



P.B. Petrović¹, M. Milanov², A. Vićentić³, M. Stojović⁴, Ž. Spasić¹, M. Pilipović¹,
Ž. Jakovljević¹, P. Baltić⁵

**PRIMENA INELIGENTNIH SENZORSKOH SISTEMA U RAZVOJU INTEGRISANE
AUTOMATIZACIJE REALNIH I VIRTUELNIH PROCESA PROIZVODNOG PREDUZEĆA –
REKAPITULACIJA REZULTATA NA PROJEKTU MA14035**

Rezime

U okviru ovog rada daje se rekapitulacija rezultata istraživanja sprovedenih na projektu MA14035 koji zajednički realizuju Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu i kompanije Mikrokontrol iz Beograda, Ikarbus iz Beograda i FAP iz Priboja. Pored pregleda teoretskih i metodoloških sadržaja, posebna pažnja se posvećuje praktičnim izlazima ostvarenim u okviru ovog projekta u formi laboratorijskih demonstracionih instalacija na kojima su praktično verifikovani ključni inovativni sadržaji sprovedenih istraživanja, kao i konceptualnih rešenja za izabrane tehnološke zadatke u proizvodnom pogonu kompanije Ikarbus kao jednog od participanata projekta. Na kraju saopštenja, navode se plan daljih istraživanja i perspektive primene ostvarenih rezultata u industrijskim uslovima, na proizvodnim linijama participanata ili u kontekstu projekata sa kompanijama koje nisu članice konzorcijuma projekta.

1. UVOD

Projekat MA 14035⁶, akronim INTOSA, je dvogodišnji projekat koji je finansijski podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije za period 2008-2010. godina. Na ovom projektu učestvuje Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Katedra za proizvodno mašinstvo, u svojstvu nosioca istraživačko-razvojnih aktivnosti i koordinatora projekta, kompanija Mikrokontrol iz Beograda, u svojstvu korisnika istraživanja i tehnološke podrške u delu industrijske automatizacije, informacionih tehnologija i tehnologija optoelektronskih sistema za dimenzionu metrologiju, i kompanije IKARBUS iz Beograda FAP iz Priboja kao korisnici istraživanja koji dolaze iz domena industrije prerade metala. Projekat je tako komponovan da u minimalnom obimu sadrži sve ključne elemente modela jednog savremenog istraživačkog projekta, kakav se primenjuje u Evropskoj uniji, a posebno u okviru FP7 okvirnog programa. Konzorcijum sadrži jednu istraživačko-razvojnu instituciju koja je locirana u edukacionom segmentu, dve velike korporacije koje poseduju potrebne kvantitativne resurse za značajna tehnološka istraživanja i implementaciju rezultata istraživanja, i jednu kompaniju iz domena malih i srednjih preduzeća, koja je po pravilu pokretač inovacionih aktivnosti iz oblasti novih tehnologija.

Projekat pored konzorcijuma, poseduje i Poslovnu interesnu grupu, koju čini klaster kompanija iz oblasti koje direktno ili indirektno gravitiraju tematskim ciljevima projekta i koje su u poslovnom smislu zainteresovane za rezultate projekta kao budući korisnici, ili kao tehnološka baza za praktičnu realizaciju istraživačkih i demonstracionih aktivnosti.

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

² Mile Milanov, dipl. ing., Direktor, Mikrokontrol d.o.o., Vase Pelagića 30, 11000 Beograd

³ Aleksandar Vićentić, dipl. ing., Generalni direktor, IKARBUS a.d., Autoput 24, 11080 Beograd

⁴ Mirko Stojović, dipl. ing., Generalni direktor, FAP korporacija, Priboj, Radnička bb, 31330 Priboj

⁵ Petar Baltić, dipl. ing., Direktor proizvodnje, IKARBUS a.d., Autoput 24, 11080 Beograd

⁶ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu 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.

U cilju postizanja efikasne komunikacije između članica konzorcijuma, i u cilju obaveštavanja stručne javnosti o rezultatima i aktivnostima projekta, kao i različitim oblicima diseminacije rezultata projekta, koristi se Internet kao opšta tehnička platforma, na kojoj je izgrađen sajt projekta sa širokim spektrom servisa i modula za razmenu informacija (<http://master.mas.bg.ac.yu/ma14035>).

2. SADRŽAJ ISTRAŽIVANJA I CILJEVI

Projekat INTOSA ima za predmet istraživanja aplikativne aspekte posebne klase senzorskih sistema koji su bazirani na simbiozi optičke tehnologije, digitalne elektronike i savremene tehnologije inteligentnih informacionih sistema. Ovakvi sistemi pokrivaju jedan vrlo širok spektar primena u domenu proizvodnih tehnologija, koje se prostiru od dimenzione metrologije, pa do sistema veštačkog gledanja i prepoznavanja oblika kao jedne od ključnih generičkih tehnologija na kojoj se gradi koncept inteligentnih tehnoloških sistema.

Ideja o pokretanju ovog projekta proistekla je iz uočenih potreba sistemskog rešavanja problema koji su pratili desetogodišnji program razvoja i proizvodnje mernih sistema baziranih na laserskim triangulacionim senzorima za merenje geometrijskih veličina na proizvodnim linijama u oblasti industrije prerade elastomera, koji je u saradnji sa kompanijom Informatika a.d. iz Beograda realizovan u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Primarni naučno-istraživački i razvojno-aplikativni cilj: uspostavljanje jedne istraživačko-razvojne jedinice u okviru Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, koja će sistematskim istraživačkim aktivnostima i njihovom praktičnom verifikacijom kroz izgradnju odgovarajućih demonstracionih instalacija, ovladati generičkim znanjima iz domena digitalne optičke tehnologije i omogućiti transfer tih znanja u domaću industriju sa ciljem masovne primene ove tehnologije u oblasti automatizacije proizvodnih procesa.

Posebni naučno-istraživački ciljevi projekta su sledeći: 1) Sistematska identifikacija stanja i prepoznavanje osnovnih trendova razvoja tehnologije optičkih senzorskih sistema i primene tih sistema u domenu automatizacije proizvodnih procesa; 2) Istraživanje i sistematizacija specifičnih tehnologija vezanih za hardverske aspekte primene optičkih senzorskih sistema u realnim industrijskim uslovima – identifikacija specifičnih zahteva i sa tim povezanim odgovarajućim procedurama za kontrolu osvetljenosti scene, refleksija, kontaminacije optičkog puta i drugih poremećaja ambijenta u kome se primenjuju optički senzori; 3) Razvoj specifičnih procedura i algoritama primarne obrade senzorskih signala primenom diskretne vejevlet transformacije, kao i istraživanje uslova efikasne primene vejevlet transformacije u realnom vremenu; 4) Razvoj novih algoritama za statističku obradu nekompletnih vremenskih serija primenom pristupa robusne statističke karakterizacije površi; 5) Razvoj novih algoritama za prepoznavanje oblika u realnom vremenu primenom neiterativnih algoritama fazi i neuro-fazi klasterovanja; 6) Istraživanje metroloških aspekata primene optičkih senzorskih sistema u dimenzionoj metrologiji na proizvodnim linijama; 7) Istraživanje specifičnih aspekata primene tehnologije virtuelnih proizvodnih sistema na domen gradnje metroloških sistema baziranih na optičkim senzorima – sinteza i simulacija automatskih mernih stanica i robotizovanih sistema sposobnih da komuniciraju sa okruženjem korišćenjem optičke povratne sprege; 8) Razvoj modela interakcije Univerzitet – Industrija u delu treninga i edukacije inženjera i osavremenjivanje njihovih znanja primenom multimedijjskih Internet tehnologija obrazovanja na daljinu; 9) Izgradnja demonstracionih instalacija i test stolova za praktičnu eksperimentalnu verifikaciju istraživačkih rezultata projekta; 10) Saopštavanje rezultata istraživanja stručnoj i naučnoj javnosti u formi stručnih i naučnih radova izloženih na domaćim ili međunarodnim konferencijama, ili publikovanim u odgovarajućim časopisima.

3. PREGLED OSNOVNIH REZULTATA SPROVEDENIH ISTRAŽIVANJA

Pregled rezultata koji su ostvareni kroz istraživačke aktivnosti na projektu u toku druge istraživačke godine navodi se po fazama sadržanim u planu realizacije projekta. Materijal koji se ovde navodi preuzet je u delovima iz godišnjeg izveštaja [1], koji je rukovodilac projekta podneo Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije za tekuću istraživačku godinu.

3.1. Faza realizacije 3 / aktivnost 1: Nove procedure primarne obrade senzorskih signala

Ovde su istraživanja bila usmerena u pravcu identifikacije tekućeg položaja manipulacionog robota, sprege koordinata položaja robota sa signalima koje generiše laserski merni sistem i integracije ovih informacija u CAD razvojno okruženje virtuelnog metrološkog sistema [2, 3]. Ključni problem koji se ovde pojavio odnosi se na zatvorenost komercijalno raspoloživih upravljačkih sistema u smislu dostupnosti koordinata položaja robotskog mehanizma u prostoru, odnosno informacija koje se čitaju sa enkodera akcionog sistema robota. Pod određenim uslovima postoji mogućnost preuzimanja tekućih koordinata položaja preko RS232

digitalnog interfejsa, ali ova funkcija nije vremenski sinhronizovana relanim stanjem mehanizma i namenjena je pre svega za statički ili kvazistatički režim rada [4]. Rešenje ovog problema se može pronaći samo kod robotskih upravljačkih sistema baziranih na PC platformi ili, izgradnjom specijalnog interfejsa koji bi preuzimao tekuće koordinate neposredno sa regulatora servo motora, tamo gde se ta informacija prosleđuje sistemu za slaganje kretanja (interpolator). Nemogućnost praktične implementacije nije ograničila razvojne aktivnosti u smislu izrade opštih algoritama za ove potrebe, gde je korišćeno MatLab razvojno okruženje. Jednom generisan vektor položaja robotskog mehanizma u prostoru uparen sa distancom izmerenom pomoću laserskog triangulacionog senzora, lako se transformiše u željeni format koji preuzima neki od standardnih razvojnih CAD sistema (CATIA, DELMIA na primer) za dalju manipulaciju u okviru virtuelnog prostora robotizovanog mernog sistema. Eksperimenti u ovom kontekstu realizovani su kroz standardni CAD paket DELMIA.

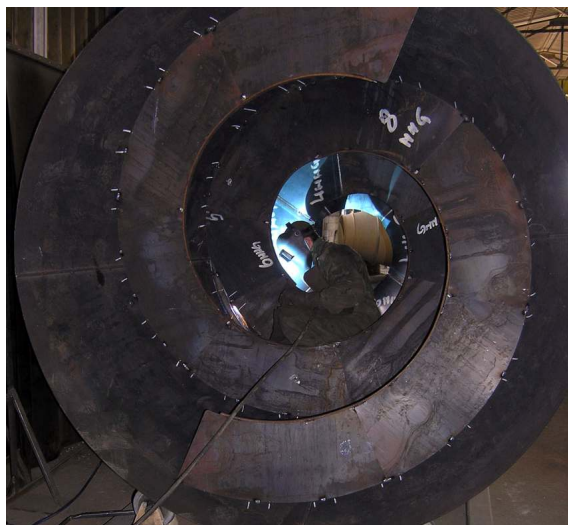
3.2. Faza realizacije 3 / aktivnost 2: Optički metrološki sistemi

Istraživački naponi su bili fokusirani u tri pravca: 1.) Istraživanje graničnih performansi laserskog triangulacionog sistema u okviru tehnologije elektrolučnog zavarivanja; 2.) Istraživanje mogućnosti primene laserskih triangulacionih sistema u okviru tehnologije sekundarne prerade drveta i proizvodnje nameštaja; 3.) Razvoj novog optičkog metrološkog sistema ekstremne brzine skeniranja koji nije baziran na laserskoj triangulaciji.

Robotsko zavarivanje je tehnologija koja postepeno prodire u industriju Srbije i zamenjuje tradicionalne sisteme bazirane na manuelnoj tehnologiji. Razlozi za to su višestruki, a mogu se izdvojiti tri dominantna: 1) višestruko veća produktivnost, 2) bolji kvalitet zavarenog sklopa i stabilnost kvaliteta i 3) zaštita čoveka od štetnostnih isparenja i zračenja. Posle faze gotovo potpune destrukcije, izgradnja novih industrijskih kapaciteta jednim velikim delom bazirana je na masovnoj proizvodnji zavarenih konstrukcija. Proizvodnja ove vrste najčešće se sreće u malim i srednjim preduzećima, sa 50 do 150 zaposlenih, ali postoje primeri gde se nekadašnje velike kompanije poput kompanije Lola, posle privatizacije vraćaju na tržište sa potpuno izmenjenim proizvodnim programom u kome dominantan sadržaj čini tehnologija zavarivanja. Ovde treba dodati i brodogradilišta, koja su posle privatizacije pokrenula intenzivne proizvodne aktivnosti, pri čemu dominantnu tehnologiju čini tehnologija zavarivanja. Sem nekoliko izuzetaka, u industriji Srbije dominantna je tehnologija manualnog elektrolučnog zavarivanja. Uslovi u kojima se odvija tehnološki proces su vrlo teški, sa nedovoljnom ili zanemarljivom zaštitom radnika, a ne tako retko, prisutne su drastične situacije, kao ona koja se navodi na slici 1, gde se od zdravih ljudi stvaraju invalidi i tako umesto koristi, društvu u celini i pojedincima stvara evidentna šteta. Drugi problem se odnosi na deficit radne snage i čestu fluktuaciju, čime se poslodavcu onemogućava da upravlja poslovanjem kompanije u celini i poštuje dogovorene rokove. Kada se prethodno doda i činjenica da je proizvodnja u ovom segmentu gotovo u potpunosti orijentisana izvozu, onda problem fluktuacije radne snage dobija sasvim novu dimenziju, on postaje ključni elemenat poslovnog rizika kompanije i održivosti ugovorenog aranžmana na duge rokove. Iz prethodno navedenog jasno sledi potreba automatizacije procesa zavarivanja kroz primenu različitih robotskih sistema. Osnovna prepreka u ovom smislu jeste problem tehnološkog skoka koji se odražava na problem zapošljavanja radnika nove kvalifikacione strukture i problem koji ima čisto tehničku prirodu, a to je sposobnost automatskog sistema da funkcioniše u uslovima značajno drugačijim od nominalnih. Upravo ovaj drugi razlog prepoznat je u okviru projekta INTOSA kao ključni istraživački izazov i kao potencijalno ključni doprinos privredi Srbije.

Savremeni roboti koji se primenjuju na zadacima elektrolučnog zavarivanja skoro bez izuzetka rade u otvorenoj upravljačkoj sprezi u odnosu na proces zavarivanja. Jednostavno, pretpostavlja se da se sklop koji se zavaruje nalazi na unapred poznatoj i precizno definisanoj poziciji, da se šav koji se zavaruje nalazi na precizno definisanoj poziciji i da sistem robot-mlaznica precizno i bez odstupanja sledi zadatu trajektoriju. U ovako idealizovanoj situaciji, povratna sprega po procesnim veličinama nije potrebna i robot može da bude efikasno upotrebljen, uvek produkujući zavareni spoj visokih performansi. U stvarnosti je situacija sasvim drugačija. Ni jedan o prethodno navedena tri preduslova nije ispunjen, a posebno prva dva. Sastavni delovi sklopa koji se zavaruje se obrađuju nedovoljnom preciznošću, sa značajnim odstupanjima od nominalne geometrije. Sklop koji se formira u fazi predmontaže takođe značajno odstupa od nominalnog. Dakle, stanje geometrije objekta na ulazu u tehnološku sekvencu zavarivanja u opštem slučaju značajno odstupa od nominalnog. Ukoliko bi se povećanjem tehnološke discipline sva ova odstupanja otklonila, to bi dovelo do drastičnog povećanja troškova proizvodnje i samim tim do poništenja prednosti koje donosi automatizacija. Zavarivanje mora da se realizuje nad sklopom nedovoljno precizne geometrije. Jedino racionalno rešenje je uvođenje različitih povratnih sprega koje će omogućiti da robot ostvari potrebnu interakciju sa okruženjem, posebno sa objektom koji se zavaruje, odnosno da se obezbedi ono što je samo po

sebi prisutno u tehnologiji manuelnog zavarivanja, a to je da varilac vidi objekat koji se zavaruje i prema tome koordinira svoje kretanje.

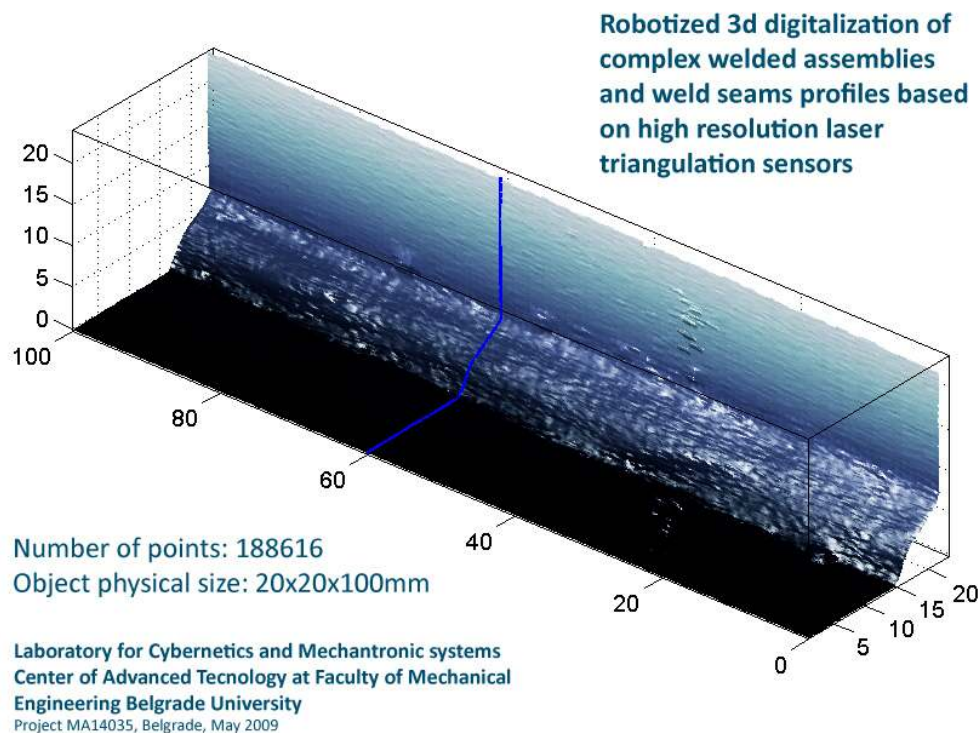


Slika 1: Proizvod vrhunskog kvaliteta izrađen u Srbiji i namenjen izvozu. Neki od detalja iz proizvodnje koji ukazuju na problematiku povezanu sa ekstremno štetnim uticajem primenjene tehnologije na ljudsko zdravlje. Direktna primena automatizacije u ovom konkretnom slučaju nije moguća. Robotizovani sistem koji bi mogao efikasno da zameni čoveka na ovakvim zadacima mora da poseduje inteligentan senzorski sistem za interakciju sa okruženjem. Sistemi bazirani na laserskoj triangulaciji predstavljaju jedno od mogućih rešenja.

Optička tehnologija bazirana na laserskoj triangulaciji [5, 6] se pokazuje kao vrlo potentan kandidat za rešenje ovog problema i u okviru ovog projekta razvijana je metodologija za opremanje standardnih industrijskih robota optičkim mernim sistemima koji će omogućiti korekciju greške geometrije sklopa koji se zavaruje u realnom vremenu. Praktični eksperimenti su pokazali da je ova tehnologija vrlo delotvorna i da pored identifikacije geometrijskih odstupanja pruža mogućnost kontrole zavarenog spoja kroz visokorezolutno skeniranje i 3d digitalizaciju zavarenog šava, neposredno posle njegovog formiranja, ne čekajući da se zona uticaja toplote ohladi. Na slici 2 naveden je primer skenirane geometrije zavarenog šava izveden u okviru projekta INTOSA na razvijenoj eksperimentalnoj instalaciji. Ključno je to da je kompletan sistem, uključujući softverske rutine za akviziciju, postprocesiranje i generisanje digitalnog modela objekta, realizovan u okviru ovog projekta, korišćenjem baznih komponenti koje su komercijalno raspoložive na tržištu, tako da se može tvrditi da je rezultat ovih istraživanja zapravo novi proizvod, visokotehnološki proizvod specijalizovan za tehnologiju elektrolučnog zavarivanja, koji bi uspešno mogao da se komercijalizuje i primeni kao domaće rešenje u industriji Srbije.

Paralelno sa ovim aktivnostima razvijen je portabilni mikrorobot jednostavne kinematske konfiguracije koji je specijalizovan za zavarivanje pravolinijskih šavova. Intenzivnim razvojnim aktivnostima sistem je koncipiran, projektovan i realizovan za samo 3 meseca. Prvi prototip je uveden u eksploataciju u januaru mesecu 2010. godine u kompaniji Velpan iz Kikinde, koja proizvodi metalne kontejnere za nemačku kompaniju Werner & Weber, i u potpunosti je svoj proizvodni program usmerila na izvoz. Ključni problemi u ovoj proizvodnji su proizvodni kapacitet i kvalitet proizvoda koji mora da bude po najvišim standardima da bi mogao da bude plasiran na zahtevnom nemačkom tržištu. Posle preliminarnih

testova koji su pokazali potpunu funkcionalnost razvijenog sistema, realizovan je i drugi prototip i februaru mesecu 2010. godine uveden u redovnu proizvodnju. Mikroroboti su tako koncipirani da omogućavaju primenu bez potrebe da njima rukuje radnik koji je kvalifikovani zavarivač. Produktivnost i kvalitet su višestruko veći od onog koji ostvaruje najveštiji kvalifikovani zavarivač (brzina zavarivanja se kreće i do 1m/min). Praksa je pokazala da jedan mikrorobot zamenjuje 3 kvalifikovana zavarivača. Po dogovoru sa kompanijom Velpan u maju mesecu biće proizvedena još jedna ovakva jedinica i pokrenut bilateralni projekat razvoja dodatnih funkcija mikrorobota koje će povećati njegovu tehnološku vrednost, a ključni sadržaj će biti senzorski sistem kojim će biti omogućeno značajno redukovanje pomoćnih vremena, i tako povećanje produktivnosti. Na slici 3 navedena je fotografija dva mikrobota na zajedničkoj stazi po kojoj se kreću.



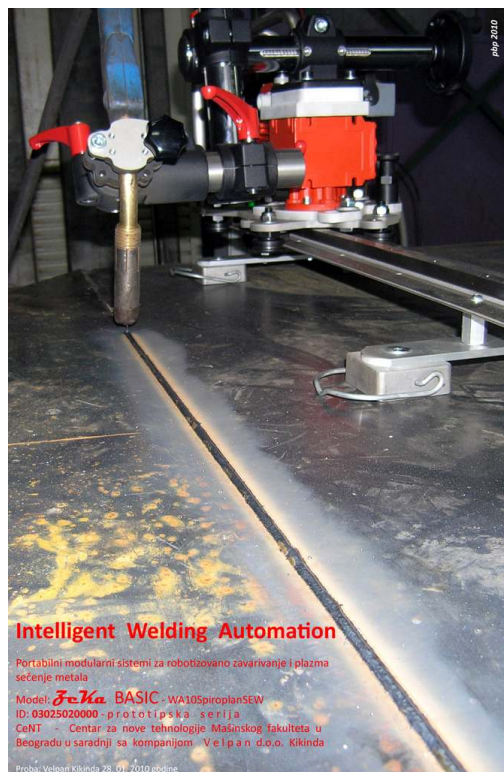
Slika 2: Primer 3d modela izvedenog visokorezolutnim laserskim skeniranjem šava formiranog elektrolučnim zavarivanjem. Detalji veličine 0.1mm omogućavaju precizan uvid u ostvarenu geometriju, precizno izračunavanje količine dodatog materijala i zatim, povezivanje ovih informacija sa procesnim veličinama. U makro razmerama, ovom tehnologijom se prepoznaje lokacija šava i deformacije zavarenog sklopa izazvana termičkim naprezanjima.

Istraživanje mogućnosti primene laserskih triangulacionih sistema u okviru tehnologije sekundarne prerade drveta i proizvodnje nameštaja je bilo predmet istraživanja u 2010. godini. Konkretno za potrebe kompanije Xillia, Beograd sprovedena su probna merenja u okviru eksperimentalne instalacije razvijene na projektu INOTOSA tokom 2009. godine, sa ciljem izgradnje sistema za reverzno inženjerstvo i kontrolu proizvodnog procesa, neposredno na proizvodnoj liniji.

Savremena industrija nameštaja bazirana je na numeričkoj tehnologiji, koja omogućava dizajnerima veliku slobodu u kreiranju modernog nameštaja sastavljenog iz delova slobodne forme. Provera geometrije u ovom slučaju nije moguća korišćenjem tradicionalnih pristupa - slobodne prostorne forme gotovo je nemoguće meriti ručnim mehaničkim merilima. Tehnologija optičkih tiangulacionih sistema pruža mogućnost efikasnog rešenja ovog problema.

Istraživanja po ovom zadatku su prvo bila usmerena na istraživanje optičke interakcije drveta kao materijala i laserskog triangulacionog senzora. Praktična merenja su pokazala da su ta svojstva vrlo pogodna i da lokalna penetracija u poroznu strukturu drveta ima efekat niskofrekventne filtracije senzorsog signala, što dodatno pojednostavljuje zadatak merenja. U drugoj fazi vršene su probe na tipičnim reprezentim delova koji se sreću u proizvodnji nameštaja sa ciljem generisanja poprčnih preseka u tehnološki bitnim ravnima za proizvodni proces. Razvijene su odgovarajuće softverske rutine za postprocesiranje senzorskih signala, rutine za formiranje ravanskog oblaka tačaka i rutine za generisanje ravanske konture. Na slici 4 prikazan je primer ovih merenja sprovedenih na sastavnim delovima stolice koja se izrađuje u Srbiji po zahtevu partnera iz

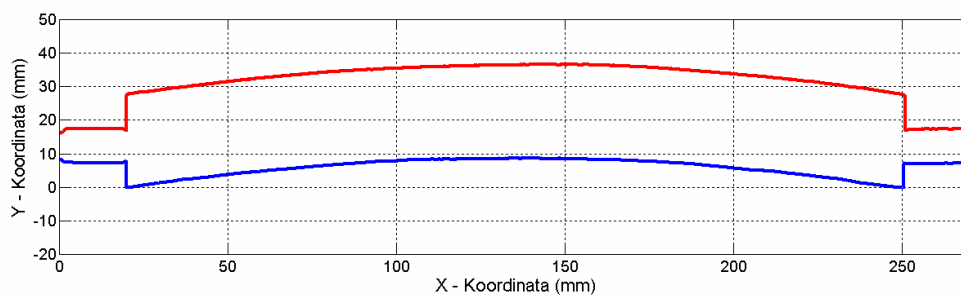
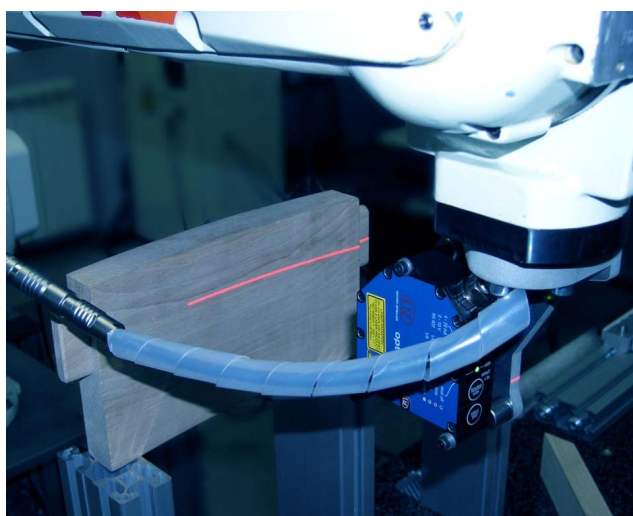
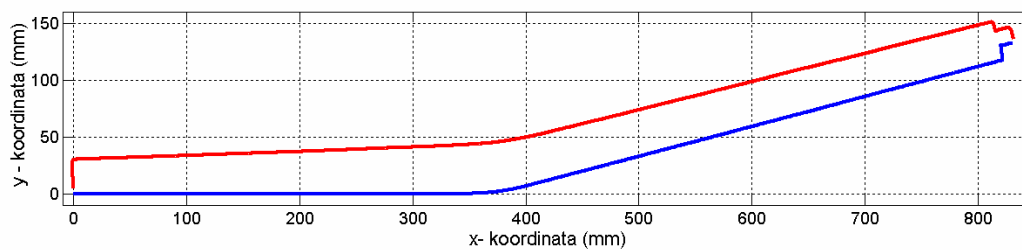
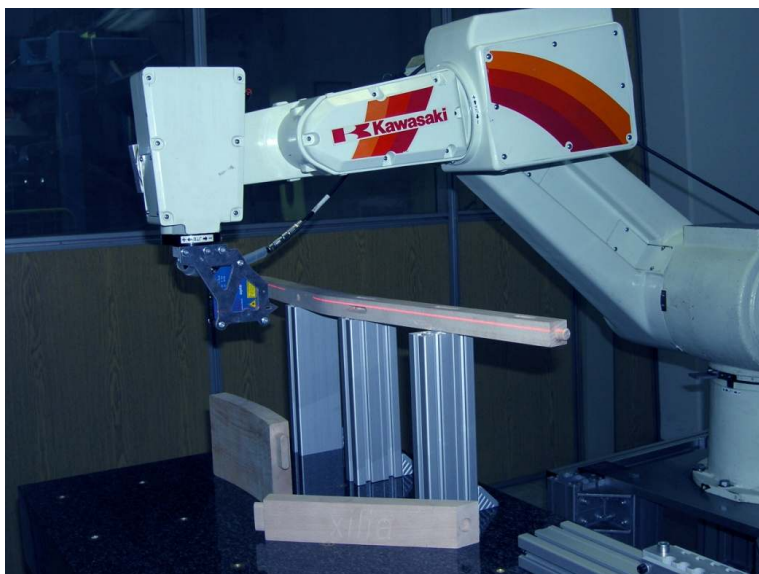
Italije. Robotizovanim skeniranjem obezbeđena je tačnost na nivou 100um što je za potrebe prerade drveta vrlo visoka tačnost. Pored identifikacije globalne geometrije skeniranog dela, sistem je pokazao potencijal da identifikuje nepravilnosti skenirane površine izazvanih defektima u samom procesu rezanja ili defektima na materijalu.



Slika 3: Fotografije portabilnog mikrorobota razvijenog u okviru projekta INTOSA za potrebe automatizacije procesa elektrolučnog zavarivanja. Robot je uveden u proizvodnju u kompaniji Velpan iz Kikinde januara meseca 2010. godine. Robotom rukuje radnik koji nema kvalifikacije varioca. U tromesečnom radu dva prototipa pokazano je kako jedan robot može da zameni 3 kvalifikovana varioca. Primer navedenog šava dobijen je probnim zavarivanjem brzinom od 0.6 m/min.

Razvoj novog optičkog metrološkog sistema ekstremne brzine skeniranja koji nije baziran na laserskoj triangulaciji nametnuo se kao logična potreba kada su sagledani svi aspekti laserske triangulacije. Ekstremno visoku tačnost i ekstremnu rezoluciju laserskih triangulacionih sistema baziranih na tačkastim izvorima svetlosti prati problem brzine skeniranja. Čak i kada je brzina uzorkovanja reda veličine 10 kHz i više (eksperimentalna istraživanja u okviru ovog projekta sprovedena su sa laserskim triangulacionim senzorom brzine uzorkovanja 2.5 kHz) proces digitalizacije je spor i nije pogodan kada se gradi kompletan digitalni model objekta. Alternativna tehnologija je tehnologija bazirana na strukturiranoj svetlosti, koja u svojoj osnovi takođe ima triangulaciju, ali se umesto tačkastog izvora svetlosti koristi ravanski izvor koji osvetljava kompletnu vidljivu površinu objekta u odnosu na neki ugao gledanja. Dovoljno je da se objekat osvetli sa tri strane i da se odgovarajućim 2d optičkim senzorom prikupe milioni tačaka iz kojih se dalje može generisati oblak tačaka iz koga se dalje umrežavanjem formira prostorna površ koja predstavlja digitalni model skeniranog objekta. Proces je vrlo brz i završava se u vremenskom intervalu reda veličine

jedne sekunde. Ovakve performanse su izuzetno pogodne za primene u relanom vremenu i u radu sa pokretnim objektima.



Slika 4: Istraživanje primenljivosti optičke triangulacije i razvijenog robotizovanog sistema za 3d skeniranje u okviru sekundarne prerade drveta i proizvodnje nameštaja.

3.3. Faza realizacije 3 / aktivnost 3: Projekat i realizacija demonstracione instalacije

Jedan od ključnih istraživačkih aspekata projekta MA14035 INTOSA odnosi se na izradu odgovarajućih test stolova i demonstracionih instalacija. Njihov cilj je da se izvrše praktične provere kritičnih teorijski razvijenih procedura (deo sistema menadžmenta rizika projekta koji treba da na vreme prepozna potencijalne probleme i obezbedi mehanizam njihovog korigovanja u hodu) i da se dokaže praktična upotrebljivost razvijenih rešenja u laboratorijskim i/ili industrijskim uslovima. U prvoj godini su razvijene i realizovane tri laboratorijske eksperimentalne instalacije: Eksperimentalna instalacija 1 - Laboratorijska instalacija za robotizovano lasersko skeniranje velikogabaritnih delova kompleksne geometrije, Eksperimentalna instalacija 2 - Laboratorijska instalacija za lasersko skeniranje malih delova kompleksne geometrije i Eksperimentalna instalacija 3 - Laboratorijska instalacija za ultrabrze sisteme kontrole geometrijskih karakteristika proizvoda primenom visokorezolutnih industrijskih sistema veštačkog gledanja. U drugoj istraživačkoj godini započeta je realizacija eksperimentalne instalacije 4 - Laboratorijska instalacija za digitalizaciju struktuiranom svetlošću.

Navedene laboratorijske instalacije realizovane su: 1)rekonfiguracijom postojeće opreme, 2)nabavkom nove opreme, 3)participacijom u opremi, radu i materijalu članica konzorcijuma i 4)pozajmicama od kompanija iz industrije. Dalje se navodi opis instalacija 1 i 4.

Dalji razvoj i unapređenje laboratorijske demonstracione instalacije razvijene u okviru prve istraživačke godine nastavljen je i u toku druge godine isključivo se fokusirajući na demonstracionu instalaciju za robotizovano skeniranje i njenu dogradnju nedostajućim hardverom i implementacijom unapređene softverske podrške za akviziciju, obradu i interpretaciju senzorskih signala.

EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA 1: Laboratorijska instalacija za robotizovano lasersko skeniranje delova kompleksne geometrije (slika 5).

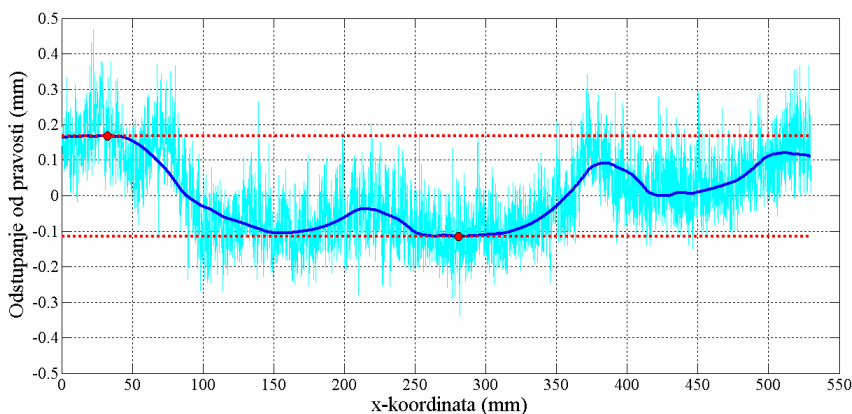
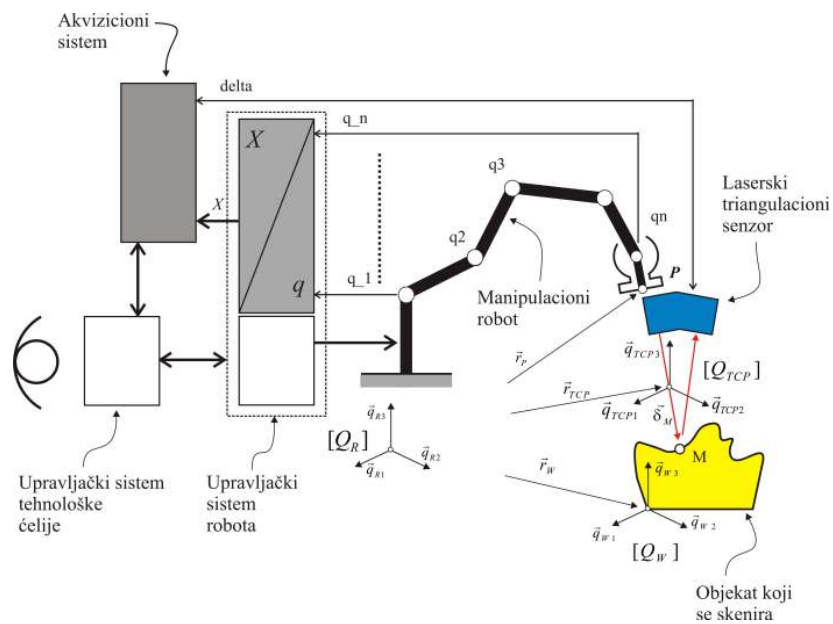
U cilju verifikacije razvijenog koncepta beskontaktnog visokopreciznog skeniranja srednjegabaritnih i velikogabaritnih delova kompleksne geometrije primenom laserskih triangulacionih senzora i manipulacionih robota na industrijskim proizvodnim linijama, razvijena je eksperimentalna instalacija u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu [7, 8, 9].

Sistem se sastoji iz: 1)manipulacionog robota antropomorfne konfiguracije sa 6 stepeni slobode nosivosti 6 kg i dohvata 1600 mm, 2)laserskog triangulacionog senzora mernog opsega od 70 do 170 mm, brzine uzorkovanja 2500 Hz i rezolucije 0.001 mm, 3) granitnog stola visoke preciznosti sa odgovarajućim postoljem za potiskivanje visokofrekventnih i seizmičkih vibracija, 4)prateći pribor za integraciju mehaničkog sistema, 5)akvizicioni sistem za prikupljanje podatka sa laserskog senzora i manipulacionog robota + primarna obrada i vizuelizacija i 6)interaktivni terminal za komunikaciju čovek-mašina. Tehničke mogućnosti: Razvijena i realizovana instalacija omogućava sprovođenje ekstenzivnih eksperimentalnih istraživanja i evaluacije koncepta robotizovanog laserskog skeniranja za industrijske aplikacije u delu dimenzione metrologije na proizvodnim linijama u automobilskoj industriji, reverznom inženjerstvu i kompenzacije geometrijske nesavršenosti priprema u okviru robotizovanih sistema za elektrolučno zavarivanje. Realizatori: Centar za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu. Korisnici: članice konzorcijuma projekta, Kolubara-Metal Vreoci, Velpan Kikinda, Zastava kovačnica, Robotakt Valjevo.

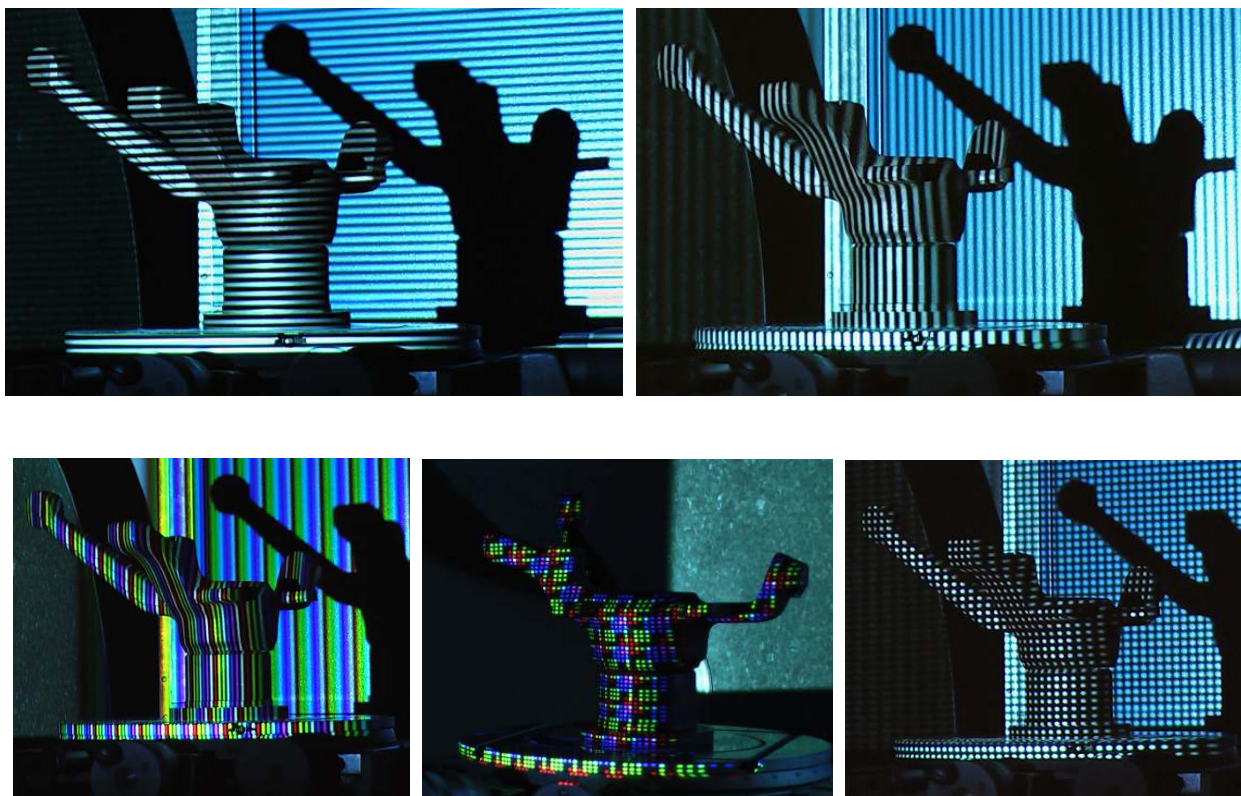
Navedena laboratorijska instalacija je u osnovi kompleksni metrološki sistem koji predstavlja generičku platformu za eksperimentalnu verifikaciju i razradu postavljenih modela, metoda i tehnika primene digitalnih optičkih senzorskih sistema za gradnju merne opreme prilagođene za primenu na automatskim proizvodnim linijama u domaćoj industriji.

EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA 4: Laboratorijska instalacija za digitalizaciju struktuiranom svetlošću.

Laboratorijska instalacija za prostornu digitalizaciju objekata složene geometrije primenom optičke triangulacije na bazi struktuirane svetlosti prikazana je na slici 6. Istraživanja u ovom smislu su započeta tokom 2010. godine i rezultirala su izgradnjom odgovarajućeg eksperimentalnog stola sa sistemom za generisanje struktuirane svetlosti velike fleksibilnosti (kontrolisan personalnim računarom) i softverskim sistemom za kalibraciju izvora struktuirane svetlosti i sistema prijemnog modula sa ugrađenim 2d senzorom za konverziju optičke pobude u električni signal velike brzine. U narednoj godini se planira dalje opremanje ovog sistema kroz ugradnju specijalizovanog softverskog sistema koji će biti razvijen u okviru projekta INTOSA kao sopstveni proizvod.



Slika 5: Konfiguracija robotizovanog mernog sistema baziranog na laserskog triangulacionog senzora sa tačkastim izvorom svetlosti i fotografija realizovane laboratorijske instalacije. Grafik u donjem delu slike prikazuje identifikovanu grešku robota u horizontalnoj ravni na nivou radnog stola. Multirezolucijskom analizom primenom diskretne vejtlet transformacije izdvojena je bazna komponenta ostvarene trajektorije robota (tamno plava boja); Originalni signal sadrži visokofrekventne komponente šuma koji dolazi od laserskog senzora i vibracija strukture manipulacionog robota.



Slika 6: Preliminarni eksperimenti sistema za ultrabrznu prostornu digitalizaciju optičkom triangulacijom strukturane svetlosti - probe generatora struktuiranog svetla.

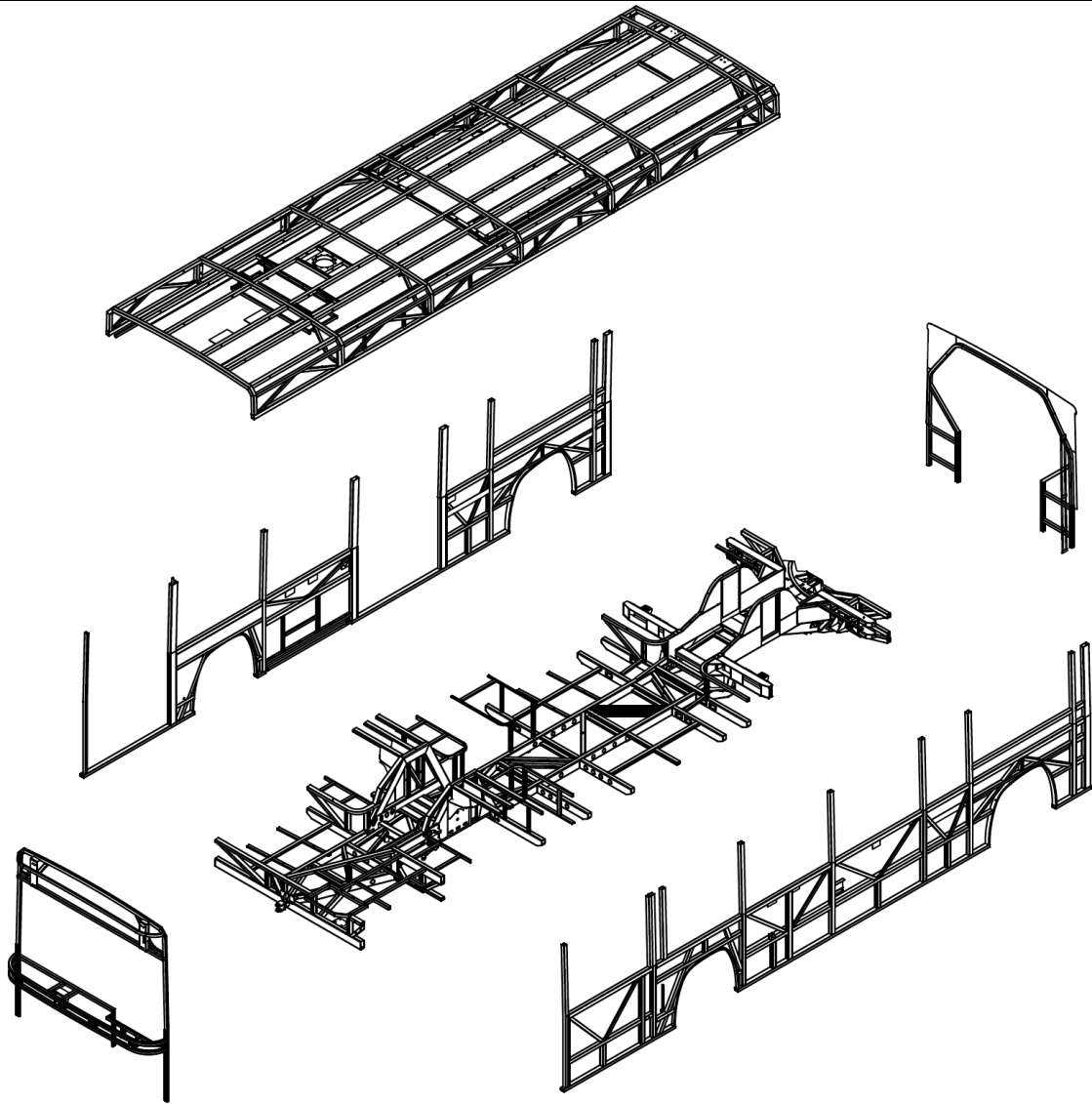
Pored primene u eksperimentalnom delu razvojnih aktivnosti, razvijene laboratorijske instalacije i demonstracioni sistemi su primenjeni u segmentu edukacije inženjera i studenata, kao i diseminacije istraživačko-razvojnih rezultata ovog projekta u drugim industrijama Srbije (namenska industrija PPU, Zastava kovačnica, TRAYAL Korporacija Kruševac, Velpan Kikinda, Robotakt Valjevo). Posebno se navodi zainteresovanost kompanije Ikarbus za studiju izvodljivosti robotizacije procesa zavarivanja i dimenzione kontrole zavarenih sklopova za dva tehnološka reprezentata: kostur autobusa (slika 7a) i sklop noseće strukture (slika 7b). U drugoj istraživačkoj godini su započete razvojne aktivnosti po ovom zadatku i biće okončane do završetka projekta, odnosno do kraja 2010. godine.

3.4. Faza realizacije 4 / aktivnost 1: Implementacija modela interacije Univerzitet-Industrija
Rezultati istraživanja treba da unaprede proizvodnju korisnika istraživanja, a zajedno sa aktuelnim poslovnim funkcijama ukupnog poslovanja, treba da budu edukacioni sadržaj budućih Centara za profesionalni trening eksperata i studenata kao paradigmatičkih edukaciono-razvojnih jedinica industrija i fakulteta za integrisanu Evropu2010 kao budućem društvu baziranom na znanju.

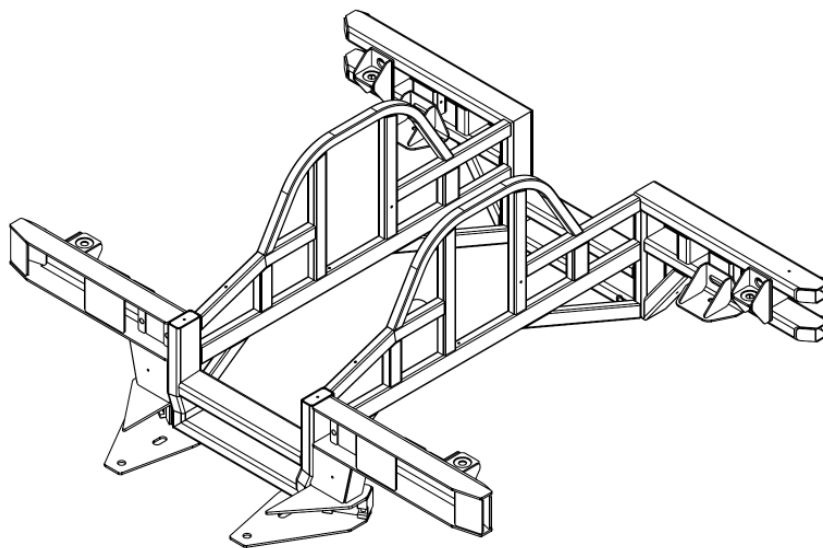
Centri za profesionalni trening eksperata i studenata treba da budu, uspostavljeni u industrijama FAP i IKARBUS sa edukacionim sadržajima iz svih strateških, inženjerskih, proizvodno-poslovnih i poslovno-finansijskih aktivnosti ovih industrija koji treba da koriste realne baze podataka/znanja ovih industrija [10]. Time su povezane razvojne i obrazovne aktivnosti institucija koje čine konzorcium ovog projekta. Naročito veliki sociološki značaj će imati Centar za profesionalni trening industrije FAP koji, kroz uvođenje inovativnih i profesionalno atraktivnih programa, treba da doprinese sprečavanju migracije stanovništva i tako omogući održivi razvoj u ovom regionu Srbije. Industrijski centri za trening zaposlenih eksperata i studenata na praksi treba da budu povezani komunikacionom mrežom čiji bi glavni čvor predstavljao Centar za kvalitet inženjerskog obrazovanja Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu (slika 8).

U realizaciji Centra za profesionalni trening zaposlenih eksperata i studenata na praksi postojala su ograničenja usled neizvesnih i neuspešnih vlasničkih transformacija korisnika istraživanja. To je uslovalo da se postavi program i principi rada Centra za profesionalni trening eksperata i studenata sa predlogom nabavke odgovarajuće opreme i programske podrške. Sama realizacija ovih centara mora da bude povezana sa izradom elektronske dokumentacije za nove proizvode sa novim vlasnicima IKARBUS i FAP. To bi značilo da problem realizacije centara treba da se poveže sa projektovanjem i realizacijom novih integrisanih informaciono-komunikacionih sistema ovih industrija i odgovarajućim investiranjem, sa pozivom na

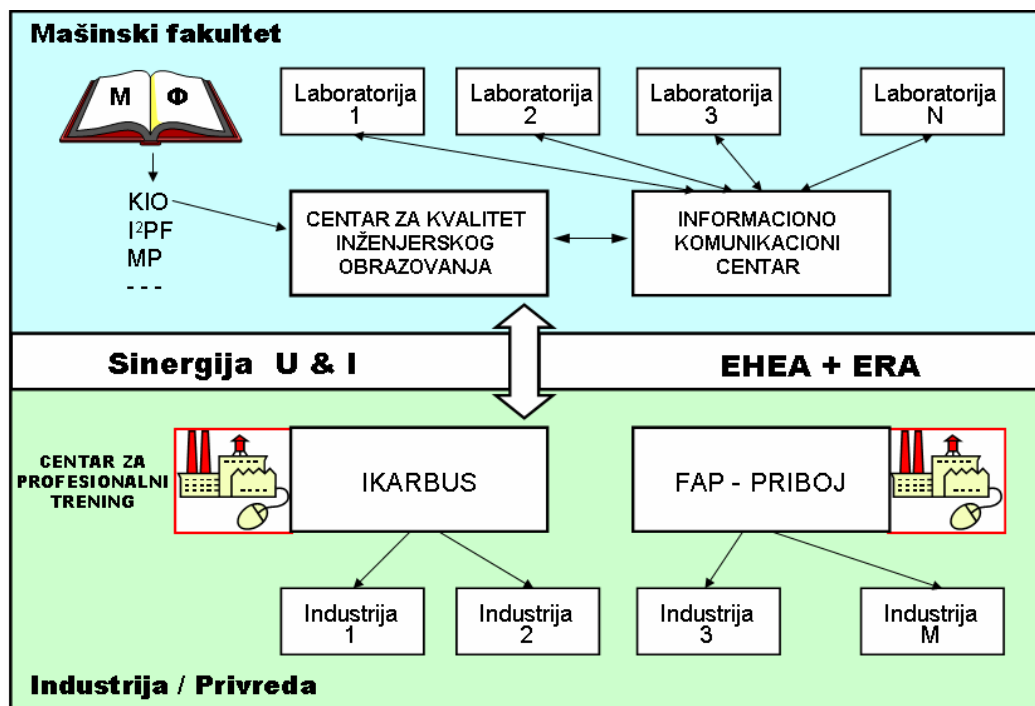
a)



b)



Slika 7: Prostorni modeli tehnoloških reprezentata zavarenih sklopova iz proizvodnog programa kompanije IKARBUS koji su predmet postavke koncepta nove tehnologije za njihovu proizvodnju primenom robotizovanog zavarivanja i robotizovanog skeniranja laserskom triangulacijom i strukturiranom svetlošću sa ciljem kontrole geometrije zavarenog sklopa i njegove kompletnosti.



Slika 9. Model transfera znanja u projektu TR-14035

predloženo rešenje, a u skladu sa postavljenim novim prioritetima tehnološkog razvoja Srbije. Ovo je naročito važno za industriju FAP i nerazvijeni region te industrije za koji postoji posebni podsticajni fond. Zato postavljeni program Centra za profesionalni trening zaposlenih eksperata i studenata na praksi treba da bude deo dokumentacije za korišćenje ovih podsticajnih sredstava.

3.5. Faza realizacije 5 / aktivnost 1: Izgradnja WEB portala projekta

Održavanje WEB portala projekta sa ciljem razvoja funkcije komunikacije istraživačkih timova, diseminacije rezultata i edukacije za potrebe Faze 4/aktivnost 1. Adresa WEB portala projekta: <http://cent.mas.bg.ac.rs>

4. PROGRAM DALJIH ISTRAŽIVANJA

U narednoj istraživačkoj godini istraživačko-razvojni naponi biće fokusirani na sledeće grupe aktivnosti, odnosno istraživačke pakete (IP):

- IP 1: Dogradnja i finalizacija koncipiranih procedura primarne obrade senzorskih signala.
- IP 2: Finalizacija hardvera demonstracionog stola i akvizicionog sistema za superbrzu digitalizaciju objekta složene geometrije primenom prostorne optičke triangulacije strukturane svetlosti
- IP 3: Razvoj softverskog sistema za obradu senzorskih signala i generisanje digitalnog modela skeniranog objekta
- IP 4: Izgradnja konceptualnih okvira sa studijom izvodljivosti tehnološke ćelije za zavarivanje za reprezentativnu klasu zavarenog sklopa noseće konstrukcije u okviru projekta razvoja i proizvodnje ekoloških autobusa nove generacije
- IP 5: Izgradnja konceptualnih okvira sa studijom izvodljivosti tehnološke ćelije za montažu i identifikaciju/korekciju geometrije reprezentativnog zavarenog sklopa kostura autobusa u okviru projekta razvoja i proizvodnje ekoloških autobusa nove generacije
- IP 6: Implementacija modela interakcije Univerzitet – Industrija
- IP 7: Održavanje WEB portala projekta

Kao ukupni okvir navedenih istraživačko-razvojni aktivnosti stoji zadatak uspostavljanja specijalizovane istraživačko-razvojne jedinice u okviru Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, koja u svom programskom određenju ima sprovođenje sistematskih istraživačkih aktivnosti, izgradnju laboratorijskih demonstracionih instalacija, i ovladavanje generičkim znanjima iz domena digitalne optičke tehnologije, sa ciljem uspostavljanja kvalitetne baze za transfer ovih specifičnih znanja i veština u domaću industriju, posebno za domen automatizacije proizvodnih procesa.

5. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada izloženi su sadržaj istraživanja, ciljevi i pregled ostvarenih rezultata na projektu MA14035 INTOSA koji zajednički realizuju Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, kompanija Mikrokontrol iz Beograda, IKARBUS iz Beograda i FAP iz Priboja. Ostvareni rezultati pokazuju zainteresovanost i spremnost domaće industrije za implementaciju savremene digitalne optičke tehnologije u svojim proizvodnim procesima i ostalim oblicima poslovnih aktivnosti.

Reference:

- [1] Godišnji izveštaj projekta MA14035, Interni materijal u formi elaborata i tehničke dokumentacije za 2010. godinu.
- [2] Bernardini, F., Bajaj, C., L., Chen, J., Schikore, D., R., Automatic Reconstruction of 3D CAD Models from Digital Scans, International Journal of Computational Geometry and Applications, Vol. 9, No 4/5, pp: 327-369, August 1999
- [3] 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, Vol. 58, No. 1, pp. 25-28, 2009
- [4] Kawasaki Robotics Inc., C Series Controller Operation and Programming Manual, 1998
- [5] Schwenke, H., et al., 2002, Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering, Annals of the CIRP, 51/2:685-699.
- [6] 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.
- [7] Petrović, P., Jakovljević, Ž., 3D digitalizacija objekata kompleksne geometrije integracijom laserskog triangulacionog senzora i industrijskog robota (Rad po pozivu), Zbornik radova, 33. Savetovanje proizvodnog mašinstva SCG, Beograd, jun, 2009., str. 219-224, ISBN: 978-86-7083-662-4
- [8] Petrovic, B., P., Jakovljevic, Z., Pilipovic, M., Mikovic, Dj, V., In Process Identification Of Workpiece/System Geometrical Deviations Based On General Purpose Robots And Laser Triangulation Sensors - Part 1: Conceptual Framework (Invited Paper), Proceedings, 10th International Scientific Conference On Flexible Technologies, MMA 09, Novi Sad, 2009, pp. 174-177, ISBN: 978-86-7892-223-7
- [9] Petrovic, B., P., Jakovljevic, Z., Pilipovic, M., Mikovic, Dj, V., In Process Identification Of Workpiece/System Geometrical Deviations Based On General Purpose Robots And Laser Triangulation Sensors - Part 2: Evaluation (Invited Paper), Proceedings, 10th International Scientific Conference On Flexible Technologies, MMA 09, Novi Sad, 2009, pp. 178-182, ISBN: 978-86-7892-223-7
- [10] Spasić, Ž., Pilipović, M., Edukacioni aspekti i diseminacija rezultata projekta, MNT-MFB 14035.6-7/10, Parcijalni završni izveštaj za 2010. godinu, Mašinski fakultet u Beogradu, 2010.

APPLICATION OF INTELLIGENT SENSORY SYSTEMS IN DEVELOPMENT OF INTEGRATED AUTOMATION OF REAL AND VIRTUAL PROCESSES IN MANUFACTURING ENTERPRISES – RECAPITULATION OF THE RESULTS OF PROJECT MA14035

Abstract

This paper gives the results of research carried out within project MA14035 carried out jointly by Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade and companies Mikrokontrol, Belgrade, IKARBUS Belgrade and FAP, Priboj. Besides an overview of theoretical and methodological issues, special attention is given to practical results realized within this project in the form of laboratory installations which are used for practical verification of key innovative contents of conducted research, as well as conceptual solutions for chosen technological tasks in production plant of Ikarbus Company as one of project participants. At the end we present the plan for further research and the perspective of application of obtained results in industrial conditions on production lines of participating companies or in the context of projects with companies which are not the members of project consortium.