



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

PRIMENA INELIGENTNIH SENZORSKIH 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 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 trogodišnji projekat koji je finansijski podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije za period 2008-2010. godina [1]. 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, dr 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 Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije kroz projekat TR35007 Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju.

2. SADRŽAJ ISTRAŽIVANJA I CILJEVI

Predmet istraživanja projekta INTOSA su aplikativni aspekti jedne 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 mašina baziranih na laserskim triangulacionim senzorima za merenje geometrijskih veličina na proizvodnim linijama u oblasti industrije prerade elastomera. Paralelno sa ovim dugoročnim programom, u skorije vreme pojavljuju se i zahtevi za realizaciju projekata visoke tehnologije, poput projekata izgradnje robotizovanog sistema za montažu vetrobranskog stakla na liniji za proizvodnju novog modela putničkog automobila Zastava 10, ili različitih projekata povezanih sa tehnologijom robotskog zavarivanja, gde ključnu ulogu imaju optički senzori i sistem veštačkog gledanja koji se koriste za uspostavljanje interakcije robotskog sistema sa njegovim okruženjem tokom izvršavanja postavljenog zadaka, uključujući i situacije koje imaju attribute rada u realnom vremenu.

Navedeni praktični inženjerski projekti pokazali su dve vrlo bitne činjenice: 1) izuzetan napredak tehnologije optičkih senzorskih sistema u protekloj dekadi i njihov veliki aplikativni potencijal i 2) potrebu za raspolaganjem vrlo kompleksnom bazom znanja i veština da bi se tehnologija optičkih senzorskih sistema mogla uspešno primenjivati u rešavanju konkretnih inženjerskih problema.

Motivisan ovakvim iskustvom Mašinski fakultet je formirao konzorcijum koji čine tri kompanije iz domena proizvodnog sektora koje su zainteresovane za širu primenu inteligentnih optičkih senzorskih sistema u okviru svog poslovnog sistema (proizvodnja u domenu automobilske industrije i inženjering u domenu automatizacije proizvodnih procesa).

Primarni naučno-istraživački i razvojno-aplikativni cilj projekta je 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 široke 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 mogu se svrstati u šest osnovnih grupa: 1) Identifikacija stanja i sistematizacija, 2) Nove procedure primarne obrade senzorskih signala, 3) Optički metrološki sistemi, 4) Projektovanje i realizacija demonstracione instalacije, 5) Razvoj modela

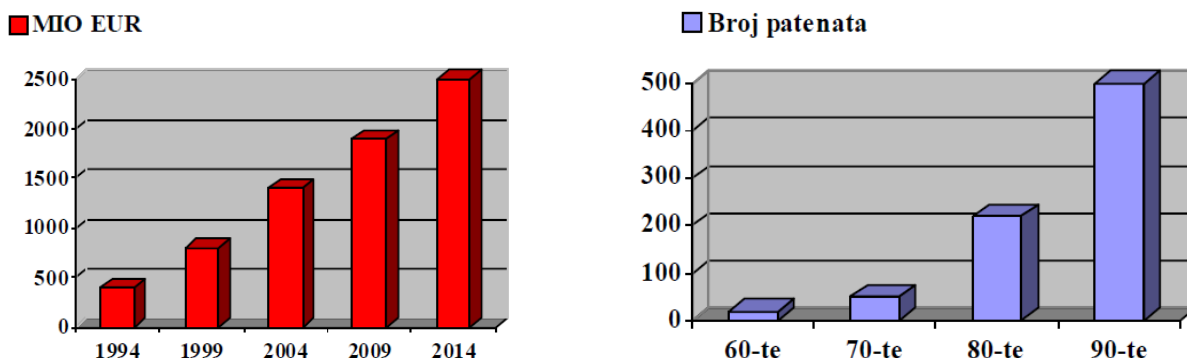
interakcije Univerzitet – Industrija i 6) Izgradnja WEB portala projekta. Materijal koji se ovde navodi preuzet je delovima iz godišnjih izveštaja koje je rukovodilac projekta podneo

Dalje se za svaku od navedenih grupa daje precizan pregled planiranih i ostvarenih rezultata sa navođenjem kraće deskripcije ključnih rezultata.

3.1. Identifikacija stanja i sistematizacija

Ovo je inicijalna istraživačka aktivnost u okviru projekta MA14035 INTOSA koja je imala za cilj da sagleda postojeće stanje stvari u oblasti tehnologije optičkih senzorskih sistema sa aplikativnog aspekta, odnosno primene ove tehnologije u domenu automatizacije proizvodnih procesa sa dva osnovna zadatka: 1) postojeće stanje tehnologije i trendovi razvoja i 2) sistematizacija hardverskih aspekata.

U okviru prvog zadatka razmatrana su dva osnovna konteksta: 1) stanje i trendovi razvoja na globalnom nivou i 2) stanje u domaćoj privredi. Globalni trendovi se u sažetom obliku prikazuju na slici 1.



Slika 1: Globalni trendovi razvoja senzorskih sistema baziranih na digitalnim optičkim tehnologijama.

Optički senzorski sistemi i njihova primena u industriji na zadacima automatizacije proizvodnih procesa imaju duboke korene u domaćoj privredi. Osamdesetih i početkom devedesetih godina prošlog veka u Srbiji su postojale akademske institucije koje su se intenzivno bavile istraživanjima u domenu dimenzione metrologije i robotike: Centar za nove tehnologije Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Institut Mihajlo Pupin, Laboratorija za robotiku, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za fiziku, a takođe i na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Domaća industrija je pratila razvoj u delu istraživanja, pa su osamdesetih godina u okviru LOLA Korporacije, a kasnije i u okviru LOLA instituta, realizovani prvi industrijski roboti, a zatim i prvi industrijski sistemi za analizu slike, koji su uspešno implementirani na konkretnim zadacima automatizacije proizvodnih procesa u domaćoj industriji. Početak oporavka domaće ekonomije nametnuo je potrebu šire primene novih tehnologija u automatizaciji proizvodnih procesa i u tom kontekstu revitalizuje se sektor robotike, ali sada sa novim učesnicima i u novom ambijentu. U okviru sprovedenih istraživanja sistematski su analizirane aktivnosti domaće industrije u oblasti automatizacije proizvodnih procesa i identifikovane su 3 privatne kompanije iz domena srednjih i malih preduzeća koje deluju u oblasti robotike, pre svega kao sistema integratori: ROBOTAKT iz Valjeva, VESIMPEKS iz Beograda i ICM iz Novog Sada. Značajno veći broj kompanija, koje su sve bez izuzetka iz domena malih i srednjih preduzeća, deluje u oblasti industrijske automatizacije ali van oblasti robotike. Najmanje 10 kompanija u svojim poslovnim aktivnostima intenzivno primenjuje optičke senzorske sisteme za domen dimenzione metrologije. Centralni problem u primeni optičkih senzora u segmentu dimenzione metrologije ili veštačkog gledanja su obrada i interpretacija signala koje generiše senzor, odnosno optičko električni pretvarač.

3.2 Nove procedure primarne obrade senzorskih signala

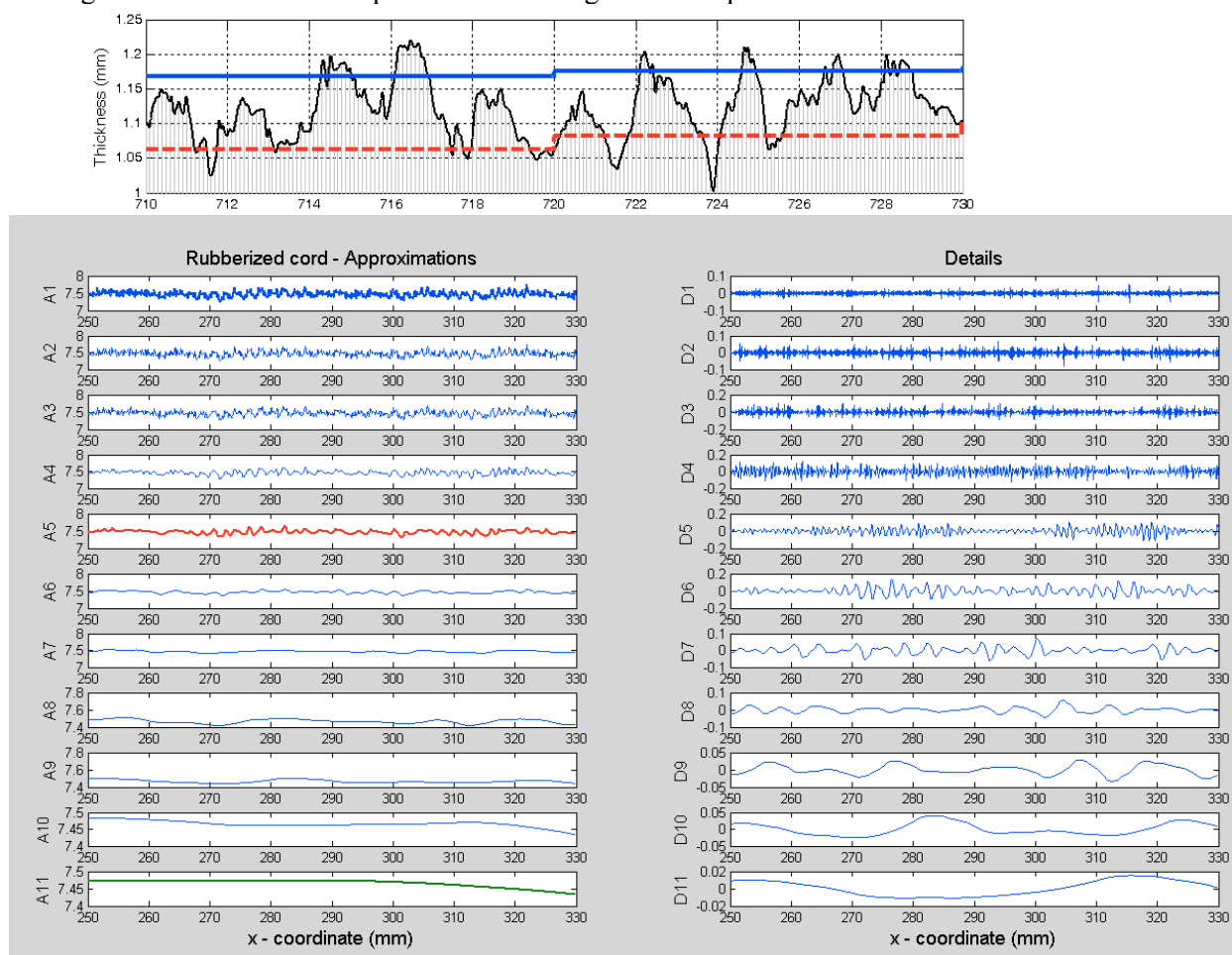
Ovo je jedna od ključnih istraživačkih celina koje su obrađivane u okviru projekta MA14035 INTOSA. Centralni problem u primeni optičkih senzora u segmentu dimenzione metrologije ili veštačkog gledanja su obrada i interpretacija signala koje generiše senzor, odnosno optičko električni pretvarač.

U okviru ovog projekta istraživački napor [2-6] su bili fokusirani u pravcu primene jedne nove tehnike obrade signala koja je bazirana na vejevlet transformaciji (WT). Naime, FT kao klasična metoda digitalne obrade signala, ima samo frekventnu, ali ne i vremensku rezoluciju. Međutim, u realnosti signali su najčešće nestacionarni – njihove spektralne komponente se menjaju u vremenu ili prostoru. Za analizu ovakvih signala pogodna je vejevlet transformacija koja signal opisuje superpozicijom elementarnih gradivnih blokova – vejevleta. Multirezolucijska analiza (MRA) daje brz hijerarhijski algoritam za izvođenje DWT i čini je izrazito pogodnom za rad u realnom vremenu. Za potrebe analize slike (dvodimenzionog signala)

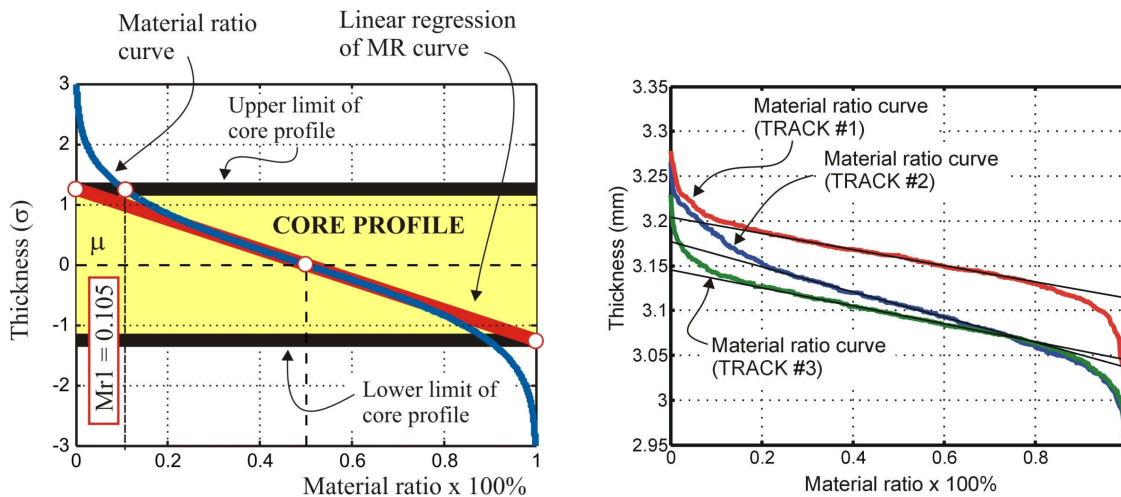
razvijena je dvodimenziona DWT koja se zasniva na sukcesivnoj jednodimenzionoj DWT vrsta i kolona matrica slike. DWT je izuzetno pogodna za detekciju ivica na slici koje predstavljaju naglu promenu u prostoru. Detektovane ivice dalje omogućuju formiranje kontura i segmentiranje slike na konačan broj objekata, što je polazna osnova za prepoznavanje oblika.

Druga grupa istraživačkih napora bila je fokusirana na slučaj rekonstrukcije nekompletnih vremenskih serija. Laserski senzori imaju prirodnu tendenciju generisanja nevalidnih rezultata merenja u slučajevima neadekvatnih optičkih svojstava površine objekta koji se skenira. Nekompletnost vektora generisanih senzorskih signala onemogućava primenu gotovo svih tradicionalnih tehnika obrade signala, uključujući DFT, STFT, DWT, ... kao i sve tehnike digitalnog filtriranja. Prethodna istraživanja koja su realizovana u teoretskom domenu i praktično implementirana na projektima laserskih mernih sistema za potrebe industrije prerade elastomera, rezultovala su postavlkom jedne sasvim nove i originalne metode bazirane na statističkoj karakterizaciji površi skeniranog objekta. Ova metoda je finalizirana u okviru ovog projekta u teorijskom smislu i detaljno eksperimentalno verifikovana (slika 3).

U delu interpretacije primarno obrađenih senzorskih signala započeta su i delimično realizovana istraživanja koja su usmerena u dva osnovna pravca. Prvi se odnosi na razvoj odgovarajućih tehnika aproksimacije prostornog ili linijskog oblaka tačaka nekim ravanskim ili prostornim geometrijskim primitivom i sintezu ukupnog geometrijskog modela skeniranog objekta u nekom od standardnih grafičkih editora (SolidWorks, CATIA, PROEngineer...). Ova istraživanja imaju direktnu primenljivost na demonstracionoj instalaciji za robotsko lasersko skeniranje kompleksnih geometrijskih prostornih formi. Drugi istraživački pravac se odnosi na istraživanja u domenu sistema veštačkog gledanja, gde je posebna pažnja usmerena na problem prepoznavanja oblika, odnosno razvoj inteligentnih algoritama za analizu slike, kao digitalizovane ravanske ili prostorne scene registrovane optičkim senzorom.



Slika 2: Primer skenirane površine gumiranog tekstilnog korda i dekompozicije senzorskog signala u vremenskom domenu na 11 fazno korektnih nivoa primenom DWT transformacije.



Slika 3: Statistička karakterizacija laserski skenirane teksture površi primenom razvijene metode za izvođenje informacije o ekvivalentnoj debljini gumiranog korda za proizvodnju visokoperformansnih pneumatika (levo: teoretski model, desno: realna merenja).

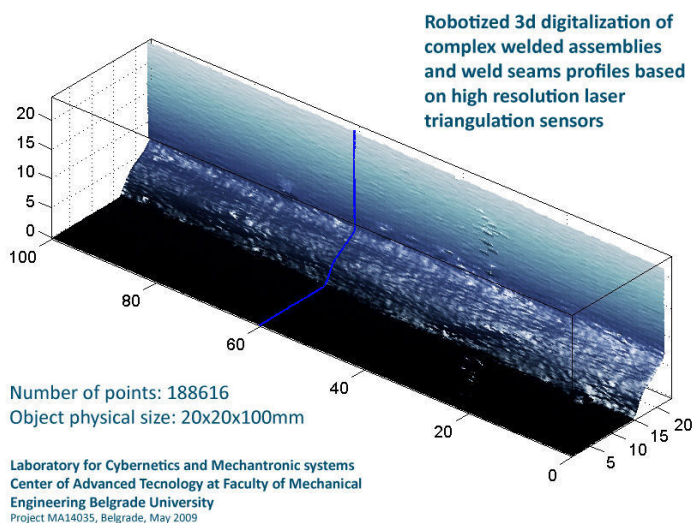
3.3. Optički metrološki sistemi

Istraživanja u oblasti optičkih metroloških sistema su grupisana u dve osnovne celine: 1) metrološki aspekti primene optičkih senzorskih sistema [7-8] i 2) virtuelna proizvodnja i virtuelni metrološki sistemi.

Prateći potrebe članica konzorcijuma i tekućih projekata sa industrijom, istraživanja metroloških aspekata primene optičkih senzorskih sistema bila su usmerena na aplikativne aspekte pretvaranja generisanih senzorskih signala u metrološki validne informacije na osnovu kojih će biti omogućeno donošenje odluka o toku procesa unutar jednog proizvodnog sistema. Konkretno, istraživački napori 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.

U kontekstu navedenog, izdvajaju se tri rezultata. Prvi rezultat je prikazan na slici 4, gde je naveden primer skenirane geometrije zavarenog šava dobijene u okviru projekta INTOSA na razvijenoj eksperimentalnoj instalaciji robotskog sistema antropomorfne konfiguracije opremljenog laserskim trinagulacionim senzorom visoke prostorne i vremenske rezolucije. Ključno je to da je kompletan sistem, uključujući softverske rutine za akviziciju, postprocesiranje i generisanje digitalnog modela objekta,

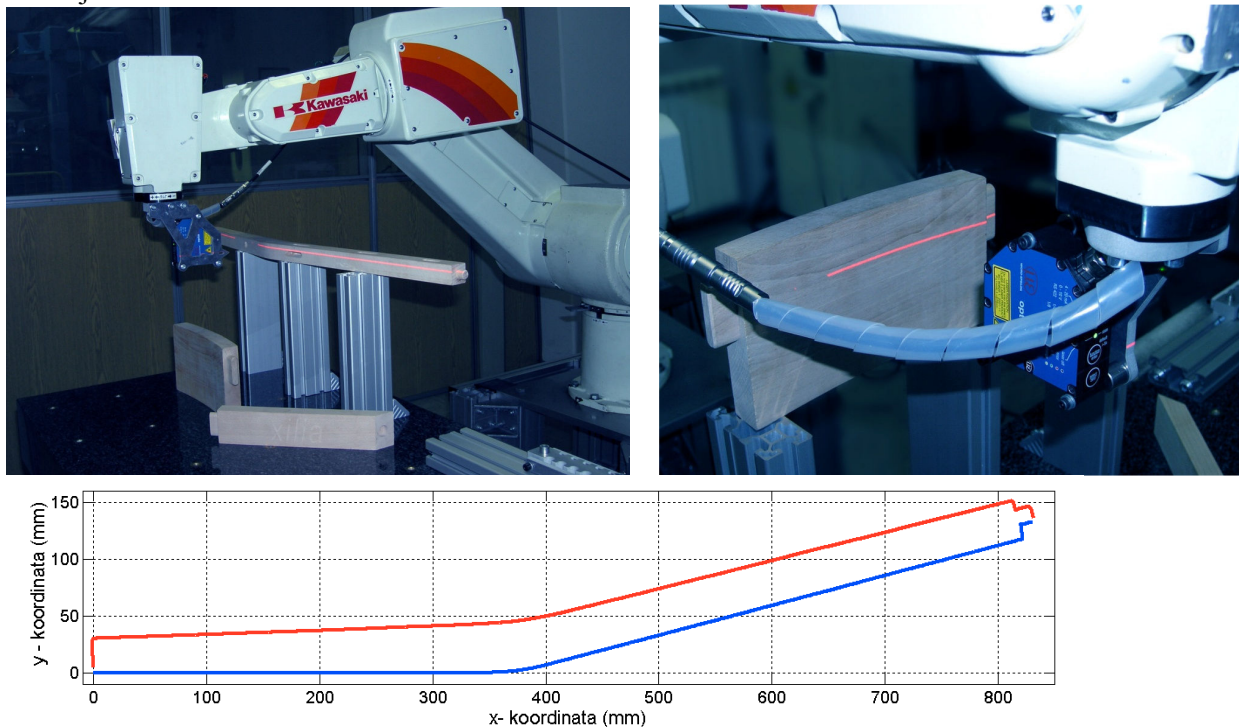


Slika 4: Primer 3d modela izvedenog visokorezolutnim laserskim skeniranjem šava formiranog elektrolučnim zavarivanjem

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 visokotehnološki proizvod, specijalizovan za tehnologiju elektrolučnog zavarivanja, koji bi uspešno mogao da se komercijalizuje i primeni kao domaće rešenje u industriji Srbije.

Drugi primer se odnosi na oblast savremene industrije nameštaja koja je bazirana 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.

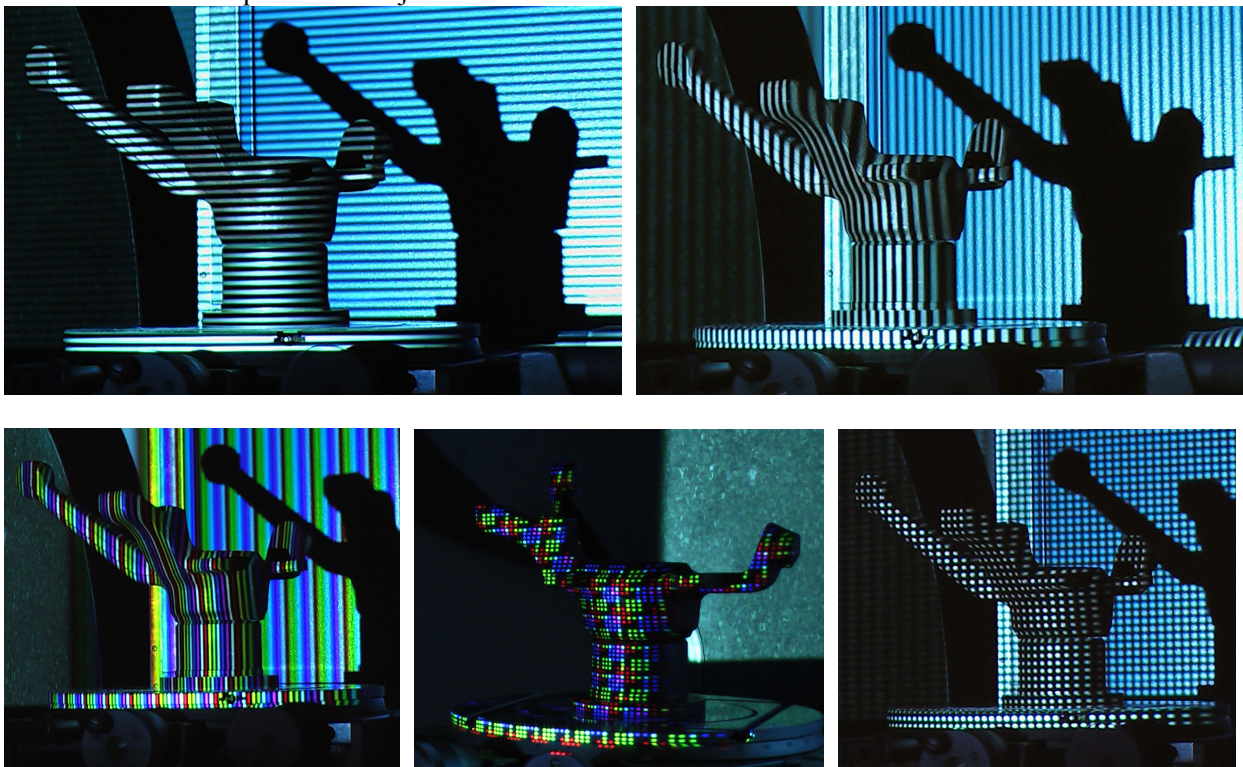
Istraživanja po ovom zadatku su prvo bila usmerena na istraživanje optičke interakcije drveta kao materijala i laserskog triangulacionog senzora. Praktična merenja su pokazala da su ta svojstva vrlo pogodna i da lokalna penetracija u poroznu strukturu drveta ima efekat niskofrekventne filtracije senzorslog signala, što dodatno pojednostavljuje zadatak merenja. U drugoj fazi vršene su probe na tipičnim reprezentima delova koji se sreću u proizvodnji nameštaja sa ciljem generisanja poprečnih 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 5 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 $100\mu\text{m}$ 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 5: Istraživanje primenljivosti optičke triangulacije i razvijenog robotizovanog sistema za 3d skeniranje u okviru sekundarne prerade drveta i proizvodnje nameštaja

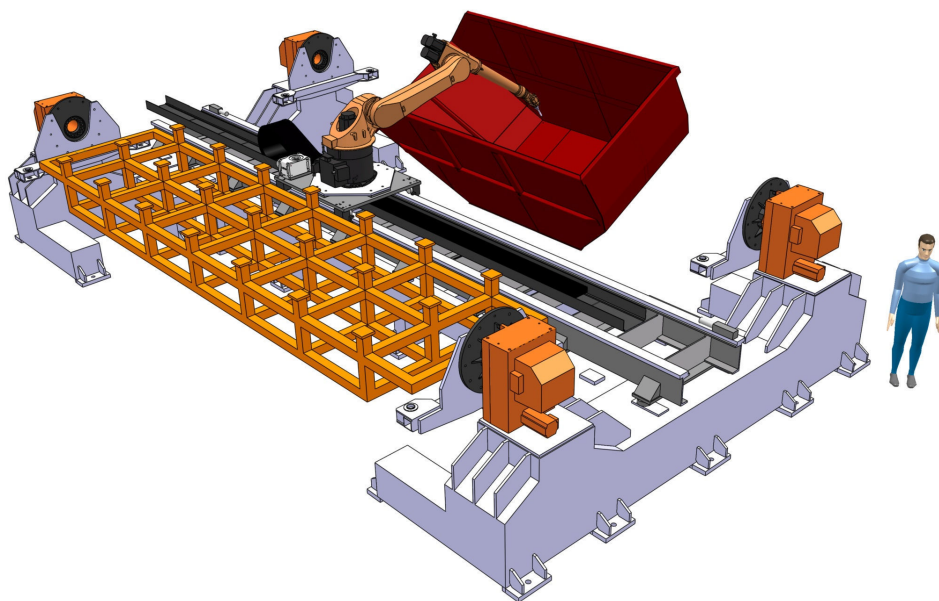
Treći primer se odnosi na razvoj novog optičkog metrološkog sistema ekstremne brzine skeniranja koji nije baziran na laserskoj triangulaciji. Ovakav sistem se nametnuo kao logična potreba kada su sagledani svi aspekti laserske triangulacije. Ekstremno visoku tačnost i ekstremnu rezoluciju laserskih triangulacionih sistema baziranih na tačkastim izvorima svetlosti prati problem brzine skeniranja. Čak i kada je brzina uzorkovanja reda veličine 10kHz 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 strukturanoj 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 (slika 6). 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 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 6: Eksperimenti u domenu ultrabrze prostorne digitalizacije optičkom triangulacijom strukturane svetlosti - probe generatora strukturiranog svetla

Virtuelna proizvodnja, koncept primene kompjuterskih tehnologija u projektovanju i proizvodnji je prihvaćen od niza industrija u toku 1990.-ih godina i posebno razvijan za automobilsku industriju. U prethodnim istraživanjima u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu definisan je model virtuelne proizvodnje sa nizom podsistema razvijanih za potrebe domaće industrije. U okviru ovog projekta, sprovedena istraživanja su fokusirana na dalji razvoj koncepta



Slika 7: Virtuelni model sistema za robotsko zavarivanje i optičko skeniranje velikogabaritnih sklopova kompleksne geometrije (rađeno za potrebe kompanije VELPAN iz Kikinde).

virtuelne proizvodnje sa integracijom novog podsistema – virtuelnim metrološkim sistemom. Na slici 7 je naveden primer razvijenog dinamičkog virtuelnog modela sistema za robotsko zavarivanje sa integrisanom funkcijom skeniranja geometrije šava.

3.4. Projektovanje 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. Razvijene su i fizički realizovane četiri 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, Eksperimentalna instalacija 3 - Laboratorijska instalacija za ultrabrze sisteme kontrole geometrijskih karakteristika proizvoda primenom visokorezolutnih industrijskih sistema veštačkog gledanja, i Eksperimentalna instalacija 4 - Laboratorijska instalacija za digitalizaciju struktuiranom svetlošću.

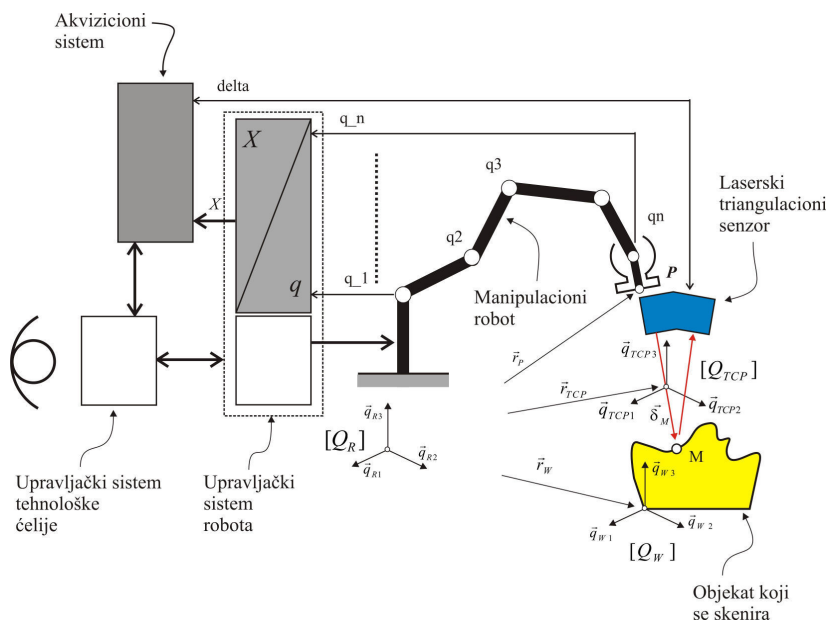
Navedene laboratorijske instalacije realizovane su: 1)rekonfiguracijom postojeće opreme, 2)nabavkom nove opreme, 3)participacijom u opremi, radu i materijalu članica konzorcijuma i 4)pozajmicama od kompanija iz industrije. Dalje se navodi sažet opis ovih instalacija.

EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA 1: Laboratorijska instalacija za robotizovano lasersko skeniranje delova kompleksne geometrije (slika 8).

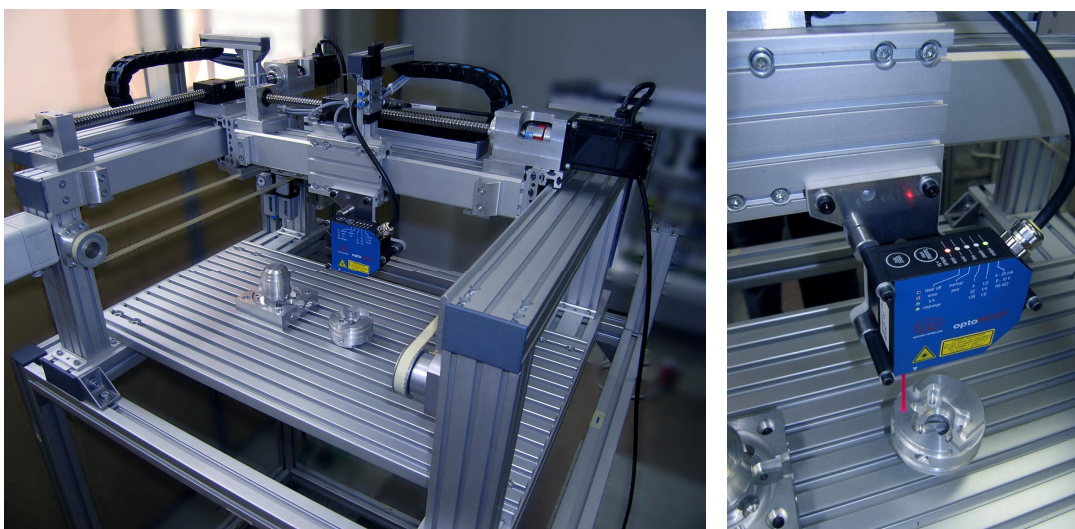
U cilju verifikacije razvijenog koncepta beskontaktnog visokopreciznog skeniranja srednjegabaritnih i velikogabaritnih delova kompleksne geometrije primenom laserskih triangulacionih senzora i manipulacionih robota na industrijskim proizvodnim linijama, razvijena je eksperimentalna instalacija u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu. 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. 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. Realizator ove instalacije je Centar za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu, a korisnici su članice konzorcijuma projekta i kompanije poslovne zainteresovane za rezultate projekta: Kolubara-Metal Vreoci, Velpan Kikinda, Zastava kovačnica, Robotakt Valjevo, Milan Blagojević Smederevo.

EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA 2: Laboratorijska instalacija za lasersko skeniranje malih delova kompleksne geometrije (slika 9).

U cilju verifikacije razvijenog koncepta beskontaktnog visokopreciznog skeniranja malih delova kompleksne geometrije primenom laserskih triangulacionih senzora, realizovana je u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu eksperimentalna instalacija bazirana na 3-d manipulacionom Kartezijevom servo-sistemu. Sistem se sastoji iz: 1)3-d platforme sa Kartezijevom konfiguracijom, sa dve servopogonjene ose i jednom pneumatski pogonjenom diskretnom osom; veličina radnog prostora 300x420x150 mm, 2)laserskog triangulacionog senzora mernog opsega od 70 do 170 mm, brzine uzorkovanja 2500 Hz i rezolucije 0.001 mm i opcionog laserskog triangulacionog senzora mernog opsega od 30 do 50 mm, sa brzinom uzorkovanja od 1000 Hz i rezolucijom od 0.001 mm, 4)prateći pribor za integraciju mehaničkog sistema, 5)akvizicioni sistem za prikupljanje podatka sa laserskih senzora + primarna obrada i vizuelizacija i 6)interaktivni terminal za komunikaciju čovek-mašina. Razvijena i realizovana instalacija omogućava sprovođenje ekstenzivnih eksperimentalnih istraživanja i evaluacije koncepta visokorezolutnog laserskog skeniranja prvenstveno za domen aplikacija u reverznom inženjerstvu. Realizatori instalacije su Centar za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu i kompanija Mikrokontrol, a korisnici članice konzorcijuma projekta.



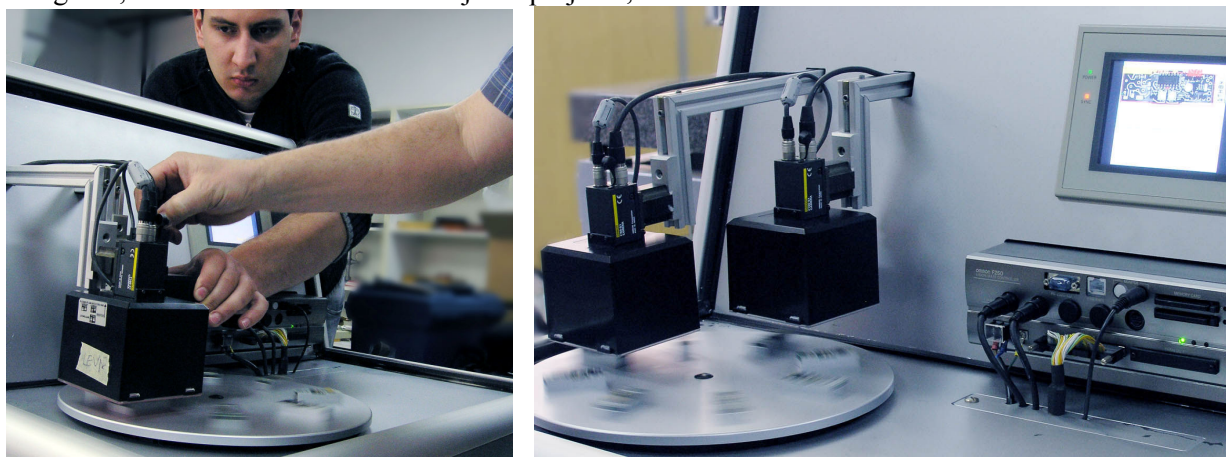
Slika 8: Koncept i fotografije Laboratorijske instalacije 1 u fazi probnog rada, podešavanja i provere funkcionalnosti instaliranih modula



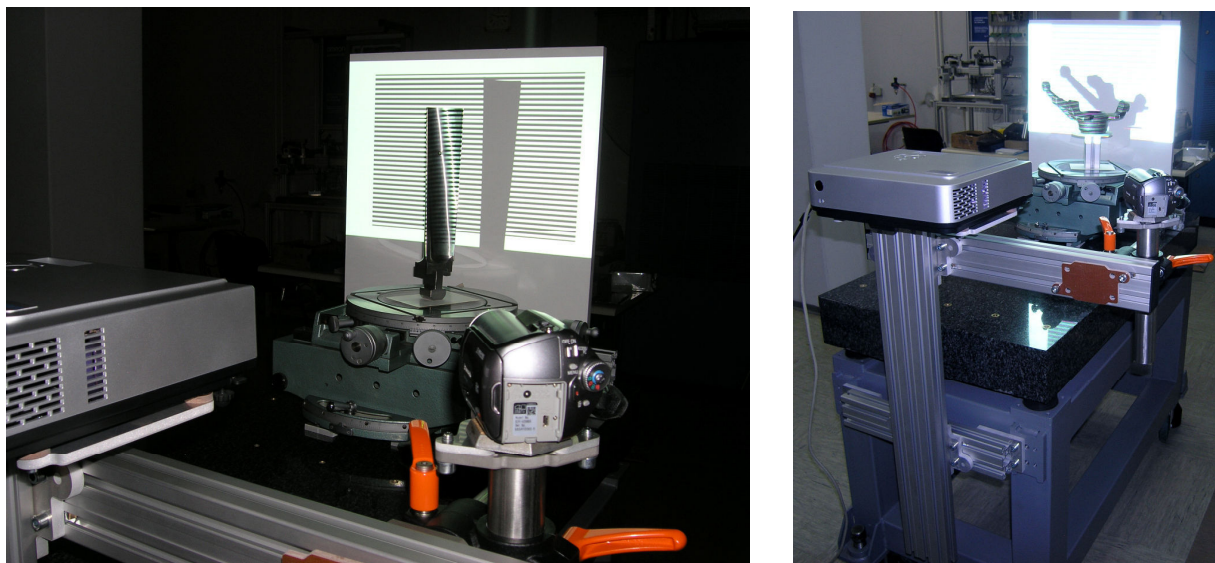
Slika 9: Fotografije Laboratorijske instalacije 2- dispozicija mernog sistema za lasersko skeniranje složenih geometrijskih formi u okviru koncepta reverznog inženjerstva

EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA 3: Laboratorijska instalacija za sisteme kontrole geometrijskih karakteristika proizvoda primenom ultrabrzih visokorezolutnih sistema veštačkog gledanja (slika 10).

U cilju verifikacije koncepta ultrabrzog sistema za analizu slike i prepoznavanje oblika u realnom vremenu na proizvodnim linijama u industrijskim uslovima, realizovana je odgovarajuća eksperimentalna instalacija u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu. Sistem se sastoji iz: 1)Specijalnog akvizicionog računara za četiri kanala za prihvat senzorskih signala koje generišu CCD kamere, 2)Dve CCD kamere sa ekspozicijom od 1/20000 sec, odgovarajućim optičkim sistemima i inteligentnim modulima za osvetljavanje scene, 3)Obrtnog stola sa kontrolisanim brojem obrtaja za fiksiranje delova čija se geometrija kontroliše, 4)Mrežni interfejs za povezivanje akvizicionog signala za razvojnim PC sistemom i 5)Interaktivni terminal za komunikaciju čovek-mašina. Razvijena i realizovana instalacija omogućava sprovođenje ekstenzivnih eksperimentalnih provera algoritma prepoznavanja geometrijskih ili vizuelnih detalja na delu koji se ispituje i optimizaciju uslova osvetljenja scene kao kritičnog elementa za primenu senzora veštačkog gledanja, posebno u uslovima ekstremno kratkih ciklusnih vremena i rada sa objektima koji poseduju delikatna svojstva površina od interesa. Ovaj sistem je praktično primenjen za sprovođenje preliminarnih istraživačkih aktivnosti na izvođenju studije izvodljivosti automatske kontrole kvaliteta na linijama za proizvodnju municije za potrebe kompanije Prvi Partizan iz Užice. Realizatori instalacije su Centar za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu i kompanija Mikrokontrol iz Beograda, a Korisnici članice konzorcijuma projekta, Prvi Partizan Užice.



Slika 10: Fotografije Laboratorijske instalacije 3 – podešavanje i probni rad sistema industrijskih kamera i akvizicionog sistema za visokorezolutnu ultrabrznu obradu slike



Slika 11: Fotografije Laboratorijske instalacije 4- dispozicija opreme za sistem prostorne digitalizacije identifikacije geometrijskih karakteristika proizvoda primenom ultrabrzih visokorezolutnih sistema veštačkog gledanja

EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA 4: Laboratorijska instalacija za prostornu digitalizaciju strukturiranom svetlošću.

Laboratorijska instalacija za prostornu digitalizaciju objekata složene geometrije primenom optičke triangulacije na bazi strukturirane svetlosti, prikazana je na slici 11. Istraživanja u ovom smislu su započeta tokom 2010. godine i rezultirala su izgradnjom odgovarajućeg eksperimentalnog stola sa sistemom za generisanje strukturirane svetlosti velike fleksibilnosti (kontrolisan personalnim računarom) i softverskim sistemom za kalibraciju izvora strukturirane svetlosti i sistema prijemnog modula sa ugrađenim 2d senzorom za konverziju optičke pobude u električni signal velike brzine.

3.5. Razvoj modela interakcije Univerzitet – Industrija

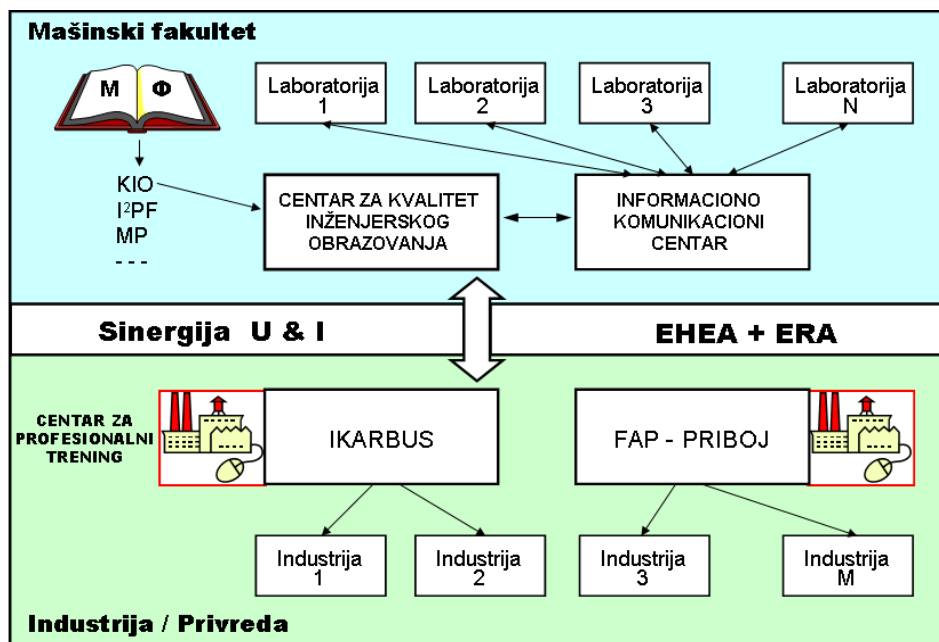
Za budući integrisani zajednički prostor za visoko obrazovanje (EHEA – European Higher Education Area) i istraživanje (ERA – European Research Area), univerziteti treba da pripreme industriju za predloge zajedničkih projekata programa FP7 koje finansira Evropska unija. Bergenski kominike kao izlazni dokument sa Ministarskog sastanka Evrope ističe značaj visokog obrazovanja u daljem unapređenju istraživanja, kao i značaj istraživanja u podržavanju visokog obrazovanja za ekonomski i kulturni razvoj evropskog društva i njegovu socijalnu koheziju.

Razvijeni model interakcije Univerzitet-Industrija obuhvatio je sledeće sadržaje:

1. Razvoj metodologije za sistematsku identifikaciju raspoloživih znanja proizvodnih i rukovodnih struktura.
2. Koncipiranje mehanizama za kontinualno osavremenjavanje znanja, posebno u kontekstu znanja za stvaranje novih proizvoda i inovativnih sadržaja.
3. Koncipiranje integrisanog sistema za obezbeđivanje kvaliteta u proizvodnji i obrazovanju.
4. Mehanizam diseminacije rezultata projekta.
5. Interakcija sa Bolonjskom deklaracijom, TEMPUS i FP7 programom EU.

Razvijeni model [9] je baziran na primeni Internet i multimedijjskih tehnologija kao fizičkog medijuma za praktičnu implementaciju. Dalji razvoj i implementacija modela interakcije Univerzitet-Industrija u obrazovanju, prekvalifikovanju i profesionalnom treningu eksperata iz industrije i studenata. Implementacija metoda koje su savremeni trend razvoja Evrope-2020, kao društva baziranog na znanju.

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 Evropu 2020 kao budućem društvu baziranom na znanju (slika 9).



Slika 12: Model transfera znanja u projektu MA 14035

U realizaciji Centra za profesionalni trening zaposlenih eksperata i studenata na praksi postojala su ograničenja usled neizvesnih i neuspelih 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

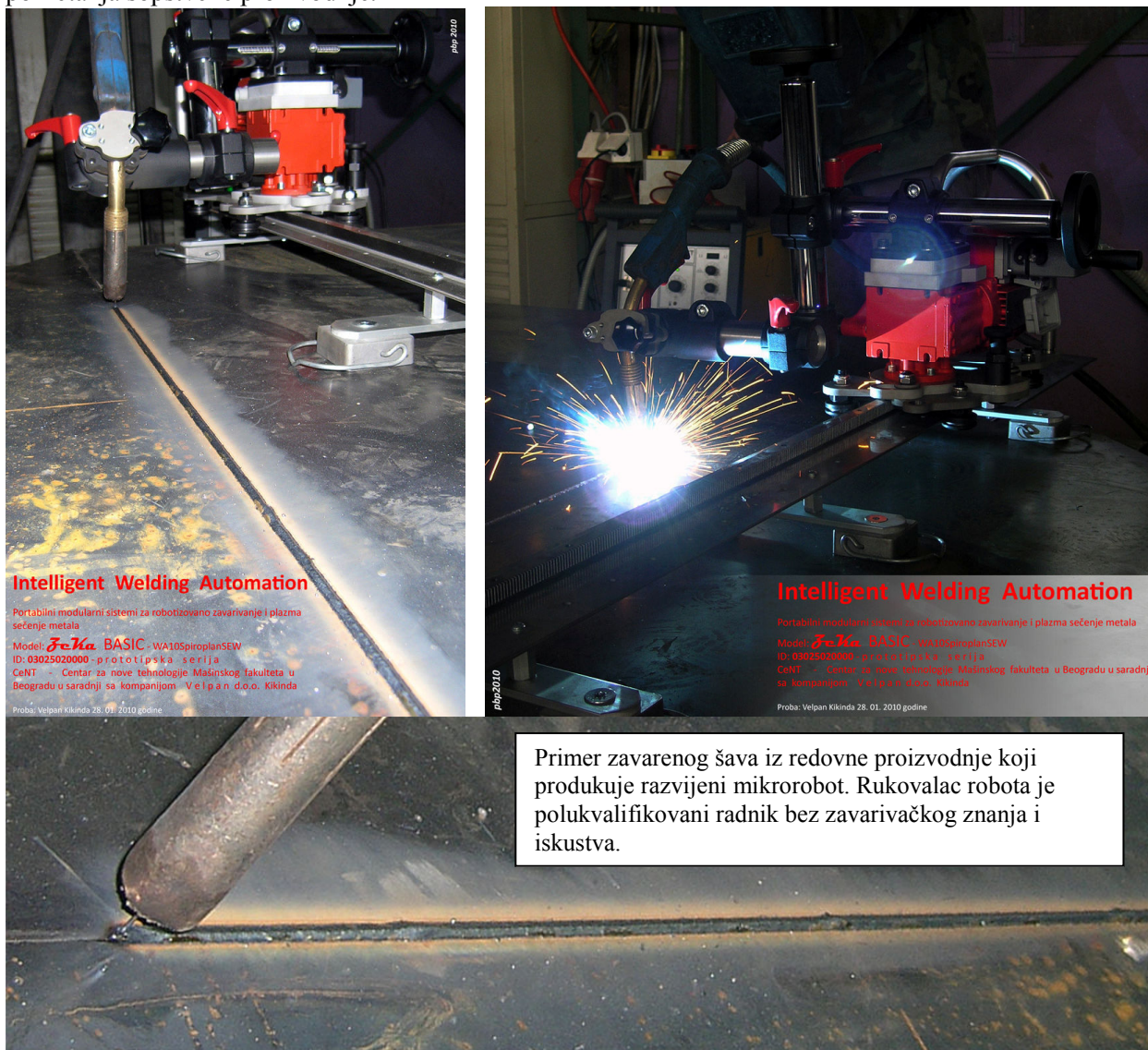
izradom elektronske dokumentacije za nove proizvode sa novim vlasnicima IKARBUS i FAP. To bi značilo da problem realizacije centara treba da se poveže sa projektovanjem i realizacijom novih integrisanih informaciono-komunikacionih sistema ovih industrija i odgovarajućim investiranjem, sa pozivom na predloženo 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.

3.6. Izgradnja WEB portala projekta

Za potrebe interne komunikacije istraživačkih timova, diseminacije rezultata i edukacije koncipiran je i izgrađen WEB portal projekta master.mas.bg.ac.rs/ma14035

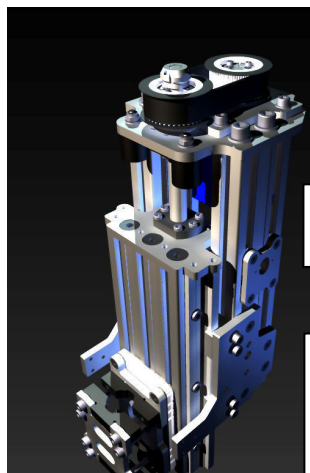
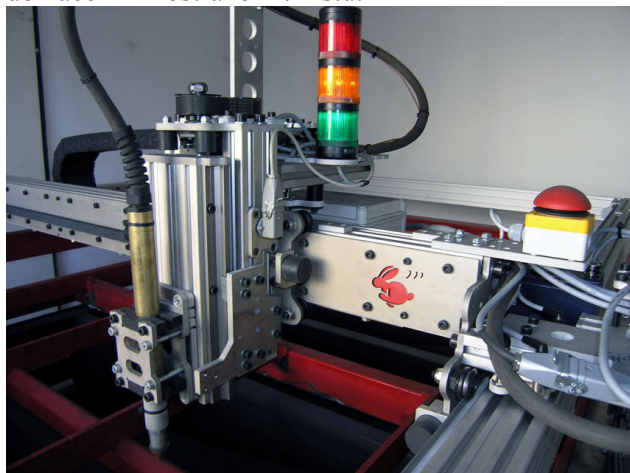
4. PRIMENA REZULTATA PROJEKTA

Aplikacija 1: Portabilni mikrorobot razvijen 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. Tokom jednogodišnjeg rada dva prototipa pokazano je kako jedan mikrorobot robot može da zameni 3 kvalifikovana varioca. Na slici 13 prikazani su roboti na tipičnim zadacima u redovnoj proizvodnji i posebno je naveden primer šava izrađenog zavarivanjem brzinom od 0,6m/min. Ovaj proizvod ima punu komercijalnu upotrebljivost, a nastao je prvenstveno u cilju supstitucije uvoza, redukcije potrebnog obima investicija za 70%, i eventualnog pokretanja sopstvene proizvodnje.



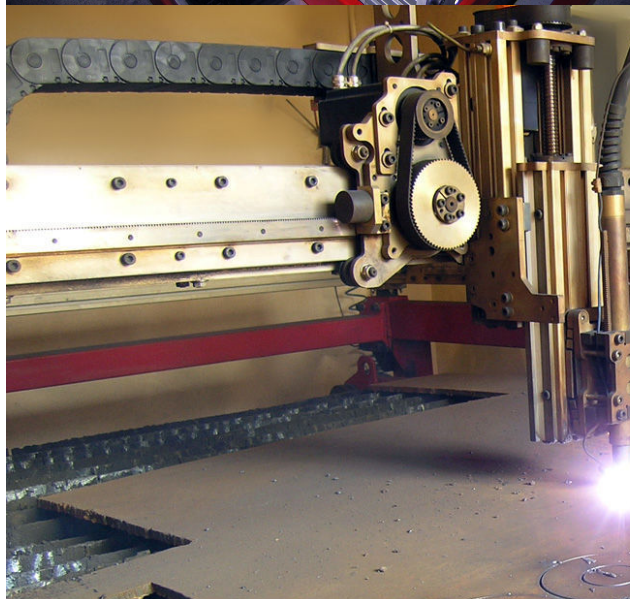
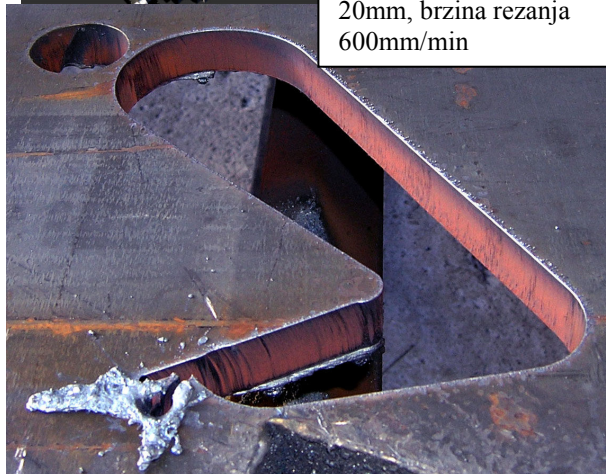
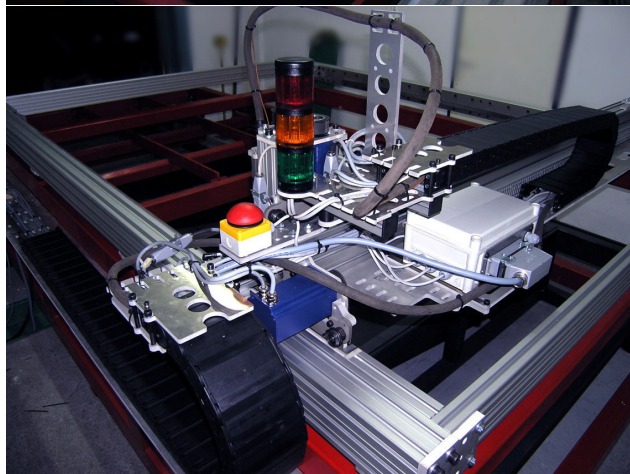
Slika 13: Portabilni mikrorobot za zavarivanje

Aplikacija 2: Modularni numerički sistem za plazma rezanje razvijen u okviru projekta INTOSA. Plazma sistem je uveden u proizvodnju u kompaniji Velpan iz Kikinde jula meseca 2010. godine. Pored modularne gradnje koja predstavlja jedinstveno rešenje na tržištu, domaćem i međunarodnom, ovaj sistem sadrži i originalno upravljanje realizovano kroz koncept otvorene arhitekture koja je bazirana na kombinaciji PC računarske platforme i industrijskih programabilnih automata. Mehanički i upravljački sistem su u potpunosti rezultat sopstvenog istraživanja i razvoja tima istraživača na projektu MA14035. Ovaj proizvod ima punu komercijalnu upotrebljivost, a nastao je prvenstveno u cilju supstitucije uvoza, redukcije potrebnog obima investicija za preko 70% i mogućeg pokretanja jednog, za domaću privredu, novog proizvodnog programa industrijske proizvodnje numerički upravljanih sistema za plazma rezanje sa ciljem njihovog plasmana na domaćem i inostranom tržištu.



Virtuelni CAD model modula z ose

Prva probna kontura rezana na lokaciji Velpan Kikinda. Čelični lim debljine 20mm, brzina rezanja 600mm/min



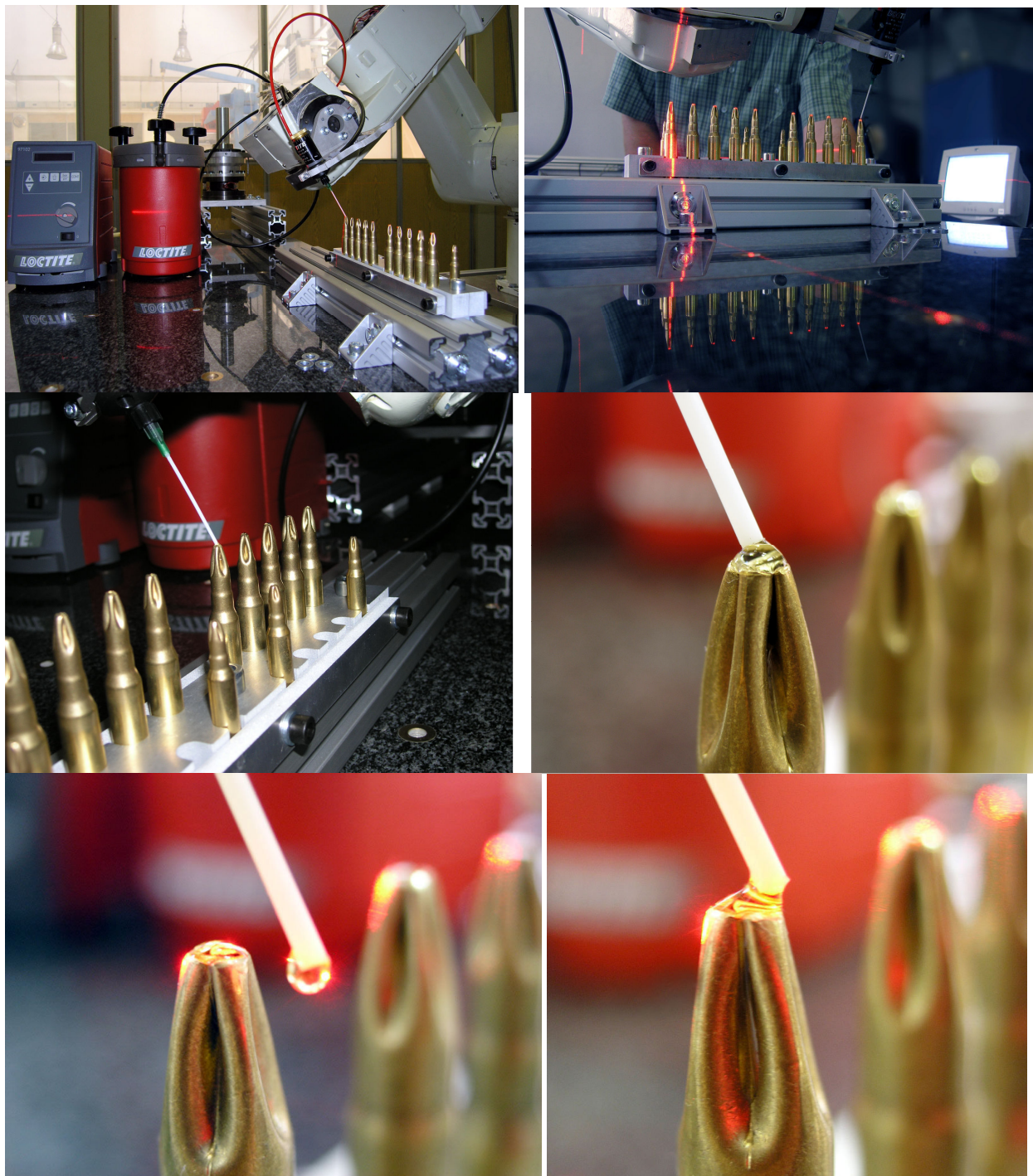
VELPAN Kikinda, mart 2011

M. Žineli, fakultet, Univerzitetu u Beogradu

Mašina u redonoj dvosmenskoj proizvodnji

Slika 14: Modularni numerički sistem za plazma rezanje

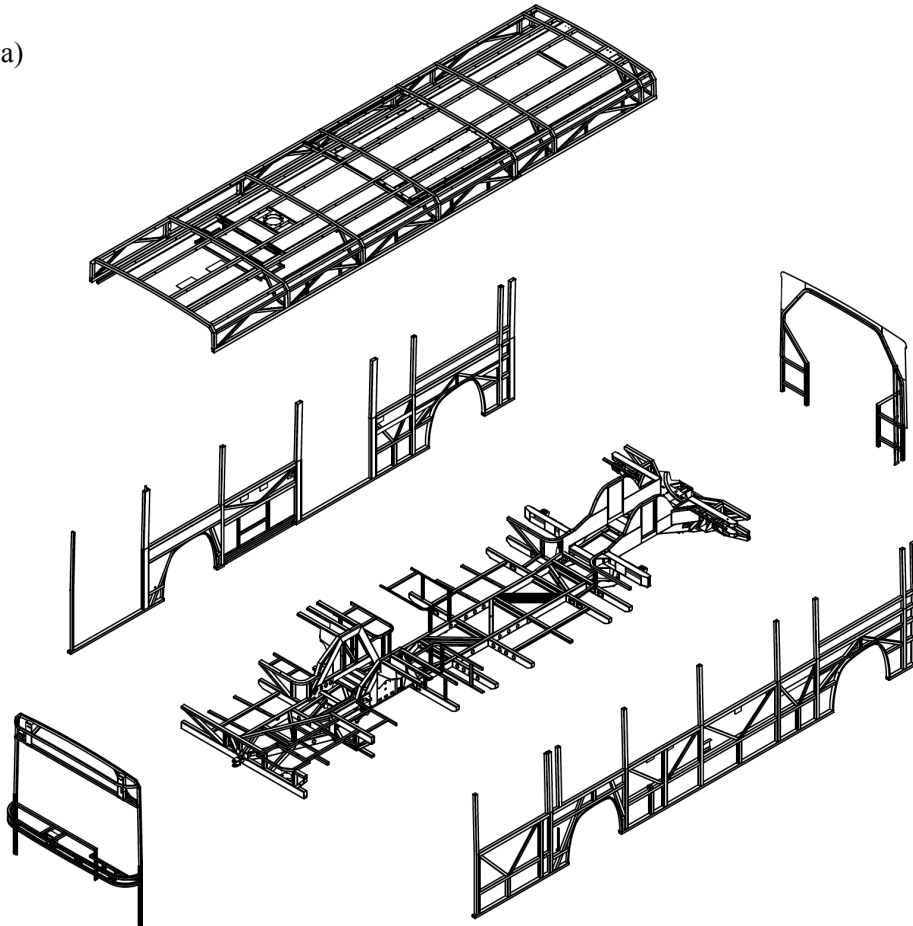
Aplikacija 3: Robotski sistem za doziranje zaptivne smese i optičku kontrolu manevarskog i bojevog metka iz proizvodnog programa kompanije Prvi partizan iz Užica u sklopu programa proizvodnje municije po NATO specifikaciji. Ovaj proizvod je specijalne namene, predstavlja potpunu supstituciju uvoza i nudi značajne uštede u obimu potrebnih investicija. Projekat se nalazi u fazi mirovanja zbog problema koji su izazvani požarom koji je zahvatio proizvodne pogone kompanije PPU. Tehnička izvodljivost ovog projekta je demonstrirana PPU, realizacija je imperativna, očekuje se povoljan poslovni trenutak za njegovu operacionalizaciju. U fizičkoj realizaciji demonstracionih eksperimenata učestvovala je kompanija HENKEL Srbija, Industrijski adhezivi (LOCTITE). Na fotografijama ispod navodi se dispozicija demonstracionog sistema i detalji probnog doziranja vode a zatim i doziranja konkretnog adheziva u zapremini od 4ul na vrh manevarskog metka.



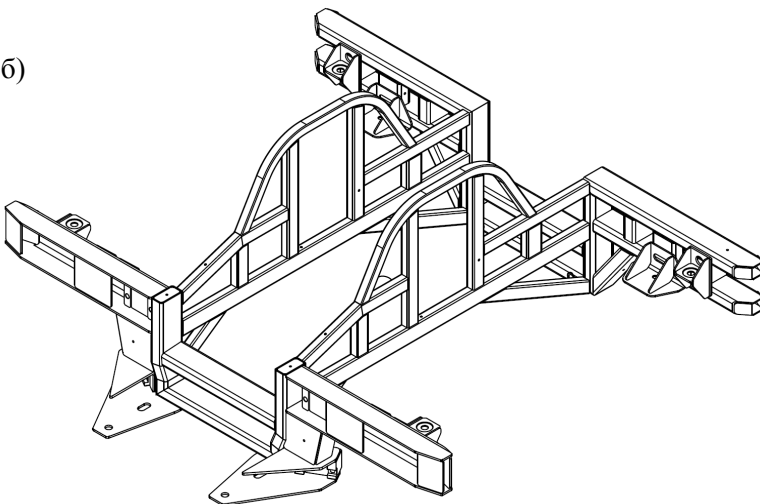
Slika 15: Robotski sistem za doziranje zaptivne smese i optičku kontrolu manevarskog i bojevog metka

Aplikacija 4: Koncipiranje robotskog sistema za automatsku montažu zavarenih sklopova kostura i noseće strukture nove generacije niskopodnih autobusa iz proizvodnog programa kompanije IKARBUS. Objektivne teškoće u poslovanju kompanije IKARBUS izazvane problemima svojinske transformacije onemogućile su razvojne aktivnosti za praktičnu implementaciju postavljenih koncepata, koji pored tehnoloških operacija montaže i zavarivanja uključuju i operacije robotske dimenzione kontrole priprema i finalnih sklopova (robotizovano skeniranje laserskom triangulacijom i struktuiranom svetlošću sa ciljem kontrole geometrije zavarenog sklopa i njegove kompletnosti). Nastavak razvojnih aktivnosti i realizacija demonstracionog sistema koji je od strateškog značaja za razvoj tehnoloških osnova kompanije IKARBUS planira se u okviru projekta TR35007.

a)



b)



Slika 16: 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 struktuiranom svetlošću sa ciljem kontrole geometrije zavarenog sklopa i njegove kompletnosti

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.

Aplikacije izvedene iz istraživačkorazvojnih aktivnosti koje su sprovedene u trogodišnjem periodu realizacije projekta MA14035 jasno ukazuju na komercijalne efekte koji su ostvarene u direktnom i indirektnom smislu. Pod direktnim efektima podrazumevaju se pre svega efekti supstitucije uvoza, nečemu što je nekada bio jedan od osnovnih pokretača razvoja, a danas potpuno zaboravljeni potencijal koji može da značajno doprinese smanjenju spoljno trgovinskog deficita Srbije i otvori nova radna mesta, posebno u razvojno zavisnim visokotehnološkim sektorima. Pod direktnim efektima podrazumeva se i značajno redukovan obim investicija uloženi za uvođenje nove tehnologije, posebno u kompaniji Velpan. Pod indirektnim efektima podrazumevaju se efekti porizašli iz povećanja obima i kvaliteta proizvodnje, kao i efekti proizašli iz razrešavanja problema nedostatka kvalifikovane radne snage, posebno u delu tehnologije zavarivanja.

Reference

- [1] Godišnji izveštaji projekta MA14035, Interni materijal u formi elaborata i tehničke dokumentacije za 2008, 2009 i 2010. godinu.
- [2] Petrovic, P., B., Jakovljevic, Z., Milacic, V., R., Context sensitive recognition of abrupt changes in cutting process, Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 5, pp. 3721-3729, 2010,
- [3] Petrovic, P., B., Jakovljevic, Z., Dynamic Compensation of Electrical Runout in Eddy Current Contactless Measurements of Non-Stationary Ferromagnetic Target, Sensor Letters, 7: 191-202, 2009,
- [4] Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Recognition of Contact States in Robotized Assembly Using Wavelet Transform and Support Vector Machines, International Conference on Innovative Technologies in Design, Manufacturing and Production, INTECH 2010, Prague, 2010.
- [5] Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Recognition of Contact States in Robotized Assembly Using Qualitative Wavelet Based Features and Support Vector Machines, Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, Manchester, UK, pp. 305-308, Springer-Verlag book chapter, ISBN: 978-1-84996-431-9
- [6] Jakovljević, Ž., Petrović, P., B., A New Approach to Rubberized Cord Surface Structure Identification Based on High-Resolution Laser Scanning and Multiresolution Signal Processing, FME Transactions, Vol. 37, pp. 19-26, 2009, ISSN: 1451-2092
- [7] Petrović, P., Jakovljević, Ž., 3D digitalizacija objekata kompleksne geometrije integracijom laserskog triangulacionog senzora i industrijskog robota, 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 and Part 2: Evaluation (Invited Paper), Proceedings, 10th International Scientific Conference On Flexible Technologies, MMA 09, Novi Sad, 2009, pp. 174-182, ISBN: 978-86-7892-223-7
- [9] 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 project MA14035

Abstract

This paper gives the results of research conducted 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 Complanly as one of project participants. At the end we present 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.