



Inteligentno stereo-vizuelno upravljanje mobilnih robota i optimalno terminiranje tehnoloških procesa - pregled rezultata istraživanja u okviru projekta MISSION4.0²⁾

Rezime

Projekat MISSION4.0 podrazumevao je, u okviru nekoliko radnih paketa, razvoj inteligentnog stereo-vizuelnog upravljanja mobilnih robota, kao i optimalno planiranje i terminiranje tehnoloških procesa, i to baziranim na tehnikama veštačke inteligencije, posebno na konvolucionim veštačkim neuronskim mrežama i biološki inspirisanim algoritmima optimizacije. Tokom dvogodišnjih intenzivnih naučnih istraživanja razvijena je nova metodologija za autonomnu navigaciju i inteligentno upravljanje mobilnih robota sopstvenog razvoja, nazvanih RAICO i DOMINO. Generisanje optimalnog plana terminiranja tehnoloških procesa, u okviru koga se izvršava i inteligentni unutrašnji transport korišćenjem mobilnih robota, takođe je bio jedan od važnih ciljeva ovih naprednih istraživanja. U ovom radu, dat je pregled nekih od ključnih rezultata projekta MISSION4.0, poput publikovanih u vodećim međunarodnim i nacionalnim naučnim časopisima, objavljenih poglavlja u naučnim monografijama, saopštenih i odštampanih naučnih radova u zbornicima prestižnih konferencija održanih u inostranstvu i regionu, zatim u okviru verifikovanih tehničkih rešenja, kao i preko skupova podataka sa otvorenim pristupom.

Ključne reči: inteligentno upravljanje mobilnih robota, stereo mašinsko gledanje, konvolucione neuronske mreže, terminiranje tehnoloških procesa, biološki inspirisani algoritmi optimizacije

1. UVOD

Projekat „Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0“ (akronim MISSION4.0, ev. broj: 6523109), realizovan u periodu od 1. septembra 2020. do 31. avgusta 2022. godine, prvi je naučno-istraživački projekat Univerziteta u Beogradu – Mašinskog fakulteta koji je finansiran od strane Fonda za nauku Republike Srbije. U izraženoj konkurenciji od 70 predloga projekata, MISSION4.0 predstavlja jedan od 12 projekata koji je ostvario finansiranje u okviru poziva „Program za razvoj projekata iz oblasti veštačke inteligencije“, odnosno jedan od šest projekata finansiranih u domenu primenjenih istraživanja (PRVI_P). Projekat MISSION4.0 realizovao je multidisciplinarni istraživački tim iz dve naučno-istraživačke organizacije Univerziteta u Beogradu – Mašinskog fakulteta (nosilac projekta) i Univerziteta u Beogradu – Filozofskog fakulteta (učesnik projekta), a rukovodilac projekta bio je prof. dr Zoran Miljković. Projektini tim činilo je, u svakom trenutku, 13 naučnika i mladih istraživača sa Mašinskog fakulteta i jedan naučnik sa Filozofskog fakulteta, pri čemu su ispunjeni i zahtevni evropski kriterijumi za ravnopravnost polova u oblasti tehničko-tehnoloških nauka, s obzirom da 43% projektnog tima predstavljaju dame. U okviru Mašinskog fakulteta, tri katedre bile su uključene u realizaciju projekta i to Katedra za proizvodno mašinstvo sa ukupno devet istraživača, Katedra za automatsko upravljanje sa tri istraživača i Katedra za industrijsko inženjerstvo sa jednim istraživačem, dok je

¹⁾ Prof. dr Zoran Miljković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zmiljkovic@mas.bg.ac.rs), Prof. dr Bojan Babić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (bbabic@mas.bg.ac.rs), vanr. prof. dr Milica M. Petrović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mmpetrovic@mas.bg.ac.rs), asistent Aleksandar Jokić, MSc, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (ajokic@mas.bg.ac.rs), Katarina Miljković, MSc, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (kmiljkovic@mas.bg.ac.rs), Đorđe Jevtić, MSc, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (drjevtic@mas.bg.ac.rs), Lazar Đokić, MSc, stručni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (ldjokic@mas.bg.ac.rs).

²⁾ U ovom radu, saopštava se pregled dela rezultata istraživanja ostvarenih u okviru naučnog projekta MISSION4.0, ev. broj: 6523109, koji je finansijski podržan od Fonda za nauku Republike Srbije, kao i potprojekta Mašinskog fakulteta u Beogradu, ev. broj: 451-03-68/2022-14/200105, finansijski podržanog od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

sa Filozofskog fakulteta uključena Katedra za sociologiju. Četiri proizvodno orijentisane kompanije podržale su istraživanja i implementaciju rezultata ostvarenih na projektu MISSION4.0: *Servoteh*, Beograd; *IVA-28*, Beograd; *FMP konzorcijum*, Beograd i *SAP West Balkans*, Beograd.

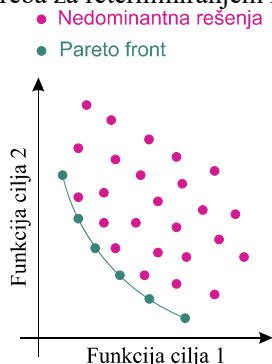
Osnovi cilj projekta MISSION4.0 podrazumevao je razvoj inovativnih algoritama baziranih na tehnikama veštačke inteligencije za upravljanje, terminiranje i ostvarivanje sajber bezbednosti kibernetско fizičkih proizvodnih sistema Industrije 4.0. Uloga člana projektnog tima sa Filozofskog fakulteta ogledala se u definisanju društveno-etičkih normativa koje je potrebno uzeti u obzir prilikom uvođenja tehnika veštačke inteligencije u okviru proizvodnih sistema. Plan realizacije projektnih aktivnosti definisan je kroz šest radnih paketa. Prvi i šesti radni paketi posvećeni su administraciji i obezbeđivanju uspešne realizacije projekta, kao i popularizaciji ostvarenih naučno-istraživačkih rezultata, dok su radni paketi dva, tri, četiri i pet naučno-istraživački orijentisani. Primarni cilj radnog paketa dva predstavljao je ostvarivanje optimalnog plana terminiranja u dinamičkim uslovima na bazi biološki inspirisanih algoritama optimizacije. Razvoj strategije stereo vizuelnog upravljanja mobilnih robota na osnovu tehnika dubokog učenja predstavljao je osnovni cilj radnog paketa tri. U okviru radnog paketa četiri, cilj je bio razvoj sistema za inteligentno upravljanje mobilnih robotskih sistema na bazi fazi logike i dubokog učenja ojačavanjem. Cilj radnog paketa pet sastojao se u razvoju novih modela dubokog učenja primenjenih radi ostvarivanja sajber bezbednosti pametnih senzora i aktuatora. Detaljan opis ostvarenih naučno-istraživačkih rezultata, proisteklih iz radnih paketa dva i tri, biće prikazan u okviru ovog preglednog rada.

Ukupan budžet projekta iznosi 199.949,18 € i podeljen je u osam kategorija. Najveći deo budžeta, u iznosu od 69,87%, predviđen je za lične prihode istraživača. Druga najveća budžetska kategorija namenjena je nabavci opreme u iznosu od 10,83% ukupnog budžeta. Troškovi nadoknade za NIO predstavljaju treću po veličini budžetsku kategoriju i iznose 9,92%. Troškovi predviđeni za putovanja (2,97%) i konferencije, odnosno publikacije (2,88%) su naredne po veličini budžetske kategorije; zatim, 2,41% budžeta opredeljeno je za troškove promocije i popularizacije (diseminacije) ostvarenih naučno-istraživačkih rezultata, dok su najmanje budžetske kategorije predviđene za angažovanje podizvođača (0,77%) i potrošni materijal (0,35%).

2. VIŠEKRITERIJUMSKO DINAMIČKO TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH ENTITETA

Terminiranje fleksibilnih tehnoloških procesa predstavlja aktivnost vremenskog raspoređivanja tehnoloških operacija i posebnih procesa za skup delova koje je potrebno obraditi u okviru tehnološkog sistema. Kako usled fleksibilnosti mašina alatki, alata, orijentacija alata, procesa i redosleda operacija varijantnost mogućnosti obrade skupa delova postaje izrazito velika [1], sve se veća pažnja istraživača u ovoj oblasti posvećuje razvoju algoritama optimizacije koji imaju mogućnost da na efikasan način izvrše proces terminiranja. Izrazito velika varijantnost broja rešenja problema terminiranja onemogućava efikasnu primenu optimizacionih algoritama koji pretražuju celokupan prostor rešenja, prevashodno zbog vremena koje je potrebno za određivanje svih mogućih rešenja. Iz tog razloga, primena metaheurističkih metoda optimizacije predstavlja adekvatnu alternativu [2]. Metaheuristički algoritmi optimizacije ne garantuju pronalaženje optimalnog rešenja, međutim, moguće je ostvariti rešenje približno optimalnom u znatno kraćem vremenskom periodu. U okviru projekta MISSION4.0, analizirana su dva kompleksnija slučaja terminiranja – dinamičko i višekriterijumsko terminiranje.

Dinamička priroda realnih tehnoloških sistema može uzrokovati poremećaje u okviru trenutnog plana terminiranja čime celokupan proces optimizacije postaje višestruko kompleksniji. Neki od uobičajenih poremećaja podrazumevaju prestanak rada mašine alatke, potrebu za obradom novog dela, otkaz dela čija je obrada u toku [3] itd. Pomenuti poremećaji narušavaju optimalnost inicijalnog plan terminiranja čime se stvara potreba za reterminiranjem radi uzimanja u obzir novog stanja tehnološkog sistema [4].



Slika 1. Pareto front

Kako bi se izvršio proces optimizacije i odredio optimalni plan terminiranja, potrebno je definisati funkciju cilja koja matematički formalizuje neki od kriterijuma terminiranja, npr. minimalno vreme potrebno da bi se obradili svi delovi čije se terminiranje vrši, minimalna cena obrade, minimalni transport [5] itd. Potreba za višekriterijumskom optimizacijom javlja se ukoliko je pri procesu terminiranja neophodno optimizovati dva kriterijuma (tj. dve funkcije cilja) istovremeno [6]. U tom slučaju, ne postoji jedno optimalno rešenje procesa optimizacije, već postoji skup rešenja koja kreiraju tzv. Pareto front (slika 1). Sva rešenja u Pareto frontu su optimalna, sa različitim uticajima funkcija cilja 1 i 2. Odabir optimalnog rešenja koje će se plasirati u proizvodnju definisan je proizvodnim prioritetima koji su u korelaciji sa pomenutim funkcijama

cilja. Na osnovu odabranog rešenja, moguće je kreirati Gantov dijagram rasporeda tehnoloških operacija, po raspoloživim mašinama alatkama sa odabranim alatima i orijentacijama alata u tehnološkom okruženju.

2.1 Pregled stanja u oblasti dinamičkog i višekriterijumskog terminiranja tehnoloških procesa

U nastavku biće analizirani radovi koji su predstavljali osnovu, tj. polazište za istraživanja sprovedena u okviru drugog radnog paketa projekta MISSION4.0. Celokupan pregled stanja podeljen je u dve oblasti; prvo će biti analizirani radovi vezani za dinamičko terminiranje, a zatim i radovi koji tretiraju višekriterijumsko terminiranje tehnoloških procesa.

Primena metodologije za dinamičko terminiranje *job-shop* tipa tehnološkog sistema na bazi genetičkih algoritama (engl. *Genetic Algorithm* – GA) predložena je u [7]. Jedan od analiziranih dinamičkih poremećaja predstavlja dolazak novog dela u sistem. Autori analiziraju dva modela za rešavanje problema dinamičkog terminiranja, kod prvog uzima se u obzir da je vreme dolaska delova u sistem stohastički, a kod drugog deterministički definisano. Eksperimentalni rezultati optimizacije, koja uključuje šest različitih funkcija cilja, pokazuju poboljšanje koje obezbeđuje nova metodologija u odnosu na pristup baziran na pravilima prioriteta. Razvoj GA za napredno terminiranje tehnološkog procesa gde se dinamika procesa ostvaruje kroz kontinualno uvođenje novih delova u tehnološki sistem predložen je u radu [8]. Funkcija cilja definisana je tako da uzima u obzir prosečno vreme koje svi delovi provedu u tehnološkom sistemu, kao i pravovremeno završavanje obrade svakog mašinskog dela. Pomenuta funkcija cilja implementirana je u okviru inicijalnog i svih reterminiranih planova terminiranja. Radi obezbeđivanja stabilnosti procesa terminiranja, uvedena je strategija periodičnog zaustavljanja, koja onemogućava uzastopno reterminiranje usled uvođenja novih delova u sistem i uvodi određeni period između dva uzastopna procesa reterminiranja. Eksperimentalna verifikacija predložene metodologije bazirane na GA obezbeđuje povišenu stabilnost terminiranja koja ne umanjuje efikasnost procesa optimizacije. Autori rada [9] predlažu metodologiju koja minimizira efekat prestanka rada mašine alatke na trenutni plan terminiranja. Predložen je hibridni GA koji vrši optimizaciju u dva koraka. Prvi korak podrazumeva klasično terminiranje uz minimizaciju vremena potrebnog da se obrade svi delovi, dok se pri drugom koraku nastavlja proces optimizacije sa funkcijom cilja koja obezbeđuje robusnost plana terminiranja na prekid rada mašine alatke. Ova dva suprotstavljena kriterijuma optimizacije objedinjena su u okviru tri različite funkcije cilja. Predložena metodologija testirana je i eksperimentalni rezultati pokazali su povišenu robusnost na prestanak rada mašine, kao i stabilnost celokupnog plana terminiranja. Primena algoritma inspirisanog inteligencijom roja čestica (engl. *Particle Swarm Optimization* – PSO) za rešavanje problema dinamičkog i statičkog terminiranja razmatrano je u radu [10]. Predloženi PSO algoritam unapređen je dodavanjem operatora elitizma, mutacije i ukrštanja, kako bi se primenio za diskretne probleme. Dva razmatrana dinamička poremećaja podrazumevaju prestanak rada mašine alatke i dolazak novog dela koji urgentno treba obraditi. Rezultati tri eksperimentalne verifikacije ukazuju na efikasnost predloženog algoritma.

Razvoj evolucionog algoritma za višekriterijumsko dinamičko terminiranje predstavljen je u okviru rada [11]. Optimizacija je izvršena na osnovu sledeće dve funkcije cilja (i) vreme potrebno za obradu svih delova čije se terminiranje vrši i (ii) ravnomerno iskorišćenje mašina alatki. Matematičko definisanje problema izvršeno je primenom MINLP (engl. *Mixed-integer non-linear programming*) modela. Predloženi algoritam upoređen je sa višekriterijumskom verzijom GA i PSO algoritama, a eksperimentalni rezultati pokazali su da predloženi algoritam ostvaruje bolja rešenja na većini test problema. Metodologija za višekriterijumsko terminiranje tehnoloških procesa, koja uključuje maksimizaciju energetske efikasnosti i minimizaciju ukupnog vremena potrebnog da se obrade svi delovi, predložena je u [12]. Razvijeni matematički model uključuje ograničenja vezana za transportni sistem na bazi automatski vođenih robokolica. Unapređeni višekriterijumski GA, koji podrazumeva integraciju PSO i algoritma simuliranog žarenja (engl. *Simulated Annealing*), predložen je za rešavanje ovog problema. Rad [13] takođe razmatra problem višekriterijumskog terminiranja radi ostvarivanja optimalne energetske efikasnosti i minimalnog vremena potrebnog za obradu svih delova čije se terminiranje vrši. Primenjena napredna verzija GA integrisana je sa pretragom promenljivih susedstava (engl. *Variable Neighborhood Search*) radi obezbeđivanja intenzivnijeg lokalnog pretraživanja. Predloženi algoritam ostvario je bolja optimalna rešenja u okviru Pareto fronta u poređenju sa tradicionalnim višekriterijumskim GA. Višekriterijumska optimizacija planova terminiranja, koja uključuje stohastički definisana vremena obrade i vremena dolazaka delova u sistem, razmatrana je u radu [14]. Metod baziran na koloniji pčela primenjen je za generisanje optimalnih planova terminiranja. Razmatrane su kombinacije pet funkcija cilja, a predloženi algoritam ostvario je bolja rešenja od tradicionalnog GA algoritma.

Različito od analiziranih radova, u okviru drugog radnog paketa projekta MISSION4.0 predložena je metodologija za višekriterijumsko terminiranje tehnoloških sistema u okviru kojih transport vrši jedan mobilni robot [6]. Razvijeno je 13 funkcija cilja, na osnovu čije kombinacije je vršena višekriterijumska optimizacija.

Četiri optimizaciona algoritma predložena su za rešavanje ovog problema, od kojih je unapređeni algoritam inspirisan čoporom vukova [15] pokazao najbolje performanse u poređenju sa aritmetičkim algoritmom [16], kao i sa tradicionalnim višekriterijumskim GA i PSO algoritmom.

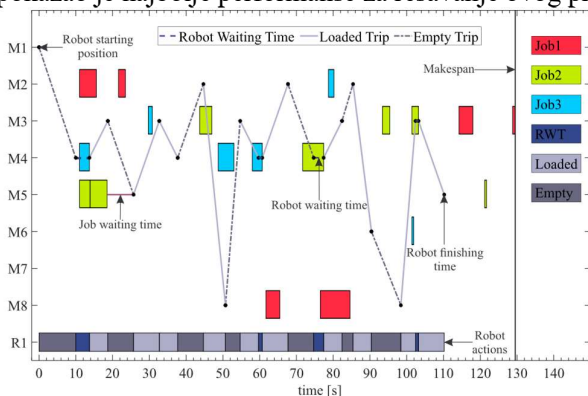
2.2 Dinamičko i višekriterijumsko terminiranje tehnoloških procesa

U nastavku, detaljno su analizirani radovi koji su proistekli kao rezultat rada istraživača u okviru oblasti terminiranja tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima. Detaljan pregled stanja u oblasti dinamičkog terminiranja fleksibilnih tehnoloških procesa predstavljen je u radu [17]. Pored inicijalnog definisanja stanja u oblasti istraživanja, predstavljena je i matematička formulacija pet funkcija cilja. Takođe, definisan je niz pretpostavki koje se moraju uvesti kako bi se adekvatno modelirao problem dinamičkog terminiranja tehnoloških procesa. Formulirana su sva neophodna ograničenja, koje je potrebno ispuniti kako bi se obezbedio validan reterminirani plan nastao usled različitih poremećaja koji se javljaju u tehnološkom okruženju.

Analizirani pristupi u rešavanju problema dinamičkog terminiranja podeljeni su u četiri kategorije: (i) multiagentni sistemi, (ii) evolucionari algoritmi, (iii) algoritmi bazirani na inteligenciji roja (iii) i (iv) hibridni pristupi. Neki od metaheurističkih algoritama koji se najčešće koriste za rešavanje problema dinamičkog terminiranja su simulirano žarenje (engl. *Simulated Annealing*), tabu pretraga (engl. *Tabu Search*), genetički algoritmi (engl. *Genetic Algorithms*), evolucionari algoritmi (engl. *Evolutionary Algorithms*), algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica (engl. *Particle Swarm Optimization*), algoritam inspirisan kolonijom mrava (engl. *Ant Colony Optimization*), algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova (engl. *Grey Wolf Optimizer*) i algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova (engl. *Whale Optimization Algorithm*).

U okviru realizovanog tehničkog rešenja [18], predložen je metod za generisanje planova terminiranja u okviru dinamičkog tehnološkog sistema na bazi genetičkih algoritama. Cilj tehničkog rešenja bio je da se obezbedi mogućnost izvršenja ponovnog terminiranja (reterminiranja) nakon pojave određenih poremećaja, uz ispunjenje optimizacionih kriterijuma. Razmatrani poremećaji predstavljaju dolazak novog dela u tehnološki sistem i otkaz obrade dela. Alternativni tehnološki procesi delova koji se terminiraju predstavljeni su AND/OR mrežama [19]. Funkcije cilja korišćene pri optimizaciji su minimalno vreme potrebno da se obrade svi delovi čije se terminiranje vrši i uravnoteženo iskorišćene mašina alatki. Takođe, prikazana je i detaljna procedura kodiranja hromozoma GA kojima su predstavljeni trenutni planovi terminiranja. Šest eksperimentalnih verifikacija, za različite funkcije cilja i skupove delova čije se dinamičko terminiranje vrši, sprovedeno je radi dokazivanja validnosti predloženog koncepta. Takođe, pri eksperimentalnoj verifikaciji uzet je u obzir i poremećaj koji podrazumeva da u okviru tehnološkog sistema više različitih novih delova dolazi istovremeno.

Višekriterijumska optimizacija primenjena u terminiranju mašina alatki i jednog mobilnog robota predstavljena je u radu [6]. Četiri metaheuristička algoritma višekriterijumske optimizacije predložena su za rešavanje ovog problema. Izvršeno je matematičko modeliranje problema, uz formiranje devet višekriterijumskih funkcija cilja relevantnih za tehnološko okruženje. Za algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova, predložene su tri nove strategije za selekciju dominantnih rešenja. Gantov dijagram obrade tri dela, sa specifičnim operacijama koje mobilni robot treba da izvrši, prikazan je na slici 2. Sposobnosti konvergencije i adekvatnog obuhvatanja celokupnog prostora rešenja predloženih algoritama analizirani su na osnovu četiri metrike. Inicijalno, izvršena je procedura podešavanja parametara optimizacionih algoritama. Na osnovu dve sprovedene eksperimentalne verifikacije, algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova pokazao je najbolje performanse za rešavanje ovog problema.



Slika 2. Gantov dijagram sa karakterističnim vremenima i akcijama mobilnog robota [6]

Primena algoritama baziranih na svim rešenjima u populaciji za višekriterijumsko terminiranje tehnoloških entiteta analizirana je u [20]. Genetički algoritam, algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica i algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova implementirani su za rešavanje ovog kombinatorno-optimizacionog problema. Pored kvantitativnih rezultata procesa optimizacije, predstavljeni su i kvalitativni u vidu Pareto fronta i Gantovog dijagrama. Eksperimentalna verifikacija ukazuje da algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova poseduje optimalnu sposobnost konvergencije i adekvatnog obuhvatanja celokupnog prostora rešenja.

3. STEREO VIZUELNO UPRAVLJANJE INTELIGENTNIH MOBILNIH ROBOTA

Vizuelno upravljanje (engl. *Visual servoing*) predstavlja metodologiju za upravljanje robotskih sistema na osnovu razlike podataka dobijenih od kamere u trenutnom i željenom položaju (tj. poziciji i orijentaciji) [21], [22]. Korišćenjem stereo vizuelnog sistema, moguće je oceniti udaljenost karakterističnih objekata, čime se dodatno unapređuje sistem vizuelnog upravljanja. Takođe, za razliku od tradicionalnih metoda vizuelnog upravljanja koji koriste karakteristične objekte kao što su tačke, linije ili kružnice na slici, moderni sistemi teže ka korišćenju kompleksnijih informacija za upravljanje. Kompleksnije informacije pružaju veću redundantnost podataka koji se koriste za upravljanje pa samim tim obezbeđuju i znatno veću robusnost pri upravljanju. Iz tog razloga, napredni sistemi vizuelnog upravljanja imaju značajno veću tačnost u odnosu na tradicionalne. U nastavku, biće analizirani radovi vezani za sisteme vizuelnog upravljanja koji koriste različite reprezentacije slika u cilju vizuelnog upravljanja.

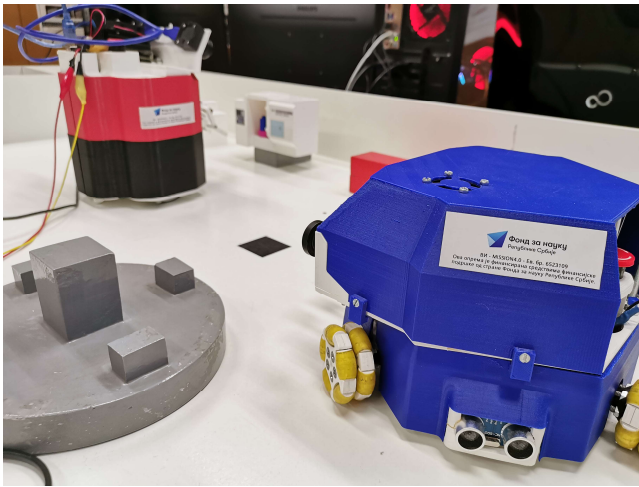
Jedan od inicijalnih radova u oblasti vizuelnog upravljanja gde se svi podaci sa slike koriste pri vizuelnom upravljanju je rad [23]. Autori modeliraju celokupan algoritam vizuelnog upravljanja kao optimizacioni proces, gde se minimizira razlika intenziteta osvetljenosti između korespondentnih piksela. Predloženi pristup karakteriše visoka tačnost finalnog položaja koji robot ostvaruje. Međutim, domen konvergencije ovakvog sistema poprilično je ograničen. Kako bi se povećao domen konvergencije, autori rada [24] predlažu korišćenje momenata intenziteta osvetljenosti piksela. Slike su podeljene u određeni broj regiona u okviru kojih su grupisani pikseli predstavljeni momentom intenziteta osvetljenosti. Predložena je metodologija na osnovu koje se računaju brzine robotskog sistema koje obezbeđuju minimizaciju razlike između momenata u okviru istih regiona na trenutnoj i ciljnoj slici. Predloženi sistem ima značajno veći domen konvergencija u odnosu na metod predložen u [23], međutim, tačnost ostvarenog položaja je na nižem nivou. Korišćenje različitih histograma generisanih na osnovu slike u cilju ostvarivanja vizuelnog upravljanja razmatrano je u radu [25]. Autor predlaže tri vrste histograma: (i) bazirane na intenzitetu RGB vrednosti piksela, (ii) bazirane na HS vrednosti piksela (na osnovu HSV modela boje) i (iii) histograme orijentisanih gradijenata (engl. *Histogram of Oriented Gradients* – HOG). Eksperimentalni rezultati predloženih metoda prikazuju da su HOG histogrami najrobusniji u okviru sistema vizuelnog upravljanja. Primena trifokalnog tenzora u okviru sistema vizuelnog upravljanja robotskih sistema analizirana je u radu [26]. Autori analiziraju mogućnost korišćenja tri slike (trenutnu, referentnu i ciljnu) pri vizuelnom upravljanju. Predstavljeni sistem vizuelnog upravljanja omogućava ostvarivanje kraće trajektorije, dok celokupan sistem obezbeđuje robusnost na šum generisanja slika, greške u kalibraciji i greške u estimaciji položaja robota.

Za razliku od analiziranih pristupa, informacije koje se koriste u okviru algoritama za vizuelno upravljanje razvijenih u okviru projekta MISSION4.0 su semantičke mape. Semantičke mape dobijaju se kada se svakom pikselu na slici dodeli klasa objekta kojoj taj piksel pripada (slika 3). Na slici 3, različite klase prikazane su drugim bojama pa se može videti da su stolovi označeni crvenom bojom, pod svetlo žutom, stolice zelenom, dok su zidovi žuti itd. Korišćenje semantičkih mapa ima nekoliko prednosti u odnosu na korišćenje intenziteta osvetljenosti piksela: 1) semantičke mape ne zavise od šuma ili promene osvetljenja u okruženju, 2) semantičke mape predstavljaju intenzivnije nosače podataka jer pružaju informacije o realnim objektima u okruženju i 3) semantičke mape se mogu adekvatno generisati u simulaciji čime se otvara mogućnost za intenzivnim učenjem robotskih sistema. Brojna istraživanja posvećena su razvoju algoritama koji tačno mogu da izvrše semantičku segmentaciju (engl. *Semantic segmentation*) i da generišu semantičke mape.



Slika 3. Primer semantičke segmentacije objekata u Laboratoriji ROBOTICS&AI

Trenutno stanje u oblasti istraživanja indikuje da duboko mašinsko učenje (engl. *Deep learning*) predstavlja tehniku koja ima najveći potencijal za generisanje semantičkih mapa. Takođe, efikasni modeli konvolucionih neuronskih mreža (engl. *Convolutional Neural Networks* – CNNs) imaju mogućnost generisanja semantičke mape u dovoljno kratkom vremenu, kako bi se kompletan proces mogao iskoristiti za upravljanje. Razvijeni algoritmi eksperimentalno su verifikovani korišćenjem robotskih sistema RAICO i DOMINO, u okviru laboratorijskog modela tehnološkog okruženja (slika 4). U nastavku, analizirani su radovi koji su proistekli iz projekta MISSION4.0, a direktno su vezani za razvoj sistema dubokog mašinskog učenja radi vizuelnog upravljanja na osnovu semantičke segmentacije.

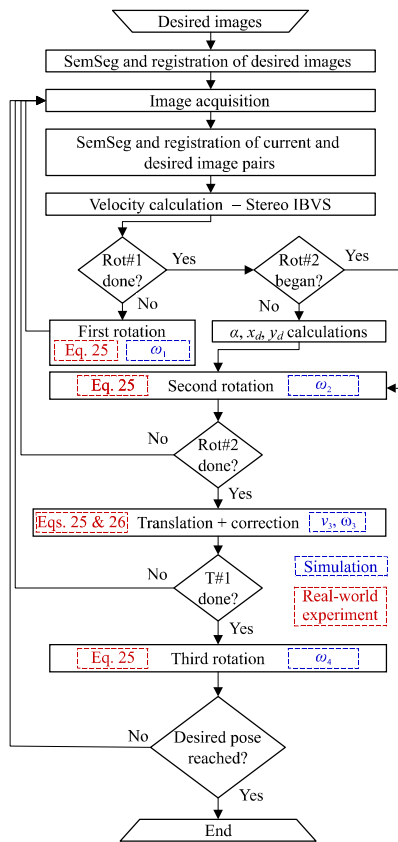


Slika 4. Mobilni roboti RAICO (levo) i DOMINO (desno) u laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja

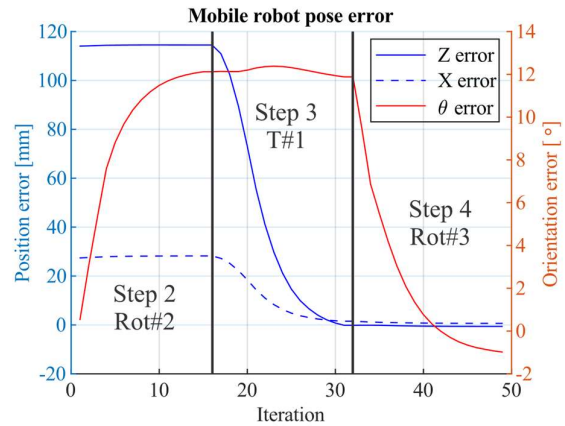
međunarodne konferencije *The International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETRAN*, ostvarena je mogućnost da uz proširenje rezultati budu objavljeni i u okviru časopisa [28]. U proširenoj verziji, tri nova napredna metaheuristička algoritma optimizacije implementirana za registraciju slika su algoritam zasnovan na inteligenciji jata jastrebova, algoritam zasnovan na inteligenciji jata kitova i algoritam zasnovan na načinu širenja plesni. Eksperimentalni rezultati pokazali su da je algoritam zasnovan na načinu širenja plesni optimalan za proces registracije slika. Razvoj nove funkcije cilja adaptirane za registraciju semantičkih mapa predstavljen je u radu [29]. Pored standardne funkcije cilja koja se isključivo odnosi na tačnost, predložena funkcija cilja uključuje i uticaj netačno registrovanih piksela semantičke mape, broj piksela koji još uvek nisu adekvatno registrovani, kao i težinski odnos koji dodatno favorizuje registraciju određenih klasa. Eksperimentalna verifikacija pokazala je poboljšana svojstva registracije slika, kao i mogućnosti primene u realnom robotskom sistemu sa implementiranim vizuelnim upravljanjem. Jedan od ishoda istraživanja na projektu MISSION4.0 je i skup podataka za semantičku segmentaciju [30]. Skup podataka sadrži preko 400 slika i semantičkih mapa generisanih u laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja. Slike su generisane stereo vizuelnim sistemom mobilnog robota RAICO, koji se sastoji od dve *Basler acA1920-25uc* kamere sa *Fujinon DF6HA-1B* sočivima. Od ukupno pet definisanih klasa, četiri klase predstavljaju mašine alatke, a peta klasa predstavlja pozadinu. Razvoj sistema percepcije koji se bazira na dubokom mašinskom učenju inteligentnog mobilnog robota RAICO sa stereo vizuelnim sistemom upravljanja predložen je u referenci [31]. Potpuno povezana konvoluciona veštačka neuronska mreža (engl. *Fully convolutional network*) sa *ResNet* arhitekturom predložena je kao model dubokog mašinskog učenja za generisanje semantičkih mapa. Predloženi model ostvario je visoku globalnu tačnost semantičke segmentacije od 65,6%, kao i brzinu procesiranja od 11 slika u sekundi za celokupni stereo vizuelni sistem. Rad [31] nagrađen je kao najbolji rad mladog istraživača u okviru sesije Robotika i fleksibilna automatizacija osme međunarodne konferencije *The International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETRAN*, čime je ostvarena mogućnost da se unapređena verzija rada objavi u časopisu [32]. Autori su predložili da dodatno povećaju tačnost sistema percepcije primenom tehnika augmentacije skupa reprezentativnih podataka za treniranje. Predložene su četiri grupe tehnika augmentacije: geometrijske transformacije slika, dodavanje šuma, manipulacija intenziteta piksela i ostale metode. Primenom sve četiri grupe, ukupna tačnost sistema percepcije povećana je za 6.2%, dok je grupa koja je imala najveći uticaj na povećanje bila grupa metoda dodavanja šuma.

Korišćenjem metoda razvijenih u referencama [27-31] uspešno je razvijen stereo vizuelni sistem upravljanja baziran na semantičkoj segmentaciji, tj. na bazi semantičkih mapa [33]. Predloženi algoritam upravljanja sastoji se od četiri faze (slika 5). Svaka faza (engl. *step*) posvećena je jednom određenom kretanju koje mobilni robot treba da ostvari na osnovu vizuelnih informacija, kako bi na kraju kretanja ostvario željeni položaj. Predloženi sistem verifikovan je u 3D dinamičkoj simulaciji (greška upravljanja tokom iteracija može se uočiti na slici 6), kao i u realnom laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja (promena položaja robota prikazana je na slici 7). Na osnovu analize eksperimentalnih rezultata, potvrđuje se tačnost pozicioniranja mobilnog robota RAICO primenom predloženog sistema vizuelnog upravljanja. Takođe, prikazana je i mogućnost upravljanja realnog mobilnog robota na osnovu slika koje su generisane u simulaciji, što dodatno unapređuje fleksibilnost i primenjivost celokupnog sistema. Na kraju, prikazana je i mogućnost funkcionisanja sistema u uslovima kada je scena koju mobilni robot snima parcijalno zaklonjena dodatnim objektima.

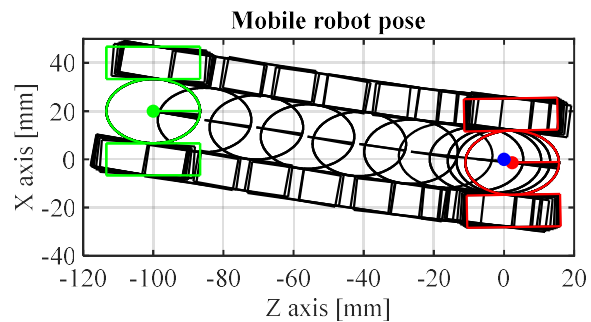
U radu [27] predstavljena je analiza primene biološki inspirisanih algoritama optimizacije radi registracije slika u okviru vizuelnog upravljanja mobilnih robota. Registracija slika predstavlja optimizacioni proces geometrijske transformacije prve slike sve dok se ona u potpunosti ne poklopi sa drugom slikom. U okviru ovog rada, slike generisane u trenutnom položaju registrovane su sa slikama generisanim u željenom položaju. Implementirana su tri biološki inspirisana algoritma: genetički algoritmi, algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica i algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova. Eksperimentalna verifikacija pokazala je da su genetički algoritmi optimalni za primenu u registraciji slika. Kako je analizirani rad nagrađen kao najbolji rad mladog istraživača na sesiji Robotika i fleksibilna automatizacija sedme



Slika 5. Algoritam za stereo vizuelno upravljanje [33]



Slika 6. Promena greške mobilnog robota kroz iteracije i etape [33]



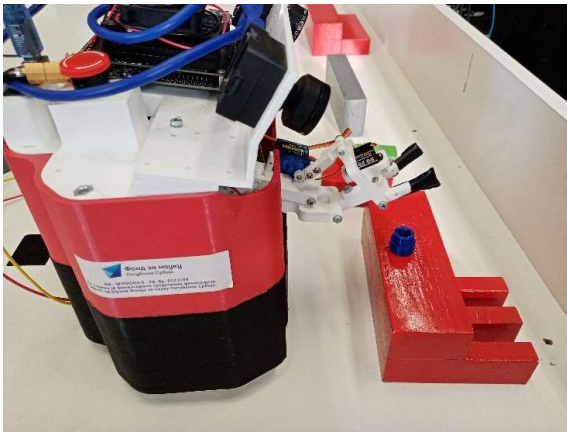
Slika 7. Promena položaja mobilnog robota kroz iteracije [33]

Naredni korak u ostvarivanju kognitivnih sposobnosti mobilnih robota ogleda se u razvoju sistema za odlučivanje [34], [35]. Odlučivanje na koordinacionom nivou ostvareno je primenom višekriterijumske optimizacije planova terminiranja mobilnog robota, dok je odlučivanje na izvršnom nivou ostvareno primenom konvolucionih neuronskih mreža na osnovu informacija dobijenih od stereo vizuelnog sistema. Izlaz višekriterijumske optimizacije predstavlja plan terminiranja na osnovu koga se generišu putanje koje mobilni robot treba da prati, a sve u cilju izvršavanja obrade skupa mašinskih delova. Sa druge strane, pored slika generisanih vizuelnim sistemom, dodatne podatke koji predstavljaju ulaz u sistem odlučivanja na izvršnom nivou predstavljao je vektor položaja mobilnog robota. Izlaz iz sistema za odlučivanje na izvršnom nivou predstavlja verovatnoća uspešnosti hvatanja mašinskog dela (slika 8).



Slika 8. Perspektiva mobilnog robota – verovatnoća uspešnosti hvatanja mašinskog dela [35]

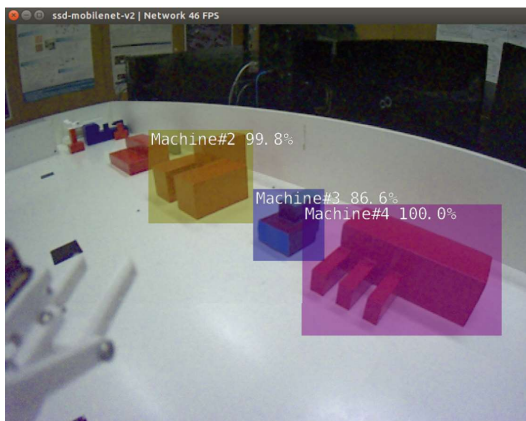
Proces hvatanja dela primenom sistema odlučivanja prikazan je na slici 9. Mogućnost primene sistema vizuelnog upravljanja na bazi dubokog mašinskog učenja u domenu servisnih robota razmatrana je u radu [36]. Sistem dubokog mašinskog učenja na bazi *DeepLabv3+* obučen je da generiše semantičke mape enterijera kancelarija i stanova. Eksperimentalni rezultati pokazuju znatan nivo obučenosti vizuelnog sistema, kao i mogućnost primene različitih metaheurističkih algoritama optimizacije u okviru sistema vizuelnog upravljanja. Analiza efikasnosti sistema dubokog mašinskog učenja primenjenog u okviru robotskog sistema RAICO izvršena je u radu [37]. Različiti tipovi konvolucionih slojeva implementirani su kako bi se ostvario optimalan odnos brzine procesiranja i tačnosti CNN mreže. Ukupno 24 CNN mreže obučene su za zadatak semantičke segmentacije. Optimalna mreža ostvarila je tačnost od 83,6%, a visok nivo efikasnosti potvrđen je ostvarivanjem brzine procesiranja od 42,6 FPS. Optimalna mreža implementirana je u okviru mobilnog robotskog sistema RAICO, a primenjena je za problem izbegavanja prepreka.



Slika 9. Mobilni robot RAICO tokom manipulacije mašinskog dela sa modela mašine alatke [34]

4. PRIMENA TEHNIKA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U OSTVARIVANJU KONCEPTA INDUSTRIJE 4.0

Primena simulacionog softvera AnyLogic radi kreiranja digitalnog blizanca realnog tehnološkog sistema razmatrana je u radovima [38], [39]. Kreirani modeli zasnovani su na statičkoj i dinamičkoj postavci. Dinamički model pruža veću fleksibilnost primene u odnosu na statički, ali je zato kompleksniji za razvoj kod kompleksnih tehnoloških sistema. Fleksibilnost dinamičkog modela ogleda se u mogućnosti modifikacije broja mašina, robota ili bilo kojih drugih tehnoloških entiteta u okruženju na osnovu trenutnog stanja sistema, dobijenog na osnovu pametnih senzora i aktuatora. Eksperimentalna verifikacija ukazuje na mogućnost kreiranja realnog digitalnog blizanca na osnovu obe postavke modela. U okviru rada [40] prikazana je mogućnost inteligentnog upravljanja motora jednosmerne struje, uz detaljno matematičko modeliranje realnog sistema. Veštačke neuronske mreže, kao univerzalni aproksimator, primenjene su radi obezbeđivanja željenog odziva sistema pri različitim ulaznim pobudama. Na osnovu simulacije i realnih eksperimenata, zaključeno je da je inteligentno upravljanje ostvareno sa zadovoljavajućom tačnošću. Razvoj mobilnog robotskog sistema, u okviru Laboratorije za industrijsku robotiku i veštačku inteligenciju, nazvanog DOMINO (engl. *Deep learning-based Omnidirectional Mobile robot with Intelligent cOntrol*), čiji se pogonski sistem zasniva na korišćenju omnidirekcionih točkova prikazan je u radu [41]. Predstavljeni su detalji vezani za izradu mehaničke strukture robota, mehanizma za hvatanje, integraciju stereo vizuelnog sistema, senzora udaljenosti, kao i upravljačke jedinice na bazi računarske platforme *Raspberry Pi 4*. Takođe, prikazan je razvoj modela kretanja na osnovu brzina (engl. *velocity-based motion model*). Na kraju, eksperimentalno je demonstrirana mogućnost mobilnog robota DOMINO da izbegne koliziju i da detektuje prepreke na definisanoj putanji kretanja. Detaljan opis softversko-hardverske integracije sistema percepcije mobilnog robota na bazi dubokog učenja pri detekciji objekata u okruženju prikazan je u radovima [42], [43]. Hardverski deo sistema percepcije podrazumeva odabir upravljačke jedinice, detaljno podešavanje parametara kamera i selekciju sočiva. Analizirane kompjuterske platforme su *Nvidia Jetson Nano* i *Raspberry Pi 4*. Odabrana upravljačka jedinica je *Nvidia Jetson Nano*, primarno zbog grafičke kartice koja omogućava primenu modela dubokog učenja u realnom vremenu.



Slika 10. Detekcija objekata u okruženju

Odabrano je sočivo koje obezbeđuje uže vidno polje kamere uz manju distorziju generisanih slika. Zatim, izvršeno je obučavanje modela dubokog mašinskog učenja na osnovu SDD arhitekture, koji ima mogućnost da u realnom vremenu detektuje objekte (slika 10). Ostvarena tačnost detekcije iznosi 91.85%, dok je prosečno vreme izvršavanja celokupne akvizicije i obrade slike za jednu kameru iznosilo 40 FPSa. Tri različite funkcije cilja, kao i tri različita metaheuristička algoritma na bazi jedinstvenog rešenja, predložena su u okviru sistema vizuelnog upravljanja predstavljenog u radu [44]. Globalna tačnost, zajedničke informacije i mIOU (engl. *mean Intersection over Union*) su tri

predložene funkcije cilja, dok su implementirani algoritmi simuliranog žarenja, gradijentni postupak i 1+1 evolucioni algoritam. Prvenstveno, izvršena je *offline* analiza funkcija cilja, a kao najbolja pokazala se funkcija cilja bazirana na zajedničkim informacijama. Zatim, izvršen je eksperiment vizuelnog upravljanja sa sva tri predložena algoritma i zaključeno je da 1+1 evolucioni algoritam poseduje najbolje optimizacione karakteristike za ovaj tip problema. Primena modela dubokog mašinskog učenja za detekciju radi poboljšanja stereo vizuelnog upravljanja analizirana je u radu [45]. *R-CNN* model konvolucionih neuronskih mreža korišćen je za prepoznavanje mašina alatki u laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja. Zatim je izlaz iz *CNN*-a (region modela mašina alatki) korišćen za detekciju karakterističnih objekata u istom regionu na trenutnoj i željenoj slici. Ova metodologija znatno je povećala robusnost detekcije i uparivanja karakterističnih objekata, a samim tim i celokupanog procesa stereo vizuelnog upravljanja. Eksperimentalna verifikacija u 3D simulaciji i na realnom robotskom sistemu DOMINO potvrdila je tačnost ostvarivanja položaja primenom predloženog algoritma vizuelnog upravljanja.

Kooperacija heterogenih mobilnih robotskih sistema na bazi informacija dobijenih algoritmom dubokog mašinskog učenja za detekciju i praćenje objekata predložena je u radu [46]. Detekcija i praćenje objekata izvršeno je primenom dubokog mašinskog učenja, tj. *YOLOv5* konvolucione neuronske mreže, dok je prosečna tačnost detekcije sedam različitih mašina alatki iznosila 95.3%. Eksperimentalna verifikacija podrazumevala je da su trajektorije oba robota usvojene tako da omogućavaju potencijalnu koliziju. Međutim, kada mobilni robot DOMINO detektuje robot RAICO, zaustavlja se, a zatim u zavisnosti od pozicije detektovanog robota na slici izvršava određene akcije kako bi izbegao koliziju. Primena veštačkih neuronskih mreža u okviru sistema za ocenu položaja robota na bazi ultra širokopojasne radio tehnologije (engl. *Ultra Wide Band - UWB*) razmatra se u okviru rada [47]. Veštačke neuronske mreže primenjuju se za poboljšanje sistema za kalibraciju ocenjenih pozicija emitera radio talasa na bazi ABPE (engl. *Apparent Beacon Position Estimation*) metodologije. Pored povećanja tačnosti, dodatna pogodnost primene veštačkih neuronskih mreža je i u mogućnosti korišćenja izrazito malog broja merenja (pet merenja) kako bi se izvršila predikcija položaja visokog nivoa tačnosti. Optimizacija parametara P/PI kaskadnih upravljačkih sistema CNC mašina alatki razmatrana je u okviru rada [48]. Izvršeno je simultano podešavanje pozicionog P parametra u spoljašnjoj petlji i PI brzinskih parametara unutrašnje petlje kontrolera. Dva metaheuristička algoritma (algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica i algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova) poređena su sa standardnom industrijom metodom za podešavanje parametara upravljačkih sistema u okviru tri metrike. Oba predložena metaheuristička algoritma ostvaruju poboljšanje predloženog sistema i do 60% u pogledu smanjenja maksimalne greške ostvarene trajektorije.

U naučnom radu [49] prikazan je konceptijski razvoj komercijalno najzastupljenijeg tipa malih bespilotnih letelica - kvadrokoptera. Njegove prednosti poput jednostavne mehanike leta, jednostavnosti upravljačkog sistema, manjih dimenzija u poređenju sa drugim tipovima letelica detaljno su objašnjene u ovom radu. Takođe, pokazano je da, u opštem slučaju, vučna sila zavisi od brzine letelice i njenog napadnog ugla, ali i od blizine zemlje. Ono što ovaj tip letelica izdvaja od drugih jeste suprotan smer obrtanja rotora, što za posledicu ima samokompenzovanje reaktivnog momenta nastalog usled obrtanja rotora u vazduhu, ali i značajnoj umanjivanju giroskopskog efekata i mahanja lopatica. Osim navedenog, u radu je predstavljen i glavni razlog nepostojanja repnog rotora kod ovog tipa letelica. Na samom kraju, dato je matematičko modeliranje kvadrokoptera sa usvojenom jednom ravni simetrije. Razvoj novog inteligentnog upravljanja mobilnog robota-letelice prikazan je u radu [50]. U okviru rada, predložen je pristup za rešavanje upravljačkog sistema koji ostvaruje autonomnu navigaciju mobilnog robota-letelice pri čišćenju gabaritnih staklenih površina eksterijera visokih zgrada. Upravljački problem može se prikazati kroz sledeće faze: (1) mobilni robot-letelica postavljen je u proizvoljni položaj u blizini objekta (zgrade koju je potrebno očistiti), (2) aktivira se sistem za detekciju u cilju prepoznavanja i praćenja karakterističnih objekata, (3) određuje se leva i desna ivica zgrade na osnovu osrednjenih vrednosti koordinata regiona u kome se nalazi objekat, međusobno rastojanje između leve i desne ivice (širina zgrade), a zatim ocenjuje udaljenost mobilnog robota-letelice od objekta, (4) tokom prilaska mobilnog robota-letelice zgradi, potrebno je izbeći prepreke (automobili, drveće, ulične svetiljke i sl.) primenom tehnika mašinskog učenja ojačavanjem, (5) određuju se položaji koji definišu granice objekta u horizontalnoj ravni, (6) izvršava se semantička segmentacija staklenih površina sa krajnjim ciljem dobijanja 3D mape staklenih površina, (7) definiše se plan kretanja mobilnog robota-letelice na osnovu inicijalno utvrđenih prioriteta. Da bi se prethodno navedene faze uspešno ostvarile, u radu je predstavljena originalna metodologija za ocenu (estimaciju) udaljenosti objekta proizvoljne početne orijentacije u odnosu na mobilni robot-letelicu, kao i novi algoritam mašinskog učenja ojačavanjem baziran na Q-mašinskom učenju. Radi ostvarivanja visoke tačnosti ocene udaljenosti objekata, neophodno je prvo razviti dovoljno pouzdan sistem za detekciju objekata. Kako modeli dubokog učenja razvijeni poslednjih godina mogu da generišu sve tačnije predikcije i procesiraju podatke u realnom vremenu, u ovom radu korišćen je model konvolucione neuronske

mreže baziran na *Tiny YOLOv2* arhitekturi. U tu svrhu, kreiran je skup podataka od 679 obučavajućih parova koje su autori rada generisali u okviru simulacionog okruženja *Unreal Engine*. Eksperimentalni rezultati za više različitih testova dobijenih korišćenjem modela kreiranog u *Simulink* okruženju pokazali su primenljivost predložene metodologije. Ističe se da je ovo jedan od retkih radova u svetu koji koristi sistem za odlučivanje o narednim akcijama mobilnog robota-letelice u okviru *Simulink* okruženja u kombinaciji sa 3D scenom kreiranom u *Unreal Engine*-u. U referenci [51], prikazan je pristup zasnovan na mašinskom učenju ojačavanjem sa krajnjim ciljem ostvarivanja autonomnog kretanja mobilnog robota-letelice u prepoznatom radnom prostoru - okruženju. Kako navedeni problem zahteva visok stepen prilagodljivosti, kao i sposobnost permanentnog učenja inteligentnog agenta tokom vremena, primenjena je jedna od najzastupljenijih tehnika mašinskog učenja ojačavanjem – mašinsko Q-učenje za realizaciju zadataka simultane lokalizacije i navigacije. Cilj ove metodologije je da, na bazi informacija o početnom i ciljnom položaju, a uz prethodno usvajanje određenih pretpostavki, inteligentni agent nauči optimalnu putanju kretanja. Treniranje, odnosno obučavanje inteligentnog agenta, izvršeno je primenom softverskog paketa *Python*, dok je animacija realizovana u okviru *ROS-Gazebo* okruženja. Rezultati su pokazali da se primenjenom metodom inteligentni agent može uspešno obučiti da ostvari ciljni položaj, uz minimalan broj realizovanih iterativnih koraka mašinskog učenja.

Sistematično prikazani naučno-istraživački rezultati drugog i trećeg radnog paketa projekta MISSION4.0 prikazani su u Tabeli 1. Rezultati su predstavljeni na osnovu Pravilnika o sticanju istraživačkih i naučnih zvanja od decembra 2020. godine³. Kvantitativni pokazatelji aktivnosti promocije i diseminacije naučnih rezultata široj nenaučnoj javnosti mogu se pronaći na sajtu projekta⁴.

Tabela 1. Objavljeni naučni rezultati drugog i trećeg radnog paketa projekta MISSION4.0				
Redni broj	Vrsta rezultata	Reference	Broj rezultata	Bodovi
1.	M13	[29], [37], [39], [41], [43], [44], [45], [49], [50]	9	63
2.	M14	[36]	1	4
3.	M21a	[6], [33]	2	20
4.	M21	[47]	1	8
5.	M31	[48]	1	3,5
6.	M33	[20], [27], [31], [35], [46], [51]	6	6
7.	M51	[17]	1	2
8.	M52	[28], [32]	2	3
9.	M63	[38], [40]	2	1
10.	M85	[42], [18], [34]	3	6
11.	Skupovi podataka	[30], [19]	2	/
			Σ 30	116,5

5. ZAKLJUČAK

U okviru rada sistematično su predstavljeni ključni naučno istraživački rezultati proistekli iz dva radna paketa projekta *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0* - MISSION4.0. Ostvareni rezultati grupisani su u tri kategorije: višekriterijumska optimizacija pri dinamičkom terminiranju fleksibilnih tehnoloških procesa, stereo vizuelno upravljanje inteligentnih mobilnih robota i primena tehnika veštačke inteligenciju u ostvarivanju koncepta Industrije 4.0. U okviru ostvarenih naučno istraživačkih rezultata vezanih za dinamičko višekriterijumsko terminiranje tehnoloških procesa, predstavljeno je detaljno matematičko modeliranje problema. Zatim, predstavljena je razvijena metodologija za problem terminiranja na osnovu metaheurističkih algoritama optimizacije od kojih je GWO algoritam pokazao najbolje performanse. Istraživanja vezana za stereo vizuelno upravljanje mobilnih robotskih sistema bila su fokusirana na primenu tehnika dubokog mašinskog učenja, tj. konvolucionih neuronskih mreža radi obezbeđivanja adekvatnih informacija sistemu percepcije mobilnog robota. Na osnovu informacija generisanih od strane sistema percepcije, razvijen je sistem za stereo vizuelno upravljanje mobilnih robota. Na kraju, predložen je sistem za odlučivanje mobilnih robotskih sistema na bazi konvolucionih neuronskih mreža, čijom primenom je moguće oceniti sigurnost hvatanja mašinskog dela. U okviru rezultata vezanih za primenu tehnika veštačke inteligencije u ostvarivanju koncepta Industrije 4.0, fokus je bio na razvoju CNN modela za rešavanje različitih zadataka mašinskog

³ <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/ministarstva/pravilnik/2020/159/18/reg>

⁴ <http://mission4-0.mas.bg.ac.rs/>

gledanja, na primeni mašinskog učenja ojačavanjem za različite zadatke autonomne navigacije mobilnih robota, kao i na primeni algoritama optimizacije u procesima potrebnim za vizuelno upravljanje.

Sve aktivnosti projekta MISSION4.0 vezane za drugi i treći radni paket, koje su definisane predlogom projekta, veoma su uspešno realizovane, a svi predloženi ambiciozni ciljevi ostvareni su sa značajno više naučno-istraživačkih rezultata nego što je inicijalno predviđeno.

6. LITERATURA

- [1] Kundakci, N., Kulak, O., *Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 96, pp. 31–51, 2016.
- [2] Petrović, M., *Veštačka inteligencija u projektovanju inteligentnih tehnoloških sistema*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, 2016.
- [3] Zhang, S., Wong, T. N., *Flexible job-shop scheduling/rescheduling in dynamic environment: a hybrid MAS/ACO approach*, International Journal of Production Research, Vol. 55, No. 11, pp. 3173–3196, 2017.
- [4] Liu, Y., Wang, L., Wang, Y., Wang, X. V., Zhang, L., *Multi-agent-based scheduling in cloud manufacturing with dynamic task arrivals*, Procedia Cirp, Vol. 72, pp. 953–960, 2018.
- [5] Petrović, M., Miljković, Z., Jokić, A., *A novel methodology for optimal single mobile robot scheduling using whale optimization algorithm*, Applied Soft Computing, Vol. 81, p. 105520, 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105520.
- [6] Petrović, M., Jokić, A., Miljković, Z., Kulesza, Z., *Multi-Objective Scheduling of Single Mobile Robot Based on Grey Wolf Optimization Algorithm*, SSRN, 2022, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4058009>
- [7] Lin, S.-C., Goodman, E. D., Punch III, W. F., *A Genetic Algorithm Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problem.*, ICGA, pp. 481–488, 1997.
- [8] Chen, K. J., Ji, P., *A genetic algorithm for dynamic advanced planning and scheduling (DAPS) with a frozen interval*, Expert systems with Applications, Vol. 33, No. 4, pp. 1004–1010, 2007.
- [9] Al-Hinai, N., ElMekkawy, T. Y., *Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm*, International Journal of Production Economics, Vol. 132, No. 2, pp. 279–291, 2011.
- [10] Yu, M. R., Yang, B., Chen, Y., *Dynamic integration of process planning and scheduling using a discrete particle swarm optimization algorithm*, Advances in Production Engineering & Management, Vol. 13, No. 3, pp. 279–296, 2018.
- [11] Sreevara Reddy, M. B. S., Ratnam, C., Rajyalakshmi, G., Manupati, V. K., *An effective hybrid multi objective evolutionary algorithm for solving real time event in flexible job shop scheduling problem*, Measurement, Vol. 114, pp. 78–90, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.09.022.
- [12] Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M. A., *Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 59, pp. 143–157, 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.04.006.
- [13] Jin, L., Zhang, C., Fei, X., *Realizing energy savings in integrated process planning and scheduling*, Processes, Vol. 7, No. 3, p. 120, 2019, doi: 10.3390/pr7030120.
- [14] Wen, X., Li, X., Gao, L., Wang, K., Li, H., *Modified honey bees mating optimization algorithm for multi-objective uncertain integrated process planning and scheduling problem*, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1177/1729881420925236.
- [15] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A., *Grey Wolf Optimizer*, Advances in Engineering Software, Vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [16] Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., Gandomi, A. H., *The arithmetic optimization algorithm*, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 376, p. 113609, 2021.
- [17] Miljković, K., Petrović, M., *Integrirano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima – pregled stanja u oblasti istraživanja*, Tehnika, Vol. 69, No. 6, pp. 733–746, 2020.
- [18] Miljković, K., Petrović, M., Babić, B., *Dinamičko integrirano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa bazirano na genetičkim algoritmima*, Tehničko rešenje, 2021.
- [19] Miljković, K., Petrović, M., *Dataset of alternative process plan networks for dynamic integrated process planning and scheduling (Version 0.1.0) [Data set]*, Zenodo, 2020.
- [20] Petrović, M., Jokić, A., Miljković, Z., Kulesza, Z., *Multi-Objective Population-based Optimization Algorithms for Scheduling of Manufacturing Entities*, The International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR2022), pp. 403–407, 2022.

- [21] Chaumette, F., Hutchinson, S., *Visual servo control. I. Basic approaches*, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 82–90, 2006, doi: 10.1109/MRA.2006.250573.
- [22] Chaumette, F., Hutchinson, S., *Visual servo control. II. Advanced approaches [Tutorial]*, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 14, No. 1, pp. 109–118, 2007, doi: 10.1109/MRA.2007.339609.
- [23] Collewet, C., Marchand, E., *Photometric Visual Servoing*, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 27, No. 4, pp. 828–834, Aug. 2011, doi: 10.1109/TRO.2011.2112593.
- [24] Bakthavatchalam, M., Chaumette, F., Marchand, E., *Photometric moments: New promising candidates for visual servoing*, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5241–5246, 2013. doi: 10.1109/ICRA.2013.6631326.
- [25] Bateau, Q., Marchand, E., *Histograms-Based Visual Servoing*, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 1, pp. 80–87, Jan. 2017, doi: 10.1109/LRA.2016.2535961.
- [26] Zhang, K., Chaumette, F., Chen, J., *Trifocal tensor-based 6-DOF visual servoing*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 38, No. 10–11, pp. 1208–1228, 2019.
- [27] Đokić, L., Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Biologically Inspired Optimization Methods for Image Registration in Visual Servoing of a Mobile Robot*, 7th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2020), pp. 715–720, 2020.
- [28] Đokić, L., Jokić, A., Petrović, M., Slavković, N., Miljković, Z., *Application of Metaheuristic Optimization Algorithms for Image Registration in Mobile Robot Visual Control*, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 155–170, 2021.
- [29] Jokić, A., Petrović, M., Kulesza, Z., Miljković, Z., *Visual Deep Learning-based Mobile Robot Control: A Novel Weighted Fitness Function-based Image Registration Model*, New Technologies, Development and Application IV (NT 2021). Lecture Notes in Networks and Systems, I. Karabegović, Ed. Springer, Cham, 2021, pp. 744–752.
- [30] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Dataset for semantic segmentation of the laboratory model of manufacturing environment (Version 0.1.0) [Data set]*, Zenodo, 2020.
- [31] Jokić, A., Đokić, L., Petrović, M., Miljković, Z., *A Mobile Robot Visual Perception System based on Deep Learning Approach*, 8th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2021), pp. 568–572, 2021.
- [32] Jokić, A., Đokić, L., Petrović, M., Miljković, Z., *Data Augmentation Methods for Semantic Segmentation-based Mobile Robot Perception System*, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 19, No. 3, in press, 2022.
- [33] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Semantic segmentation based stereo visual servoing of nonholonomic mobile robot in intelligent manufacturing environment*, Expert Systems with Applications, Vol. 190, p. 116203, 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2021.116203.
- [34] Petrović, M., Jokić, A., Babić, B., *Višekriterijumsko odlučivanje inteligentnog mobilnog robota na bazi metoda metaheurističke optimizacije i dubokog mašinskog učenja*, Tehničko rešenje, 2022.
- [35] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Mobile robot decision-making system based on deep machine learning*, 9th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2022), pp. 653–656, 2022.
- [36] Petrović, M., Jokić, A., Kulesza, Z., Miljković, Z., *Deep learning of mobile service robots*, Book Service robots – Advances in Research and Applications, Nova Science Publishers, New York, 2021, pp. 77–97.
- [37] Petrović, M., Miljković, Z., Jokić, A., *Efficient Machine Learning of Mobile Robotic Systems based on Convolutional Neural Networks*, Artificial intelligence for Robotics and Autonomous Systems. Studies in Computational Intelligence, A. Koubaa and A. T. Azar, Eds. Springer, submitted in July 2022.
- [38] Babić, B., Višić, J., Đermanović, A., *Digitalni blizanci u pametnoj proizvodnji i industriji 4.0*, 42. JUPITER konferencija, pp. 1.1-1.11, 2020.
- [39] Babić, B., *Digital twins in smart manufacturing*, Soft Computing in Smart Manufacturing: Solutions toward Industry 5.0. Series Advanced Mechanical Engineering, T. Sibalija and P. Davim, Eds. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2021, pp. 113–134.
- [40] Miljković, K., Petrović, M., Jovanović, R., *Prilog razvoju inteligentnog upravljanja servo motora jednosmerne struje primenom veštačkih neuronskih mreža*, 42. JUPITER konferencija, pp. 4.24-4.35, 2020.
- [41] Đokić, L., Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Design and development of a holonomic mobile robot for material handling and transportation tasks*, New Technologies, Development and Application IV (NT 2021). Lecture Notes in Networks and Systems, I. Karabegović, Ed. Springer, Cham, 2021, pp.

- 709–716.
- [42] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., *Stereo vizuelni sistem percepcije mobilnog robota baziran na dubokom mašinskom učenju*, Tehničko rešenje, 2021.
- [43] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Real-time Mobile Robot Perception based on Deep Learning Detection Model*, New Technologies, Development and Application V (NT 2022). Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham, 2022, pp. 670–677.
- [44] Miljković, Z., Jokić, A., Petrović, M., *Image Registration Algorithm for Deep Learning-Based Stereo Visual Control of Mobile Robots*, Deep Learning for Unmanned Systems. Studies in Computational Intelligence, A. Koubaa and A. T. Azar, Eds. Springer, Cham, 2021, pp. 447–479.
- [45] Miljković, Z., Đokić, L., Petrović, M., *Application of convolutional neural networks for visual control of intelligent robotic systems*, Soft Computing in Smart Manufacturing: Solutions toward Industry 5.0. Series Advanced Mechanical Engineering, T. Sibalija and P. Davim, Eds. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2021, pp. 83–112.
- [46] Miljković, Z., Đokić, L., Petrović, M., *Object detection and tracking in cooperative multi-robot transportation*, 38th International Conference on Production Engineering (ICPE-S 2021), pp. 137–143, 2021.
- [47] Petrović, M., Ciężkowski, M., Romaniuk, S., Wolniakowski, A., Miljković, Z., *A novel hybrid NN-ABPE-based calibration method for improving accuracy of lateration positioning system*, Sensors, Vol. 21, No. 24, p. 8204, 2021, doi: 10.3390/s21248204.
- [48] Miljković, Z., Petrović, M., *A Survey of Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Tuning of Cascade Control Systems: Concepts, Models and Applications*, 5th International Conference “Mechanical Engineering in the 21st Century” (MASING 2020), pp. 3–8, 2020.
- [49] Jevtić, Đ., Svorcan, J., Radulović, R., *Flight Mechanics, Aerodynamics and Modelling of Quadrotor*, New Technologies, Development and Application IV (NT 2021). Lecture Notes in Networks and Systems, I. Karabegović, Ed. Springer, Cham, 2021, pp. 681–689.
- [50] Miljković, Z., Jevtić, Đ., *Object Detection and Reinforcement Learning Approach for Intelligent Control of UAV*, New Technologies, Development and Application V (NT 2022). Lecture Notes in Networks and Systems, I. Karabegović, A. Kovačević, and S. Mandžuka, Eds. Springer, Cham, 2022, pp. 659–669.
- [51] Miljković, Z., Jevtić, Đ., Svorcan, J., *Reinforcement learning approach for autonomous UAV navigation in 3D space*, 14th International Scientific Conference MMA 2021 – Flexible Technologies, pp. 189–192, 2021.

Intelligent stereo-visual mobile robot control and optimal process planning and scheduling – overview of research results within the project MISSION4.0

Abstract: *The project MISSION4.0 was focused on developing intelligent stereo-visual control of mobile robots and optimal process planning and scheduling based on artificial intelligence techniques. Particularly, project team members developed novel convolutional neural networks and biologically inspired optimization algorithms. During two years of intensive scientific research, a new methodology was developed for autonomous navigation and intelligent control of own developed mobile robots RAICO and DOMINO. One of the important goals was to generate an optimal scheduling plan within a manufacturing environment, in which intelligent internal transport is executed using mobile robots. In this paper, we present an overview of some of the key research results of the MISSION4.0 project, such as publications in leading international and national scientific journals, publication of chapters in scientific monographs, scientific papers published in the proceedings of prestigious regional and international conferences, results achieved within verified technical solutions, as well as through the publication of open access data sets.*

Key words: *intelligent mobile robot control, stereo vision, convolutional neural networks, process planning and scheduling, biologically inspired optimization algorithms*