

Laboratorij za naprednu 3D rekonstrukciju i registraciju površina

Tomislav Pribanić¹

¹ član suradnik, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, tomislav.pribanic@fer.hr

Sažetak: *Laboratorij za naprednu 3D rekonstrukciju i registraciju površina (engl. Advanced Shape Reconstruction and Registration Laboratory - SHARK Lab) osnovan je 2016. godine kao istraživački laboratorij na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER). SHARK Lab okuplja istraživače sa Zavoda za elektroničke sustave i obradbu informacija i sa Zavoda za elektroniku, mikroelektroniku, računalne i inteligentne sustave. Istraživačka djelatnost usmjerena je poglavito na metode i algoritme računalnog vida, i to za područja: 3D oslikavanje i 3D rekonstrukciju korištenjem profilometrije strukturiranim svjetlom te stereo vidom; 3D registracija oblaka točaka s naglaskom na uporabu senzora mobilnih platformi poput pametnih telefona i tableta; i postupci za kalibraciju sustava 3D oslikavanja koji koriste više kamera i više projektora, posebice sustava namijenjenih za korištenje u medicini te sustava oslikavanja za 3D printanje. SHARK Lab je član Centra izvrsnosti za računalni vid i Centra za umjetnu inteligenciju na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu*

Ključne riječi: *umjetna inteligencija, računalni vid, strojno učenje, 3D rekonstrukcija, 3D registracija, strukturirano svjetlo, umjeravanje kamera.*

1. Uvod

Poznavanje prostornog položaja točaka svijeta, odnosno površina objekata je ključna informacija u izuzetno velikom broju djelatnosti (primjena) npr., inverznom inženjerstvu, industrijskoj kontroli kvalitete proizvoda, prepoznavanju objekata, robotskoj navigaciji, interakciji čovjeka s računalom (igre), 3D digitalizaciji kulturnih dobara, medicinskim (zdravstvenim) primjenama itd. Zbog toga i ne čudi da jedan od najpropulzivnijih istraživačkih pravaca u području računalnog vida i obrade slike pripada

istraživanju metoda i algoritama za 3D rekonstrukciju. U velikom broju primjena 3D rekonstrukcija vanjskoga svijeta iz jedne prostorne točke gledišta nije dovoljna već zahtjeva uzimanje podataka iz različitih prostornih položaja. To nameće potrebu za rješavanjem nove zadaće tzv. 3D registracije podataka koja ima za konačni cilj izražavanje izvornih 3D podataka, dobivenih iz različitih prostornih položaja, u zajedničkom prostornom koordinatnom sustavu. Nerijetko se zbog toga problemi 3D rekonstrukcije i 3D registracije promatraju zajedno. Povrh toga danas se veliki dio istraživanja provodi odnosno primjenjuje na pametnim platformama (telefonima, tabletima). Naime, pametni telefoni postaju sve moćniji, sa sve većim brojem ugrađenih senzora (npr. akcelerometar, magnetometar, žiroskop, GPS) te sa sve značajnim proširenjem funkcija. Stoga i ne čudi da je pametni telefon, između ostaloga, relativno brzo prepoznat kao potencijalni uređaj za 3D rekonstrukciju/3D registraciju objekata pomoću snimljenih slika.

2. Obrazloženje potrebe osnivanja Laboratorija

U zadnjih desetak godina djeluje grupa znanstvenika i studenta na Zavodu za elektroničke sustave i obradbu informacija pod vodstvom prof. dr. sc. Tomislava Pribanića koja se bavi istraživanjem i razvojem sustava za 3D rekonstrukciju. Do sada je objavljeno 15tak radova u časopisima te više desetaka radova na međunarodnim skupovima. Voditelj laboratorija je voditelj nekoliko projekata vezanih uz područje (HRZZ IP, POC, međunarodni (bilateralni) projekti). U svome radu grupa surađuje s znanstvenicima i grupama s nekoliko istaknutih međunarodnih ustanova: Computer Vision and Robotics Group, University of Girona, Spain; Toulouse Institute of Computer Science Research (IRIT), University of Toulouse (UT), France; Chinese Academy of Science (CAS) in Southern China, Shenzhen Institutes of Advanced Technology (SIAT), Shenzhen, China; INRIA Grenoble - Rhône-Alpes, France; Hometrica Consulting, Switzerland. Također grupa vrlo dobro surađuje i s tuzemnim ustanovama, Sveučilište u Zagrebu Kineziološki fakultet te Poliklinika za fizikalnu rehabilitaciju i medicinu Peharec, Pula. Uz grupu okupljenu oko prof. dr. sc. Tomislava Pribanića u području 3D rekonstrukcije djeluje i prof. dr. sc. Siniša Šegvić čiji znanstveni interesi uključuju primjenu i razvoj rekonstrukcijskih metoda u računalnom vidu. U tom kontekstu rekonstrukcija često nije zanimljiva i konačna svrha sama po sebi, nego prvenstveno služi kao alat koji podupire različite oblike razumijevanja slika poput klasifikacije scene, pronalaženja i prepoznavanja objekata, lokalizacije robota ili praćenja objekata. Stoga zanimljive metode uključuju praćenje okana u slijedu slika, monokularnu estimaciju strukture scene i gibanja kamere, stereoskopsku estimaciju gibanja kamere te gustu stereoskopsku rekonstrukciju strukture scene. Nadalje, izv. prof. dr. sc. Marko Subašić se također bavi problemima obrade i analize slike snimljenih raznim vrstama kamera ili drugim uređajima. Područje interesa izv. prof. dr. sc. Subašića uključuje segmentaciju objekata, detekciju objekata,

raspoznavanje objekata i praćenje objekata u statičnim slikama ili videosnimkama. Navedenim problemima bavio se na konkretnim problemima iz područja primjene koja uključuju biometriju, automobilski sektor i biomedicinu. Istraživačku grupu čini i nekoliko sadašnjih i bivših doktoranda Sveučilišta u Zagrebu Fakulteta elektrotehnike i računarstva.

Stoga osnivanje ovakvoga laboratorija predstavlja logičan nastavak okrupnjavanja znanstvenika na FER-u koji se bave dotičnim područjem, a u cilju još kvalitetnijeg pozicioniranja FER-a u tom području. Važno je naglasiti da je osnivanje laboratorija bio i jedan od predvidivih ciljeva HRZZ (Hrvatske zaklade za znanost) projekata prof. dr. sc. Tomislava Pribanića. Kroz laboratorij kao ustrojbenu jedinicu FER-a jača se međunarodna vidljivost rada u ovome području. Nadalje povezivanje istraživača u laboratorij olakšalo je istraživanje i razvoj, sudjelovanje na međunarodnim projektima i suradnju s industrijom i medicinskim ustanovama. Jedna od važnih djelatnosti Laboratorija je obrazovanje novih stručnjaka u području kroz obrazovanje studenata na konkretnim razvojnim i istraživačkim projektima, uvođenjem novih predmeta iz područja te popularizacijom znanosti s konkretnim primjenama u praksi.

3. Opis djelatnosti Laboratorija

Istraživačka djelatnost

Istraživanje obuhvaća metode i algoritme računalnog vida za 3D rekonstrukciju i 3D registraciju. Pored kamere kao osnovnog djela 3D sustava i ambijentalnog svjetla, istražuje se i uporaba dodatnih izvora svjetala koji komplementarno nadopunjavaju informacije neposredno dobivene od strane kamera. Proučavaju se i postupci umjerenja 3D sustava te optimalni načini obradbe izlaznih podataka pogodnih za dalju uporabu, npr. na 3D printerima. Dodatan istraživački naglasak je na uporabi pametnih telefona (tableta) koji uz sve kvalitetnije kamere imaju i veliki broj drugih vrsta senzora, a čiji se izlaz može iskoristiti i u cilju 3D rekonstrukcije. 3D rekonstrukcija ljudskog tijela, u usporedbi s neživim objektima, ima svoje specifičnosti i to naročito u području primjene medicine te laboratorij provodi istraživanje i razvoj 3D sustava i u tome području. Pored standardnih postupaka računalnog vida, SHARK Lab proučava i metode dubokog učenja kod izrade dubokih modela za analizu oblika ljudskog tijela [1].

Inovacijska djelatnost

Članovi laboratorija su dobitnici više medalja međunarodnoj izložbi inovacija ARCA, vezano uz tematiku 3D skeniranja na pametnim telefonima. Na tom tragu činili su se,

a i dalje se provide naporu za daljnji razvoj inovacije i moguću tržišnu eksploataciju. Laboratorij direktno surađuje s inozemnim institucijama čiji pojedini članovi su već osnovali spin off firme kroz koje bi bilo moguće direktno transferirati inovativno znanje i rezultate u (industrijsku) primjenu. Isto tako laboratorij surađuje i s privatnim zdravstvenim ustanovama u RH kroz čiju suradnju se također očekuju ideje primjerene za zajedničke prijave na inovacijske natječaje i projekte.

Nastavna djelatnost

Članovi laboratorija predaju studentima FER-a dio istraživačke tematike laboratorija na predmetima 3D skeniranje, Trodimenzionalni računalni vid, Multisenzorski sustavi i lokomocija, Sustavi za mjerenje neelektričkih veličina, Analiza dinamičkih scena, Modeli za predstavljanje slike i videa, Digitalna obradba i analiza slike, Slučajni procesi u sustavima te Neuronske mreže. Također dio tematike predaje se i na međunarodnom studiju na Medicinskom fakultetu u sklopu predmeta Measurement and analysis of human locomotion. Povrh toga do sada je obranjeno više desetaka završnih i diplomskih studentskih radova, 7 doktorata, a u tijeku su pet doktorata u ovome području. U suautorstvu sa dodiplomskim studentima objavljena su 4 rada u CC/SCI časopisima te 16 radova na međunarodnim konferencijama.

Popularizacija znanosti

U cilju popularizacije znanosti članovi laboratorija sudjeluju u televizijskim priložima, na Sveučilišnim smotrama, festivalima znanosti te održavaju demonstracije i predavanja školskim uzrastima.

4. Dosadašnja suradnja članova Laboratorija s drugim istraživačkim grupama/laboratorijima i s gospodarstvom

U svome radu prof. dr. sc. Tomislav Pribanić surađivao je ili surađuje s više istraživačkih grupa na istaknutim međunarodnim ustanovama i na različitim projektima iz područja 3D rekonstrukcije i registracije točaka (površina):

- Kao pridruženi istraživač sudjelovao je u radu projekta CAVIAR (INRIA Rhône-Alpes, Francuska, Rujan 2004 – Prosinac 2004) u grupi dr.sc. Peter Sturm. Suradnja s dr. sc. Peter Sturmom traje i danas kroz zajedničke prijave na projektima i publikacije radova (2 SCI/CC rada i 5 radova na međunarodnim konferencijama). Trenutno suradnik na HRZZ projektu.

- Kao pridruženi istraživač sudjelovao je na radu projekta Z-laser. (Fraunhofer IGD, Darmstadt, Njemačka, veljača 2006 – kolovoz 2006) u grupi Prof. Dr.-Ing. Georgios Sakasa.
- Kao voditelj s hrvatske strane međunarodnog projekta Construction of structured light system using Teledyne DALSA cameras (2012), surađivao je s firmom Teledyne DALSA. U sklopu suradnje Teledyne DALSA je donirala nekoliko svojih kamera.
- Kao voditelj s hrvatske strane međunarodnog projekta Single shoot structured light 3D reconstruction surađuje s grupom prof. Zhan Songa s Shenzhen Institutes of Advanced Technology (SIAT), Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, China.
- Kao voditelj s hrvatske strane međunarodnog projekta Three-dimensional reconstruction using smartphone surađuje s grupom prof. Simone Gasparinija s Toulouse Institute of Computer Science Research (IRIT Institut de Recherche en Informatique de Toulouse) University of Toulouse, Toulouse, France.
- Više od 10 godina surađuje s grupom prof. Joaquim Salvija, Computer Vision and Robotics Group, Department of Computer Architecture and Technology, Institute of Informatics and Applications, University of Girona, Spain. Dio rezultata višegodišnje suradnje iskazan je kroz zajedničku publikaciju 5 radova u CC/SCI časopisima te 5 radova na međunarodnim konferencijama te par održanih pozvanih predavanja U RH, tj. Španjolskoj. Trenutno suradnik na HRZZ projektu.
- Nekoliko godina surađuje s prof. Mohit Guptom WISION Lab (Wisconsin Computation Imaging and Vision lab), University of Wisconsin-Madison, USA, na području razvoja 3D sustava i kamera sa aktivnim osvjetljenjem (engl. Time of flight camera).
- Nekoliko godina surađuje s dr.sc. Fiona Berryman s Royal Orthopaedic Hospital, Birmingham, UK, na razvoju sustava za 3D skeniranje.
- Nekoliko godina surađuje s dr. sc. Nicola D'Apuzzo osnivačem i ravnateljem firme Hometrica iz Švicarske, koja se bavi konzaltingom prilikom odabira i razvoja 3D sustava. Trenutno suradnik na HRZZ projektu.
- Gotovo 20 godina surađuje s Biomehaničkim laboratorijem Poliklinike za fizikalnu medicine i rehabilitaciju Peharec u Puli; >10 zajedničkih projekata i radova. Trenutno suradnik na HRZZ projektu.
- Gotovo 20 godina surađuje s Biomehačkim laboratorijem Kineziološkog fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Vladimira Medveda; između ostaloga, više zajedničkih radova, suradnja na dva predmeta, od toga jedan na međunarodnom studiju.

U svome radu prof. dr. sc. Siniša Šegvić surađivao je ili surađuje sa sljedećim istraživačkim grupama na istaknutim međunarodnim ustanovama:

- Lagadic, INRIA/IRISA Rennes (Francois Chaumette)
- VMG, TU Graz (Axel Pinz)
- ACIN, TU Wien, Markus Vincze

U svome radu izv. prof. dr. sc. Marko Subašić surađivao je ili surađuje:

- Grupom prof. Hrvoja Golda sa Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu na problemima analize slika i videa za napredne sustave pomoći vozaču.
- Grupom prof. Renate Pernar sa Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na problemima analize zračnih i satelitskih snimaka za potrebe udaljenih mjerenja.
- Grupom prof. Zorana Vatavuka sa Kliničkog bolničkog centra Sestre milosrdnice na problemima automatske analize fotografija očne pozadine za detekciju dijabetičkih poremećaja.
- Grupom prof. Ericha Sorantina sa Sveučilišne bolnice u Grazu, Austrija, na problemima analize CT snimaka aneurizme abdominalne aorte.
- Firmama Siemens d.d. i Siemens AG Austrija na problemima automatske analize kvalitete osobnih fotografija za elektroničke dokumente.

5. Plan istraživačke i inovacijske djelatnosti Laboratorija

Istraživačka djelatnost

U svome istraživačkom radu SHARK Lab se fokusira na nekoliko područja. Prvo područje podrazumijeva obradbu slika u cilju izračuna unutarnje i vanjske orijentacije kamere, tzv. umjeravanje (kalibraciju) kamere, a što je tipično jedan od preduvjeta za 3D rekonstrukciju. Između ostaloga to uključuje metode umjeravanja kamere pomoću 3D, 2D i 1D sredstava (kalibracijskih kaveza, ravnine i štapa), kao i detekciju točaka u prirodi iskoristivih za umjeravanje kamere. Proučavaju se i odgovarajući modeli kamere ovisni o vrsti (stupnju) distorzije leće kamere. Poseban naglasak pridaje se automatizaciji kalibracijskih procedura koje će za korisnika biti što prihvatljivije. Kalibracijski postupci vezani uz sustave za 3D analizu ljudskog pokreta i oblika tijela se posebice istražuju u kontekstu svakodnevne primjene u praksi, a koja može zahtijevati i češću re-kalibraciju 3D sustava [2].

Nadalje, uz pretpostavku umjerenog sustava kamere, istražuju se metode nalaženja korespondentnih točaka na slikama koje će omogućiti 3D triangulaciju točaka.

Razmatra se nalaženje korespondentnih točaka bilo detekcijom tzv. karakterističnih točaka, bilo metodama pasivnog sterea, bilo kombinirano, bilo metodama dubokog učenja, koristeći najbolje prednosti različitih pristupa. Kod pasivnog sterea promatraju se tzv. lokalne metode nalaženja korespondentnih točaka uz uporabu različitih funkcija cijena. Također i globalne metode optimizacije su predmet istraživanja za koje se, budući da su vremenski zahtjevnije, razmatraju mogućnosti paralelizacije kod implementacije. Duboki modeli koju omogućavaju nalaženje anatomske korespondentnih točaka na ljudskom tijelu su isto tako predmet istraživanja.

Sljedeće srodno područje istraživanja uključuje aktivni stereo i to prije svega kroz uvođenje dodatnog izvora svjetla [3]. Izučava se uporaba laserskih izvora s slučajnim uzrokom, vrlo blisko popularnoj inačici prve verzije Kinect uređaja. Također kao izvor svjetla koriste se i komercijalni video projektori, a što omogućava primjenu i istraživanje u području strukturiranog svjetla. U kontekstu istraživanja strukturiranog svjetla ne primjenjuje se samo tradicionalni pristup istraživanja posebno projicirajućih uzoraka pogodnih za dinamičke objekte, a posebno uzoraka za statičke objekte. Dodatno se istražuju tzv. hibridni projicirajući uzroci koji se u istoj sceni mogu adaptirati za statičke i dinamičke točke scene [4]. S obzirom na uporabu dodatnog izvora svjetla, već navedeno istraživanje umjeravanja kamera će se odgovarajuće proširiti i na umjeravanje 3D sustava s izvorima svjetla. Oslanjajući se na trenutnu suradnju s inozemnim laboratorijem čija jedna od specijalnosti je fotometrijski stereo (engl. photometric stereo), planira se proširenje istraživanja i u tome pravcu, s naglaskom na analizu prednosti i nedostataka fotometrijskog sterea u odnosu na strukturirano svjetlo. Također članovi laboratorija su kroz suradnju napravili i prve rezultate kroz pristup 'rekonstrukcija kroz (de)fokusiranje' (engl. Shape from defocus), pa se očekuje i istraživanje ostalih Shape from X metoda.

Uzimajući u obzir da 3D rekonstrukcija iz jednog pogleda vrlo često ne zadovoljava potrebe već se očekuje rekonstrukcija predmeta (prostora) iz više pogleda, sljedeći logičan istraživački pravac je 3D registracija. 3D registracijom se postiže izražavanje izvornih oblaka točaka originalno dobivenih iz različitih pogleda, u zajedničkom prostornom koordinatnom sustavu. Posebno se promatraju tzv. grube (približne) metode 3D registracije, a posebno fine (točne) metode 3D registracije. Budući da se 3D registracija može dobrim djelom opisati i kao problem nalaženja korespondentnih točaka u 3D prostorima, analizira se proširenje znanih metoda za nalaženje korespondentnih točaka u 2D prostoru (slici). Uz standardne pristupe računalnog vida za 3D registraciju, prate se i istraživanja 3D registracije temeljena na dubokim modelima, a koja postaju sve popularnija. Nadalje, s jedne strane istražuje se tzv. isključivo softverske metode 3D registracije, bez uporabe ikakvih dodatnih senzora osim kamera. Međutim uviđajući danas sve širu dostupnost ostalih tipova senzora, npr. akcelerometara, magnetometara, žiroskopa itd., istražuje se i 3D registracija uz prisutnost dodatnih vrsta senzora [5].

Spomenuti senzori su naročito dostupni u pametnim telefonima, pa se istražuju 3D rekonstrukcije/registracije i na pametnim telefonima (tabletima). Periodično se na tržištu pojavljuje nezanemariv broj telefona koji imaju na sebi ili stereo par kamera ili ugrađeni (pico)projektor. Štoviše na tržište bi se trebao pojaviti uskoro i prvi pametni telefon s ugrađenim laserskim picoprojektorom, a to otvara nove mogućnosti razvoja metoda i algoritama za obradu, a koje nisu bile moguće kod DLP tipa projektor. Međutim bez obzira na tip projektor pametnog telefona, izuzetno je velik istraživački potencijal oko implementacija metoda i algoritama izvorno namijenjenih za tradicionalne konfiguracije 3D sustava, ali uz uvažavanje specifičnosti pametnih platformi.

Inovacijska djelatnost

Dva su osnovna pravca. Prvi je patentiranje, odnosno licenciranje novo razvijenih metoda. Na tome planu već su u tijeku prijave nekoliko projekata na natječaje koji omogućavaju procjenu mogućnosti i postizanje spomenutog cilja. Također posjećivanjem inovacijskih sajmova i smotri se planira proširiti vidljivost postignutih rezultata kao i stvaranje kontakata s potencijalnim partnerima za daljnji razvoj k komercijalizaciji. S takvim novim partnerima, uz postojeće partnere u spomenutim laboratorijima (institutima) i u gospodarstvu, a koji imaju iskustva i u komercijalizaciji, kao drugi pravac planira se otvaranje start up firmi. To bi omogućilo ne samo daljnji razvoj i komercijalizaciju najboljih ideja već i zapošljavanje najboljih studenata neposredno uključenih u istraživačke rezultate laboratorija.

Usklađenost Laboratorija s istraživačkom strategijom Fakulteta, Sveučilišta i društvenom zajednicom

"Strategija razvoja Fakulteta elektrotehnike i računarstva 2019.-2023. godine" kao jedan od glavnih usmjerenja navodi istraživačka i inovacijska dostignuća, dok je jedna od misija FER-a provođenje međunarodno priznatih istraživanja te razvoj novih interdisciplinarnih područja i stvaranje novih znanja. Kao strateški cilj posebno se ističe povećanje istraživačko-razvojnih kapaciteta, te prijenos znanja i ideja u gospodarstvo. Na tome putu naglašava se aktivnost osnivanja istraživačkih laboratorija i centara izvrsnosti radi strukturiranja istraživačke djelatnosti Fakulteta uz sustavne mjere za poticanje njihova rada te također osnivanja spin-off i start-up poduzeća. Opis SHARK laba je u skladu s navedenim strateškim smjericama FER-a. Predviđiva djelatnost i rezultati laboratorija su posebice primjenjivi u strateški navedenim istraživačkim i inovacijskim djelatnostima FER-a za Klaster "Zdravlje" te Klaster "Digitalizacija i industrija".

"Strategija istraživanja, transfera tehnologije i inovacija Sveučilišta u Zagrebu" u svojoj misiji pridjeljuje Sveučilištu središnju ulogu u istraživačkim postignućima i

pokretanju inovacija na nacionalnoj razini, s odjekom u regiji i Europi. U tom smislu Sveučilište preuzima odgovornost za transfer tehnologije i razvoj inovacija te prepoznaje da je okrupnjivanje istraživačkih kapaciteta preduvjet za opstanak u danas već izuzetno kompetitivnom istraživačkom prostoru. Stoga su neki od glavnih ciljeva stvaranje poticajnih istraživačkih okruženja te razvijanje međunarodne suradnje i umrežavanja. U cilju postizanja istih Sveučilište ističe kako je od iznimne važnosti sustavno poticanje i briga oko osnivanja istraživački laboratorija kao i poticanje suradnje nastavnika s kolegama iz vrsnih svjetskih institucija. Dosadašnji rad članova laboratorija se uklapa u ostvarenje spomenute strategije i ciljeva.

6. Zaključak

Uspostavom Laboratorija za naprednu 3D rekonstrukciju i registraciju površina na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu omogućeno je učinkovitije istraživanje grupe istraživača u opisanom području umjetne inteligencije. Prikazana široka međunarodna suradnja osigurava međunarodnu prepoznatljivost kao i istraživanje ciljeva prepoznatih na međunarodnom planu. Aktivnosti koja se provode služe ne samo istraživačkim djelatnostima već su usmjerena prema nastavnim i inovacijskim djelatnostima. Posljednje navedeno je naročito interesantno za što bolji transfer znanja i tehnologije k poduzećima. SHARK Lab provodi i izobrazbu novih mladih stručnjaka, posebice na doktorskoj razini. To je prema 'van' moguće i najvrjedniji rezultat jer izobrazba novih doktoranda ne osigurava samo potencijalno nove istraživače u akademskim sredinama već predstavlja i važan segment u razvojnim sredinama poduzeća te gospodarstvu.

Literatura

- [1] Bartol, K.; Bojanić, D.; Petković, T.; Pribanić, T.: A Review of Body Measurement Using 3D Scanning. *IEEE Access*, (2021), pp. 1-21.
- [2] Pribanić, T.; Sturm, P.; Cifrek, M.: Calibration of 3D kinematic systems using orthogonality constraints. *Machine Vision and Applications*, 2007. (18) pp. 367-381.
- [3] Pribanić, T.; Petković, T.; Bojanić, D.; Bartol, K.; Gupta, M.: Smart Time-Multiplexing of Quads Solves the Multicamera Interference Problem. 2020 International Conference on 3D Vision (3DV), Fukuoka, Japan
- [4] Petković, T.; Pribanić, T.; Đonlić, M.: Single-Shot Dense 3D Reconstruction using Self-Equalizing De Bruijn Sequence. *IEEE transactions on image processing*, 25 (2016), 11; 5131-5144
- [5] Pribanić, T.; Petković, T.; Đonlić, M.: 3D registration based on the direction sensor measurements. *Pattern recognition*, 88 (2019), pp. 532-546.