

# **Interaktivna laboratorijska aplikacija s kolaborativnim robotom**

**Saša Stradovnik, Rok Pučko, Aleš Hace**  
**Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko**  
**Koroška cesta 46, 2000 Maribor**  
**sasa.stradovnik@um.si, rok.pucko@um.si, ales.hace@um.si**

## ***Interactive laboratory application with a collaborative robot***

Most collaborative robot applications, which can be currently seen in industry, have been designed to perform deterministic repetitive manufacturing tasks. Physical contact between a robot and a human is usually not provided in the task execution, since it presents a potential harmful hazard for the human worker. In this case, a safety-related stop would be triggered immediately that leads to lower productivity and lower task performance efficiency. However, the collaborative robot systems provide a possibility to involve a human with his intelligent creativity and motion dexterity into the process workflow, which may improve flexibility of the collaborative robotic application that can be achieved only hardly by a conventional robotization approach. The collaborative robotic systems enable planned physical human-robot interaction, which is allowed also by technical specification of the safety standard for robotization issued in 2016 (ISO/TS 15066). In this paper, we describe an approach for flexible definition and adaptation of a collaborative robot task in which a physical human-robot contact can be used as a natural and intuitive interaction. We demonstrate the approach on the case of experimental laboratory screwing application, which furthermore enables upgrading with other technologies for facilitating human-robot collaboration such as augmented reality.

## ***Kratek pregled prispevka***

Večina kolaborativnih robotskih aplikacij, ki jih dandanes srečamo v industriji, je načrtovana s ciljem izvajanja točno določenih ponavljajočih se nalog. Fizični stik med robotom in človekom običajno ni vključen v izvedbo naloge, saj lahko predstavlja nevarnost za človeka. V primeru potencialno škodljivega dotika varnostni mehanizmi sprožijo takojšnjo zaustavitev robota, kar zmanjšuje produktivnost in učinkovitost izvedbe naloge. Vendar pa kolaborativni robotski sistemi ponujajo možnost, da se človek s svojo kreativnostjo aktivno vključuje v delovni proces, kar omogoča večjo prilagodljivost robotske aplikacije, ki jo sicer z običajno robotizacijo težko dosežemo. Kolaborativni roboti omogočajo načrtovane fizične stike kot obliko interakcije človek-robot, kar dovoljujejo tudi novejši standardi za varnost v robotski avtomatizaciji (ISO/TS 15066). V članku opisujemo pristop prilagajanja kolaborativne robotske naloge, kjer fizični stik med robotom in človekom uporabimo kot obliko naravne in učinkovite interakcije. Demonstracija je narejena na primeru eksperimentalne laboratorijske aplikacije vijčenja, ki omogoča nadgradnjo s spremljajočimi tehnologijami kolaborativnih robotskih sistemov, kot je obogatena resničnost.

## 1 Uvod

Kolaborativne robotske aplikacije omogočajo, da je človek aktivno vključen v proizvodne postopke na načine, kot jih avtomatizacija s klasično robotiko zaenkrat še ne dopušča. Razlogov za to je več. S klasično robotizacijo pogosto ne moremo popolnoma avtomatizirati sistema ali pa to ni ekonomsko upravičeno. Z vključevanjem človeka v proces pa lahko dosežemo bolj optimalno izvedbo, saj lahko uporabimo njegovo spretnost, inteligenco, kreativnost, sposobnost zaznavanja in odločanja, ki nam s trenutno razvojno stopnjo robotskih tehnologij še ni na voljo.

Tehnična specifikacija ISO/TS 15066, kot sestavni del standarda ISO 10218, definira 4 nivoje kolaborativnosti med človekom in robotom [1, 2]. Aplikacija je lahko kolaborativna, če omogoča takšno načrtovanje robotizacije, da je nivo tveganja sprejemljiv. Kolaborativnost na podlagi ročnega vodenja (ang. »Hand-guiding operation«) in omejene mehanske moči in sile (ang. »Power&force limiting«) zahtevata uporabo kolaborativnega robota.

Za naravno interaktivno sodelovanje človeka s kolaborativnim robotom je potreben intuitivni komunikacijski vmesnik. Ta vmesnik lahko vključuje različne tehnologije s pomočjo katerih človek sodeluje z robotom: varna fizična interakcija, tehnologija obogatene resničnosti, tehnologija prostorskega zaznavanja s pomočjo 3D kamere itd.

Obogatena resničnost (ang. Augmented Reality, AR) je tehnologija, ki z dodatnimi digitalnimi informacijami prekriva realni svet in omogoča prepletanje resničnega in virtualnega sveta. Aplikacije obogatene resničnosti se razvijajo predvsem v smeri grafičnega prikazovanja 3D virtualnih objektov v prostoru, vključujejo pa tudi prostorsko predstavitev zvočnih signalov, zajem vhodnih podatkov iz okolja preko kretenj, prepoznavo objektov in glasov ter njihovo lokalizacijo. Ta tehnologija, v kombinaciji s kolaborativnimi robotskimi sistemi, prinaša številne nove, izboljšane možnosti komunikacije med robotom in

človekom, ki so bile do sedaj omejene zgolj na našo domišljijo. V ta namen se obogatena resničnost uporablja predvsem z namenom definiranja robotske trajektorije, vizualizacije potencialno nevarnih območij, ki si jih delita človek in robot, simulacije robotske trajektorije pred njeno izvedbo ali z namenom posredovanja drugih relevantnih navodil in informacij človeku. Glede na uporabljeno opremo lahko objekte virtualnega sveta prikažemo prostorsko (zaslon, AR očala) ali projekcijsko (projektor).

V članku se ukvarjamo s hibridnim delovnim mestom, ki si ga delita človek in robot, in omogoča vzpostavitev neposredne fizične interakcije med njima, ki je načrtovana tako, da je za človeka varna. Človek in robot si delita delovni prostor z namenom razdelitve nalog glede na zmožnosti in razpoložljivosti enega in drugega, pri čemer bi lahko en človek sodeloval z več roboti hkrati. Fizični stik med njima omogoča prilagajanje robotske naloge preko kinestetičnega učenja z demonstracijo v primeru, da robotu ne uspe uspešno izvršiti dela robotske naloge. Na ta način človek izvaja nadzor nad procesom in pomaga robotu pri izvedbi zahtevnejših nalog. Uporabljen AR vmesnik omogoča prostorski 3D prikaz hologramov s prekrivanjem realnega prostora, ki smo ga uporabili za intuitivno in fleksibilno definiranje robotske naloge, za kar ne potrebujemo posebnega znanja o programiranju robotov.

Za demonstracijo v laboratorijskem okolju smo izbrali robotizirano kolaborativno aplikacijo vijačenja. Vijačenje je na veliko prisotno v industriji sestavljanja (ang. »assembly industry«) in ima odličen potencial za uvedbo kolaborativne robotske aplikacije [3-5], saj je za človeka varna, vključuje pa manj in bolj zahtevne elementarne operacije, ki jih lahko učinkovito razdelimo med robota in človeka v sodelovalni nalogi na hibridnem delovnem mestu.

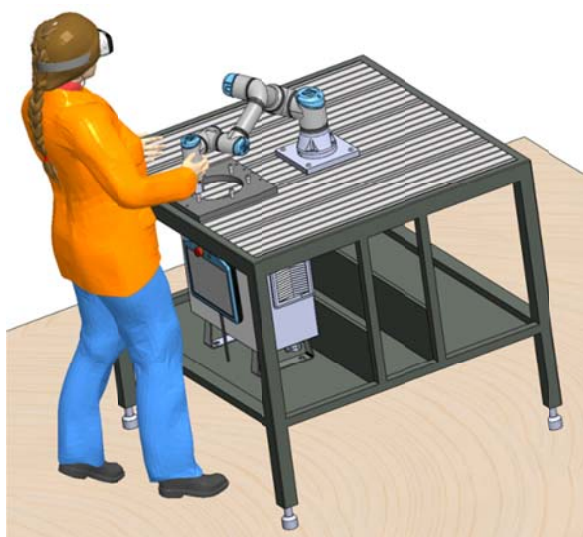
## 2 Kolaborativno vijačenje

V laboratorijski robotski kolaborativni aplikaciji vijačenja uporabljamo industrijskega

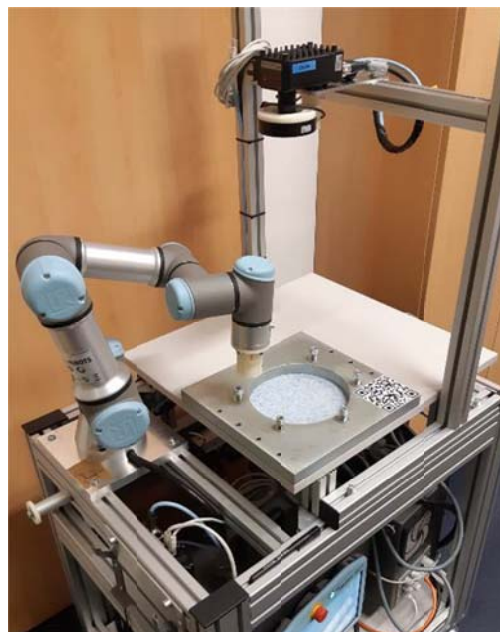
kolaborativnega robota UR3e proizvajalca Universal Robots [6]. Zadnji sklep tega robota je neskončno vrtljiv, kar smo izkoristili kot »demonstracijski vijačnik«. Predmet sodelovalne naloge je vijačenje vijakov v predvidene navojne luknje nekega izdelka. Naloga robota je priviti vstavljene vijake do predpisanega navora, človek pa v tej aplikaciji lahko:

- vstavlja ustrezne vijake na pravilno mesto, hkrati pa lahko tudi vizualno pregleda vijake in defektne odstrani,
- pomaga robotu, tako da del naloge opravi človek sam (npr. človek zavijači nekaj vijakov, vendar ni nujno, da jih privije do konca, saj je to lahko fizično naporno),
- fleksibilno definira potek robotske naloge (npr. določi zaporedje vijakov z AR vmesnikom)
- v primeru, da robotu ne uspe izvršiti neke operacije (npr. detektira manjkajoči ali neustrežno vstavljen vijak), ustrezno adaptira robotsko nalogo oz. program.

Virtualni model robotske celice hibridnega delovnega mesta je prikazan na sliki 1, laboratorijska postavitve pa na sliki 2.



Slika 1: Virtualni model hibridne delovne celice.



Slika 2: Laboratorijska postavitve delovne celice.

Tabela 1: Razdelitev nalog robot - človek

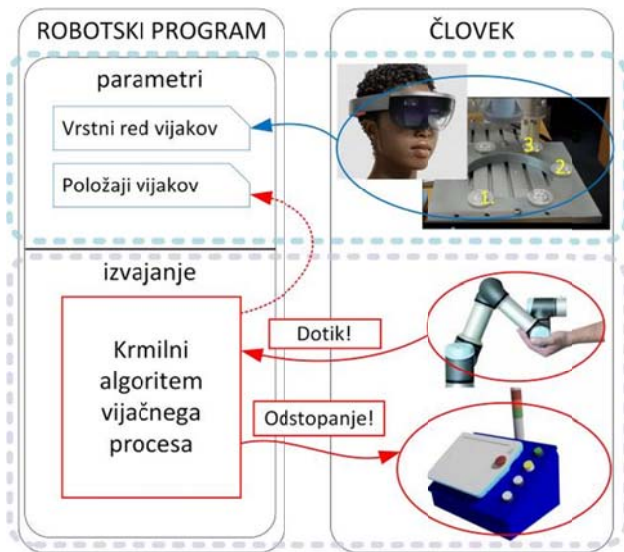
Naloga	Izvajalec	
	Robot	Človek
Vstavljanje vijakov		✓
Vijačenje	✓	✓
Meritev navora	✓	

## 2.1 Robotski program

Robotski program omogoča:

- avtonomno delovanje po vnaprej izbranem vrstnem redu – parametrizacija vrstnega reda izvajanja,
- sprotno spreminjanje parametrizacije vrstnega reda izvajanja,
- detekcijo določenega odstopanja od predvidenega normalnega poteka vijačenja,
- sprotno adaptacijo robotskega programa (sprotno učenje operativnih točk),
- vmesnik med človekom in robotom na osnovi fizičnega dotika.

Robotski program in interakcija s človekom ter pripadajoč informacijski tok so predstavljeni s sliko 3.

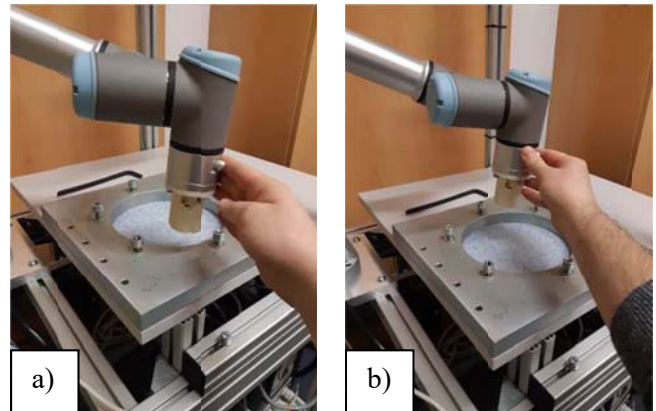


Slika 3: Informacijski tok interaktivnega vmesnika človek – robot.

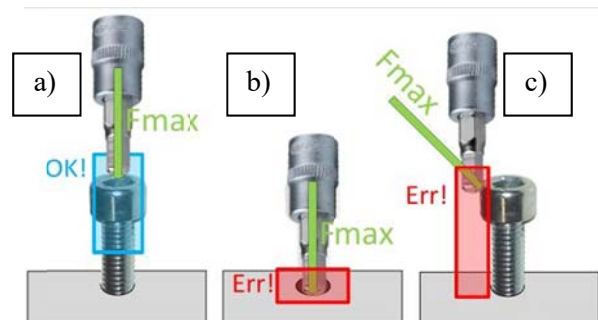
Vijačni cikel se začne tako, da človek nastavi vijake in nato sproži zagon programa preko uporabniške konzole. Robot avtonomno vijači po v naprej določenih položajih in vnaprej določenem zaporedju. Ko zavijači vse vijake se vijačni cikel konča. Človek lahko med vijačnim procesom po potrebi začasno ustavi robota. Pri tem se lahko posluži naravnega in intuitivnega vmesnika, ki je osnovan na fizičnem dotiku, ki je vključen v robotski program in ima natančno definiran odziv robota. V našem primeru smo ob detekciji dotika predvideli začasno zaustavitev izvajanja robotskega programa s preklpom v kinestetični način premikanja robota. Preklop v kinestetični način je enostaven in intuitiven. Po začasni prekinitvi se lahko sproži nadaljevanje izvajanja robotskega programa. Postopek je prikazan na sliki 4.

Robotski program je načrtovan tako, da sproti diagnosticira morebitna odstopanja na določenih delih procesa vijačenja. Program zaznava morebitno odsotnost vijaka na vijačnem mestu in prav tako morebitni spodrseljaj pri vijačenju vijaka (npr. položaj vijaka ni takšen, kot ga robot pričakuje in vijačnika ne pozicionira dovolj natančno ali pa je vijak postavljen poševno ipd.). Zaznavanje odstopanja od predvidenega poteka procesa je zasnovano na principu tipanja okolice z vgrajenim senzorjem sile na vrhu robota. Robot pozicionira vijačno orodje nad vijak in se začne

gibati proti glavi vijaka. Odstopanje določi na podlagi položaja, v katerem zazna silo, kot je prikazano na sliki 5.



Slika 4: Detekcija dotika s preklpom v kinestetično vodenje; a) človek se dotakne robota b), robot zazna dotik in preklopi v kinestetično vodenje – človek lahko robota prosto premika, c) človek lahko sproži nadaljnje izvajanje robotskega programa.

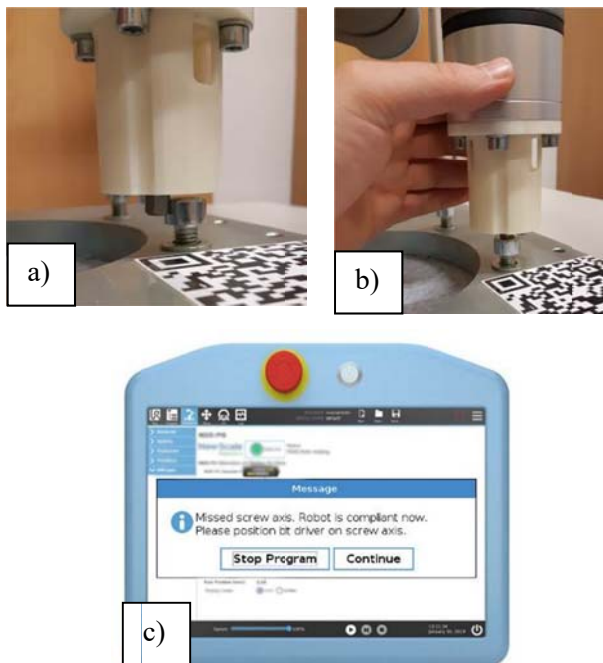


Slika 5: Zaznavanje pravilnega položaja in prisotnosti vijaka; a) robot zazna vijak na pričakovanem mestu, b) robot zazna odsotnost vijaka, c) robot zazna napačno pozicijo.

V primeru zaznanega odstopanja se robot ustavi in preklopi v kinestetični način premikanja ter hkrati to ustrezno signalizira človeku preko uporabniške konzole. Človek ima nato možnost s kinestetičnim vodenjem robota



umakniti ali pa robota naučiti na novi položaj vijaka, kot je to prikazano na sliki 6.



Slika 6: Detekcija odstopanja; a) robot zazna silo dotika z vijakom, ki ni na pričakovanem mestu, b) človek nauči robota na nov položaj vijaka, c) človek preko vmesnika sproži nadaljnje izvajanje.

## 2.2 Varnostne omejitve

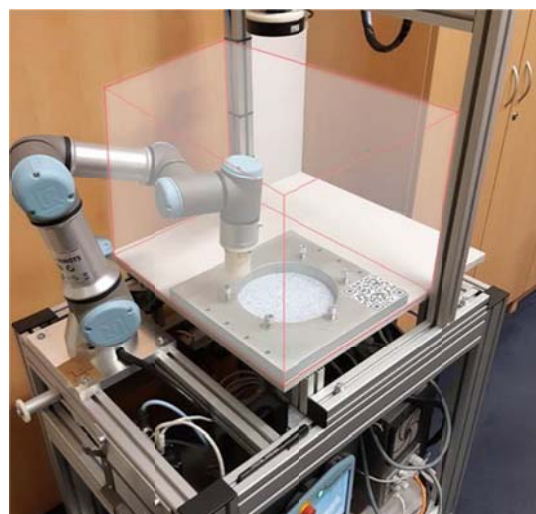
V kinestetičnem načinu vodenja lahko človek premika robota v omejenem delovnem prostoru. Te omejitve predstavljajo enega od varnostnih funkcij kolaborativnega robota. V našem primeru smo omejili položaj orodja z mejnimi ravninami (glej sliko 7) ter tudi rotacijo vijačnega orodja tako, da se prepreči usmeritev le-tega proti človeku.

Če človek tekom kinestetičnega vodenja orodje robota pripelje v bližino ene od mejnih ravnin, najprej začuti odbojno silo. Če človek kljub temu nadaljuje in doseže mejno ravnino, se avtomatsko sproži varnostna zaustavitev (glej sliko 8).

## 3 Interaktivni komunikacijski vmesnik z obogateno resničnostjo

Današnja tehnologija obogatene resničnosti omogoča vrsto različnih vmesnikov. Eno izmed bolj intuitivnih komunikacij lahko dosežemo z uporabo naprav nameščenih na glavi, med njimi

pa gotovo izstopajo očala Microsoft HoloLens [7] na sliki 10, ki smo jih uporabili tudi pri naši laboratorijski aplikaciji vijačenja.



Slika 7: Varnostna omejitev delovnega prostora – beli kvader predstavlja prostor, kjer se lahko nahaja orodje robota.



Slika 8: Varnostna zaustavitev robota blizu mejne ravnine.

HoloLens je prvi popolnoma samostojni holografski računalnik, ki združuje najsodobnejšo optiko in senzorje ter omogoča, da so 3D hologrami postali del našega resničnega sveta. Sledenju pogledu in prepoznavi kretenj predstavljajo primarni način vnosa podatkov pri teh očalih. S pogledom lahko uporabnik posreduje informacije o tem kaj gleda in s tem določi svoje namere. Kazalec, ki prekriva površino realnega sveta, predstavlja povratno informacijo o tem kam je usmerjen uporabnikov pogled. V kombinaciji s prepoznavo človekovih kretenj ali govora lahko uporabnik proži izvršitev določenih ukazov.



Slika 9: Očala za obogateno resničnost HoloLens [7]

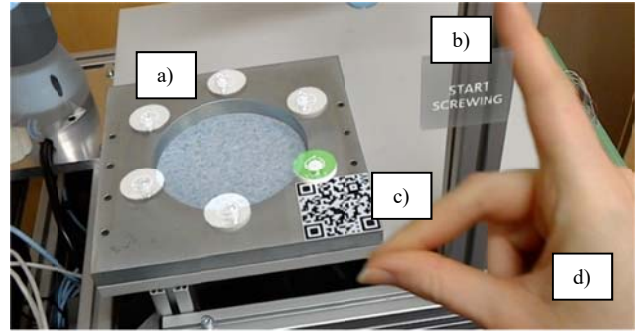
Za potrebe razvoja naše laboratorijske aplikacije smo vzpostavili komunikacijsko povezavo UR3e – ROS – Unity – HoloLens (glej sliko 11).



Slika 11: Komunikacijska arhitektura za obogateno resničnost s HoloLens očali.

Programska oprema Unity3D [8] je namenjena kreiranju virtualnih interaktivnih 3D objektov holografskega vmesnika. Za integracijo očal HoloLens v robotski sistem pa je bilo potrebno vključiti še ROS [9], robotski operacijski sistem, ki združuje programske knjižnice in orodja, ki so v pomoč pri razvoju tovrstnih robotskih aplikacij. Komunikacija med Unity3D in ROS poteka preko t. i. »rosbridge« z uporabo programske knjižnice ROS#, ki omogoča uvoz ali izvoz datotek v .urdf formatu iz ROS v Unity3D ali obratno, ter vzpostavitve komunikacije med njima preko t. i. »websocket« komunikacijskega protokola.

Komunikacija med robotom in ROS-om, ki poteka preko TCP/IP protokola, nam omogoča dostop do podatkov o položaju sklepov robota, podatkov o sili in navoru ter temperaturi sklepov, stanja vhodno-izhodnih enot, statusa robota in definiranje robotske trajektorije ali pošiljanje ukazov v programskem jeziku URScript, ki ga uporablja robotski krmilnik kolaborativnega robota UR3e.



Slika 12: AR vmesnik; a) virtualni gumbi za izbiro mesta vijačenja, b) virtualni gumb za začetek vijačenja, c) AR marker, d) kretnja »Air-tap«

AR vmesnik (glej sliko 12) vključuje šest virtualnih gumbov, ki so pozicionirani na mestih, kjer je potrebno vstaviti vijake in omogočajo definiranje robotske trajektorije ter določitev zaporedja vijačenja. Prostorska poravnava virtualnih objektov glede na realno okolje in objekte v njem je dosežena z uporabo markerja v obliki QR kode, ki služi kot referenca za pozicioniranje virtualnih objektov v realnem svetu. Prepoznavo in sledenje markerjem omogoča knjižnica Vuforia [10], ki jo lahko integriramo v programsko okolje Unity3D. Desno od omenjenih virtualnih gumbov je nameščen virtualni gumb za začetek vijačenja, ki ga pritisnemo po končani izbiri vijakov.

Z uporabo intuitivnega holografskega vmesnika je definiranje robotske trajektorije hitro in fleksibilno. Potrebno je določiti le mesta vijačenja in njihovo zaporedje izvajanja. Potek definicije robotske naloge z AR vmesnikom:

1. S pogledom na virtualni gumb izberite mesto vijačenja (vijak 1-6).
2. S kretnjo »Air-tap« ali z uporabo klikerja potrdite izbiro (virtualni gumb se obarva zeleno).
3. Enak postopek ponovite za ostale vijake.
4. Po končani izbiri usmerite pogled na virtualni gumb »START SCREWING« in potrdite izbiro s kretnjo »Air tap« ali z uporabo klikerja.
5. Izvede se virtualna simulacija robotske trajektorije. Če je simulacija uspešno zaključena, ponovno pritisnite gumb »START SCREWING«.
6. Parametri vijačenja se prenesejo na robotski krmilnik, ki izvrši načrtovano nalogo na realnem robotu.



*Slika 13: Holografski virtualni 3D model robota UR3e med izvajanjem simulacije prekriva realno okolje.*

Z namenom validacije definirane robotske trajektorije lahko holografski vmesnik prikaže simulacijo gibanja robota z virtualnim 3D modelom (glej sliko 13). Simulacija predvidene robotske trajektorije se pri tem izvede pred izvajanjem programa na realnem robotu. Na ta način lahko uporabnik preveri korektnost sekvence vijačenja in izvedljivosti naloge. Prav tako pa lahko tudi preveri, da bo izvedeno gibanje robota prosto kolizij.

#### 4 Zaključek

Kolaborativne robotske aplikacije prinašajo v industrijo nove možnosti avtomatizacije. Verjetno jih je najbolj enostavno vpeljati v postopke sestavljanja ali montaže, ki vključujejo tipične operacije, kot je vijačenje. Pri tem lahko elementarne operacije razdelimo tako, da človek vstavlja vijake v luknje, robot pa jih privijači. Na ta način se bistveno poenostavi naloga robota in tako proizvodna tehnologija. Znižajo se tudi investicijski stroški, kar je ugodno predvsem za avtomatizacijo delovnih mest v manjših in srednje velikih podjetjih. V nasprotju s popolnoma avtomatiziranimi sistemi vijačenja ni potrebe po dodatni opremi, ki bi bila namenjena sortiranju, orientiranju in doziranju vijakov do vijačnika, ki je nameščen na robotu. Fizično zahtevnejše naloge vijačenja prevzame robot, medtem ko si delovni prostor s človekom. Definiranje robotske trajektorije je fleksibilno do te mere, da omogoča dinamično spreminjanje robotske trajektorije na zelo intuitiven način, saj lahko neposredno prilagaja trajektorijo praktično vsak uporabnik preko holografskega vmesnika, brez predhodnega znanja o programiranju robotov.

Predstavljena laboratorijska aplikacija združuje ključne elemente, ki so potrebni za razvoj človeku varne in intuitivne kolaborativne aplikacije, v katero sta aktivno vključena človek in robot. Komunikacija med njima poteka na človeku naraven in učinkovit

način (fizični stik, holografski vmesnik). Fizična interakcija omogoča adaptacijo robotske naloge preko kinestetičnega učenja, z vmesnikom obogatene resničnosti pa lahko robotsko nalogo definiramo fleksibilno.

Razvoj laboratorijske aplikacije želimo nadaljevati predvsem v smeri izboljšanja časovne učinkovitosti takšnih kolaborativnih sistemov z adaptivnim re-planiranjem robotske trajektorije na podlagi predvidevanja morebitnih kolizij s človekom in okolico.

#### 5 Zahvala

To delo je bilo delno sofinancirano v okviru projekta ROBOTool-1, OP20.03540, Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

#### 6 Literatura

- [1] "ISO 10218-1/2:2011 Robots and Robotic Devices Safety Requirements for Industrial Robots Part 1: Robots/Part 2: Robot Systems and Integration.," 2011.
- [2] "ISO/TS 15066:2016 Robots and Robotic Devices Collaborative Robots," 2016.
- [3] A. Cherubini, R. Passama, P. Fraise, and A. Crosnier, "A unified multimodal control framework for human-robot interaction," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 70, pp. 106–115, 2015.
- [4] R. Gerbersa, M. Mücke, F. Dietricha, and K. Drödera, "Simplifying robot tools by taking advantage of sensor integration in human collaboration robots," in *6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS)*, 2016, pp. 287 – 292: Elsevier.
- [5] R.-J. Halmea, M. Lanza, J. Kamarainen, R. Pietersa, J. Latokartanoa, and A. Hietanen, "Review of vision-based safety systems for human-robot collaboration," in *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2018, vol. 72, pp. 111-116: Elsevier.
- [6] "Universal Robots," Accessed on: 11.3.2019 Available: <https://www.universal-robots.com/>
- [7] "Microsoft HoloLens," Accessed on: 11.3.2019 Available: <https://www.microsoft.com/en-US/hololens>
- [8] "Unity3D," Accessed on: 11.3.2019 Available: <https://unity3d.com/>
- [9] "ROS," Accessed on: 11.3.2019 Available: <http://www.ros.org/>
- [10] "Vuforia," Accessed on: 11.3.2019 Available: <https://www.vuforia.com/>