuje/odseca na tačku širine 5 do 10 piksela, ali tada se može pojaviti problem nedovoljnog intenziteta svetlosti koja se reflektuje od objekta i usmerava na prijemni optički senzor.



Slika 6.2: Izlaz koji generiše Mod 2. Laserski izvor projektuje tačku na karakteristične površi iz čega se elementarnom matematikom izračunava lokacija šava. U konkretnom slučaju, projektuju se tri nekolinearne tačke na horizontalnu ravan baznog lima i tri na vertikalnu ravan rebra. U preseku ovih ravni nalazi se šav koji se zavaruje. Moguće su i druge, robusnije šeme tačkastog skeniranja.

Mod 3: Mod laserske ili LED linijske triangulacije.

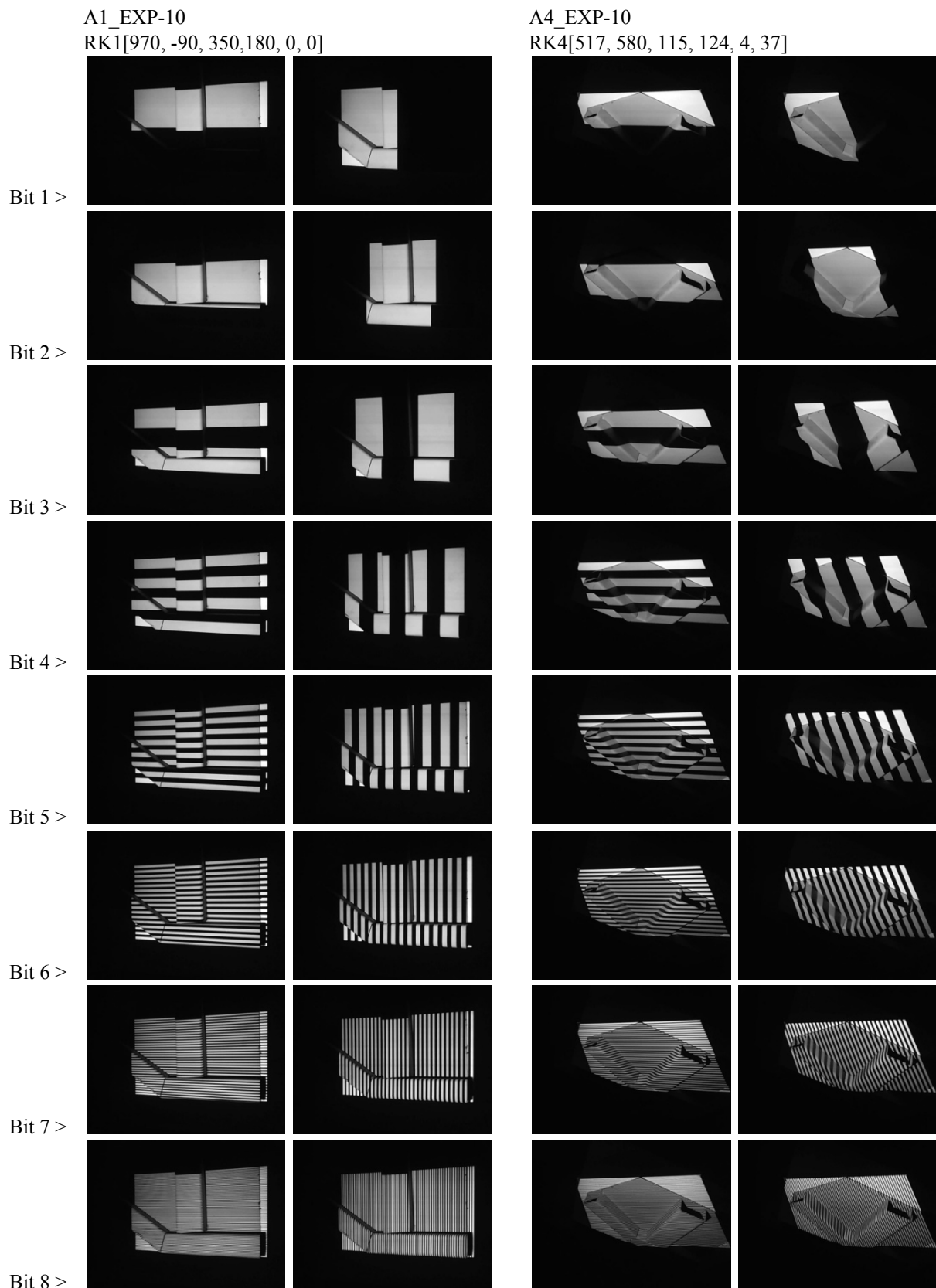
U ovom modu rada laser ili projektor strukturirane svetlosti usmeravaju na scenu samo jednu liniju. Odgovarajući algoritam koji podržava ovaj mod rada na osnovu zahvaćenog odraza optičkim sistemom, izračunava profil ravanskog preseka objekta od kojeg se svetlost reflektuje koristeći prilagodjeni elementarni algoritam triangulacije. Vektor profila sastoji se iz 640 elemenata (ovo je maksimalna rezolucija, ali u cilju ostvarivanja visoke metrološke robusnosti, susedne piksele je moguće grupisati u linijske klasterne (2, 4, 6, ...), čime se redukuje rezolucija u meri koja je određena veličinom klastera). Daljom obradom ovog vektora se mogu izdvojiti geometrijski primitivi, kao što je linija ili kružnica, ili složenije geometrijske forme u ravni koje određuju mikrogeometriju šava. Bez obzira na mali broj frejmova u sekundi (30fps) ovaj mod rada je dovoljno produktivan za digitalizaciju detalja sklopa koji se zavaruje. Mala dužina elektronske ekspozicije kod kamere OmniVision OV7670 u trajanju od 2ms dozvoljava kontinualno skeniranje.



Slika 6.3: Izlaz koji generiše Mod 3. Slika prikazuje kretanje vrha robota duž pravolinijske trajektorije sa projekcijom linije u pet karakterističnih pozicija. Na desnoj strani prikazani su korepsodentni frejmovi koje generiše digitalna kamera. Obradom skeniranih profila generiše se lokalna geometrija sklopa koji se zavaruje sa velikom preciznošću. Kontinuilanim kretanjem generiše se veliki broj preseka (30 u sekundi) iz čega se dalje može izvesti precizna informacija o lokanoj geometriji.

Mod 4: Mod ravanske triangulacije.

U ovom modu rada koristi se projektor strukturirane svetlosti koji na scenu projektuje jednu ili seriju kodnih mapa. Odgovarajući algoritam koji podržava ovaj mod rada i koji odgovara izabranoj vrsti kodne mape, na osnovu zahvaćenog odraza optičkim sistemom, izračunava skup tačaka, organizovanih kao matrica ili kao vektor, sa n elemenata. Projektor je kao i optički senzor digitalni sistem, tako da je njegova mapa takodje diskretna. Kvant diskretizacije digitalne mape projektora je uvek veći od rezolucije optičkog senzora. U konkretnom slučaju realizovanog prototipa, projektor generiše kodnu mapu fizičke rezolucije 1280x768. Teoretski, broj elemenata n (prostornih tačaka) može da bude jednak broju piksela ($n = 640 \times 480 = 307200$). Ipak, u praksi se taj broj značajno redukuje zbog optičke robusnosti. Eksperimentima je pokazano da je gornja granica rezolucije kodnih mapa 2^{16} , odnosno deljenje kodne ravni na 65536 2-d kvanta. Uz veću marginu sigurnosti, rezolucija od 2^{14} daje podelu kodne ravni na 16384 klastera od po 18 piksela. Svaki klaster određuje jednu tačku u 3d prostoru scene (tačka se locira u centru klastera od 18 piksela). Ovo je suština rada u modu 4, koji obezbeđuje superbrzu prostornu digitalizaciju kroz masovnu triangulaciju uniformnog ravanskog skupa tačaka projektovanih na objekat koji se digitalizuje. U zavisnosti od vrste kodne mape sa kojom se radi, ovaj mod može da postigne vrlo veliku robusnost, uključujući i prepoznavanje greške i njeno automatsko korigovanje.



Slika 6.4: Izlaz koji generiše senzorski sistem u Mod 4 režimu rada;. Strukturirana mapa monohromatska sa Gray-ovim 2x8 bitnim kodom; Povezano sa slikom 6.1, zbog ograničenog prostora prikazani odrazi dobijeni iz pogleda A1 i A4; Na poslednjem frejmu u nizu teško se razaznaju kodne linije zbog umanjenog prikaza.

Sa aspekta primarne obrade posebno je značajno to što se senzorski sistem u svom radu referencira u odnosu na globalni koordinatni sistem robota i/ili robotskog radne stanice. U tom kontekstu, sprovode se tri grupe aktivnosti:

1. Preuzimaju se koordinate robota iz izvršnog programskog koda,
2. Očitavaju se stvarne koordinate robota iz registara u kojima se čuva stanje enkodera, i
3. Koristi se eksterni sistem za merenje položaja vrha robota ili neke druge referentne tačke, korišćenjem IMU navigacionog senzora koji u relanom vremenu iz 9 senzorskih signala koje generišu 3 dof MEMS akcelerometar, 3 dof MEMS magnetometar i 3 dof MEMS žiroskop, integracijom izračunava 3 Ojlerova ugla (i/ili pripadajući kvaternion) i daljom integracijom 3 translatorne koordinate.

U okviru **Preprocesor B softverskog modula** ostvaruje se funkcija fuzije skupa tačaka generisanih u različitim pogledima na objekat i/ili deo radnog prostora od interesa. Proces fuzije, ili kako se to u specifičnom žargonu oblasti koja se bavi problematikom 3d digitalizacije naziva 'registracija' je vrlo kompleksan matematički zadatak, koji se deli na dve osnovne grupe problema: 1)kruta registracija i b)meka registracija. U okviru ovog tehničkog rešenja razmatran je samo slučaj krute registracije.

Koncept krute registracije se dalje ilustruje na primeru dva skupa tačaka, skup referentnog modela (m) koji sadrži Nm elemenata i skup (skeniranih) podataka (d) koji sadrži Nd elemenata. Sa T je označen transformacioni operator:

$$T_{2D}(a; x) = T_{2D}(\theta, t_x, t_y; x) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

koji kada se primeni na skup podataka na najbolji način preklapa skup tačaka podataka i skup tačaka referentnog modela. Kvalitet podešavanja je određen funkcijom greške:

$$\varepsilon^2(|x|) = \|x\|^2, \quad (2)$$

Suštinski problem u izračunavanju greške podešavanja je problem korespodencije, odnosno problem utvrđivanja korespodentnih parova tačaka, jedne koje pripada referentom modelu i druge koja pripada skupu podataka generisanih procesom skeniranja (rezultat rada Preprocesor A modula za preprocesiranje senzorskih podataka). Korespodencija se može matematički izraziti pomuću neke fukcije $\phi(i)$. U opštem slučaju broj elemenata skupa tačaka referentnog modela i skupa tačaka podataka nije jednak. Dakle, zadatak korespodencije nije moguće u potpunosti ostvariti. Takodje, ukoliko je pogled kojim su generisane tačke podataka delimično preklopljen sa pogledom iz kojeg su generisane tačke modela, korespodenciju nije moguće u potpunosti ostvariti. Da bi se razrešio ovaj problem (problem parcijalnog preseka skupa modela i skupa podataka) uvodi se operator ω koji ima jediničnu vrednost za tačke koje se mogu upariti i nultu za one koje se ne mogu upariti. Na osnovu toga, funkcional greške koji se minimizira u procesu registracije dobija svoj primarni oblik:

$$E(a; \phi) = \sum_{i=1}^{N_d} \omega_i \varepsilon^2(|m_{\phi(i)} - T(a; d_i)|), \quad (3)$$

U opštem slučaju funkcija ϕ je deo minizacionog procesa. Ova funkcija može da bude distanca izmedju korespodentnih parova modela i podataka, odakle se (3) dovodi na oblik:

$$E(a) = \sum_{i=1}^{N_d} \omega_i \min_j \varepsilon^2(|m_j - T(a; d_i)|), \quad (4)$$

iz čega dalje sledi konačna relacija kojom se definišu nepoznati parametri transformacionog operatora $T(a; x)$, koji za slučaj 2d registracije imaju značenje koje je definisano relacijom (1):

$$\hat{a} = \arg \min_a \sum_{i=1}^{N_d} \omega_i \min_j \varepsilon^2(|m_j - T(a; d_i)|), \quad (5)$$

Ovako postavljen optimizacioni zadatak nema svoje eksplicitno rešenje. Najpoznatiji i u praksi najviše primenjivan iterativni algoritam je ICP algoritam (*Iterated Closest Point*), koji se sastoji iz dva osnovna koraka, označena sa C i sa T. Oni su matematički formulisani na sledeći način:

Korak C. Izračunaj korespondencije koristeći relaciju:

$$\phi(i) = \arg \min_{j \in \{1, \dots, N_m\}} \varepsilon^2(|m_j - T(a; d_i)|), \quad i = 1 \dots N_d, \quad (6)$$

tako da $m_{\phi(i)}$ je najbliža tačka iz skupa tačaka modela tački d_i koja je transformisana tekućim parametrima transformacionog operatora a_k .

Korak T. Ažuriraj transformaciju, i izračunaj:

$$a_{k+1} = \arg \min_a \sum_{i=1}^{N_d} \varepsilon^2(|m_{\phi(i)} - T(a; d_i)|), \quad (7)$$

U većini slučajeva $T(a; x)$ se izračunava u zatvorenoj formi ili primenom tehnike dekompozicije singularnih vrednosti matrice (svd).

Konvergencija ovog algoritma ka lokalnom minimumu je garantovana. Izborom odgovarajućeg inicijalnog skupa parametara, moguće je postići i globalnim minimum greške korespondencije. Poznavanje približnih vrednosti potrebnih uglova zakretanja i translacije tačaka supa podataka radikalno doprinosi efikasnosti i obezbeđuje brzu kovergenciju ICP algoritma ka globalnom minimumu. Zato je neophodno da se koriste koordinate robotskog sistema na neki od prethodno navedena 3 načina.

ICP algoritam se okončava kada je transformaciona matrica $T(a_{k+1}; x)$ u koraku $(k+1)$ jednaka transformacionoj matrici $T(a_k; x)$ u koraku k .

Napomena: Pojam modela ovde treba shvatiti tako da je model generisan iz nekog CAD paketa i stvarno predstavlja nominalni model objekta koji je apriorno poznat, ali postoji i druga mogućnost, koja se primenjuje onda kada ne postoji nominalni model. U tom slučaju pojam modela se svodi na slučajno izabran referentni pogled u odnosu na koji se vrši registracija skupova tačaka generisanih kroz Preprocesor A ali iz drugih pogleda (pogledaj sliku 6.1, tu bi referentni pogled, odnosno model mogao da bude bilo koji skup tačaka izveden iz jednog od 5 pogleda).

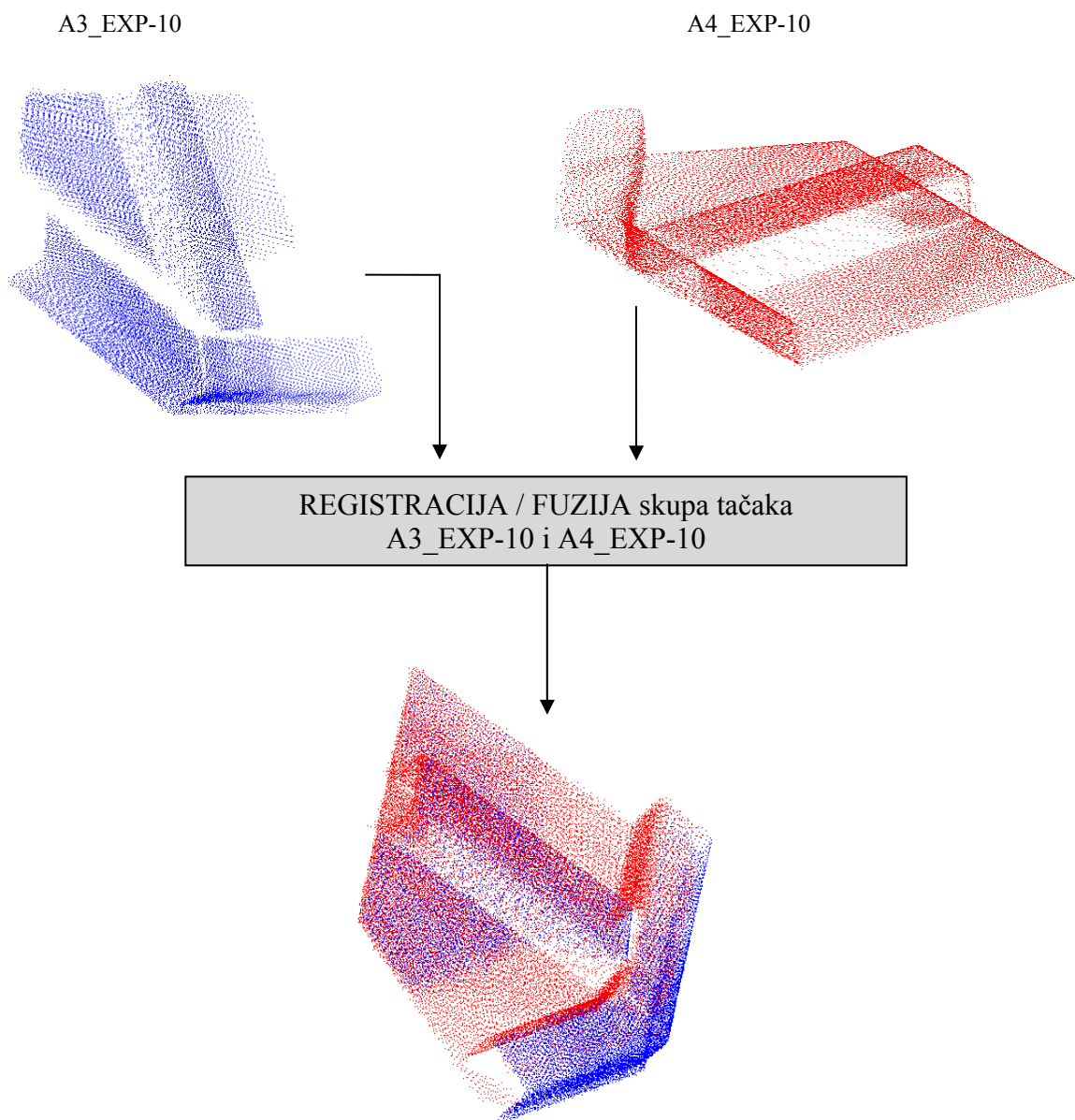
Na slici 7 prikazan je primer registracije dva skupa tačaka, jedan generisan u referentnom pogledu, a drugi u narednom pogledu.

Zadatak registracije se može ostvariti i primenom algoritama koji su bazirani na Hausdorfovoj distanci. Ipak, Hausdorfova distanca se na najefikasniji način koristi za zadatak komparacije i kvantifikaciju greške.

5.4. Modul 4, Modul 5 i Modul 6

Modul 4 je modul kroz koji se ostvaruje sekundarna obradu signala i 3d vizuelizacija radnog prostora (samo zona od primarnog tehnološkog interesa). Preprocesori A i B generišu ulaz za Modul 4. U metodološkom smislu, sekundarna obrada podrazumeva transformaciju neuredjenog u uredjeni skup tačaka i time njegovo prevodjenje u digitalni model objekta. Ovu

transformaciju je moguće ostvariti kroz tehnike bazirane na Voronoi algoritmima, gde se prepoznaju susedne tačke i povezuju ravanskim primitivima u obliku trougla. Zatim se sprovodi filtracija i slične aktivnosti nad tako dobijenim prostornim objektom. Tehnološki vredniji pristup baziran je na semantičkoj transformaciji. Njen osnovni izlaz je segmentacija primarnog skupa tačaka u podskupove kroz prepoznavanje geometrijskih primitiva poput ravni ili cilindra (umesto susednosti, prepoznaju se složenije relacije između podskupova tačaka). RANSAC algoritam se vrlo često primenjuje u ovom kontekstu. Ovaj algoritam je u svojoj osnovi statističke prirode. Ipak, postoje i računski efikasniji algoritmi koji su pogodni za primenu u realnom vremenu. U okviru TR35007 projekta sprovode se intenzivna istraživanja u ovom domenu. Naredni, u hijerarhijskom smislu najviši i najkompleksniji korak je prepoznavanje geometrijskih osobenosti koje su tehnološke prirode i relevantne za proces zavarivanja, odnosno izvršenja zadatka koji se postavlja pred robota.



Slika 7: Primer registracije dva skupa prostornih tačaka.

U okviru Modula 5 ostvaruje se takozvani *Human-friendly* interfejs za spregu čoveka i robotskog sistema, koji je direktna podrška Modulu 4 i istovremeno predstavlja spregu sa

upravljačkim funkcijama robota i procesa zavarivanja. U okviru ovog tehničkog rešenja kao HMI platforma korišćen je standardni SolidWorks komercijalnih 3D modeler, uz odgovarajuća funkcionalna prilagodjavanja. Kroz Modul 5 moguće je ugraditi identifikovani objekat ili deo radnog prostora u virtuelni 3d nominalni model radne stanice, objekta koji se zavaruje, robota i ostalog pomoćnog primera. Na ovaj način se stvara mogućnost sprovođenja virtuelne simulacije izvršavanja radnog zadatka robotskog elektrolučnog zavarivanja, na bazi senzorom prikupljenih podataka i sprovedene primarne i sekundarne obrade.

Modul 6 je poseban hardverski modul koji predstavlja virtuelnu mlaznicu. Virtuelna mlaznica se sastoji iz realne fizičke mlaznice u kojoj se umesto žice za zavarivanje pojavljuje tačkasti laserski snop. Na ovaj način je moguće u realnom fizičkom prostoru izvesti neku vrstu simulacije izvršavanja radnog zadatka, pri čemu operator može da prati lokaciju na kojoj se pojavljuje laserska tačka. Ukoliko ova laserska tačka pada u zonu šava, onda je kompletan proces preprocesiranja i postprocesiranja, uključujući i replaner radnog zadatka, realizovan korektno. Ova provera je finalna i posle toga je moguće aktivirati realan proces elektrolučnog zavarivanja, uz visok stepen verovatnoće da će on biti u potpunosti uspešan.

Prethodno navedeni moduli i njihova funkcija, jaso pokazuju tehnološku vrednost ovog tehničkog rešenja i takodje, da njegova uspešna primena ne zahteva kompleksno obučavanje korskri niti zahteva visok nivo početnih znanja koje korisnik, budući operater, mora unapred da poseduje kako bi mogao da sistem ove kompleksnosti efikasno koristi u praksi.

6. ZAKLJUČAK

Tehničko rešenje: **Multimodalni sistem robotskog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti za primenu u robotskom zavarivanju**, izvedeno je u obliku laboratorijskog prototipa, kojim su demonstrirana znanja i veštine projektnog tima TR35007 u domenu razvoja savremenih senzorskih sistema za veštačko gledanje, specijalizovanih za primenu u robotici. Razvijeno rešenje je posebno prilagodjeno za primenu na robotskim sistemima za elektrolučno zavarivanje. Senzorski sistem se sastoji iz 6 hardverskih i softverskih modula, medjusobno sregnutih kao jedinstven funkcionalni sistem. Osnovna tehnološka vrednost i inovativnost je u multimodalnom radu koji je ostvaren kroz kombinovanje većeg broja postojećih tehnologija za dimenzionu metrologiju i 3d akviziciju geometrije složenih prostornih objekata. Pored navedene, druga posebnost ovog tehničkog rešenja i komparativna prednost u odnosu na postojeće, komercijalno raspoložive proizvode je niska proizvodna cena koja je bazirana na primeni tehnologija koje su razvijene za masovnu potrošačku industriju (industrija zabave prevashodno) i na bazi minimizacije funkcionalnih performansi sastavnih modula. Primenom optičkih senzora VGA standarda istovremeno je ostvarena velika redukcija troškova (masovno rasprostranjen standard sa opremom i komponentama koje se izradjuju u ekstremno velikim serijama), redukovani zahtevi računске složenosti (indirektna redukcija troškova) i postignute optimalne performanse (30 fps i prostorna rezolucija bolja od 0.5mm) sa aspekta procesa zavarivanja. Ovakvim pristupom je omogućeno da se drastično redukuju troškovi opremanja robota za zavarivanje tehnološki visokovrednim sistemima vizuelne povratne sprege (kod postojećih, komercijalno raspoloživih sistema oni se kreću u intervalu od 50 do 150% vrednosti robota!), što stvara prostor za široku primenu ovih sistema u industrijskoj praksi, uključujući i primenu u malim i srednjim preduzećima. Postojeće stanje je takvo da, bez obzira na činjenicu da je robotsko zavarivanje jedna od prvih uspešnih aplikacija robota u industrijskoj uslovima, tehnologija na kojoj robotsko elektrolučno zavarivanje danas počiva je dominantno bazirana na 'slepom' zavarivanju, odnosno tehnologiji koja se malo ili nimalo promenila u odnosu na rane početke njene primene u industriji. Realizovan laboratorijski prototip multimodalnog senzorskog sistema je inovativno rešenje za ultrabrz u akviziciju okruženja u industrijskim

uslovima, koje predstavlja solidnu osnovu za dalje razvojne aktivnosti (usavršavanje) i paralelno, pokretanje aktivnosti na komercijalizaciji (*from lab to market*). U narednoj fazi planira se pokretanja aktivnosti na komercijalizaciji ovog tehničkog rešenja u saradnji sa kompanijom ARTEC Group, Luxemburg – Palo Alto (US) – Moscow (Rusija), Hi-Tec kompanija, specijalizovana za akviziciju i obradu 3D površina.

7. LITERATURA

- [1] J.N. Pires, A. Loureiro, and G. Bolmsjo, "Welding Robots: Technology, Systems Issues and Applications ", Springer-Verlag London Limited 2006, ISBN-10: 1852339535
- [2] T.-J. Tarn, S.-B. Chen, C. Zhou (Eds.), "Robotic Welding, Intelligence and Automation", Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN-10 3-540-73373-6.
- [3] J. B. Park, S. H. Lee, and I. J. Lee, "Precise 3D Lug Pose Detection Sensor for Automatic Robot Welding Using a Structured-Light Vision System", *Sensors* 2009, 9, pp.: 7550-7565; doi:10.3390/s90907550
- [4] B.G. Batchelor and P.F. Whelan: *Intelligent Vision Systems for Industry*, Springer, 2002, ISBN-10: 3-540-19969-1.
- [5] D. Xu, M. Tan, X. Zhao, Z. Tu, "Seam Tracking and Visual Control for Robotic Arc Welding Based on Structured Light Stereovision", *International Journal of Automation and Computing* 1 (2004) 63-75.
- [6] S. Inokuchi, K. Sato, F. Matsuda, "Range imaging system for 3-D object recognition", *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, 1984, pp. 806–808.
- [7] YASKAWA Motoman Robotics, MA1400 Arc Welding Industrial Robot, User Manual, MA1400
- [8] STMicroelectronics, STM32F415RG High-performance ARM Cortex-M4 MCU with DSP and FPU, Datasheet, DocID022063 Rev 4, June 2013.
- [9] OmniVision, OV7670/OV7671 CMOS VGA (640x480) CameraChip with OmniPixel Tehology, Advanced Information Preliminary Datasheet, Version 1.01, July 2005.
- [10] P.J. Besl, N.D. McKay, "A Method for Registration of 3D Shapes", *IEEE PAMI*, vol. 14(2), 1992, pp. 239-256.
- [11] A. W. Fitzgibbon, "Robust Registration of 2D and 3D Point Sets", In *BMVC '01: Proceedings of the 1995 British conference on Machine vision*, pages 662–670,2001.
- [12] S. Rusinkiewicz, M. Levoy: "Efficient variants of the ICP algorithm", *3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001.
- [13] B. Bellekens, V. Spruyt, R. Berkvens, and M. Weyn, "A Survey of Rigid 3D Pointcloud Registration Algorithms", *AMBIENT 2014 : The Fourth International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*, pp.8-13, ISBN: 978-1-61208-356-8.
- [14] S. Marden and J. Guivant, "Improving the Performance of ICP for Real-Time Applications using an Approximate Nearest Neighbour Search", *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation*, Wellington, NZ, 3 - 5 December 2012 2012, pp. 3–5.
- [15] S. Fantoni, U. Castellani, and A. Fusiello, "Accurate and Automatic Alignment of Range Surfaces", *Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission*. IEEE, Oct. 2012, pp. 73–80.
- [16] D. P. Huttenlocher, G. A. Klanderman, and W. J. Rucklidge, "Comparing images using the Hausdorff distance," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 15, pp. 850–863, Sept. 1993.
- [17] R. Schnabel, R. Wahl, and R. Klein, "Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection", *Computer Graphics Forum* (June 2007), 26:2(214-226).
- [18] Danilov, I., Petrović, P., Lukić, N., "Coded Structured Light Triangulation For Agile Robot - Environment Interaction In Arc Welding", *ICPE 2013 - Proceedings of the 35th International Conference on Production Engineering*, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, Kopaonik, 2013, pp. 215-220, ISBN 978-86-82631-69-9.
- [19] Danilov, I., Petrović, P.B., Lukić, N., "Triangulacija strukturirane svetlosti u robotskom zavarivanju", *Zbornik radova 39. JUPITER konferencija*, 35. Simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2014, str. 3.36-3.43, ISBN: 978-86-7083-838-3.