

Laboratorij za autonomne sustave i mobilnu robotiku

Ivan Petrović¹, Marija Seder² i Ivan Marković²

¹ redoviti član, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva

² Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva

Sažetak: Laboratorij za autonomne sustave i mobilnu robotiku (LAMOR) istraživački je laboratorij koji djeluje u okviru Zavoda za automatiku i računalno inženjerstvo Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. LAMOR je jedan od vodećih laboratorija u Republici Hrvatskoj u području robotike, a svoje je istraživačko djelovanje usmjerio na temeljna istraživanja algoritama upravljanja, estimacije i umjetne inteligencije s primjenom u razvoju sustava autonomije mobilnih robota i vozila u nepoznatim i dinamičkim okruženjima te sustava djelotvorne i sigurne interakcije autonomnih mobilnih robota i ljudi. U radu je opisana uspostava laboratorija i prikazan je njegov 20-godišnji razvoj, a potom su predstavljene osnovne informacije o njegovoj istraživačkoj djelatnosti, najznačajnijim znanstvenim postignućima, najvažnijim istraživačkim projektima, međunarodnoj suradnji te doprinosu razvoju znanosti i gospodarstva u Republici Hrvatskoj.

Ključne riječi: istraživački laboratorij, autonomni sustavi, mobilna robotika, interakcija robota i ljudi.

1. Uvod

Nema sumnje da će robotika, kao disruptivna tehnologija, tijekom vremena sve više i više utjecati na sve aspekte ljudskoga života. Glavni izazov robotike u sljedećih nekoliko desetljeća bit će razvoj autonomnih robotskih sustava koji mogu obavljati složene zadatke u ljudskim okruženjima i sigurno surađivati s ljudima sa što manje ograničenja. Misijska i vizija Laboratorija za autonomne sustave i mobilnu robotiku (LAMOR) jest pridonositi rješavanju navedenih glavnih izazova robotike budućnosti. LAMOR je istraživački laboratorij koji djeluje u okviru Zavoda za automatiku i

računalno inženjerstvo Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. LAMOR je jedan od vodećih laboratorija u Republici Hrvatskoj u području robotike, a svoje je istraživačko djelovanje usmjerio na temeljna istraživanja algoritama upravljanja, estimacije i umjetne inteligencije s primjenom u razvoju sustava autonomije mobilnih robota i vozila u nepoznatim i dinamičkim okruženjima te sustava djelotvorne i sigurne interakcije autonomnih robota i ljudi.

U radu su predstavljene osnovne informacije o uspostavi i razvoju LAMOR-a, njegova istraživačka djelatnost, najznačajnija znanstvena postignuća, najvažniji istraživački projekti, međunarodna suradnja te doprinos razvoju znanosti i gospodarstva u Republici Hrvatskoj.

2. Uspostava i razvoj laboratorija LAMOR

Voditelj laboratorija LAMOR, prof. dr. sc. Ivan Petrović, započeo je s istraživanjima u području upravljanja autonomnim mobilnim robotima i vozilima krajem 1990-ih godina u okviru tima za napredno upravljanje (engl. Advanced Control Team) kojemu je voditelj bio prof. dr. sc. Nedjeljko Perić. Kada mu je 2002. na natječaju Ministarstva znanosti i obrazovanja (MZO) prihvaćen znanstveni projekt "Inteligentno upravljanje mobilnim robotima" (2002. – 2007.) prof. Petrović uspostavio je samostalnu istraživačku grupu AMOR za upravljanje mobilnim robotima (engl. Autonomous Mobile Robotics Group – AMOR) iz koje se tijekom vremena razvio današnji Laboratorij za autonomne sustave i mobilnu robotiku (LAMOR) te se 2002. godina s pravom može smatrati godinom uspostave LAMOR-a – dakle, ove godine LAMOR obilježava svoju 20. godišnjicu djelovanja. AMOR je bio prva istraživačka grupa u Republici Hrvatskoj koja se počela sustavno baviti istraživanjima autonomnih mobilnih robota. U početku se istraživačka grupa AMOR sastojala od triju znanstvenih novaka (Kristijan Maček, Edouard Ivanjko i Mišel Brezak), a vrlo brzo se proširila s još dvoje znanstvenih novaka (Marija Seder i Andrej Kitanov). Svi su oni obranili doktorske disertacije i imaju uspješne karijere u sustavu znanosti (Kitanov), visokoga obrazovanja (Ivanjko, Seder) ili industriji kao voditelji istraživačkih timova (Maček, Brezak). Dodatno jačanje istraživačkoga kapaciteta AMOR grupe, odnosno tada već laboratorija LAMOR, dogodilo se 2007. godine, kada je LAMOR postao voditeljem novoga znanstvenoga projekta MZO-a "Upravljanje mobilnim robotima i vozilima u nepoznatim i dinamičkim okruženjima" (2007. – 2013.), koji je omogućio proširenje istraživačkoga tima s još dva znanstvena novaka (Ivan Marković i Srećko Jurić-Kavelj).

Punopravno članstvo Republike Hrvatske u 7. okvirnom programu Europske unije (EU FP7, 2007. – 2013.) otvorilo je nove prilike za financiranje jačanja istraživačkih

kapaciteta i istraživačkih aktivnosti na hrvatskim sveučilištima i znanstvenim institutima. LAMOR je tu priliku iskoristio tako da je pokrenuo i koordinirao EU FP7 projekt „ACROSS - Centre of Research Excellence for Advanced Cooperative Systems“ (2011. – 2015.; tada najveći EU projekt u Hrvatskoj s proračunom 3,35 milijuna EUR-a). Projekt ACROSS omogućio je LAMOR-u zapošljavanje šest novih istraživača i nabavu kapitalne znanstvene opreme u vrijednosti oko 450 tisuća EUR-a.

Od 2015. godine LAMOR je kao koordinator uključen u rad Istraživačke jedinice za napredne kooperativne sustave Znanstvenoga centra izvrsnosti za znanost o podacima i kooperativne sustave (ZCI) koji uključuje istraživače iz 13 hrvatskih znanstvenih institucija s pet sveučilišta. Uz zapošljavanje troje novih istraživača, ZCI je LAMOR-u omogućio umrežavanje s najboljim istraživačkim laboratorijima u Republici Hrvatskoj koji provode komplementarna istraživanja.

U ovome času LAMOR-ov tim broji 20 djelatnika: troje nastavnika (Petrović, Seder, Marković), tri iskusna istraživača s doktoratom znanosti, dvanaest doktoranada te dvije administrativno-financijske voditeljice projekata. U tijeku je uspostava nove istraživačke grupe u LAMOR-u za primjenu umjetne inteligencije u robotici, koja se odvija u okviru šestogodišnjega projekta „AIFORS - ERA Chair in Artificial Intelligence in Robotics“ financirana s 2,5 milijuna EUR-a iz okvirnoga programa Obzor 2020 Europske unije. U tome smislu očekujemo da će se do kraja 2022. godine tim LAMOR-a povećati na 25 do 30 djelatnika.

3. Istraživačka djelatnost LAMOR-a

U prvim godinama djelovanja istraživačka je djelatnost u LAMOR-u bila usredotočena na razvoj algoritama za autonomnu navigaciju mobilnih robotskih platformi u zatvorenim unutarnjim prostorima, uz pretpostavku da se roboti gibaju po ravnim vodoravnim površinama i da percepcijski senzori daju dvodimenzionalne (2D) informacije o prostoru, tj. samo udaljenosti do prepreka u okruženju robota u vodoravnoj ravnini određenoj visinom njihove pozicije na robotskoj platformi. Najviše korišteni percepcijski senzori bili su 2D ultrazvučni i laserski senzori udaljenosti. Izgrađene su karte prostora bile dvodimenzionalne te su položaj robota i putanja njegova gibanja mogli biti određivani samo u 2D prostoru. Algoritmi za autonomnu navigaciju u 2D prostorima omogućuju primjenu autonomnih mobilnih robota samo u unutarnjim prostorima i to u primjenama u kojima se ne traži kohabitacija i suradnja robota s ljudima jer percepcijski senzori ne pružaju dovoljno informacija da bi se mogla jamčiti sigurnost ljudi u okruženju robota. Primjeri uspješnih primjena algoritma za autonomnu navigaciju u 2D prostorima jesu autonomni usisavači, autonomna vozila za prijevoz tereta u proizvodnim halama i skladištima i sl.

Međutim, roboti djeluju u trodimenzionalnom (3D) prostoru i od budućih se robota očekuje da potpuno autonomno obavljaju složene zadatke umjesto ljudi ili u suradnji s ljudima u širokom spektru primjena u unutarnjim i vanjskim prostorima. Istraživačka strategija LAMOR-a usklađena je s tim očekivanjima od budućih robota pa su istraživačke aktivnosti u LAMOR-u usmjerene na sljedeće četiri ključne istraživačke domene:

1. Robotska percepcija i višesenzorska fuzija – cilj je istraživanja pružiti robotima sposobnost razumijevanja i interpretacije okruženja u kojemu djeluju.
2. Lokalizacija robota i kartiranje prostora – cilj je istraživanja omogućiti robotima da na osnovi informacija iz svojih senzora autonomno određuju svoj položaj u prostoru te da izgrađuju kartu prostora.
3. Planiranje i upravljanje gibanjem robota – cilj je istraživanja omogućiti robotima učinkovito i sigurno gibanje u prostoru na temelju informacija dobivenih od modula za percepciju, lokalizaciju i kartiranje.
4. Sigurna interakcija robota s ljudima – cilj je istraživanja omogućiti kohabitaciju i suradnju autonomnih mobilnih robota i ljudi u istome okruženju.

U nastavku dajemo kratak pregled istraživačkih aktivnosti u LAMOR-u u svakoj od njegovih četiriju ključnih istraživačkih domena.

3.1. Robotska percepcija i višesenzorska fuzija

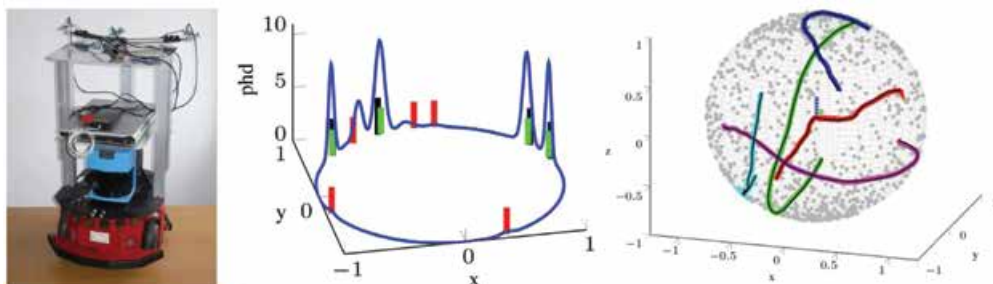
Istraživanja u području robotske percepcije dominantno su usredotočena na detekciju i praćenje gibajućih objekata i na prepoznavanje mjesta. U istraživanjima najčešće pretpostavljamo kamere kao percepcijske senzore, ali se zbog povećanja robusnosti percepcije u većini primjena moraju koristiti i drugi senzorski modaliteti (lidari, radari, termokamere ...) pa istražujemo i algoritme višesenzorske fuzije.

Modul za detekciju i praćenje gibajućih objekata vrlo je važan dio sustava za autonomiju mobilnih robota jer omogućuje zaključivanje o trenutačnom položaju objekata u okruženju kao i njihovim budućim trajektorijama, što je preduvjet za planiranje učinkovitog i sigurnog gibanja robota kroz prostor. Zadaća je modula estimirati broj gibajućih objekata u sceni i njihova stanja, što je otežano šumom u senzorskim podacima, lažnim mjerenjima (mjerenja koja nisu došla od samih objekata) i nepoznavanjem funkcije pridruživanja mjerenja i objekata. To može imati za posljedicu da broj mjerenja ne odgovara broju gibajućih objekata u sceni i da nije uvijek jasno koji je objekt uzrokovao koje mjerenje. Za detekciju i praćenje gibajućih objekata razvijene su metode zasnovane na (i) vjerojatnosnom pridruživanju (engl. probabilistic data association, PDA), (ii) praćenju više hipoteza (engl. multiple-hypothesis tracking, MHT) i (iii) slučajnim konačnim skupovima (engl. random finite sets, RFS).

LAMOR je u ovome području napravio nekoliko vrijednih doprinosa. Jedan od prvih doprinosa bilo je praćenje govornika poljem mikrofona na robotskoj platformi (Slika 1). Mjerenja smo modelirali kružnom von Misesovom razdiobom uvažavajući činjenicu da je poljem mikrofona moguće odrediti samo kut, a ne i udaljenost do izvora zvuka [1]. Potom smo razvili filtre gustoće hipoteze vjerojatnosti (engl. Probability Hypothesis Density Filter) s mogućnošću praćenja objekata na ne-Euklidskim geometrijama, poput kružnice, sfere i Lievih grupa (primjeri su prikazani na Slici 1) [2], [3]. Time se intrinzično u obzir uzima geometrija prostora i ispravno se modeliraju nesigurnosti. Također smo za PDA metode razvili pristup koji omogućuje praćenje više gibajućih objekata na sferi te općenito Riemannovim mnogostrukostima [4], [5]. Nadalje, nesigurnost senzora poput radara i stereokamera može se točnije modelirati na Lievim grupama za što smo razvili PDA metodu za praćenje vozila fuzijom tih senzora [6]. Primjer praćenja gibajućih objekata i eksperimentalni postav senzora prikazan je na Slici 2. Sličnu teoretsku pozadinu filtra na Lievim grupama iskoristili smo i na problemu estimacije položaja čovjeka. Slika 3 prikazuje snimku evaluacije predloženoga pristupa koji je zasnovan na proširenom Kalmanovu filtru na Lievim grupama (LG-EKF) te model opisa kinematike ljudskoga tijela [7].

Da bi se osigurala robusna percepcija autonomnih sustava, često je nužno koristiti više heterogenih senzora koji zbog različitih fizikalnih načela mjerenja stanja okruženja omogućuju određenu razinu redundantnosti. Međutim, za fuziju informacija sustava heterogenih percepcijskih senzora potrebno je njegovo ekstrinzično i vremensko umjeravanje, odnosno određivanje relativne transformacije između senzora i njihovih satova, kako bi se mjerenja mogla dovesti u ispravan odnos. LAMOR je razvio opću metodu za ekstrinzično i vremensko umjeravanje koja je zasnovana na estimaciji primjenom Gaussovih procesa [8].

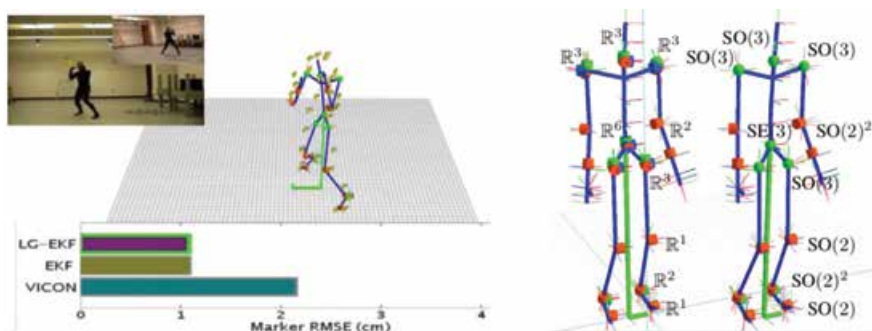
Naši aktualni istraživački izazovi u ovome području odnose se na razvoj metoda estimacije stanja na tangencijalnom svežnju Riemannovih mnogostrukosti i metoda ekstrinzičnoga umjeravanja heterogenih senzorskih sustava estimacijom vlastitih trajektorija te njihovom fuzijom s metodama koje smo već razvili.



Slika 1: Mobilni robot s poljem mikrofona (lijevo) te primjeri praćenja izvora zvuka na kružnici (sredina) i sferi (desno) uz prisustvo šuma i lažnih mjerenja



Slika 2: Primjer praćenih objekata fuzijom radara i stereokamere (lijevo). Žute kružnice su praćeni objekti, zelene su mjerenja radara, a crveni pravci predstavljaju optički tok uzrokovan gibajućim objektima (desno)



Slika 3: Estimacija položaja čovjeka pomoću metoda filtriranja na Lievim grupama. Primjer eksperimentalne evaluacije (lijevo) i modela kinematike ljudskog tijela (desno)

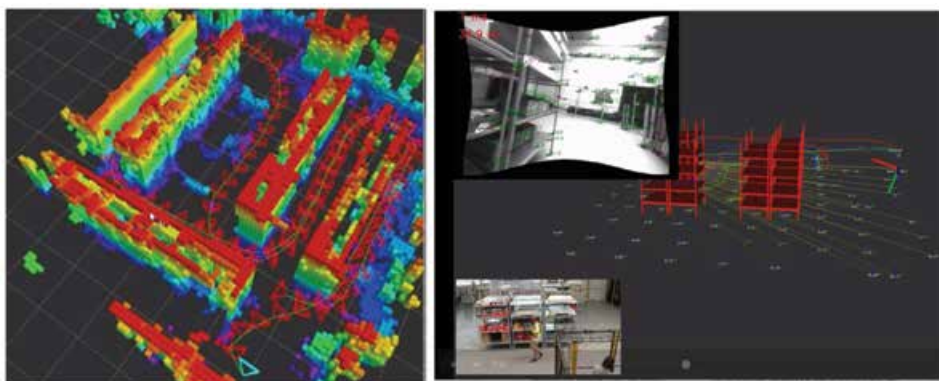
3.2. Lokalizacija robota i kartiranje prostora

Istodobna lokalizacija robota i kartiranje prostora (engl. Simultaneous Localization And Mapping, SLAM) ključni je modul sustava autonomije robota u novim nepoznatim prostorima. SLAM je zahtjevan problem jer robot mora istodobno graditi kartu nepoznatoga prostora i lokalizirati se u njoj (Slika 4, lijevo). Najčešće su pristupi SLAM-u zasnovani na vizualnim sensorima ili lidarima (dodatno potpomognutima odometrijom s kotača ili inercijskim mjernim jedinicama), ali se u zadnje vrijeme koriste i napredne inačice radarskih senzora s pojačanom rezolucijom te događajne kamere [9]. SLAM se sastoji od dvaju podmodula: prvi je zadužen za izlučivanje informacija iz senzorskih mjerenja i određivanje trajektorije senzora (odometrija), a drugi je zadužen za osiguranje globalno konzistentne estimacije trajektorije jer zbog šuma mjerenja odometrijski modul često zna biti opterećen sustavnim pogreškama.

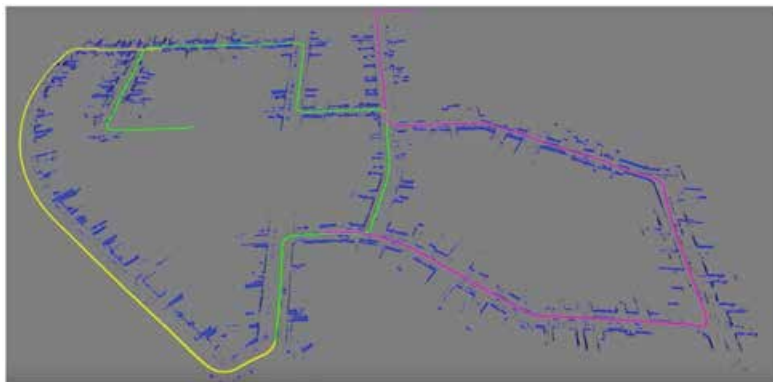
U ovome je području LAMOR napravio značajne istraživačke iskorake. U [10] smo predstavili tzv. SOFT stereovizualnu odometriju i na njoj zasnovan SLAM, koja je postigla najbolji rezultat među vizualnim pristupima na javno dostupnom podatkov-

nom skupu KITTI na kojemu istraživači iz cijeloga svijeta evaluiraju svoje algoritme vizualne odometrije i SLAM-a. Taj je rezultat predstavljen 2017. godine, a nedavno je LAMOR razvio i SOFT2 inačicu stereovizualne odometrije koja je na podatkovnom skupu KITTI pobijedila čak i pristupe zasnovane na lidarima [11]. To je postignuće dobrim dijelom i rezultat iznimno točnoga umjeravanja stereovizijskoga sustava [12]. Vizualna odometrija i SLAM također su korišteni za lokalizaciju radnika u robotiziranom skladištu (Slika 4, desno), gdje je sustav kamera bio smješten na prsluku u lumbalnom dijelu leđa kako bi što manje ometao radnika u njegovu radu [13]. Nadalje, razvili smo i SLAM s 3D lidarom zasnovan na registraciji planarnih površinskih segmenata [14]. Slika 5 prikazuje proces kooperativne izgradnje karte grada gdje tri različita vozila opremljena 3D lidarima zasebno grade lokalne karte koje se u oblaku spajaju u jednu globalno konzistentnu kartu. LAMOR je također razvio i teorijske osnove za nove metode estimacije za SLAM zasnovane na proširenome informacijskome filtru na Lievim grupama [15], [16]. Na koncu, u suradnji s istraživačima sa Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, razvili smo metodu za prepoznavanje mjesta pomoću planarnih površina i linijskih segmenata [17] te metodu uparivanja nizova slika pomoću značajki dobivenih dubokim neuronskim mrežama [18]. Prepoznavanje mjesta koja je robot ranije posjetio ključno je za osiguranje globalno konzistentne estimacije trajektorije jer omogućuje tzv. “zatvaranja petlje” u SLAM-u kada se ispravljaju akumulirane sustavne pogreške odometrije uzrokovane zašumljenim mjerenjima pomaka odometrijom. Problem prepoznavanja mjesta vrlo je izazovan jer se vremenom prostor može mijenjati, npr. zbog mijenjanja rasporeda namještaja u zatvorenom prostoru ili promjene godišnjih doba (Slika 6).

Naši aktualni istraživački izazovi u ovome području odnose se na odometriju i SLAM s događajnim kamerama, semantičko-geometrijski SLAM te korištenje dubokih neuronskih mreža u procesu estimacije vlastitoga gibanja kamere.



Slika 4: Primjer istodobne lokalizacije i kartiranja prostora stereokamerom (lijevo) i lokalizacija radnika u robotiziranom skladištu sustavom kamera instaliranih na njegovu prsluku (desno)



Slika 5: Primjer kooperativne izgradnje karte s tri vozila i 3D lidarom.



Slika 6: Prepoznavanje mjesta kamerom – varijacije u dobu dana i godišnjem dobu.

3.3. Planiranje i upravljanje gibanjem robota

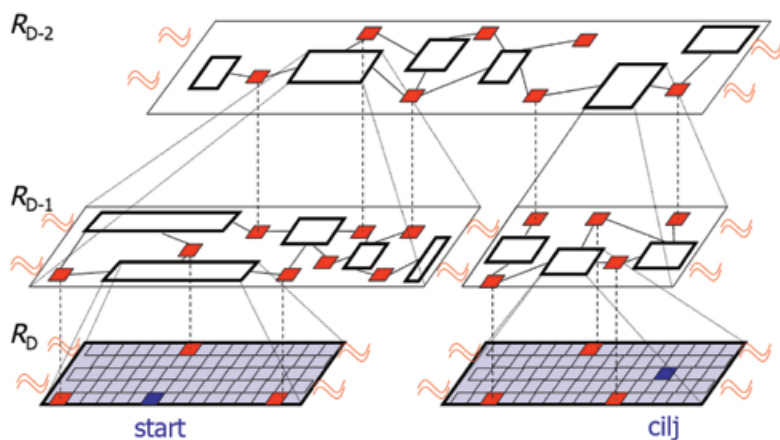
Algoritmi planiranja i upravljanja gibanjem izračunavaju trajektorije gibanja robota na temelju karakteristika i stanja robota i stanja okruženja koje dobiva od modula za

percepciju i modula za lokalizaciju i kartiranje te zadatka koji robot treba izvršiti. Istraživanja u LAMOR-u dominantno su usredotočena na planiranje i upravljanje gibanjem mobilnih robotskih platformi i vozila u složenim dinamičkim okruženjima, a u zadnjih nekoliko godina i planiranjem gibanja u visokodimenzionalnim prostorima za redundantne robote s velikim brojem stupnjeva slobode.

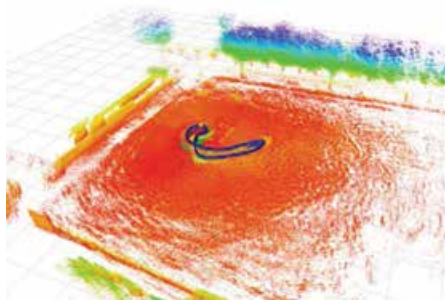
Metode planiranja i upravljanja gibanjem mobilnih robotskih platformi i vozila mogu se ugrubo podijeliti u dvije skupine: (1) metode koje prvo planiraju geometrijsku putanju robota te ju potom zaglađuju i generiraju trajektoriju robota poštujući njegova kinematička i dinamička ograničenja i (2) metode koje upravljaju gibanjem robota minimizacijom navigacijske funkcije radi dostizanja ciljne pozicije u prostoru. LAMOR je ostvario značajne doprinose u objema navedenim skupinama metoda.

Prvoj skupini metoda planiranja i upravljanja gibanjem mobilnih robotskih platformi i vozila pripada naša tzv. TWD* metoda planiranja geometrijske putanje mobilnoga robota [19]. Metoda pronalazi najkraću moguću putanju u mrežastoj karti zauzeća prostora s najmanjim mogućim brojem promjena smjera putanje i s proizvoljnim kutovima promjene smjera. Dodatno, razvili smo i hijerarhijski algoritam planiranja geometrijskih putanja u vrlo velikim prostorima [20], kao što su primjerice prostori sastavljeni od više katova ili čak više zgrada. Algoritam radi hijerarhijsku apstrakciju modela prostora da bi smanjio složenost grafa mogućih putanja, a samo na donjoj, najdetaljnijoj razini, izračunava parcijalne putanje između ključnih točaka u prostoru kao što su položaj vrata, raskrižja putova i slično, dok na višim razinama koristi te parcijalne putanje kao veze između apstraktnih čvorova, čime ubrzava izračun puta u grafu (Slika 7). Za zaglađivanje isplaniranih geometrijskih putanja razvili smo algoritam zasnovan na klotoidama [21] koji ih izračunava u stvarnome vremenu. Prednosti primjene klotoida proizlaze iz njihova linearnog profila zakrivljenosti koji omogućuje uključanje ograničenja bočnih, translacijskih i rotacijskih ubrzanja robota te posljedično vremenski optimalno gibanje robota dok slijedi zaglađenu putanju. Opisana je metoda posebno pogodna u primjenama u kojima je potrebno osigurati da robot/vozilo što točnije slijedi zadanu putanju gibanja, npr. iscrpno prekrivanje prostora za njegovo čišćenje, razminiranje (Slika 8) i sl. Nadalje, razvili smo i tzv. HE* metodu [22] koja integrira planiranje i zaglađivanje puta, čime se izbjegava potreba naknade provjere moguće kolizije zaglađenoga puta s preprekama.

Drugo skupini metoda planiranja i upravljanja gibanjem mobilnih robotskih platformi i vozila pripada naša metoda zasnovana na navigacijskoj funkciji i algoritmu s pomičnim horizontom [23], [24]. Navigacijska funkcija slična je kontinuiranoj funkciji umjetnih potencijalnih polja, ali nema lokalnih minimuma, nego samo globalni minimum u ciljnoj poziciji robota. Metoda generira navigacijsku funkciju interpolacijom diskretnih cijena puta do cilja, čime je postignuta računska jednostavnost. Algoritam s pomičnim horizontom izračunava moguće lokalne trajektorije robota optimizacijom prema iznosima navigacijske funkcije po njegovim



Slika 7: Hijerarhijska apstrakcija velikih prostora od najdetaljnije razine RD do najapstraktnije.



Slika 8: Vozilo KOMODO tvrtke DOK-ING izvodi algoritam patroliranja na prostoru 200x200 m² prikazanog oblakom točaka senzora Velodyne.

moogućim budućim stanjima u zadanome vremenskom horizontu. Moguće lokalne trajektorije robota dobiju se evolucijom stanja na osnovi njegova kinematičkoga modela na koje su primijenjene upravljačke veličine (brzine robota). Optimalna je lokalna trajektorija robota ona koja ostvaruje minimum prema iznosima navigacij-

ske funkcije i njezina se prva upravljačka vrijednost prosljeđuje robotu određujući njegovo gibanje. Opisani se postupak ponavlja u svakom vremenskom intervalu upravljačkoga algoritma sve dok robot ne dođe u ciljnu poziciju. Na Slici 9 prikazana je primjena algoritma na svesmjernome robotu složenog oblika. Opisana je metoda posebno pogodna za navigaciju u izrazito dinamičnim prostorima (npr. gdje zajedno rade roboti i ljudi) jer omogućuje brzo replaniranje putanje pri pojavi nepoznatih prepreka na putanji robota.

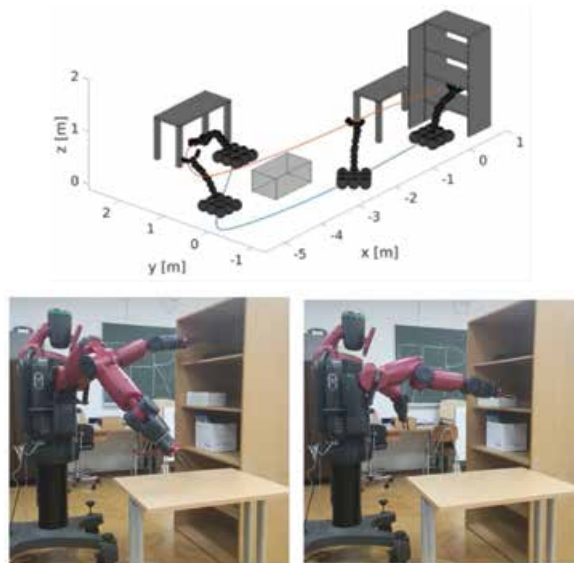


Slika 9: Navigacija svesmjernoga robota Kuka OmniRob u uskom prolazu.

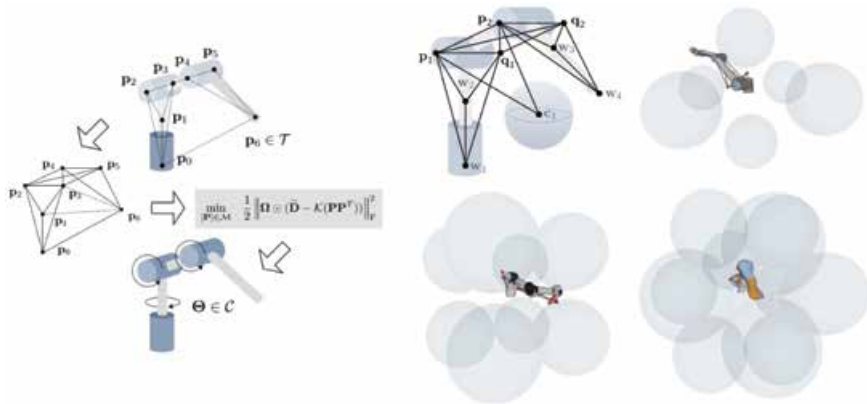
Opisane metode planiranja i upravljanja gibanjem mobilnih robotskih platformi pretpostavljaju da je karta prostora poznata pa nisu primjenjive u nepoznatim prostorima kada je uz problem planiranja istodobno potrebno rješavati i SLAM problem. Algoritmi planiranja u nepoznatim prostorima trebaju osigurati potpuno autonomnu izgradnju cjelovite i točne karte prostora u što kraćem vremenu, što je zahtjevan zadatak. U LAMOR-u smo razvili algoritam koji minimizira duljinu putanje robota potrebne za cjelovito modeliranje prostora [25], [26] i algoritam koji ciljano prolazi i kroz područja prostora koja su već modelirana radi poboljšanja točnosti modela [27].

Metode planiranja gibanja mobilnim robotskim platformama nisu prikladne za planiranje gibanja u visokodimenzionalnim prostorima za redundantne robote s velikim brojem stupnjeva slobode jer se povećanjem dimenzionalnosti prostora njihova računska složenost jako povećava. Noviji pristupi planiranju gibanja u visokodimen-

zionalnim prostorima zasnivaju se na optimizaciji trajektorija. LAMOR je u ovome području napravio nekoliko doprinosa. Glavni se doprinosi odnose na rješavanje problema lokalnih minimuma pri optimizaciji trajektorija modeliranih kontinuiranim Gaussovim procesima. U [28] smo predstavili metodu zasnovanu na heteroskedastičnim Gaussovim procesima i stohastičkoj optimizaciji, a u [29] metodu s mješavinama Gaussovih procesa s mogućnošću uključivanja nediferencijabilnih ograničenja. Metode su testirane na problemu planiranja gibanja mobilnoga manipulatora s 10 stupnjeva slobode i dvoručnoga robotskog manipulatora s 14 stupnjeva slobode (Slika 10). Nadalje, planiranje gibanja u visokodimenzionalnim prostorima zahtijeva i rješavanje problema singulariteta i inverzne kinematike, što je složen zadatak za redundantne robotske konfiguracije s velikim broje stupnjeva slobode. U [30] smo predstavili metodu praćenja približavanja robota singularitetima zasnovanu na Riemannovim mnogostrukostima koja omogućuje uključivanje metrike u metode planiranja gibanja s ciljem da robot bude što je više moguće udaljen od singulariteta. U [31] i [32] smo predstavili novi pristup modeliranju kinematike robota i ograničenja zasnovan na invarijantnim udaljenostima ključnih točaka robotske konfiguracije. Geometrija udaljenosti točaka može se povezati s Gram matricama fiksnoga ranga, što predstavlja Riemannovu mnogostrukost i otvara mogućnost korištenja postojećih metoda optimizacije razvijenih za takve geometrije. Ilustracija je ovih pristupa prikazana na Slici 11. Naši aktualni istraživački izazovi u ovome području odnose se na razvoj metoda planiranja gibanja koje uključuju i dinamičke objekte, uzimajući u obzir i nesigurnosti njihova stanja, te na korištenje grafovskih neuronskih mreža za rješavanje problema inverzne kinematike.



Slika 10: Planiranje gibanja mobilnoga manipulatora (lijevo) i dvoručnoga robotskog manipulatora (desno)



Slika 11: Ilustracija modeliranja kinematike robotskog manipulatora euklidskim udaljenostima između ključnih točaka (lijevo) te planiranje gibanja različitih manipulatora u prostoru s više prepreka (desno)

3.4. Sigurna interakcija robota s ljudima

Svakodnevna interakcija robota i ljudi neminovna je bliska budućnost. Međutim, osim učinkovite suradnje, nužno je da ta interakcija bude i sigurna za ljude. Jedan od ključnih istraživačkih izazova učinkovite i sigurne interakcije robota i ljudi jest estimacija namjere i djelovanja čovjeka. Problem je vrlo izazovan jer se namjera ne može izravno mjeriti, nego robot o namjeri čovjeka s kojim surađuje mora zaključivati iz konteksta i samoga djelovanja čovjeka. Nadalje, algoritmi estimacije namjere čovjeka moraju biti i računski učinkoviti da bi se mogli koristiti tijekom interakcije. Algoritmi estimacije namjere ljudi najčešće se zasnivaju na Markovljevim procesima odlučivanja, skrivenim Markovljevim procesima i dubokim neuronskim mrežama.

U ovome je području LAMOR započeo istraživanja sa svrhom estimacije djelovanja čovjeka u robotiziranim skladištima [33]. Cilj je toga istraživanja bio prepoznavanje namjere radnika, odnosno prepoznavanje u koji je od konačnoga broja ciljeva radnik krenuo. Ta se informacija koristi za uočavanje odstupanja cilja radnikove kretnje od planiranoga cilja, kako bi se pravovremeno replanirale putanje robota u skladištu i time zadržala učinkovitost rada cijeloga skladišta. Provođenje eksperimenata za testiranje razvijenih algoritama u stvarnom robotiziranom skladištu (Slika 12, lijevo) jako je zahtjevno jer su skladišta u funkciji cijeli dan i noć te ne postoji mogućnost mijenjanja konfiguracije prostora. Iz toga su razloga predloženi i provedeni eksperimenti u virtualnoj stvarnosti (Slika 12, sredina) gdje je bilo moguće vrlo jednostavno mijenjati konfiguraciju prostora i ponašanje robota. Nadalje, u nešto drugačijem kontekstu, razvili smo i algoritam estimacije čovjekove namjere u suradnim prostorima [34] gdje algoritam treba odrediti koji objekt u prostoriji čovjek namjerava uzeti (Slika 12, desno). Algoritam je zasnovan na dubokim povratnim neuronskim mrežama koje su

učene na signalima poput položaja čovjekove ruke i smjera gledanja. Aktualna istraživanja u LAMOR-u odnose se na uključivanje estimacije namjere čovjeka u proces planiranja gibanja robota i uočavanje suptilnih signala ponašanja pomoću vizualnih senzora radi što točnije i pravovremene estimacije namjere čovjeka.



Slika 12: Fotografija robotiziranoga skladišta projektnoga partnera Swisslog (lijevo), eksperiment u virtualnom skladištu (sredina) i primjer eksperimenta za procjenu djelovanja čovjeka u suradnom prostoru (desno)

4. Najznačajniji rezultati istraživačkoga djelovanja LAMOR-a

4.1. Znanstvenoistraživački rezultati

Istraživači LAMOR-a objavili su rezultate svojih istraživanja u više od 70 radova u časopisima i poglavljima u znanstvenim knjigama (od toga 55 radova u časopisima u bazi WoS Core Collection) te u više od 220 radova u zbornicima radova znanstvenih skupova. Ti su radovi do sada citirani više od 1500 puta u bazi Web of Science, više od 2400 puta u bazi SCOPUS i više od 4100 puta u bazi Google Scholar. Osim toga, objavili su oko 50 stručnih radova, studija, elaborata i tehničkih izvještaja. Na međunarodnim znanstvenim skupovima, dva su rada članova LAMOR-a dobila nagradu za najbolji članak (engl. Best Paper Award), a dva za najbolji studentski članak (engl. Best Student Paper Award). Nadalje, za svoja su znanstvena postignuća članovi LAMOR-a dobili više od 20 nagrada i priznanja; od FER-a, Sveučilišta u Zagrebu, HATZ-a, HAZU-a, državnih tijela i inovacijskih sajмова. U laboratoriju je obranjeno 19 doktorskih disertacija, a trenutačno je 14 studenata na doktorskome studiju pod mentorstvom nastavnika LAMOR-a. Također, u svoja istraživanja redovito uključujemo studente diplomskoga studija tako da je više od 200 studenata izradilo svoje diplomske radove u laboratoriju.

4.2. Istraživački projekti

Istraživačka djelatnost LAMOR-a dominantno je financirana sredstvima projekata prihvaćenih na kompetitivnim natječajima. Samo su plaće troje nastavnika (Petro-

vić, Seder, Marković) financirane sredstvima iz državnoga proračuna, dok su plaće svih ostalih, sadašnjih i bivših članova LAMOR-a financirane sredstvima ugovorenih projekata. U LAMOR-u je od njegova osnivanja do sada provedeno ili je još uvijek u provedbi ukupno 27 međunarodnih znanstvenih projekata (od toga 1 FP5, 1 FP6, 4 FP7 i 7 H2020 projekata) i 32 domaća znanstvena i stručna projekta. Ukupna financijska vrijednost tih projekata iznosi oko 18 milijuna EUR-, od čega je po oko 8 milijuna EUR-a vrijednost projekata financiranih iz okvirnih programa Europske unije i iz Europskog fonda za regionalni razvoj.

U drugome poglavlju ukratko smo naveli doprinose projekata koji su dominantno pridonijeli razvoju istraživačkih kapaciteta LAMOR-a, a u nastavku ukratko opisujemo rezultate 10 odabranih znanstvenoistraživačkih i razvojno-istraživačkih projekata:

1. SafeLog – Safe human-robot interaction in logistic applications for highly flexible warehouses, EU H2020 project, H2020-ICT-2015, Project No.: 688117 (<http://safelog-project.eu/>). LAMOR je razvio holistički sigurnosni koncept interakcije robota i ljudi u skladištima zasnovan na sigurnosnom prsluku koji je opremljen kamerama, antenama i drugim senzorima.
2. L4MS – Logistics for Manufacturing SMEs, EU H2020 project, H2020-FOF-2017, Project No.: 767642 (<http://www.l4ms.eu/>). LAMOR je razvio algoritme navigacije mobilnih robotskih platformi za skladišta te ih provjerio u skladištu projektnoga partnera.
3. RoboCom++ – Rethinking Robotics for the Robot Companion of the future, FLAG-ERA JTC 2016, Joint Transnational Call – Topic: Cooperative Robots (<http://robocomplusplus.eu/>). LAMOR je razvio algoritme za računski učinkovitu gustu detekciju gibajućih objekata u slici i praćenje gibanja ljudi.
4. EOLO – Wind generator remote inspection system, European FP7 project, FoF-ICT-2013.7.1 Project No. 608849. LAMOR je razvio algoritam istodobne lokalizacije drona za inspekciju vjetroturbina i kartiranje prostora zasnovan na stereoviziji.
5. CloudSLAM – Cooperative cloud based simultaneous localization and mapping in dynamic environments, Unity Through Knowledge Fund, Grant No. 24/15 (<https://cloudslam.fer.hr/>). LAMOR je razvio algoritme za kooperativnu višerobotsku istodobnu lokalizaciju i izgradnju konzistentne globalne karte prostora u oblaku.
6. ThermalMapper – Thermal 3D Modeling of Indoor Environments for Saving Energy, SEE-ERA.NET Plus, Joint European Research Project, Ref. Nr ERA 14/01. LAMOR je razvio algoritme planiranja gibanja robota u nepoznatome prostoru koji osiguravaju autonomno istraživanje prostora i izgradnju cjelovite geometrijske i toplinske karte prostora.

7. A-UNIT – Istraživanje i razvoj napredne jedinice za autonomno upravljanje mobilnim vozilima u logistici, Europski fond za regionalni razvoj, IRI II, korisnik Gideon Brothers d.o.o., OPKK 2014.-2020. LAMOR razvija algoritme dinamičkoga planiranja gibanja mobilnih vozila u velikim skladištima koji osiguravaju sigurno i učinkovito gibanje robota između gibajućih objekata i ljudi te algoritme umjeravanja senzora na mobilnom vozilu.
8. SafeTRAM – Sustav za povećanje sigurnosti vožnje javnog urbanog tračničkog prometa, Europski fond za regionalni razvoj, IRI, korisnik Končar – Institut za elektrotehniku d.d., OPKK 2014.-2020. LAMOR je razvio algoritme za detekciju i praćenje gibajućih objekata ispred urbanoga tračničkog vozila te algoritme za lokalizaciju vozila s ciljem pomoći vozaču vozila u sigurnosno kritičnim prometnim situacijama.
9. DUV-NRKBE – Razvoj daljinski upravljana vozila za djelovanje u ekstremnim NRKBE uvjetima, Europski fond za regionalni razvoj, IRI, korisnik Dok-Ing d.o.o., OPKK 2014.-2020. LAMOR je razvio algoritme koji omogućuju autonomiju daljinski upravljana vozila u ekstremnim NRKBE uvjetima u slučaju gubitka komunikacije vozila i stanice za daljinsko upravljanje.
10. EKO-KOMVOZ – Ekološki prihvatljivo vozilo za čišćenje javnih površina sa sustavima autonomnog upravljanja zasnovanim na umjetnoj inteligenciji, Europski fond za regionalni razvoj, IRI II, korisnik RASCO tvornica komunalne opreme, d.o.o., OPKK 2014.-2020. LAMOR razvija algoritme za percepciju i interpretaciju scene ispred vozila za čišćenje koji su dio sustava pomoći vozaču vozila u obavljanju zadataka čišćenja.

4.3. Međunarodna suradnja

LAMOR je tijekom svoga djelovanja postao prepoznat i u međunarodnim okvirima kao relevantan laboratorij za istraživanja u području autonomnih i robotskih sustava, što se najviše ogleda u međunarodnoj znanstvenoj suradnji s brojnim srodnim istraživačkim grupama i laboratorijima na zajedničkoj provedbi međunarodnih kolaborativnih istraživačkih projekata, poglavito projekata iz okvirnih programa Europske unije (13 projekata, kao što je navedeno u potpoglavlju 4.2). Na međunarodnim je projektima ili zajedničkim publikacijama LAMOR ostvario partnerstva s istraživačkim i razvojnim timovima s više od 50 inozemnih znanstvenoistraživačkih institucija i visokotehnoloških poduzeća, a ovdje navodimo samo nekoliko najznačajnijih institucija za koje možemo reći da smo s njima uspostavili strateška partnerstva: Karlsruhe Institute of Technology (Germany), Royal Institute of Technology (Sweden), Czech Technical University in Prague (Czech Republic), Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML (Germany), University of Toronto Institute for Aerospace Studies (Canada), INRIA Rennes-Bretagne Atlantique (France), VTT Technical

Research Centre (Finland), Julius-Maximilians-University Würzburg (Germany) i The University of Vienna (Austria).

Snažan doprinos povećanju međunarodne vidljivosti i suradnje LAMOR-a ostvaren je i aktivnim sudjelovanjem njegovih članova, osobito nastavnika, u programskim i organizacijskim odborima međunarodnih znanstvenih konferencija. Nastavnici LAMOR-a do sada su sudjelovali u programskim odborima 60-ak znanstvenih konferencija, a imali su (su)predsjedateljske uloge na 16 međunarodnih konferencija, od čega su ih sedam organizirali u Hrvatskoj. Od posebnoga su značaja za međunarodnu prepoznatljivost LAMOR-a sljedeće tri konferencije koje smo organizirali u Hrvatskoj: (i) 4th European Conference on Mobile Robots – ECMR09, Mlini/Dubrovnik (2009), (ii) 10th IFAC Symposium on Robot Control – SYROCO'12, Dubrovnik (2012) i (iii) 17th International Conference on Intelligent Autonomous System (IAS-17) koja će se održati 13. – 16. lipnja 2022. u Zagrebu. Radi održavanja i širenja mreže međunarodnih kontakata redovito organiziramo međunarodne radionice s pozvanim predavačima iz inozemstva – do sada smo ih organizirali ukupno osam. Nadalje, članovi LAMOR-a redovito su recenzenti radova za vodeće robotičke časopise i konferencije te su aktivni u relevantnim međunarodnim strukovnim udrugama (IEEE–Institute of Electrical and Electronic Engineers i IFAC–International Federation of Automatic Control). Primjerice, voditelj laboratorija predsjednik je IFAC-ova Tehničkoga odbora za robotiku, a drugo dvoje nastavnika članovi su istoga odbora. Međunarodna prepoznatljivost LAMOR-a rezultirala je i time da su njegovi nastavnici održali 20-ak pozvanih predavanja u inozemstvu te da su sudjelovali u povjerenstvima za ocjenu/obranu osam doktorskih disertacija na renomiranim europskim sveučilištima i da je voditelj laboratorija sumentor dviju disertacija na inozemnim sveučilištima.

4.4. Doprinos razvoju znanosti i gospodarstva u Hrvatskoj

Istodobno s razvojem vlastitih znanstvenoistraživačkih kapaciteta LAMOR pridonosi razvoju znanstvenoistraživačkih kapaciteta FER-a i drugih srodnih institucija u Republici Hrvatskoj. Prvi značajniji doprinos ostvaren je pokretanjem i koordinacijom znanstvenoga programa "Inteligentni robotski sustavi i autonomna vozila" (2007. – 2013.). U program je bilo uključeno pet srodnih znanstvenih projekta (četiri projekta na FER-u i jedan projekt na PMF-u) s više od 30 istraživača u znanstvenim zvanjima i s 15-ak znanstvenih novaka. To je bio prvi organizirani tim značajnijega istraživačkoga kapaciteta u Republici Hrvatskoj koji je sustavno provodio istraživanja u području inteligentnih robotskih sustava i autonomnih vozila. Drugi je značajni doprinos, koji je iznimno pridonio jačanju znanstvenoistraživačkih kapaciteta i znanstvene izvrsnosti FER-a u području naprednih kooperativnih sustava (kooperativnih: robotskih sustava, umreženih ugradbenih sustava i sustava obnovljive energije), ostvaren pokretanjem i koordinacijom EU FP7 projekta „ACROSS - Centre

of Research Excellence for Advanced Cooperative Systems“ (2011. – 2015.; tada najveći EU projekt u Hrvatskoj s proračunom 3,35 milijuna EUR-a za FER). Projekt je uključivao 14 istraživačkih grupa iz sedam zavoda FER-a i na njemu je ostvarena suradnja sa 16 sveučilišta iz 10 država Europske unije i tri industrijska partnera iz Republike Hrvatske (Končar – Institut za elektrotehniku, Ericsson Nikola Tesla i Dok-Ing). Projekt je omogućio zapošljavanje 26 doktoranada i poslijedoktoranda (zahvaljujući projektu četvero poslijedoktoranda trajno se vratilo u Republiku Hrvatsku) te nabavu kapitalne znanstvene opreme (vrijednosti oko 1 milijun EUR-a). Treći je značajni doprinos ostvaren pokretanjem i koordinacijom rada "Istraživačke jedinice za napredne kooperativne sustave" u okviru "Znanstvenoga centra izvrsnosti za znanost o podacima i kooperativne sustave" (2015. – 2025.) koja uključuje istraživače iz šest znanstvenih institucija s pet hrvatskih sveučilišta, čime je omogućeno jačanje znanstvenoistraživačkih kapaciteta na razini cijele Hrvatske. Na koncu, u zadnjih je desetak godina na projektima koje koordinira LAMOR u prosjeku zaposleno 30 do 35 doktoranada, od čega oko polovice izrađuje svoje disertacije u drugim laboratorijima FER-a ili hrvatskih partnerskih institucija uključenih u te projekte.

Doprinos razvoju gospodarstva u Republici Hrvatskoj LAMOR ostvaruje na više načina, a najizrazitiji su sljedeći: (i) intenzivna suradnja s hrvatskom industrijom kroz izravno ugovorene znanstvene i razvojno-istraživačke projekte te kroz zajedničku provedbu projekta industrijskoga istraživanja i eksperimentalnoga razvoja dobivenih na kompetitivnim natjecajima s ciljem primjene rezultata istraživanja provedenih u LAMOR-u (do sada je uspješno provedeno 20-tak projekata u suradnji s hrvatskim poduzećima), (ii) 13 od ukupno 19 doktora znanosti koji su doktorirali u LAMOR-u djeluje u hrvatskome gospodarstvu obnašajući vodeće razvojno-istraživačke ili menadžerske funkcije, a neki su i suosnivači uspješnih novih poduzeća (primjerice, Gideon Brothers d.o.o.), (iii) LAMOR je suosnivač Hrvatskoga robotičkog digitalnog inovacijskog središta (CROBOHUB) u Inovacijskome Centru Nikola Tesla (2016.) te je u okviru CROBOHUB-a pokrenuo i provodi četiri inovacijska projekta iz okvirnoga programa Obzor 2020 Europske unije s ciljem primjene robota i umjetne inteligencije u automatizaciji proizvodnje u malim i srednjim poduzećima i (iv) provedbom cjeloživotnog obrazovanja stručnoga osoblja iz industrije kroz specijalističke poslijediplomske studije (LAMOR je uključen u provedbu studija „Željeznički elektrotehnički sustavi“) i seminare u području automatizacije u industriji (LAMOR-ove seminare u suradnji s poduzećem Siemens d.d. do sada je pohađalo više od 1200 polaznika).

5. Zaključak

Uspostavom Laboratorija za autonomne sustave i mobilnu robotiku (LAMOR) u Zavodu za automatiku i računalno inženjerstvo Fakulteta elektrotehnike i računar-

stva Sveučilišta u Zagrebu stvoren je okvir za provedbu organiziranih i strukturiranih istraživanja u području robotike usmjerenih na temeljna istraživanja algoritama upravljanja, estimacije i umjetne inteligencije s primjenom u razvoju sustava autonomije mobilnih robota i vozila u nepoznatim i dinamičkim okruženjima te sustava djelotvorne i sigurne interakcije autonomnih robota i ljudi. U svojih 20 godina istraživačkoga djelovanja LAMOR je ostvario zapažene znanstvenoistraživačke rezultate, izgradio relevantan istraživački kapacitet i uspješno proveo veliki broj znanstvenih i razvojno-istraživačkih projekata, što je rezultiralo zamjetnom međunarodnom prepoznatljivošću i suradnjom s većim brojem srodnih istraživačkih grupa na vodećim europskim i svjetskim sveučilištima te značajnim doprinosima razvoju znanstveno-istraživačkih kapaciteta i gospodarstva utemeljena na znanju u Republici Hrvatskoj.

Literatura

- [1] Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Speaker Localization and Tracking with a Microphone Array on a Mobile Robot using von Mises Distribution and Particle Filtering. *Robotics and Autonomous Systems*. 58 (2010) , 11; 1185-1196.
- [2] Marković, Ivan; Ćesić, Josip; Petrović, Ivan. Von Mises Mixture PHD Filter. *IEEE Signal Processing Letters*. 22 (2015) , 12; 2229-2233.
- [3] Ćesić, Josip; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Mixture Reduction on Matrix Lie Groups. *IEEE Signal Processing Letters*. 24 (2017) , 11; 1719-1723
- [4] Marković, Ivan; Bukal, Mario; Ćesić, Josip; Petrović, Ivan. Multitarget Tracking with the von Mises-Fisher Filter and Probabilistic Data Association. *Journal of Advances in Information Fusion*. 11 (2016) , 2; 157-172.
- [5] Bićanić, Borna; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Multi-Target Tracking on Riemannian Manifolds via Probabilistic Data Association *IEEE Signal Processing Letters*, 28 (2021), 1555-1559.
- [6] Ćesić, Josip; Marković, Ivan; Cvišić, Igor; Petrović, Ivan. Radar and Stereo Vision Fusion for Multitarget Tracking on the Special Euclidean Group. *Robotics and Autonomous Systems*. 83 (2016) ; 338-348.
- [7] Joukov, Vladimir; Ćesić, Josip; Westermann, Kevin; Marković, Ivan; Petrović, Ivan; Kulić, Dana. Estimation and observability analysis of human motion on Lie groups. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 50 (2020), 3; 1321-1332.
- [8] Peršić, Juraj; Petrović, Luka; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Spatiotemporal Multisensor Calibration via Gaussian Processes Moving Target Tracking *IEEE Transactions on Robotics* (2021).
- [9] Hadviger, Antea; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Stereo Dense Depth Tracking Based on Optical Flow using Frames and Events *Advanced Robotics*, 35 (2020), 3-4; 141-152.
- [10] Cvišić, Igor; Ćesić, Josip; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. SOFT-SLAM: Computationally Efficient Stereo Visual SLAM for Autonomous UAVs. *Journal of Field Robotics*. 35 (2018), 4; 578-595

- [11] Cvišić, Igor; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. SOFT2: Stereo Visual Odometry for Ground Vehicles based on a Point-to-Epipolar-Line Metric. *IEEE Transactions on Robotics* (in review).
- [12] Cvišić, Igor; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Enhanced calibration of camera setups for high-performance visual odometry. *Robotics and Autonomous Systems* (in review).
- [13] Popović, Goran; Cvišić, Igor; Écorchard, Gaël; Marković, Ivan; Přeučil, Libor; Petrović, Ivan. Human localization in robotized warehouses based on stereo odometry and ground-marker fusion *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 73 (2022).
- [14] Lenac, Kruno; Kitanov, Andrej; Cupec, Robert; Petrović, Ivan. Fast Planar Surface 3D SLAM Using LIDAR. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017.
- [15] Lenac, Kruno; Česić, Josip; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Exactly Sparse Delayed State Filter on Lie groups for Long-term Pose Graph SLAM. *International Journal of Robotics Research*, 37 (2018), 6; 585-610.
- [16] Česić, Josip; Marković, Ivan; Bukal, Mario; Petrović, Ivan. Extended Information Filter on Matrix Lie Groups. *IFAC Automatica*. 82 (2017) ; 226-234.
- [17] Cupec, Robert; Nyarko, Emmanuel Karlo; Filko, Damir; Kitanov, Andrej; Petrović, Ivan. Place Recognition based on Matching of Planar Surfaces and Line Segments. *International Journal of Robotics Research*. 34 (2015) , 4/5; 674-704.
- [18] Maltar, Jurica; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Visual Place Recognition using Directed Acyclic Graph Association Measures and Mutual Information-based Feature Selection *Robotics and autonomous systems*, 132 (2020), 103598, 14.
- [19] Đakulović, Marija; Petrović, Ivan. Two-way D* algorithm for path planning and replanning. *Robotics and Autonomous Systems*. 59 (2011) , 5; 329-342.
- [20] Seder, Marija; Mostarac, Petar; Petrović, Ivan. Hierarchical path planning of mobile robots in complex indoor environments. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, ISSN 0142-3312, volume 33, issue 3-4, pp. 332-358, 2011.
- [21] Brezak, Mišel; Petrović, Ivan: Real-time Approximation of Clothoids with Bounded Error for Path Planning Applications, *IEEE Transactions on Robotics*. 30 (2014), 2; 507-515
- [22] Klančar, Gregor; Seder, Marija; Blažič, Sašo; Škrjanc, Igor; Petrović, Ivan: Drivable Path Planning Using Hybrid Search Algorithm Based on E* and Bernstein-Bézier Motion Primitives, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51 (2021), 8; 4868-4882.
- [23] Seder, Marija; Baotić, Mato; Petrović, Ivan. Receding Horizon Control for Convergent Navigation of a Differential Drive Mobile Robot. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 25 (2), 2017. 653-660.
- [24] Đakulović, Marija; Sprunk, Christoph; Spinello, Luciano; Petrović, Ivan; Burgard, Wolfram. Efficient Navigation for Anyshape Holonomic Mobile Robots in Dynamic Environments *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 3-8.11.2013. 2644-2649.
- [25] Đakulović, Marija; Ileš, Šandor; Petrović, Ivan. Exploration and Mapping of Unknown Polygonal Environments Based on Uncertain Range Data. *AUTOMATIKA: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, ISSN 0005-1144, volume 52, issue 2, pp. 118-131, 2011.

- [26] Borrmann, Dorit; Nüchter, Andreas; Đakulović, Marija; Maurović, Ivan; Petrović, Ivan; Osmanković, Dinko; Velagić, Jasmin; A mobile robot based system for fully automated thermal 3D mapping, *Advanced Engineering Informatics*, volume 28, issue 4, pp. 425-440, 2014.
- [27] Maurović, Ivan; Seder, Marija; Lenac, Kruno; Petrović, Ivan. Path Planning for Active SLAM Based on the D* Algorithm With Negative Edge Weights. *IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics - Systems*. 48 (2018), 8; 1321-1331.
- [28] Petrović, Luka; Peršić, Juraj; Seder, Marija; Marković, Ivan. Cross-Entropy based Stochastic Optimization of Robot Trajectories using Heteroscedastic Continuous-time Gaussian Processes *Robotics and Autonomous Systems*, 133 (2020), 103618, 14.
- [29] Petrović, Luka; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Mixtures of Gaussian Processes for Robot Motion Planning using Stochastic Trajectory Optimization *Transactions on Systems, Man and Cybernetics* (in review).
- [30] Marić, Filip; Petrović, Luka; Guberina, Marko; Kelly, Jonathan; Petrović, Ivan. A Riemannian metric for geometry-aware singularity avoidance by articulated robots *Robotics and Autonomous Systems*. 145 (2021).
- [31] Marić, Filip; Giamou, Matthew; Hall, Adam W.; Khoubyarian, Soroush; Petrović, Ivan; Kelly, Jonathan. Riemannian Optimization for Distance Geometric Inverse Kinematics *IEEE Transactions on Robotics* (2021).
- [32] Giamou, Matthew; Maric, Filip; Rosen, David; Peretroukhin, Valentin; Roy, Nicholas; Petrovic, Ivan; Kelly, Jonathan. Convex Iteration for Distance-Geometric Inverse Kinematics *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022.
- [33] Petković, Tomislav; Puljiz, David; Marković, Ivan; Hein, Bjoern. Human Intention Estimation based on Hidden Markov Model Motion Validation for Safe Flexible Robotized Warehouses. *Robotics and computer-integrated manufacturing*. 57 (2019) ; 182-196.
- [34] Petković, Tomislav; Petrović, Luka; Marković, Ivan; Petrović, Ivan. Human action prediction in collaborative environments based on shared-weight LSTM networks and careful feature selection. *Applied Soft Computing* (in review).