

Kolaborativna robotika – ključ učinkovitosti i kvalitete u maloserijskoj proizvodnji

dr. sc. tech. Bruno Marić
bruno.maric@fer.unizg.hr

27. Dan kakovosti, Sekcija za kakovost pri GZDBK
27.11.2025., Šmarješke Toplice

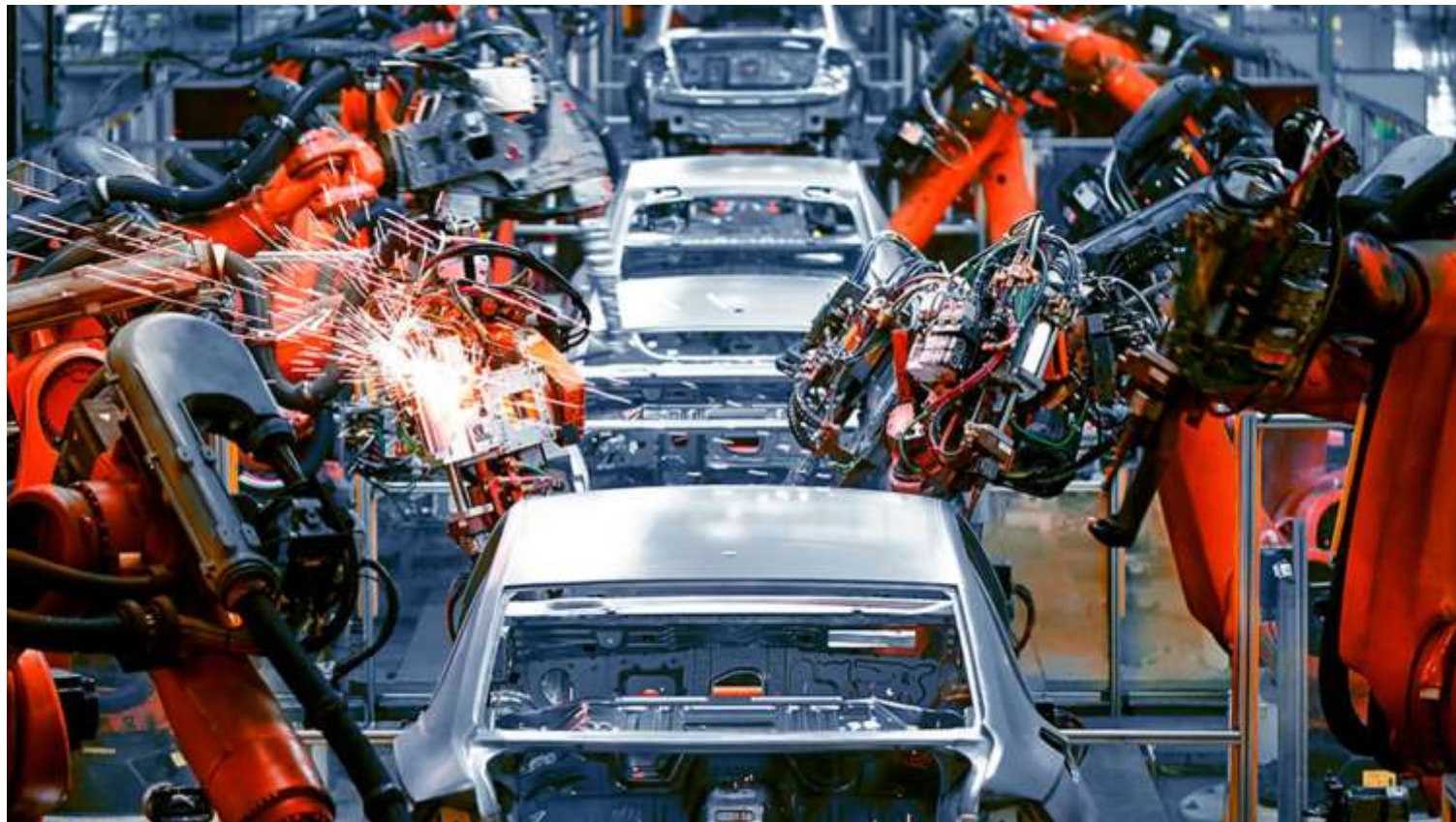


GOSPODARSKA ZBORNICA
DOLENJSKE IN BELE KRAJINE



- 
- Uvod
 - FER
 - CROBOHUB++
 - LARICS
 - Kolaborativna robotika
 - Zaključak

Roboti u industriji



Roboti u maloserijskoj industriji?



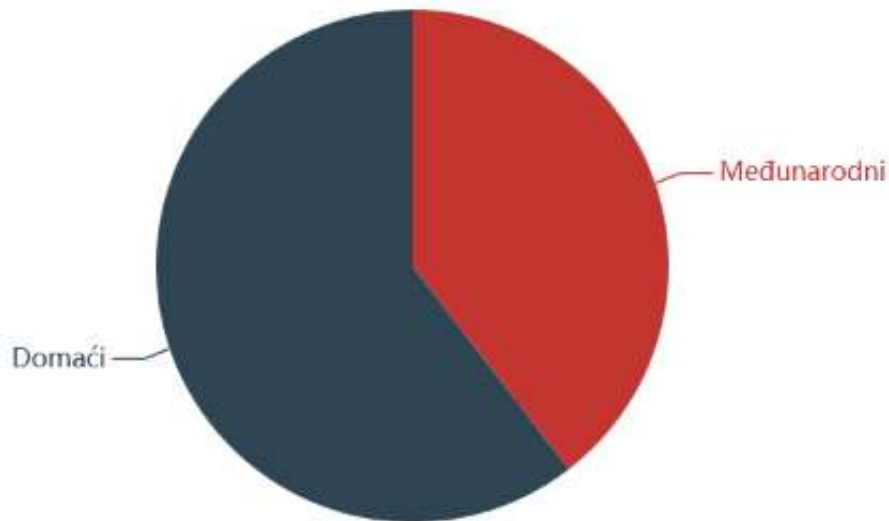
- 
- Uvod
 - FER
 - CROBOHUB++
 - LARICS
 - Kolaborativna robotika
 - Zaključak

- **Vodeća visokoškolska i istraživačka institucija** koja svoje znanje i inovacije izravno povezuje s potrebama gospodarstva i industrije.
- **VIZIJA:** Postati prepoznatljiva europska visokoškolska i istraživačka institucija u području **elektrotehnike, računarstva te ICT-a** – ustanova koja obrazuje vrhunske tehnološke stručnjake i odgovorne lidere koji će kreirati budućnosti Hrvatske i Europe
- **12 zavoda** kao **jezgra** nastavnoga, istraživačkoga i znanstvenoga rada na pojedinome području ili grani

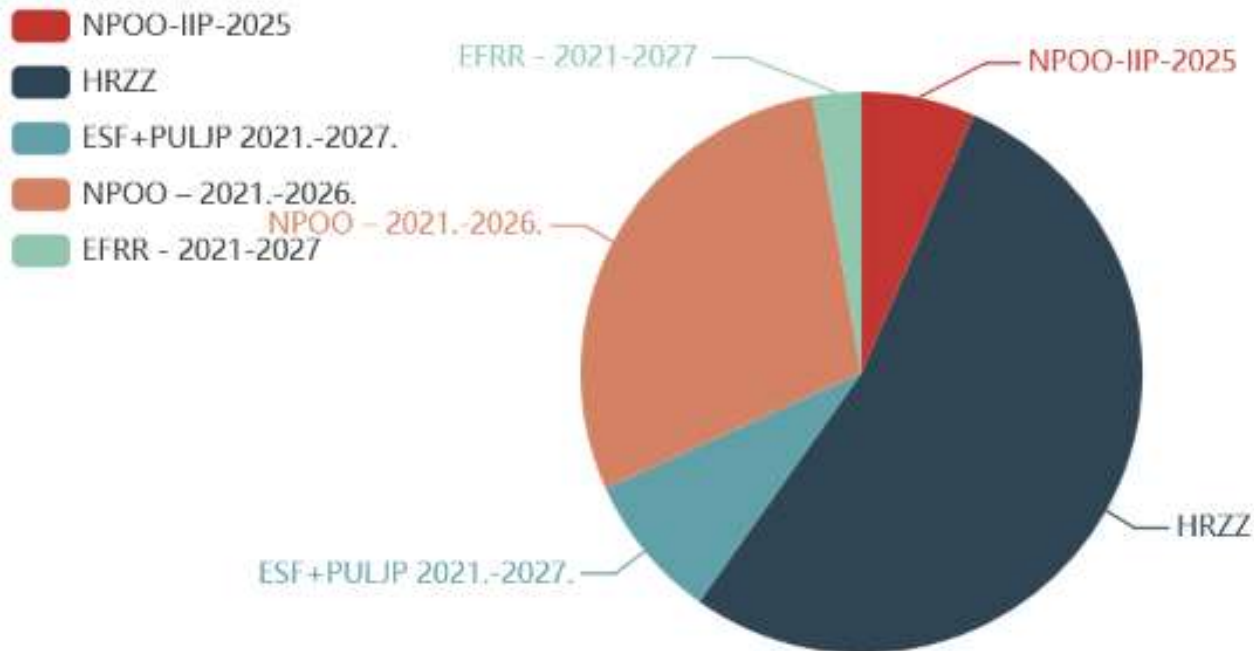


Istraživanje na FERu

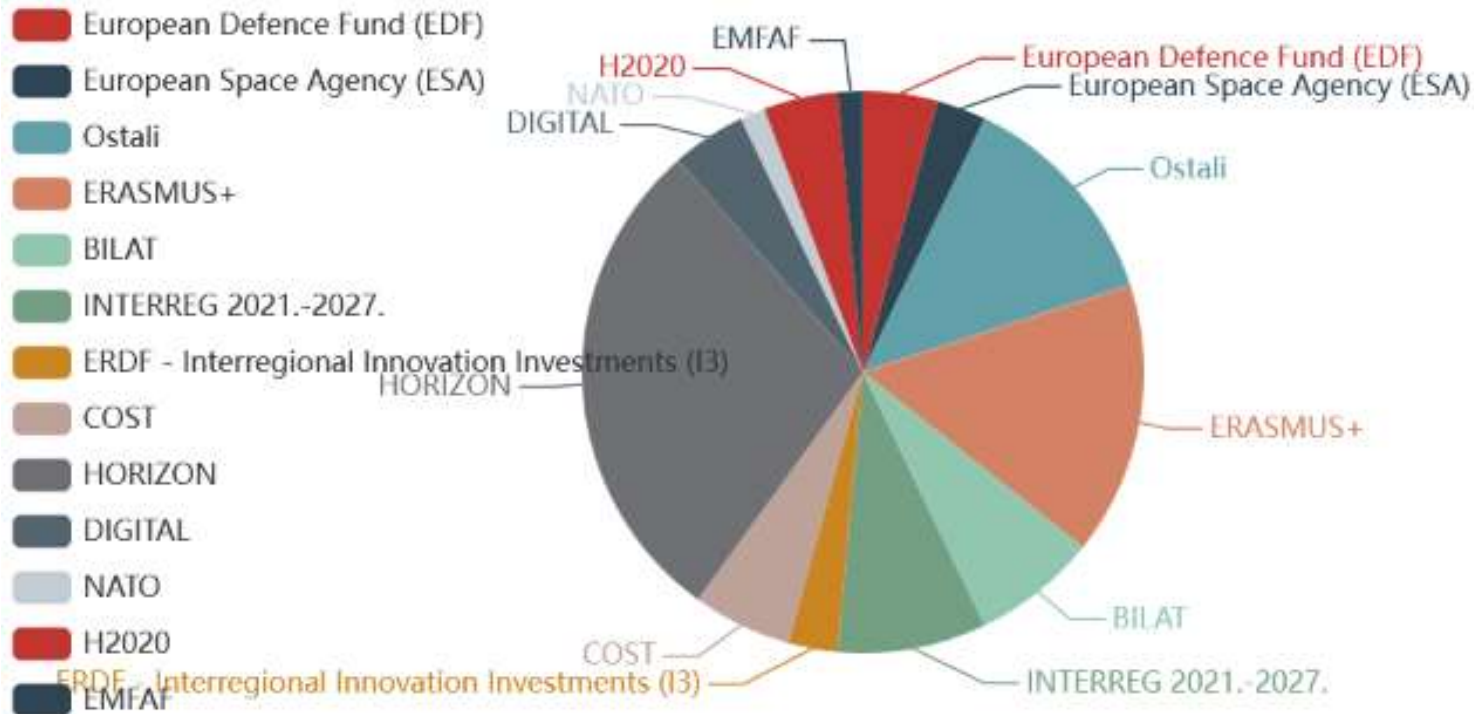
- Danas se na FER-u provodi više od 150 visokotehnoloških istraživačkih projekata te deseci projekata suradnje s gospodarstvom
- Prema podacima Europske komisije, FER je među vodećim institucijama u Hrvatskoj u privlačenju sredstava iz europskih fondova



Istraživanje na FERu – Domaći projekti



Istraživanje na FERu – Međunarodni projekti



Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo (ZARI)

- **Osnovan 1954.** kao Zavod za kontrolne i signalne uređaje (osnivač prof. dr. sc. Vladimir Muljević)
- **Algoritmi upravljanja** za procese, robote, plovila, pH procese i toplinske izmjenjivače.
- **Neizrazita logika, neuronske mreže**, prediktivno, adaptivno i robusno upravljanje, otpornost na kvarove.
- **Automatizacija** diskretnih procesa, fleksibilni proizvodni sustavi, daljinsko prikupljanje podataka.
- **Ugrađeni i komunikacijski sustavi**, arhitekture mikroračunala, jezici za opis sklopovlja, CAD alati.
- **Sigurnost i ICT:** šifriranje, sažimanje podataka, distribuirani sustavi, e-trgovina i e-plaćanja.





- 
- Uvod
 - FER
 - CROBOHUB++
 - LARICS
 - Kolaborativna robotika
 - Zaključak

- **Misija:** Digitalna transformacija gospodarstva u području proizvodnih tehnologija, poljoprivrede, energije i okolišta te javne i državne uprave korištenjem ekspertize i infrastrukture konzorcijskih partnera kroz pružanje skupa posebno osmišljenih usluga te umrežavanje dionika u lancu vrijednosti, na nacionalnoj i europskoj razini
 - **ciljani korisnici:**
 - mikro, mala i srednja poduzeća (uključivo i poduzeća srednje tržišne kapitalizacije)
 - institucije državne i javne uprave
 - usluge su za korisnike **besplatne**
- Ključne tehnologije (Digital European Program – DEP)
 - Umjetna inteligencija (AI)
 - Kibernetička sigurnost (Cybersecurity)
 - Računarstvo visokih performansi (HPC)
 - Ključni sektori EDIH CROBOHUB++
 - Proizvodne industrije (manufacturing)
 - Digitalizirana poljoprivreda (smart agriculture)
 - Energija i okoliš (energy and environment)
 - Javna i državna uprava (public services)

EDIH CROBOHUB ++

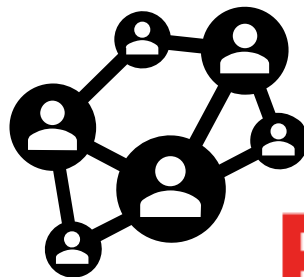
Partneri



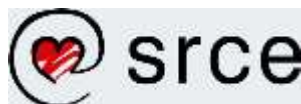
INFODOM



Fakultet
elektrotehnike i
računarstva



CROBOHUB++

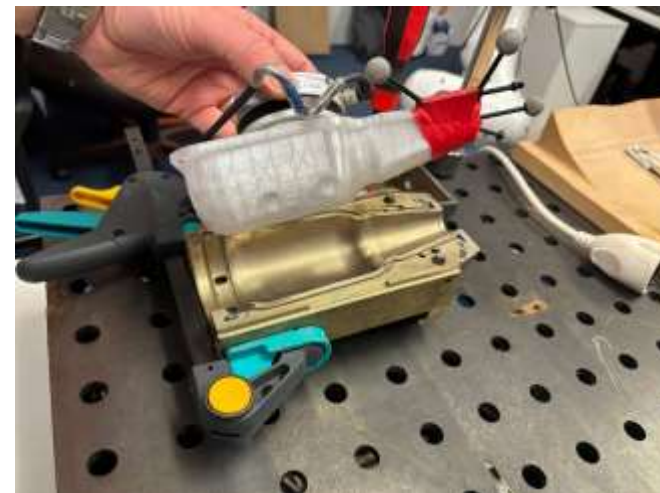


Primjeri provedenih TBI usluga

- Korisnik: Metal product d.o.o.
- Industrija: Metaloprerađivačka industrija
- Specifičnost korisnika:
 - Raznolikost proizvodnje
 - Proizvodnja velikih i malih serija
- Teme:
 - Inspekcija kvalitete prešanih elemenata
 - Automatsko punjenje preša za uklanjanje srha s otkivaka
 - Programiranje demonstracijom za zavarivanje i brušenje



Analiza izvedivosti detekcije pukotine u otkivku



Analiza izvedivosti automatskog punjenja preša

- 
- Uvod
 - FER
 - CROBOHUB++
 - LARICS
 - Kolaborativna robotika
 - Zaključak

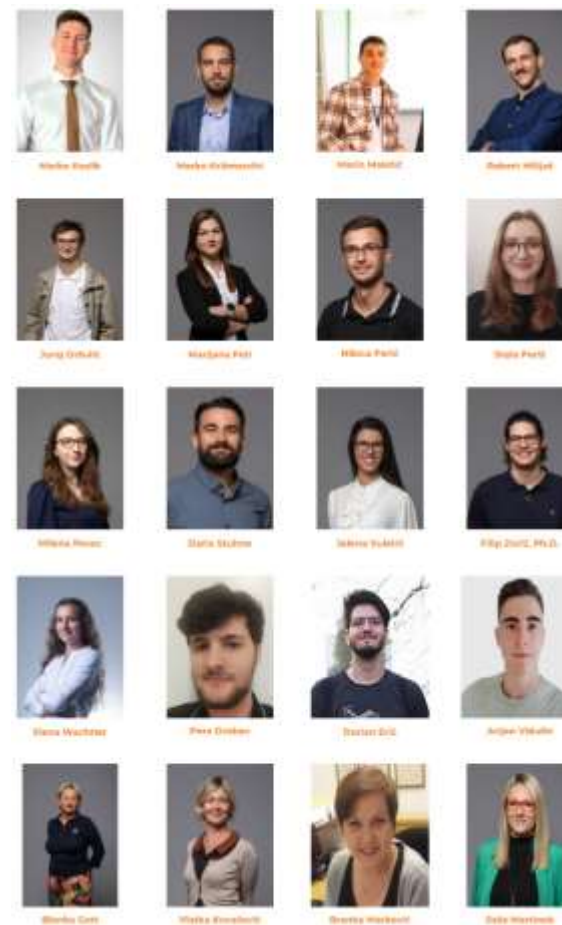
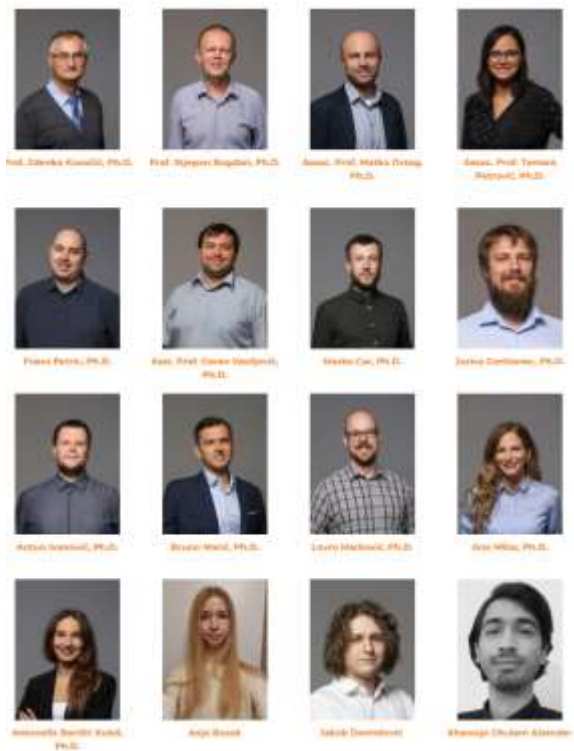
Flying, walking, driving robots



FER **VARICS**



Tim





Heterogeneous autonomous robotic system in viticulture and mariculture



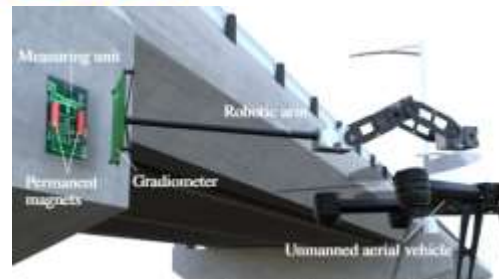
"smart biohybrid organisms" for environmental monitoring.



Structured Ecological CULTivation with Autonomous Robots In Agriculture



Aerial cognitive robotic system with capabilities on the operational range and safety in the interaction with Aerial Co-Workers



Autonomous System for Assessment and Prediction of Infrastructure Integrity



- 
- Uvod
 - FER
 - CROBOHUB++
 - LARICS
 - Kolaborativna robotika
 - Zaključak

Što je to kolaborativna robotika? Kolaborativni roboti ili koboti?

- Roboti dizajnirani za siguran rad uz ljude u zajedničkom radnom prostoru bez potrebe za sigurnosnim barijerama



Robotski manipulatori



Industrijski:

- Važan faktor moderne industrije
- Specifični ponavljajući zadaci
- Predprogramirani
- Komplicirani za reprogramiranje
- Zatvorene radne ćelije
- Primjeri: autoindustrija, industrija velikog obujma, itd.



Kolaborativni:

- Drugačiji pristup, dijeljenje radnog prostora
- Fleksibilna robotska proizvodnja
- Industrija malog obujma
- Jednostavna tranzicija između različitih zadataka

Industrijski vs. Kolaborativni manipulatori

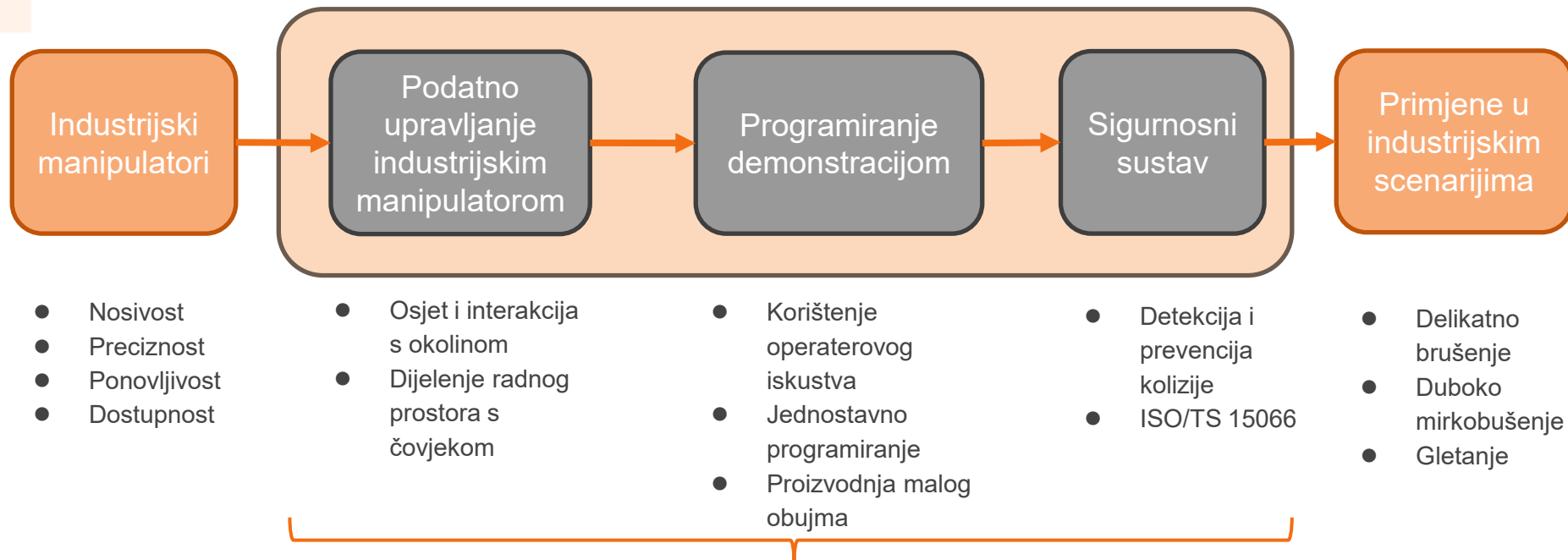


- Kruto upravljani
- Nosivost: 10-30
- Velika brzina, vi

- ...po momentu zglobova
- ...do 15 kg
- Usjet prema okolini

Praznina ??

Kako premostiti prazninu?



Sigurno kolaborativno okruženje za podatne industrijske manipulatore

Programiranje demonstracijom

- Rastuća potražnja za fleksibilnim robotskim manipulatorima u maloserijskim proizvodnjama
- Izbjegavanje potrebe za inženjerom robotike pri primjeni robota u novim scenarijima
- Uzimanje u obzir udobnosti operatera te njegov utjecaj na demonstraciju
- PbD – Stjecanje vještine:
 - Kinestetičko učenje
 - Novo sučelje čovjek-robot temeljeno na sustavu za praćenje gibanja
- Reprodukcija vještina



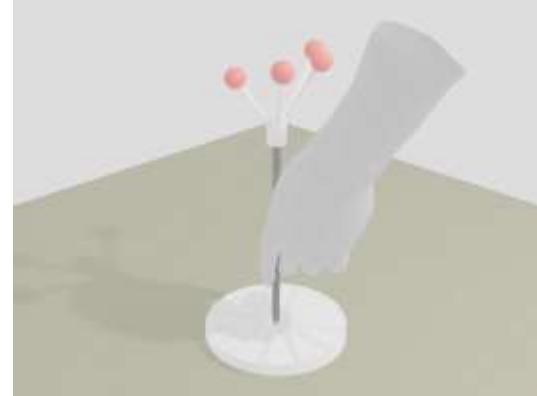
Programiranje demonstracijom korištenjem kolaborativnog robota

Virtualna olovka

- Jednostavno i intuitivno za operatera
- Minimiziranje izravnog kontakta operatera i robota
- **Virtualna olovka:**
 - alat **nalik olovci** koji omogućava demonstraciju **bez napora**, zadržavajući operatera operateru u njegovoj zoni komfora
 - Vrh u obliku šiljka ili linije
- **Metode kalibracije** virtualne olovke
 - Prikupljanje podataka
 - Predložena metoda kalibracije
- Svestranost upotrebe



Virtualna olovka



Prikupljanje podataka za kalibraciju alata



Prikupljanje podataka za kalibraciju alata

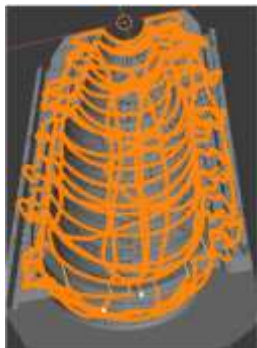
[1] M. Polic, B. Maric and M. Orsag, "Soft robotics approach to autonomous plastering," *2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Lyon, France, 2021, pp. 482-487

Implementacija robotskih sustava koristeći virtualnu olovku

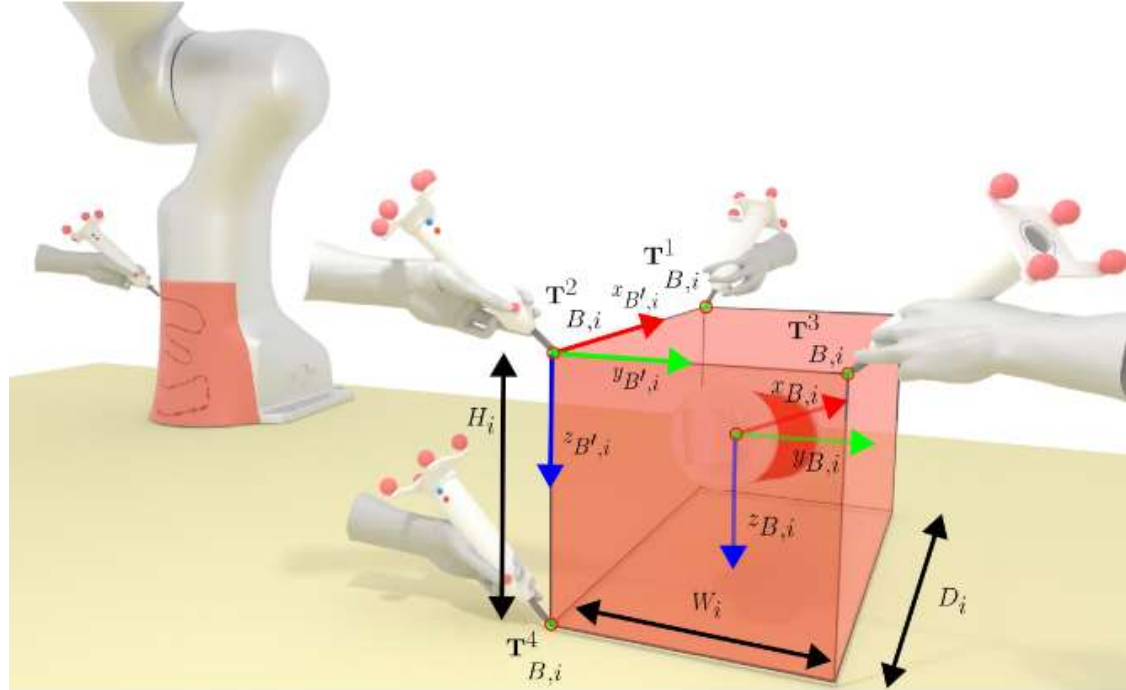
- Brzo i jednostavno kreiranje virtualne reprezentacije radnog prostora robota
- Mjerenje točke/točaka:

$$\mathbf{p} = [x \ y \ z \ q_x \ q_y \ q_z \ q_w] \in \mathbb{R}^{1 \times 7}$$

- **Markiranje prepreka**
- **Prijenosni skener**
- **Lokalizacija objekata pomoću poznatih 3D modela**



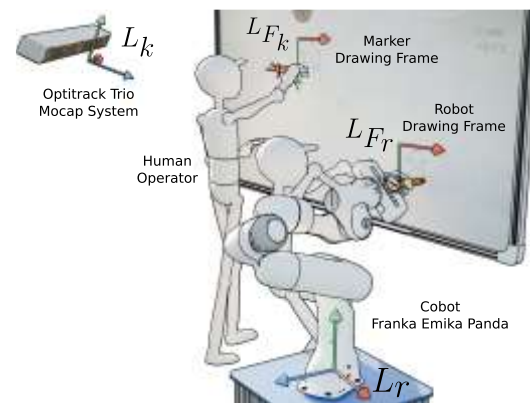
Skenirani oblak
točaka



Svestranost korištenja virtualne olovke u implementaciji robotskih sustava

Programiranje demonstracijom: Korisničko iskustvo (1)

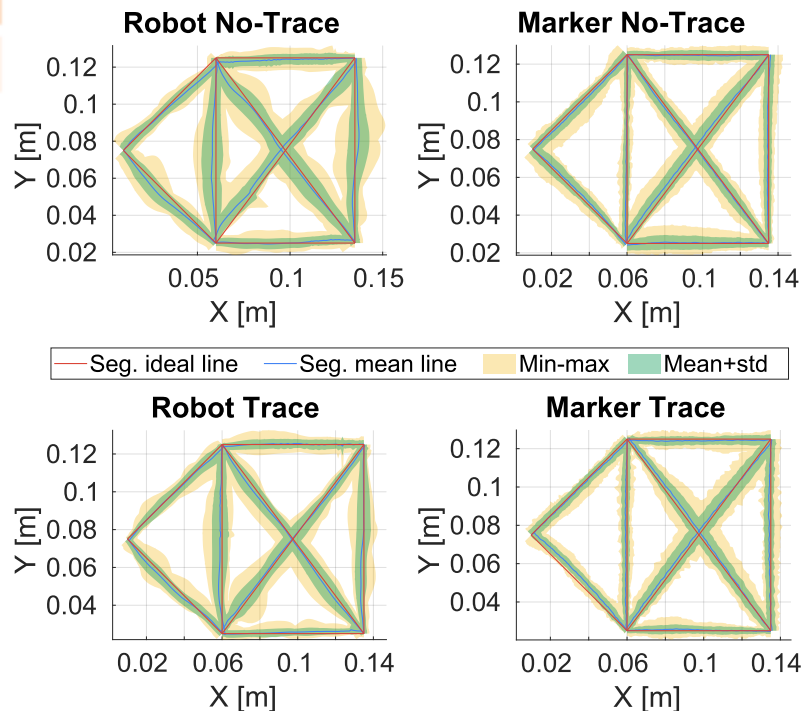
- **Hipoteza:** Virtualna olovka je **intuitivna i jednostavna** za korištenje te snima čistu bit demonstracije, dok suprotno tome, **kinestetički** pristup gura operatera **izvan njihove zone komfora**, što rezultira vrlo **pristranim** demonstracijama.
- Eksperimentalna postavka hardvera: Franka Emika Panda, F/T senzor
- Jednostavan zadatak crtanja koji **zahtijeva vještinu koju posjeduju svi**
- **Evaluacija zadatka**
- **NASA-in** indeks opterećenja sirovog zadatka i test upotrebljivosti sustava (**SUS**)



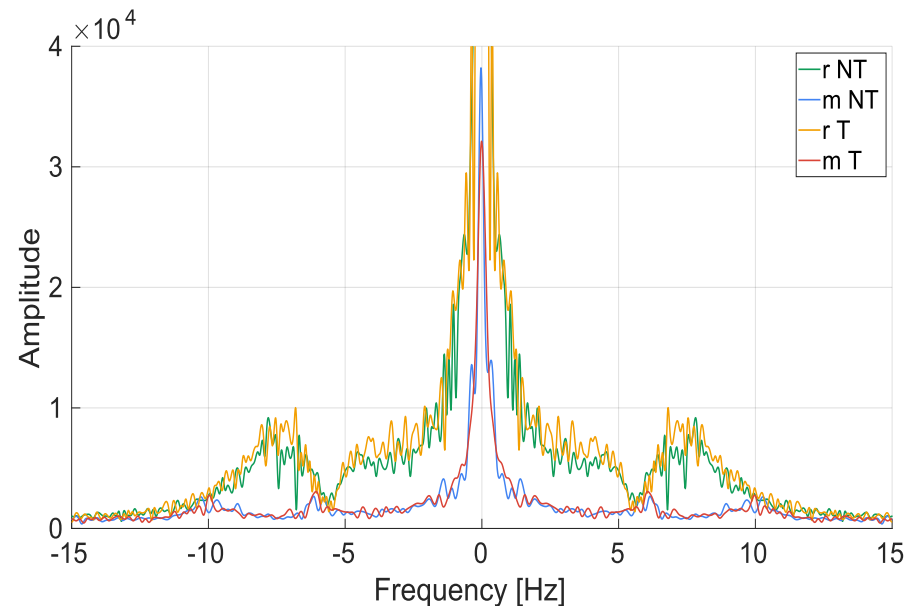
[2] B.Maric, F. Zoric, F. Petric and M. Orsag, "Comparative Analysis of Programming by Demonstration Methods: Kinesthetic Teaching vs Human Demonstration," 2024 *arXiv preprint arXiv:2403.10140*

[3] B.Maric, F. Zoric, F. Petric and M. Orsag, "Kinesthetic vs Imitation: Analysis of Usability and Workload of Programming by Demonstration Methods," *Workshop on Mechanisms for Mapping Human Input to Robots From Robot Learning to Shared Control/Autonomy, Robotics: Science and Systems, Delft, 2024*

Programiranje demonstracijom: Korisničko iskustvo (2)



Demonstrirane trajektorije



Frekvencijska analiza sile dodira

[2] B. Maric, F. Zoric, F. Petric and M. Orsag, "Comparative Analysis of Programming by Demonstration Methods: Kinesthetic Teaching vs Human Demonstration," 2024 *arXiv preprint arXiv:2403.10140*

[3] B. Maric, F. Zoric, F. Petric and M. Orsag, "Kinesthetic vs Imitation: Analysis of Usability and Workload of Programming by Demonstration Methods," *Workshop on Mechanisms for Mapping Human Input to Robots From Robot Learning to Shared Control/Autonomy, Robotics: Science and Systems, Delft, 2024*

ROBOFAKTURA – Sustav demonstracijom podržanog programiranja robotskih ćelija

- **CILJ:** proširiti mogućnosti robotske tehnologije u postojećim industrijskim nišama, otvoriti nova područja primjene i omogućiti primjenu izvan industrije, poput uslužnih djelatnosti i medicine
- **Ubrzano programiranje i implementacija** s naglaskom na tehnike kolaborativnog programiranja. Naš cilj? Pojednostavljivanje integracije robotskih rješenja u postojeće proizvodne linije, čineći automatizaciju dostupnom svim poduzećima.
- **Vrhunska tehnologija**, koja uključuje inovativne alate za označavanje radnih prostora robota i olakšavanje učenja kroz simulirana okruženja.



PRIMJER 1: Delikatno brušenje kompozitnih materijala

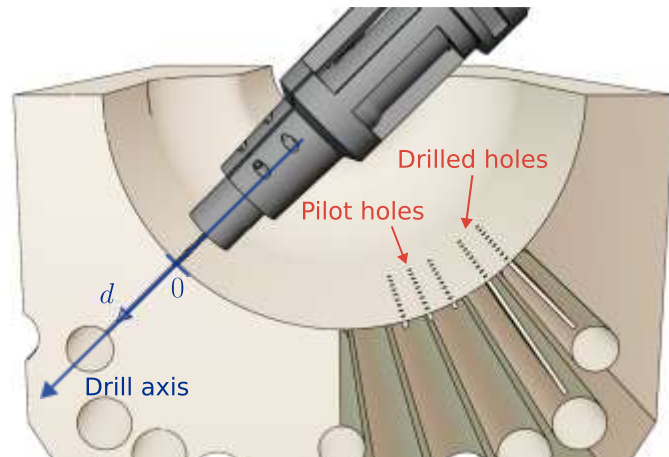
- Podatni industrijski manipulator:
 - 6 stupnjeva slobode
 - Kinestetičko učenje
- Mjerenje sila i momenata
- Skeniranje, lokalizacija, generiranje trajektorija
- Rezultati:

Product	1DOF	6DOF	PbD
A	60%	75%	80%
B	34%	50%	50%
C	0%	60%	98%



PRIMJER 2: Duboko mikro-bušenje kalupa za proizvodnju stakla (1)

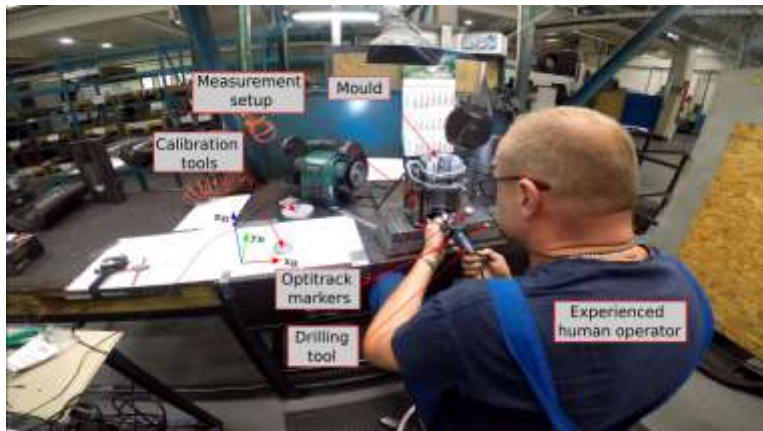
- Mikro rupe izbušene prema vakuumskim kanalima za izvlačenje zarobljenog zraka
- **Mehaničko bušenje** dubokih mikro rupa: svrdlo 0.4-0.6 mm, dubina bušenja do 25 mm
- Nečistoće materijala
- **Proizvodna linija ovisi o vještinama** samo nekolicine kvalificiranih radnika
- Kinestetičko učenje može gurnuti operatera izvan njegove **zone komfora** i rezultirati značajnim **smanjenjem performansi**
- Kinematika bušenja dubokih mikro rupa:
 - Položaj rupe
 - Vektor bušenja
 - Dubina bušenja (putanja)



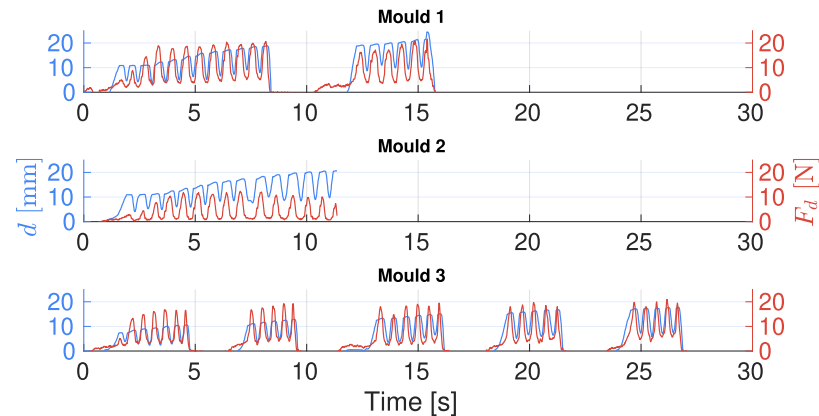
[4] B. Maric, F. Petric, D. Stuhne, V. Ranogajec and M. Orsag, "Replicating human skill for robotic deep-micro-hole drilling," *2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Mexico City, Mexico, 2022, pp. 2238-2244

PRIMJER 2: Duboko mikro-bušenje kalupa za proizvodnju stakla (2)

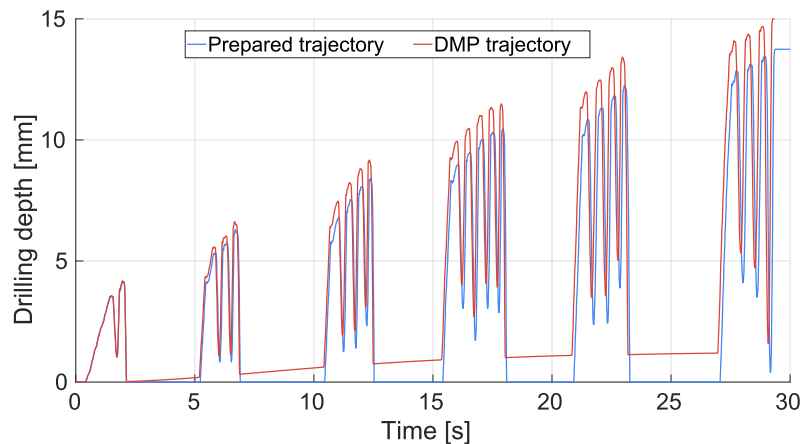
- Snimanje vještine
 - Skeniranje i lokalizacija na licu mjesta
- Obrada snimaka i izdvajanje specifičnosti ljudskog bušenja
- Repliciranje stručne vještine - DMP
- Kontroler bušenja: 1-DOF



Pokretni mjerni postav



Specifične trajektorije bušenja za nekoliko kalupa



Generirane trajektorije za reprodukciju

PRIMJER 2: Duboko mikro-bušenje kalupa za proizvodnju stakla (3)

- Prvi cilj bio je reproducirati snimljenu ljudsku vještinu uz održavanje sličnog trajanja i dubine:

	Operator performance	Robot performance
Mould 1	up to 25	more than 120
Mould 2	8	60
Mould 3	8	20
Mould 4	4	19
Mould 5	7	10

- Drugi cilj bio je izbušiti kalup sa sličnim svojstvima materijala kao oni korišteni u početnom snimanju.
- Pokazana je prilagodljivost i učinkovitost predloženog sustava

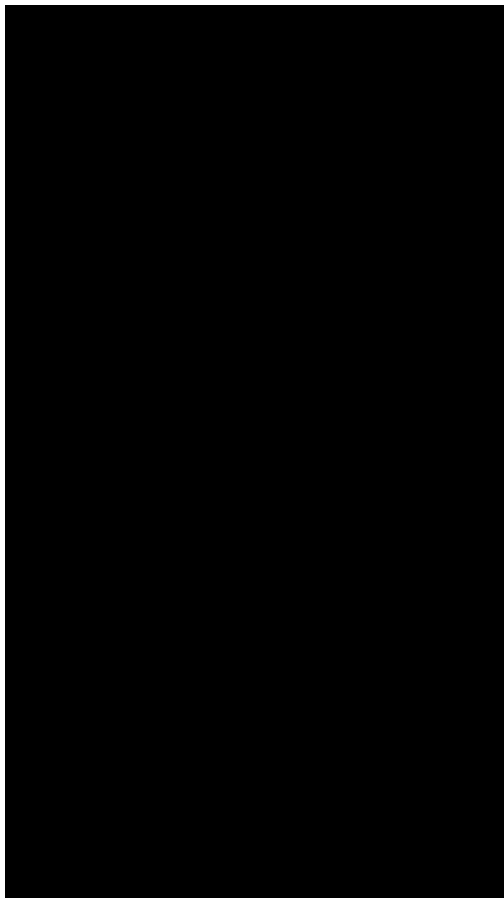


PRIMJER 3: Programiranje robotskog zavarivanja demonstracijom

- **IDEJA:** Omogućiti robotsko zavarivanje u industrijama gdje se proizvodi izmjenjuju svakodnevno
- Kroz jednostavnu demonstraciju putanje u koju je potrebno smjestiti zavar
- Izbor pokreta zavarivanja:
 - Sintetiziran s obzirom na parametre tehnologije
 - Demonstriran



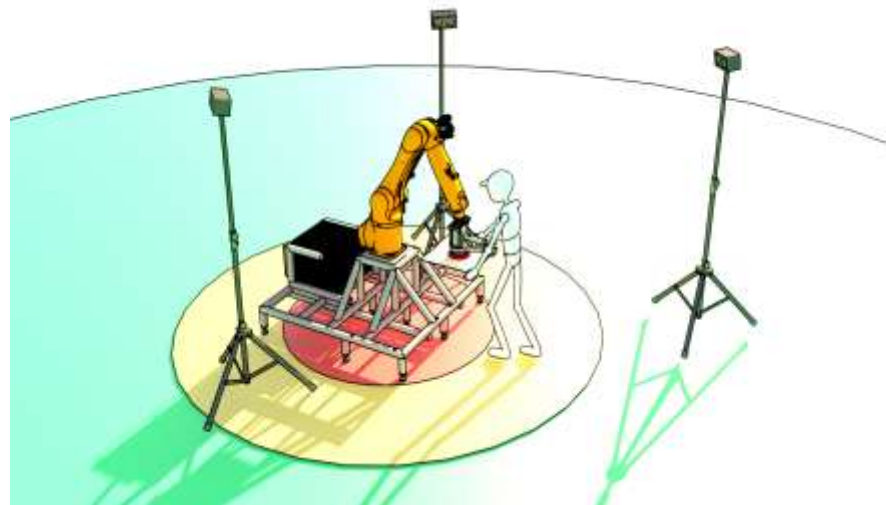
PRIMJER 3: Programiranje robotskog zavarivanja demonstracijom



- 
- Uvod
 - FER
 - CROBOHUB++
 - LARICS
 - Kolaborativna robotika
 - **Zaključak**

Zaključak

- Primjena robota u maloserijskoj proizvodnji moguća korištenjem principa kolaborativne robotike
- Snimanje demonstracija kao izrazito bitna komponenta sustava kojoj je potrebno posvetiti posebnu pažnju. Guranje operatera u nepoznato okruženje može značajno utjecati na samu demonstraciju.
- Primjenom robota postiže se povećanje učinkovitosti, povećanje ponovljivosti te u konačnici osiguranje kvalitete
- Predstavljena tri industrijska primjera kolaborativne robotike





Hvala na pažnji!



27.11.2025., Novo Mesto

