

# Kolaborativni sustavi čovjek- robot

---

**Palajsa, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:822661>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-16**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Palajsa**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Student:

Ivan Palajsa

Zagreb, 2021.

**ZADATAK**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

**ZAVRŠNI ZADATAK**

Student: **Ivan Palajsa** Mat. br.: 0035207688

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kolaborativni sustavi čovjek-robot**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Human-robot collaboration systems**

Opis zadatka:

Ljudski alati postaju sve napredniji, a u njima se ogleda i opredmećena ljudskost, bilo u izvršnom, bilo u upravljačkom smislu. Interakcija čovjeka i naprednog stroja kao što je robot, nema svoj značaj samo u predvidivom industrijskom okruženju, već i u mnogim drugim područjima, gdje nadolazeće tehnologije tek trebaju na što kvalitetniji način zadovoljiti snažan ljudski poriv za interakcijom.

U radu je potrebno:

1. istražiti i opisati područja industrijsko-proizvodne i uslužne primjene kolaborativnog rada čovjek-robot
2. opisati stanje tehnike, napose primijenjene ili primjenjive senzoričke u vezi ljudi uključenih u kolaboraciju
3. koncipirati kolaborativan sustav čovjek-robot u kojem se praćenjem (stanja) ljudskog sudionika planiraju i izvode odgovarajuće radnje robota.

Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Datum predaje rada:  
**1. rok:** 18. veljače 2021.  
**2. rok (izvanredni):** 5. srpnja 2021.  
**3. rok:** 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 22.2. – 26.2.2021.  
**2. rok (izvanredni):** 9.7.2021.  
**3. rok:** 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Zoranu Kunici, na savjetima, uloženom vremenu, primjedbama i korekcijama koje su pomogle u izradi ovog rada, također cijeloj svojoj obitelji, svim kolegama i prijateljima na potpori koju su mi pružili tijekom cijelog studija.

U Zagrebu, 23. rujna 2021.

Ivan Palajsa

## **SAŽETAK**

U ovom radu istražene su i opisane industrijsko-proizvodne i uslužne primjene kolaboracije između čovjek i robota. Opisane su tehnologije koje se koriste kako bi suradnja čovjeka i robota bila sigurna i učinkovita. Predložena su dva kolaborativna sustava čovjek-robot koji bi pomogli u suzbijanju širenja zaraze koronavirusom među medicinskim osobljem.

Ključne riječi: kolaboracija čovjek-robot, kolaborativni robot, primjena, sensorika, koronavirus

## **SUMMARY**

Within this paper, the industrial-production and service applications of human-robot collaboration are explored and described. The technologies used to make human-robot collaboration safe and effective are described. Two collaborative human-robot systems have been proposed to help combat the spread of coronavirus infection among medical personnel.

Key words: collaboration man-robot, collaborative robot, application, sensorics, coronavirus

## SADRŽAJ

ZADATAK.....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY .....	IV
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA .....	VII
POPIS SLIKA .....	VIII
POPIS TABLICA.....	X
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KOLABORACIJA ČOVJEK–ROBOT .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Povijesni razvoj [3] .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Prednosti korištenja kolaborativnih robota.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Sigurnost.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4. Primjena kolaborativnih robota.....</b>	<b>7</b>
2.4.1. Primjena u montaži .....	8
2.4.2. Primjena u zavarivanju.....	10
2.4.3. Primjena u rukovanju materijalom.....	11
2.4.4. Primjena u zdravstvenom sektoru .....	12
<b>3. PRIMIJENJENA SENZORIKA U KOLABORATIVNIM SUSTAVIMA IZMEĐU     ČOVJEKA I ROBOTA.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Robotski sustavi .....</b>	<b>16</b>
3.1.1. Kolaborativne robotske ruke [21] .....	17
3.1.2. Nosivi robotski sustavi (egzoskeleti) .....	18
<b>3.2. Senzori u kolaboraciji čovjeka i robota .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Aktuatori u kolaboraciji čovjeka i robota .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4. Tehnike učenja robota.....</b>	<b>24</b>



---

<b>4. MOGUĆNOST PRIMJENE KOLABORACIJE ČOVJEKA I ROBOTA U BORBI PROTIV ŠIRENJA COVID–19 .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Kolaborativni robot za provjeru vitalnih znakova (KUKA LBR iiwa).....</b>	<b>27</b>
<b>4.2. Kolaboracija pri testiranju na koronavirus (Robot Hospi).....</b>	<b>30</b>
<b>4.3. Troškovi implementacije kolaborativnih robota .....</b>	<b>33</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>34</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>35</b>

**POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Značenje/Opis</b>
eng.		engleski
HRK		hrvatska kuna, novčana jedinica
ISO		eng. International Organization for Standardization – Međunarodna organizacija za normizaciju
USD		američki dolar, novčana jedinica

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Zona sigurnosti zaštite radnika [2] .....	2
Slika 2.	YuMi, kolaborativni robot s dvije ruke [4] .....	4
Slika 3.	Prednosti radnika i kolaborativnog robota [2].....	4
Slika 4.	Sigurnosne značajke definirane za kolaborativne robote [8] .....	6
Slika 5.	Različiti načini suradnje između čovjeka i robota prilikom montaže [10].....	7
Slika 6.	Robot PART4you (KUKA) radi ruku pod ruku s ljudima bez ikakvih sigurnosnih prepreka [11] .....	9
Slika 7.	Postavljanje izolacije za zvuk i vlagu na automobilskim vratima [12].....	9
Slika 8	Princip rada <i>SnapWelda</i> [14].....	10
Slika 9.	MiR100 u suradnji s radnikom [15] .....	11
Slika 10.	Egzoskelet podržava ruke radnika kod podizanja tereta [16].....	12
Slika 11.	Kirurški sustav Da Vinci [18] .....	13
Slika 12.	Xenex – robot za usisavanje bakterija i virusa [19] .....	14
Slika 13.	Robot Tug [20].....	15
Slika 14.	Najpoznatiji jednoruki roboti: (a) Sawyer, (b) UR, (c) KUKA LBR iiwa 7-R800, (d) Fanuc-CR35ia [21] .....	17
Slika 15.	Najpoznatiji dvoruki roboti: (a) Baxter, (b) Yumi, (c) NEXTAGE, (d) PR2 [21] .....	18
Slika 16.	Nosivi robot EXO – UL7 [22].....	19
Slika 17.	Robotski sustav koji pomaže pri penjaju uza stepenice [23].....	20
Slika 18.	Senzor Kinect [24].....	21
Slika 19.	Primjena EMG senzora [26].....	22
Slika 20.	Pneumatski mišić [27] .....	24
Slika 21.	Elastični aktuator [28] .....	24

---

Slika 22.	Robot Nao izražava radost po uzoru na korisnika [29] .....	25
Slika 23.	Robot KUKA LBR iiwa [35] .....	29
Slika 24.	Pulsni oksimetar [34].....	30
Slika 25.	Robot Hospi [37] .....	32

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike robota Hospi [37] .....	32
Tablica 2. Troškovi implementacije kolaborativnih robota .....	33

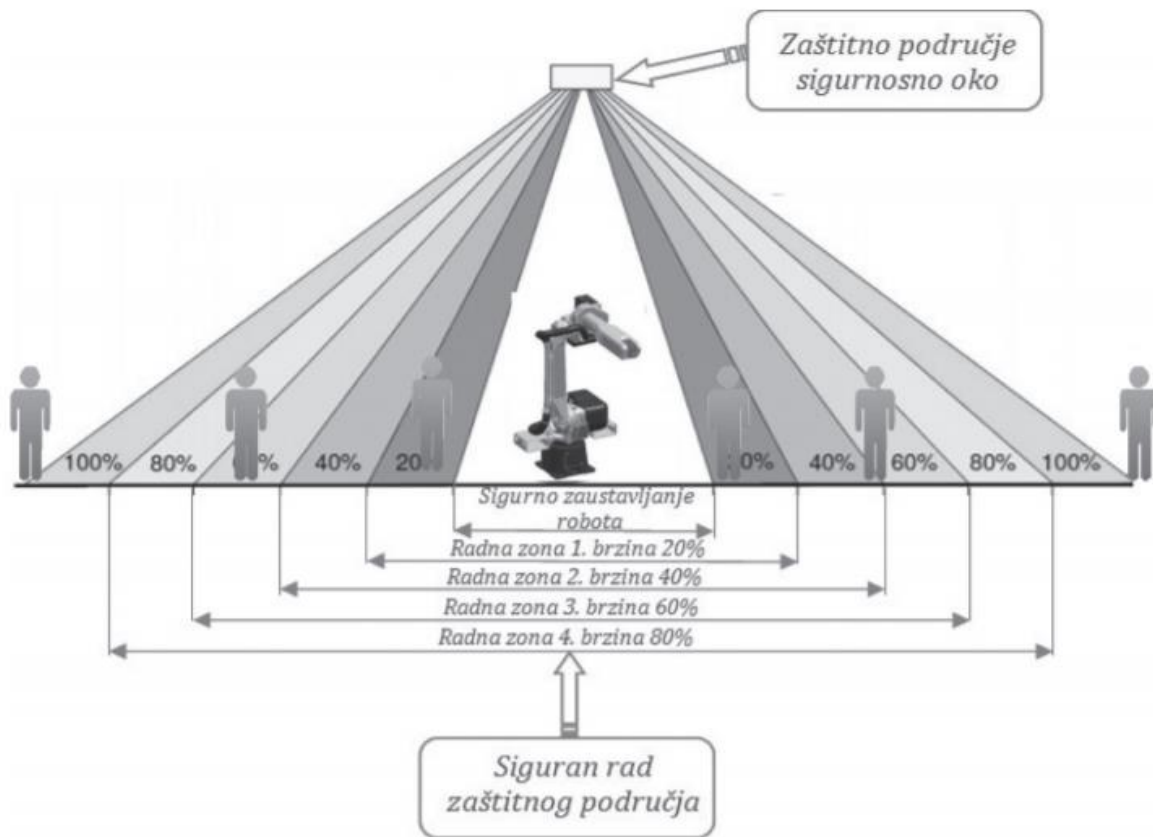
## 1. UVOD

U novije vrijeme kolaborativni sustavi između čovjeka i robota privukli su značajnu pozornost u industriji i akademskoj zajednici. Tehnološki napredak pod krilaticom *Industrija 4.0* predstavlja nastavak dosadašnje tri industrijske revolucije, njenom primjenom unaprijeđuju se industrijski procesi, a tu do izražaja dolazi primjena kolaborativnih robota koji rade zajedno sa čovjekom.

Fizička suradnja čovjeka i robota definirana je kada čovjek, robot i okolina dođu u međusobni kontakt i tvore čvrsto povezan dinamički sustav za izvršavanje zadataka. U tome je ključna uspostava principa rada u kojem se bitne sposobnosti i čovjeka i robota mogu zajedno iskoristiti. Naprimjer, ljudske kognitivne sposobnosti u učenju i prilagodbi na različite zahtjeve i probleme se mogu koristiti za nadzor kolaborativnog robota koji ima izraženu točnost te preciznost.

Kolaborativni roboti imaju velik broj prednosti nad tradicionalnim industrijskim robotima, sigurniji su za radnike, zauzimaju manje prostora, nije ih potrebno odvajati od radnika, jednostavniji je rad njima, a i jeftiniji su. Njihova primjena već sada je široka, pojavljuju se u kućanstvima, uredima, bolnicama pa i svemiru. [1] Rezultat takve suradnje je veća efikasnost, ušteda na vremenu, smanjeni troškovi i povećani profit, a što je najvažnije, zajamčena je sigurnost radnika i mogućnost ozljede na radu svedena je na minimum.

Kolaborativni roboti imaju ugrađenu naprednu sensoriku kao što su senzori sila i momenata te vizijski sustavi koji osiguravaju siguran radni prostor i zone zaštite. Slika 1. prikazuje zonu sigurnosti zaštite radnika osiguranu postupnim smanjenjem brzine robota ovisno o udaljenosti radnika.



Slika 1. Zona sigurnosti zaštite radnika [2]

## 2. KOLABORACIJA ČOVJEK–ROBOT

### 2.1. Povijesni razvoj [3]

Razvoj tehnologije u većini slučajeva pridonosi kvaliteti ljudskog života, ali ponekad uzrokuje nezgode i povrede čovjeka u radu. Tako se 90-ih godina prošlog stoljeća u američkoj tvrtki *General Motors* pojavila zabrinutost radi načina na koji tvrtka rješava ergonomska pitanja u svojim pogonima. Tada je tvrtka *General Motors* odlučila napraviti sigurne robote koji bi radili s ljudima, a ne u kavezu. Za pomoć su se obratili Jamesu Edwardu Colgateu i Michaelu Peshkinu sa Sveučilištu Northwestern, koji su potom pokrenuli istraživački projekt o kolaborativnim robotima. Oni su kolaborativni robot opisali kao uređaj za izravnu fizičku interakciju između čovjeka i računalno upravljano manipulatora. Godine 1997. Colgate i Peshkin osnovali su tvrtku *Cobotics* koja je proizvela nekoliko modela kolaborativnog robota koji su se koristili u završnom sklapanju automobila.

Njemačka tvrtka *Kuka Robotics*, u suradnji s još nekoliko tvrtki, na tržište je lansirala LBR 3, kolaborativni robot male mase. Nakon njega su dodatno usavršili tehnologiju i proizveli još nekoliko modela kao što su LBR 4 i LBR iiwa.

*Universal Robots*, jedan od najvećih dobavljača robota u svijetu, 2008. godine proizvela je UR5, svoj model kolaborativnog robota koji je mogao sigurno raditi zajedno sa zaposlenicima, eliminirajući potrebu za sigurnosnim kavezima i ogradama, a njegovi nasljednici bili su UR10, te UR3.

Tvrtka *ABB* proizvela je 2015. YuMi, kolaborativni robot s dvije ruke. (Slika 2.)

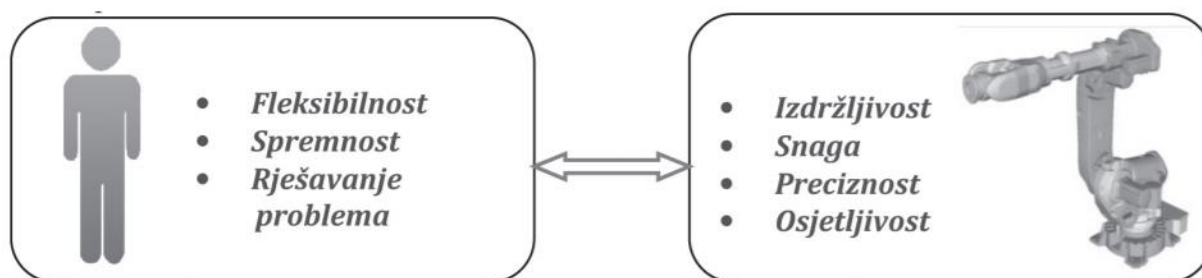




Slika 2. YuMi, kolaborativni robot s dvije ruke [4]

## 2.2. Prednosti korištenja kolaborativnih robota

Kao što je spomenuto, kolaborativni roboti nisu namijenjeni da u potpunosti zamijene radnike, nego da surađuju skupa s njima. U takvoj suradnji čovjek može obavljati razne kompleksne operacije, te analitičke zadatke, a glavne karakteristike kolaborativnih robota su njegova jednostavnost upravljanja, mogućnost učestalog ponavljanja, preciznost, te izdržljivost. Razlike između radnika i robota prikazane su na slici 3.



Slika 3. Prednosti radnika i kolaborativnog robota [2]

Glavne prednosti korištenja kolaborativnih robota jesu [5]:

- Nude veću konkurentnost poduzeća razvijenih zemalja u usporedbi sa zemljama s vrlo jeftinom radnom snagom.
- Robotska točnost, preciznost i kontinuirani rad mogu osigurati bolju kvalitetu i smanjiti potrebu za naknadnom obradom i kontrolom kvalitete.
- Robot može ubrzati neke operacije i prilagoditi se posebnim uvjetima koji mogu dovesti do povećanja proizvodnje.
- Na različite načine umanjuju mogućnost ozljede na radu, podižu teške terete, rukuju opasnim tvarima, brojnim sensorima ukazuju na ostale potencijalne opasnosti

Istraživanja su pokazala da su timovi sastavljeni od ljudi i robota mnogo učinkovitiji od timova sastavljenih samo od ljudi ili samo od robota. Dokazano je da kolaboracija umanjuje vrijeme praznog hoda za 85 %. [6]

### 2.3. Sigurnost

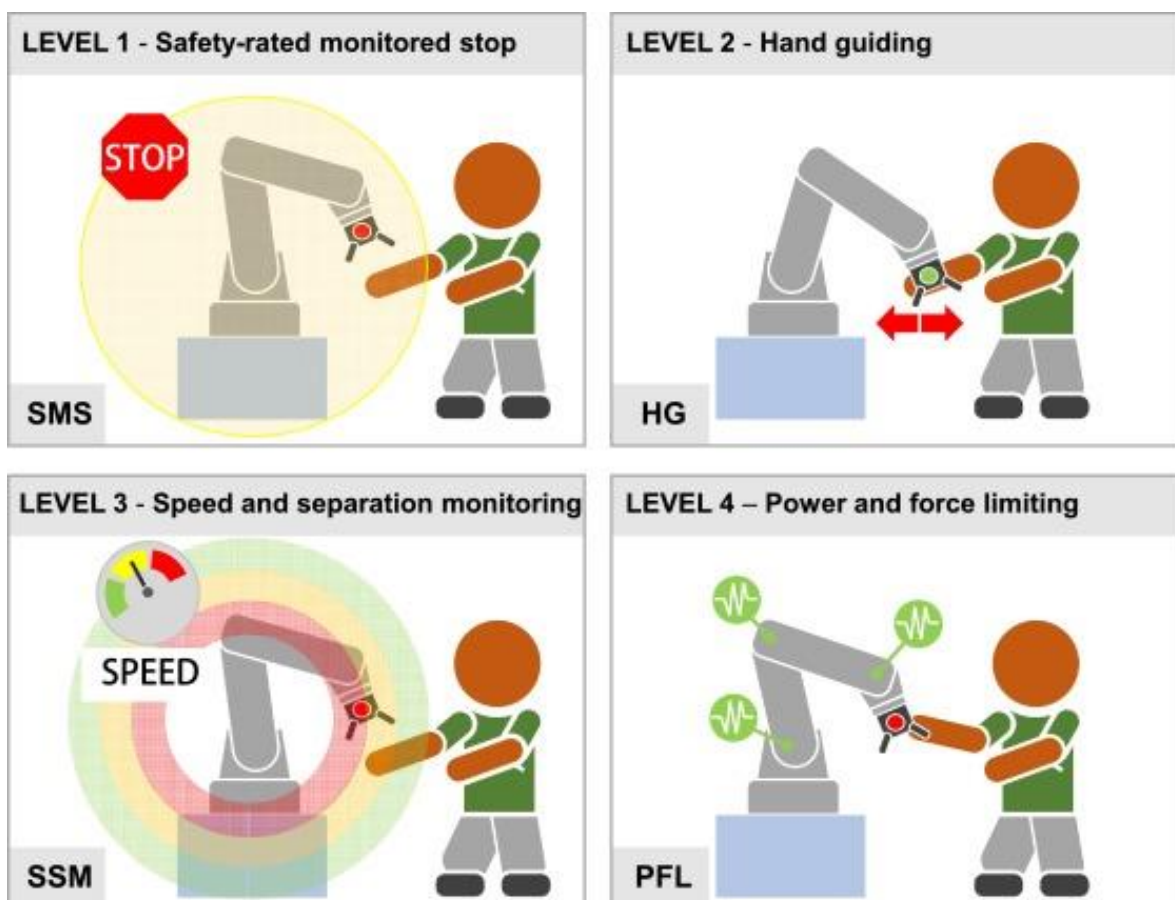
Glavni cilj procesa automatizacije koji se mora postići jest siguran i pouzdan rad, uz zadržavanje najveće moguće produktivnosti. Sastavni dio „suradničke“ prirode kolaborativnih robota je da ljudi mogu surađivati s njima bez potrebe za zaštitnom ogradom, stoga svi roboti moraju ispunjavati stroge sigurnosne zahtjeve. Većina kolaborativnih robota je lagana, zbog toga su oni većinom namijenjeni za manje dijelove čija masa ne prelazi 10 kg. Iznimka je Fanuc CR-35iA koji može podići dijelove teške do 35 kg, ali treba napomenuti da je njegova masa skoro 1000 kg što nije tipično za kolaborativne robote. Također kako bi zaštitili ljude, kolaborativni roboti nemaju oštre rubove, te su napravljeni od mekog materijala kako bi smanjili rizik od ozljede u slučaju sudara. Smanjena im je brzina rada u odnosu na industrijske robote. Prema ISO 10218 postoje četiri bitne sigurnosne značajke (Slika 4.) definirane za kolaborativne robote [7]:

- Sigurnosno zaustavljanje (eng. *Safety Monitored Stop*) – ova značajka se koristi kod kolaborativnih robota predviđenih za samostalan rad, samo u rijetkim slučajevima u njihov radni prostor ulazi čovjek, naprimjer ako zaposlenik želi namjestiti dio kojim robot upravlja ili ga ukloniti iz njegovog prostora, robot će se prestati kretati, ali se

neće potpuno isključiti kako bi mogao lakše nastaviti sa radom kada čovjek napusti njegov prostor.

- Ručno vođenje (eng. *Hand Guiding*) – čovjek ručno upravlja uređajem koji se nalazi na robotu ili u blizini njega kako bi prenesao naredbe kretnje u robotski sustav.
- Nadzor kretanja i položaja (eng. *Speed and Separation Monitoring*) – slično kao kod sigurnosno nadziranog zaustavljanja pomoću laserskog vida robot može osjetiti ljudsku blizinu, robot će sve više usporavati kako mu se čovjek približava, a ako mu dođe preblizu potpuno će se zaustaviti. Kada se čovjek udalji, robot će nastaviti s radom. Koristi se za poslove gdje radnik i robot dijele radni prostor.
- Sposobnost ograničavanja sile i snage (eng. *Power and Force Limiting*) – pomoću senzora u zglobovima očitavaju sile i momente, čim se očita povećana sila robot se zaustavlja.

Sa svim tim sigurnosnim značajkama i mjerama zaštite, suradnja između čovjeka i robota čini dobru kombinacija sigurnosti i produktivnosti.

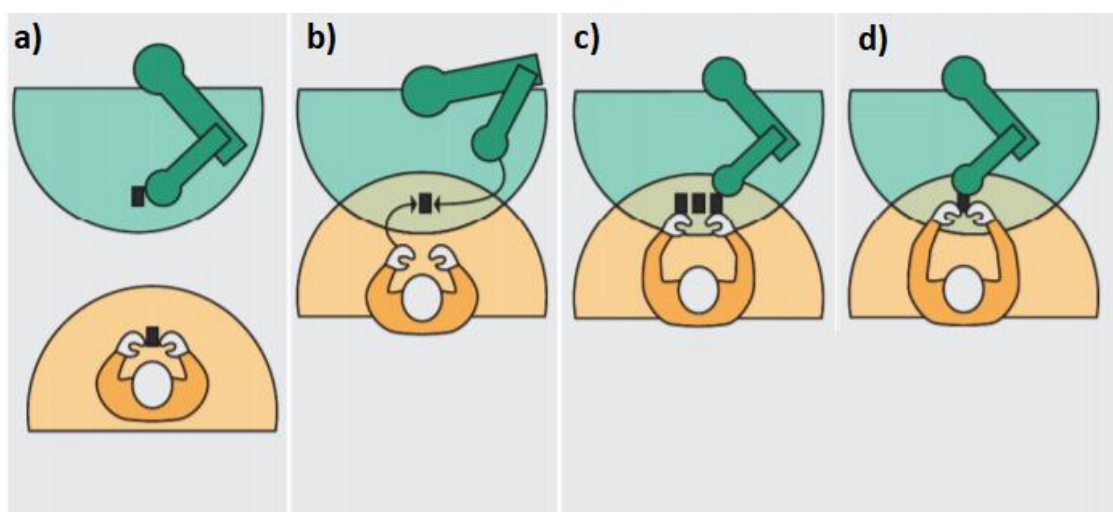


Slika 4. Sigurnosne značajke definirane za kolaborativne robote [8]

## 2.4. Primjena kolaborativnih robota

Radi navedenih kvaliteta koje donosi suradnja čovjeka i kolaborativnog robota, ne čudi da iz godine u godinu raste popularnost kolaborativnih robota. Prema istraživanjima iz 2019. koje je proveo *Interact Analysis* navodi se da je tada isporučeno 23 000 kolaborativnih robota, a rad njima donio je više od 650 USD, što je za 20 % više nego godinu prije. Trend korištenja kolaborativnih robota nadalje raste, a dodatan faktor ubrzanja uzrokovala je pandemija Covid - 19. Suradnja čovjeka i kolaborativnog robota našla je široku primjenu kako u industrijsko–proizvodnom sektoru (montaža, rukovanje materijalom i transport), tako i u uslužnom sektoru, a i u brojnim drugim granama ljudske djelatnosti moguće je naći korisnu i uspješnu primjenu. [9]

Robot može komunicirati s ljudima unutar radnog prostora na razne načine. Na slici 5. prikazani su načini suradnje između čovjeka i robota prilikom montaže.



**Slika 5. Različiti načini suradnje između čovjeka i robota prilikom montaže [10]**

Slika 5.a) prikazuje način gdje čovjek i robot surađuju zajedno, ali ne dijele radni prostor.

Na slici 5.b) prikazan je primjer gdje čovjek i robot dijele radni prostor, ali je samo jedan od partnera prisutan u operativnom području. Takav primjer rada pojavljuje se u procesu montaže gdje robot služi za dostavljanje komponenata za montažu i kada ih dostavi u zajedničko radno područje, čovjek počinje montirati proizvod, a robot priprema iduću komponentu.

Slika 5.c) prikazuje način rada gdje i čovjek i robot surađuju u procesu montaže u zajedničkom radnom prostoru i u isto vrijeme, ali ne rade na istoj komponenti. Primjer takvog rada je montaža mjenjača brzine gdje čovjek montira ležajeve u kućištu, a nakon toga robot ugrađuje zupčanik. Najnaprednija razina suradnje između čovjeka i robota prikazana je na slici 5.d) gdje oba partnera rade u istom radnom prostoru, u isto vrijeme i na istoj komponenti. [10]

### 2.4.1. Primjena u montaži

U obrazloženju primjera sa slike 5. već je spomenuta primjena kolaborativnih robota u montaži. Kako je montaža jedno od najperspektivnijih industrijskih područja za primjenu kolaborativnih robota, u ovoj će se točki dodatno razmotriti.

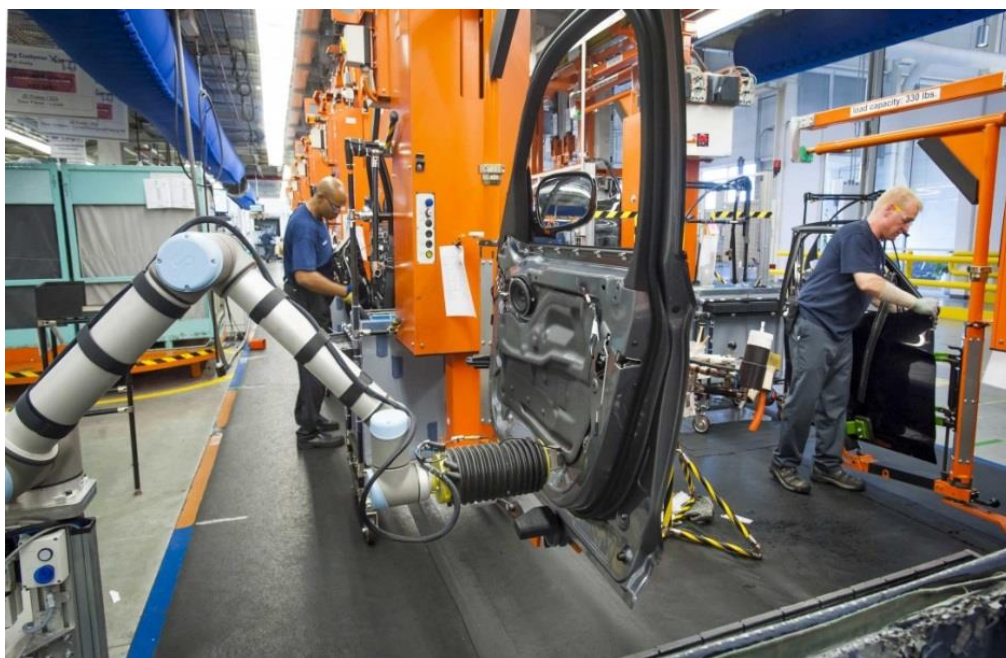
Montaža često zna biti dugotrajan i zamoran proces za ljude. Također ljudi su skloni pogreškama, a ponekad i najmanja pogreška može donijeti velike gubitke za tvrtku i naštetiti njenom ugledu. Kao što je spomenuto kolaborativne robote odlikuje preciznost, tako da je njihovim korištenjem mogućnost pogreške svedena na minimum. Uz odgovarajuće upute osoblja oni mogu ispuniti sve tražene zahtjeve u montaži.

Suradnja čovjeka i robota razvijena je u automobilske industriji. U svom glavnom pogonu u Ingolstadtu, Audi je uveo kolaborativni robot „PART4you“ (Slika 6.) tvrtke KUKA, koji surađuje s radnicima na montažnim linijama. Robot je opremljen kamerom i integriranom usisnom čašicom koja mu omogućuje da pokupi dijelove za montažu i proslijedi ih radnicima u pravo vrijeme i u ergonomski optimalnom položaju. [11]

BMW je u svom pogonu u Spartanburgu uveo robote koji rade na montaži vrata. Četiri robota opremaju unutrašnjost vrata izolacijom za zvuk i vlagu. Oni na svojim rukama imaju valjkaste glave kojima prevlače sloj zaštitne folije preko elektronike s unutarnje strane vrata. (Slika 7.). [12]



**Slika 6. Robot PART4you (KUKA) radi ruku pod ruku s ljudima bez ikakvih sigurnosnih prepreka [11]**



**Slika 7. Postavljanje izolacije za zvuk i vlagu na automobilskim vratima [12]**

### 2.4.2. Primjena u zavarivanju

Sve je češća primjena kolaborativnih robota kod zavarivanja. U današnje vrijeme velik je nedostatak kvalificiranih zavarivača u cijelome svijetu. Prosječna starost zavarivača u SAD-u je 55 godina, a samo je 20 % zavarivača mlađe od 35 godina. Prema istraživanjima koje je provelo Američko udruženje za zavarivanje, do 2024. godine predviđa se nedostatak od 440000 zavarivača. [13] Zbog tih podataka sve veća je potreba za automatizacijom zavarivanja. Prednosti su brojne. Roboti mogu cijeli dan raditi na manjim dijelovima bez odmora, i tako skinuti pritisak sa zavarivača koji se mogu koncentrirati na druge teže zadatke. Također, zbog svoje preciznosti roboti mogu bolje uštedjeti materijal i tako smanjiti troškove, a posao završe brže nego ljudi. Suradnjom tvrtki Universal Robots i Arc Specialities proizveden je kolaborativni robotski sistem SnapWeld koji se može lako postaviti u postojeće kabine za zavarivanje, uklanjajući potrebu za novim skupim ćelijama. Sastoji se od aparata za dodavanje žice Profax i plamenika s vodenim hlađenjem koji omogućuje zavarivanje do 600 ampera. Na slici 8. prikazan je princip rada *SnapWelda*. [14]



Slika 8 Princip rada *SnapWelda* [14]

### 2.4.3. Primjena u rukovanju materijalom

Premještanje materijala unutar proizvodne jedinice dosadan je proces za ljude. Kolaborativni roboti to mogu lako obaviti i brže premještati materijale na željeno mjesto. Također roboti mogu rukovati opasnim i teškim materijalima bez da ugrožavaju radno okruženje. Jedan od najpoznatijih robota za prijenos materijala je MiR100 koji koristi ugrađene senzore za skeniranje, 3D kameru i ultrazvuk za kretanje po objektu. MiR100 ima nosivost 100 kg, a može vući čak i do 300 kg. Baterija mu može izdržati do 15 sati rada ili 20 km putovanja. Koristi intuitivno sučelje kojem se može pristupiti preko iOS ili android uređaja ili preko računala. MiR100 može samostalno identificirati svoju okolinu putem ugrađenih senzora i kamera, ili mu se mogu unijeti 3D crteži izgleda zgrade. Na slici 9. robot MiR100 donosi potrebne predmete radniku. [15]



Slika 9. MiR100 u suradnji s radnikom [15]

U novije vrijeme pri rukovanju materijalom počeli su se pojavljivati tzv. nosivi roboti ili egzoskeleti koji su opremljeni motorima i hidraulikom. Kao što je prikazano na slici 10. ljudi



ih nose na sebi kako bi osigurali dodatnu snagu i izdržljivost kod podizanja teških tereta. Napravljeni od izrazito fleksibilnog i laganog materijala omogućuju radnicima da obave precizne zadatke uz minimalni napor. Egzoskelet umanjuje mišićnu aktivnost leđa, ramena i koljena za 50 %. [16]

Švedska tvrtka BioServo razvila je egzoskeletnu rukavicu koja ima senzore i motore u svakom prstu koji reagiraju na razinu sile koja se primjenjuje na ruku radnika koji nešto podiže ili hvata, te zatim rukavica preuzima dio opterećenja. BioServo tvrdi da može povećati snagu ruku za 20 %. [17]



Slika 10. Egzoskelet podržava ruke radnika kod podizanja tereta [16]

#### 2.4.4. Primjena u zdravstvenom sektoru

Današnje društvo prolazi kroz demografske promjene, sve je više starijih ljudi, očekivani životni vijek se produljuje, a samim time potražnja za zdravstvenim uslugama se znatno povećava. Nedostatak zdravstvenog osoblja sve je veći, zato su potrebni novi koncepti za borbu protiv tog problema koji se moraju testirati i primijeniti u praksi.

Kolaboracija između čovjeka i robota nudi novi način rada u zdravstvu i smanjuje opterećenje ljudi. Po uzoru na pojam *Industrija 4.0*, zdravstveno osoblje uvelo je pojam *Zdravstvo 4.0*, odnosno koncept tzv. pametne bolnice. Zdravstvo 4.0 donosi razne tehnološke napretke koji donose kvalitetniju uslugu i bolju prevenciju bolesti. [17] Unutar Zdravstva 4.0 pojavljuju se medicinski roboti. Za razliku od čovjeka, roboti su neumorni i njihove ruke nikada ne drhte. Mogu napraviti precizne pokrete, te biti prisutni uz pacijenta koliko god je potrebno.

Američka tvrtka Intuitive Surgical proizvela je kirurški sustav Da Vinci, robot sa više ruku kojem je cilj smanjiti kirurške pogreške i postići manje invazivnu operaciju za pacijente. On kirurzima povećava preciznost, čime postiže manji gubitak krvi, minimalne rezove i mnogo brži oporavak. Kroz 3D uvećanje visoke rezolucije, kirurzi ručno kontroliraju robota i izvode operacije. Da Vinci radi sitne, precizne rezove koje prave ljudske ruke nisu u stanju napraviti. Slika 11. Prikazuje kirurški sustav Da Vinci. [18]



**Slika 11. Kirurški sustav Da Vinci [18]**

Bolnički stečene infekcije su još jedan zdravstveni problem koji roboti mogu unaprijediti. Bolnički stečene infekcije se pojavljuju jer zdravstveno osoblje ponekad nije u mogućnosti

potpuno očistiti sobe odnosno u potpunosti je sterilizirati zbog nedostatka vremena ili zbog poteškoća u uklanjanju svih klica. Čiste bolnice su od velike važnosti kako bi se spriječila zaraza osoba koje imaju slab imunološki sustav. Xenex je prijenosni robot koji se koristi za dezinfekciju bolničkih soba u nekoliko minuta koristeći UV zrake punog spektra koje u potpunosti eliminiraju bakterije i viruse. [19] Zdravstveno osoblje ga mora unijeti u sobu i ostaviti samog. Kada je soba u potpunosti prazna robot kreće dezinfekciju svojim UV zrakama. Slika 12. prikazuje Xenex, robot za usisavanje bakterija i virusa.



**Slika 12. Xenex – robot za usisavanje bakterija i virusa [19]**

Dostavljanje lijekova, hrane i ostalih potrepština jedan je od zadataka koji oduzima najviše vremena medicinskom osoblju. U prosjeku se za prijevoz obroka, posteljine, laboratorijskih uzoraka, otpada i drugih stvari u jednoj bolnici prijeđe više od 80 kilometara. Američka tvrtka Aethon proizvela je robot pod imenom Tug koji oslobađa zdravstveno osoblje svih tih fizičkih obaveza i omogućuje im da se usredotoče na njegu pacijenata. [20] Oni u sebi imaju programiran tlocrt bolnice, a i opremljeni su mnoštvom senzora za sprječavanje sudara tako da na svom putu kroz bolnicu ne naiđu na nikakvu prepreku. U sebi imaju i ugrađene

zvučnike preko kojih nježno mole ljude da se odmaknu dok se kreću kroz zakrčene hodnike. Robot Tug prikazan je na slici 13.



**Slika 13. Robot Tug [20]**

Suradnja između čovjeka i robota u zdravstvu još uvijek nije toliko proširena, neke bolnice si to ne mogu priuštiti, neki još uvijek nemaju povjerenja u ta nova tehnološka dostignuća, ali vjeruje se da će u skorije vrijeme njihova primjena u zdravstvenom sektoru biti sve veća.

### **3. PRIMIJENJENA SENZORIKA U KOLABORATIVNIM SUSTAVIMA IZMEĐU ČOVJEKA I ROBOTA**

Kolaborativni roboti izrađeni su s jedinstvenim tehnologijama kako bi zadovoljavali posebne ISO standarde. Za postizanje intuitivne suradnje, robot mora moći promatrati svoju okolinu i biti „svjestan“ svega što se oko njega događa. Kada je svjestan svoje okoline, robot može procijeniti koji je najbolji način za izvođenje željenog zadatka. [21] Primjerice, ako čovjek i robot zajedničkim radom pokušavaju podići stol, robot mora moći identificirati stavke u okruženju, uključujući stol, zatim mora predvidjeti namjere čovjeka i koordinirati svoje aktivnosti kako bi uspješno odradio zadatak. Te sposobnosti proizvođač ne može ugraditi u robot, ali robot ih može naučiti kroz različite metode učenja.

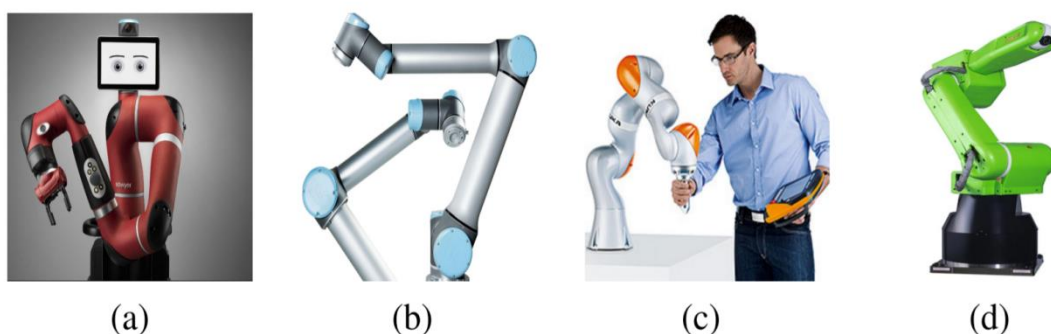
Sve te funkcionalnosti ne bi bile moguće bez prisutnosti najsuvremenijih tehnologija, posebno senzora i aktuatora. U robotici senzori služe kao kanali kroz koje robot dobiva informacije o svome okruženju, te preko kojih može komunicirati i davati povratne informacije. S druge strane, aktuatori pretvaraju signale u pokrete u zglobovima i tijelu robota. Da bi suradnja između čovjeka i robota bila uspješna, komponente kao što su senzori, aktuatori, odgovarajući robotski sustav, odgovarajuće strategije suradnje i metode učenja, potrebno je pažljivo razmotriti i odabrati.

#### **3.1. Robotski sustavi**

Opisani robotski sustavi grupirani su na temelju njihove namjene, mehaničke strukture i prilagodbe. Razlikuju se: kolaborativne robotske ruke i nosivi robotski sustavi.

### 3.1.1. Kolaborativne robotske ruke [21]

Riječ je o lakim i kompaktnim kolaborativnim robotima. Većina ih može biti ručno vođena, čime se omogućuje da ih koriste korisnici koji imaju malo ili nimalo znanja o programiranju. Dijele se na jednoruke i dvoruke. Jednoruki roboti su brži i vrlo učinkoviti u obavljanju svojih zadataka, vrlo su točni i precizni. Roboti s dvije ruke imaju mogućnost obavljanja više istovremenih zadataka i sinkronizirano kretanje koje omogućuje sigurno rukovanje većim i težim dijelovima. Najpoznatiji jednoruki roboti prikazani su na slici 14.



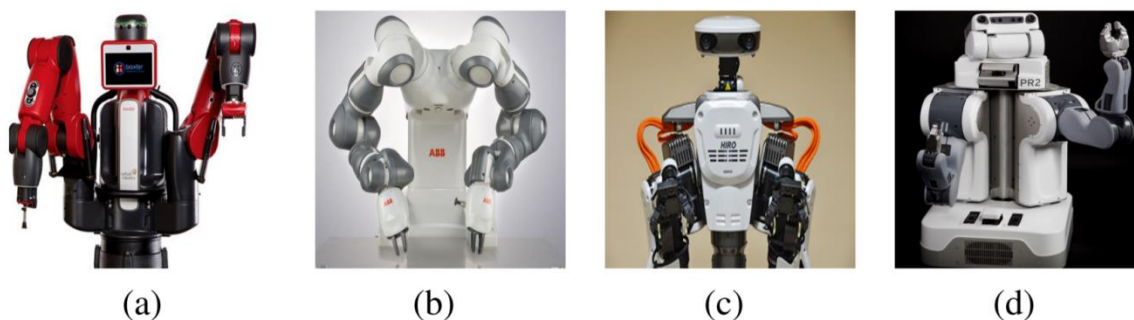
**Slika 14. Najpoznatiji jednoruki roboti: (a) Sawyer, (b) UR, (c) KUKA LBR iiwa 7-R800, (d) Fanuc-CR35ia [21]**

Na slici 14.a) prikazan je robot Sawyer koji je proizvela tvrtka Rethink Robotics. Namijenjen je za zadatke u kojima je potrebna visoka preciznost. Ima ugrađeno grafičko korisničko sučelje Intera Studio koje omogućuje korisnicima sa ograničenim tehničkim sposobnostima da upravljaju njime. Dizajniran je za manevriranje u uskim prostorima.

Roboti UR, na slici 14.b), imaju šest stupnjeva slobode gibanja, vrlo su tihi i lagani za rukovanje. Na slici 14.c) je laki kolaborativni robot KUKA LBR iiwa 7 - R800 koji proizvodi njemačka tvrtka KUKA. Ima odličan omjer snage i težine, opremljen je jedinstvenim sensorima koji detektiraju svaki mikro udar na svojim zglobovima. Nedostatak mu je visoka cijena. Fanuc - CR35ia, prikazan na slici 14.d), poznat je kao najsnažniji kolaborativni robot, mase je 990 kg i može podići i do 35 kg.

Na slici 15. prikazani su najpoznatiji dvoruki kolaborativni roboti. Robot Baxter (Slika 15.a), ima strukturu pogodnu za istovremeno rukovanje objektima, ali mana mu je slabija preciznost. Također, zauzima više prostora što ga u industriji čini manje privlačnim. Na slici 15.b) prikazan je robot Yumi. Proizvela ga je tvrtka ABB Robotics, a namijenjen je za

montažu manjih dijelova te za operacije ispitivanja kvalitete i pakiranja u industriji. Jednostavan je za programiranje, fleksibilan je i vrlo osjetljiv na vanjske sile. Kompaktan izgled i mala veličina čine ga prijenosnim i prikladnim za mnoge industrije i istraživačke institucije. Robot NEXTAG, na slici 15.c), ima na svakoj ruci šest stupnjeva slobode. Mase je 29 kg i može podići teret od 1,5 kg u svakoj ruci. Ima motore male snage što ga čini sigurnijim ako dođe do sudara s objektom ili čovjekom, te ima sposobnost izvršavanja složenih zadataka (upravo zbog šest stupnjeva slobode u svakoj ruci). Robot PR 2, prikazan na slici 15.d), opremljen je brojnim sensorima kao što su senzori pritiska na vrhu prstiju, zatim akcelerometrom, te laserskim mjeračem udaljenosti. S obzirom na oblik i veličinu prigodan je za manje istraživačke laboratorije.



**Slika 15. Najpoznatiji dvoruki roboti: (a) Baxter, (b) Yumi, (c) NEXTAG, (d) PR2 [21]**

### 3.1.2. Nosivi robotski sustavi (egzoskeleti)

Nosivi robotski sustavi koriste se u raznim područjima, poboljšavaju oštećene funkcije tijela, te tjelesne sposobnosti. Razlikuju se nosivi roboti koji poboljšavaju sposobnosti gornjih ekstremiteta, donjih ekstremiteta, te proteze. Proizvode se roboti koji imaju jednak broj stupnjeva slobode kao ljudska ruka, naprimjer EXO-UL7, prikazan na slici 16. Robot je opremljen sensorima sile i momenta na nadlaktici, podlaktici, šaci i vrhovima prstiju. [22]

Nosivi robotski sustavi donjih ekstremiteta uglavnom se koriste kako bi pojačali snagu zdravih ljudi pri izvođenju teških radova, poput nošenja teških tereta, ali koriste se i u rehabilitaciji donjih ekstremiteta, primjerice kod pacijenata koji su pretrpjeli moždani udar.

Također je razvijen i robotski sustav koji pomaže ljudima pri penjanju uza stepenice, (Slika 17.). [23]

Primjena proteza posljednjih godina je znatno porasla, međutim većina proteza ne može obaviti svakodnevne životne aktivnosti kao što su hvatanje i držanje nekog predmeta bez da on klizne zbog nedostatka taktilne povratne informacije. Predložene su razne metode kako spriječiti klizanje predmeta iz proteze, primjerice mjerenjem pomaka predmeta bi se moglo očitati klizanje kada je ono očito, ali teško je odrediti minimalni pomak prije nego što dođe do klizanja, te bi predmet već mogao ispasti iz proteze prije nego što sustav može poduzeti neke radnje kako bi to spriječio. Drugi način da se otkrije klizanje je da sustav osjeti vibracije koje se događaju na protezi. [21]



Slika 16. Nosivi robot EXO – UL7 [22]





**Slika 17. Robotski sustav koji pomaže pri penjaju uza stepenice [23]**

### **3.2. Senzori u kolaboraciji čovjeka i robota**

Kao što je već spomenuto, bez senzora kolaboracija s robotom ne bi bila moguća. Preko senzora robot prima signale i daje povratne informacije. Senzori u robotim se dijele na vizijske senzore, taktilne senzore, EMG i EEG senzore.

Za promatranje okoliša najviše se koriste senzori s ugrađenim kamerama, relativno su jeftini i laki za korištenje. Kamera može pružiti RGB informacije, te preko nje robot može detektirati prepreke koje mu se nalaze na putu. Popularan senzor sa kamerom je senzor Kinect (Slika 18.), koji može ponuditi dvije značajke: prepoznavanje oblika putem standardne kamere i procjena udaljenosti putem dvije infracrvene laserske kamere koje mu omogućuju snimanje

3D pokreta. Mana senzora s kamerom je to što su skloni okluziji<sup>1</sup>, te ne rade dobro u uvjetima refleksije i kontrasta. [21]



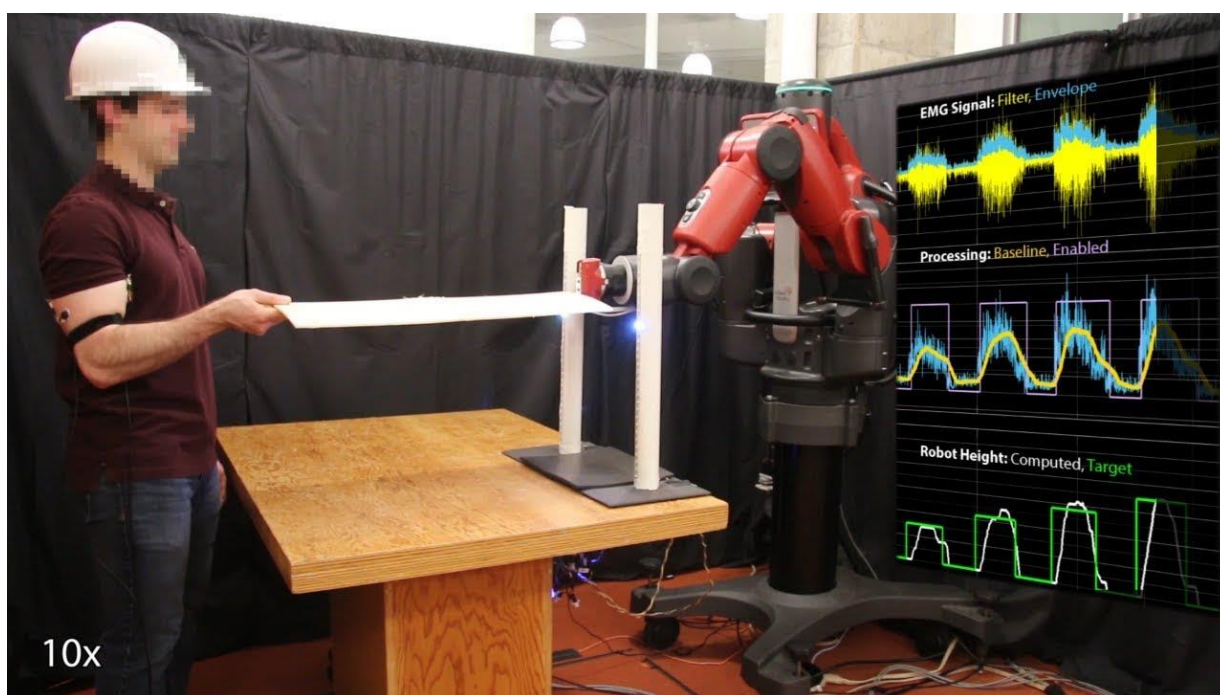
**Slika 18. Senzor Kinect [24]**

Robotska koža, napravljena od mekog i fleksibilnog materijala, prekriva tijelo robota i omogućuje mu da podražaje iz okoline pretvori u električne signale koje robot može generirati kako bi mogao sigurno i učinkovito raditi. Može se primijeniti na različite složene konture robota tako što se deformira, ali pritom zadržava svoja senzorska svojstva. Ona olakšava interakciju s ljudima, te poboljšava sposobnost prilagodbe, osjetljivosti i agilnosti. Neophodan je hardver koji omogućuje robotu da obradi informacije poput udaljenosti, sile i temperature pružajući temelj uspjeha svake kolaboracije čovjeka i robota. Robotska koža ima mogućnost promjene krutosti kada osjeti ljudsku blizinu, čime smanjuje mogućnost ozljede u slučaju sudara. To je proces sličan djelovanju ljudskog tijela koje zategne mišić pri obrani od vanjskih udara. Napredniji oblici robotske kože osim taktilnih informacija mogu prenijeti i vizualne informacije poput mijenjanja boje i emitiranja svjetla. Preko kože roboti mogu razumijeti i emocije koje mu se žele prenijeti, primjerice ako robot osjeti udarac, može to interpretirati kao ljutnju. [25]

---

<sup>1</sup> Okluzija: od latinskog *occludere* – zatvoriti, kasnolatinski *occlusio*.

Senzori EMG ili elektromiografski senzori se koriste za bilježenje aktivnosti električnih signala koji se stvaraju pri kontrakciji mišića. Pomoću senzora EMG robotski sustav prati aktivnost mišića. Primjerice, obradom aktivnosti bicepsa robot može procijeniti kada osoba pomiče ruku gore ili dolje i potom „kopira“ te kretnje. Osoba može napeti ili opustiti ruku kako bi upravljala robotom bez da mora pomicati vlastitu ruku. Primjena senzora EMG dana je na slici 19., gdje robot prati signale mišića ruke radnika i zajedno s njime podiže teret. EMG senzor se stavlja na bicepse i tricepse radnika radi praćenja mišićne aktivnosti. Njegovi algoritmi tada neprestano otkrivaju promjene u razini ruke radnika kao i diskretne geste rukom koji bi korisnik mogao napraviti za precizniju kontrolu. [26]



**Slika 19. Primjena EMG senzora [26]**

EEG ili elektroencefalografija je elektrofiziološka metoda koja se koristi za praćenje električne aktivnosti mozga postavljanjem elektroda na vanjsku površinu tjemena. EEG bilježi varijacije napona uzrokovane protokom ionske struje u unutrašnjosti neurona mozga. Koristeći EEG signale iz mozga razvijena su mnoga sučelja koja pomažu ljudima s motoričim poremećajima. [21]

### 3.3. Aktuatori u kolaboraciji čovjeka i robota

Signale koje robot primi preko senzora, aktuatori pretvaraju u pokrete. Aktuatore se može podijeliti na pneumatske, koji koriste komprimirani zrak za stvaranje pokreta, zatim hidrauličke koji koriste komprimiranu tekućinu, te električne koji koriste električnu struju ili magnet.

Pneumatska tehnologija koristi se za stvaranje umjetnih mišića u rukama robota, te generiranje pokreta u tzv. mekoj (eng. *soft*) robotici. Pneumatski mišići imaju radne karakteristike slične ljudskim mišićima, skupljaju se uzdužno i često se koriste u antagonističkim parovima. Sastoje se od cjevaste elastične membrane okružene pletenom mrežom. Kada se cijev napuše, ona gura mrežu, povećavajući joj promjer. To zauzvrat dovodi do kontrakcije duljine mišića, pri čemu se vrši velika sila. Zbog kompresije zraka, ti su mišići usklađeni i ponašaju se poput nelinearnih opruga čija se ukočenost može prilagoditi promjenom tlaka zraka. Prednost ove vrste aktuatora je što su vrlo lagani, relativno jeftini i mogu se prilagoditi različitim veličinama prema zahtjevima zadatka. Primjer pneumatskog mišića prikazan je na slici 20. [27]

Električni aktuatori često proizvode velike brzine, ali slab okretni moment. Korištenjem reduktora može se poboljšati moment, ali će se smanjiti brzina, također dolazi do pojave trenja, zazora, valovitosti momenta i buke. Zbog toga se koriste elastični aktuatori SEA (Slika 21.), koji štite robote od udara pri sudaru s nekim objektom. Njegovu elastičnu komponentu čini jedna opruga ili nekoliko opruga spojenih u nizu. Pružaju „meku“ kontaktnu silu prema okolišu što je značajna prednost u odnosu na krute aktuatore. [28] Zbog svoje elastične prirode nije najpogodniji za robote u kojima je potreban visok stupanj krutosti. Kod njih se koriste aktuatori promjenjive krutosti koji mijenjaju svoju krutost ovisno o promjeni impedancije. Oni imaju bolja svojstva apsorpcije udaraca od elastičnih aktuatora. [21]

Hidraulički aktuatori pogodni su za nošenje teških tereta, također mogu osigurati veliki okretni moment i održavati vrlo snažno linearno kretanje bez zupčanika. Osjetljivi su kod izlaganja toplini, zbog toga mogu imati problema ako je temperatura korištene tekućine previsoka. Koriste se kod nosivih i mobilnih robotskih sustava gdje pomažu korisnicima u podizanju teških tereta. [21]



Slika 20. Pneumatski mišić [27]

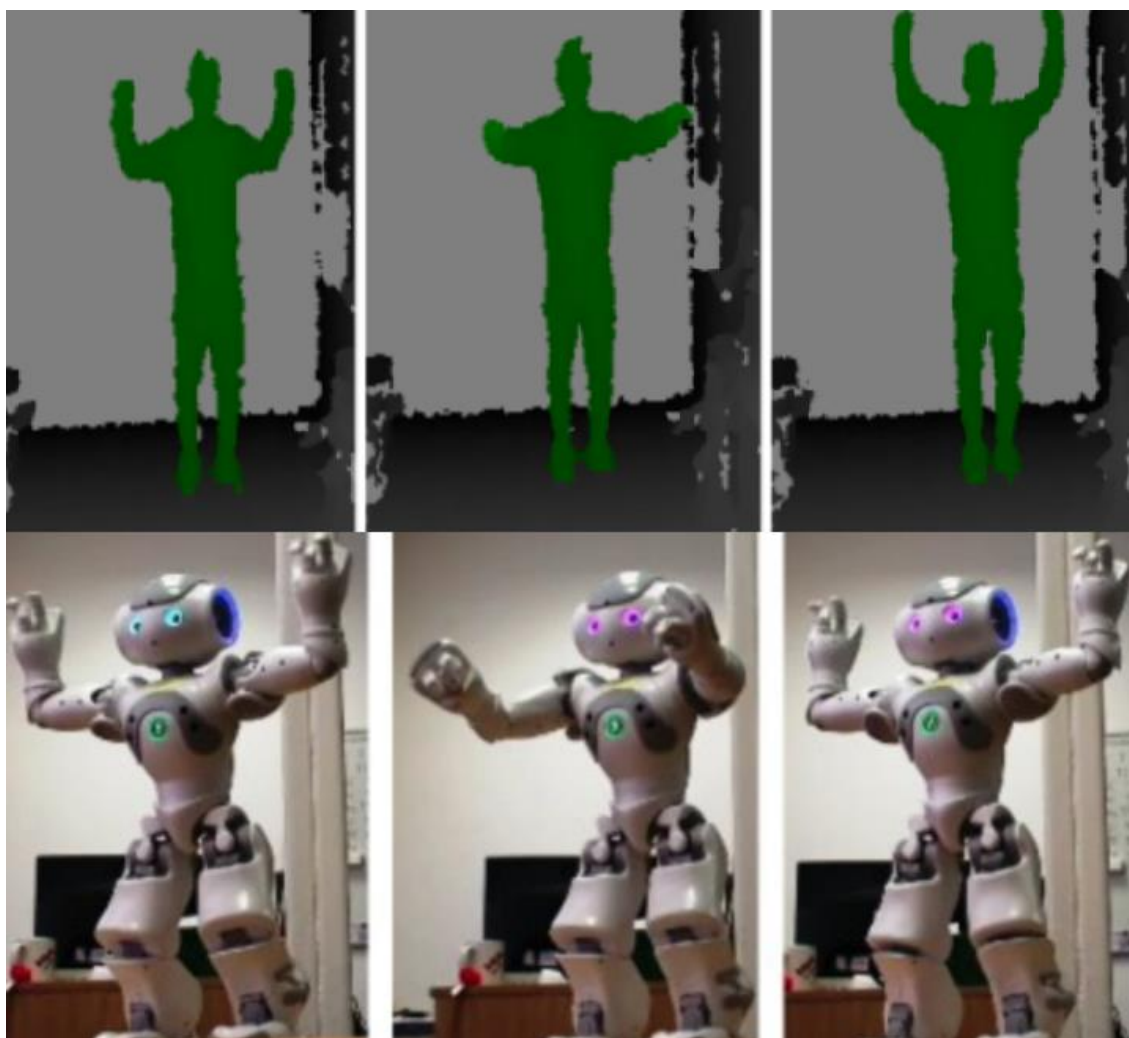


Slika 21. Elastični aktuator [28]

### 3.4. Tehnike učenja robota

Praktično je nemoguće unaprijed definirati robota da obavlja sve zadaće potrebne za uspješnu kolaboraciju čovjeka i robota, zbog toga se definiraju algoritmi učenja kako bi robot stekao sposobnost da se nosi sa tim zadacima.

U posljednje vrijeme metoda tzv. dubokog učenja sve se više koristi u kolaboraciji čovjeka i robota. Primjerice razvijen je model neuronske mreže koji služi za prepoznavanje ljudskih emocija. Neuronske mreže su općenito poznate po tome što imaju izraženu aproksimaciju, te dobro barataju bukom i velikom količinom podataka. Robot putem neuronskih mreža uči ljudski emocionalni izraz i reagira u skladu s njime, kao što je prikazano na slici 22. Znanstvenici su ljudske emocije podijelili na osam osnovnih emocionalnih stanja, a sve ostale se pojavljuju kao kombinacija tih osam. Kako bi se opisala ljudska emocija koristi se senzor Kinect koji daje 3D opis kretanja. Baza podataka sastoji se od različitih izraza za osnovne ljudske emocije. Budući da ne izražavaju svi ljudi emocije na isti način, za neku emociju se može unijeti više izraza. Nedostaci dubokog učenja su što zahtijeva dugo razdoblje obuke i visoke troškove. [29]



Slika 22. Robot Nao izražava radost po uzoru na korisnika [29]

Metoda potpornih vektora je tehnika prepoznavanja ljudskog djelovanja i predviđanja ljudskog kretanja, vrlo je popularna zbog točnosti prepoznavanja i brzine učenja. Robot prikuplja kratke trajektorije prateći ljude pomoću RGBD kamera. One se zatim grupiraju kako bi se skupili uzorci kretanja, a zatim se koriste za predviđanje budućih kretanja prema tim uzorcima. [30]

Gaussov model smjese ili GMM jedna je od najpopularnijih metoda među tehnikama učenja koje se koriste u kolaboraciji čovjeka i robota. Koristi se kako bi se na robot prenijele ljudske sposobnosti rukovanja objektima. Robot putem sustava za detekciju pokreta promatra demonstraciju, a zatim se koristi GMM metoda kako bi kodirala skupove trajektorija prikupljenih sensorima. Robot nakon svake demonstracije reproducira generaliziranu verziju zadatka, model se postupno nadograđuje i korisnik prekida demonstraciju nakon što robot uspješno nauči vještinu. [21]

Skriveni Markovljev model robotskog učenja izveden je iz Markovljevog procesa koji govori da trenutno stanje sustava ovisi isključivo o prethodnom stanju sustava. Pomoću Markovljeva modela baziranog na oponašanju robot može naučiti kretanje nakon gledanja 2D piksela označenih markerima i pričvršćenih na tijelo čovjeka. Takav model sastoji se od tri koraka: učenje, prepoznavanje i generiranje. Skriveni Markovljev model se koristi kao matematička osnovica za takvu radnju. Učenje se sastoji od pojave opservacijskih simbola, koje zatim sustav prepoznaje, a u trećem koraku sustav dekodira obrasce kretanja iz opservacijskih simbola. [31]

## **4. MOGUĆNOST PRIMJENE KOLABORACIJE ČOVJEKA I ROBOTA U BORBI PROTIV ŠIRENJA COVID-19**

U današnje vrijeme svijet se nalazi u borbi sa pandemijom koronavirusa. COVID-19 je zarazna bolest uzrokovana virusom SARS-CoV-2. Virus se prvi puta pojavio u kineskom gradu Wuhanu u prosincu 2019. godine, a nakon toga se proširio u više od 185 zemalja širom svijeta. [32] Do sada je umrlo više od četiri milijuna ljudi, a diljem svijeta potvrđeno je više od 200 milijuna slučajeva zaraze. [33] Virus se može širiti od osobe do osobe kroz male kapljice iz usta ili nosa koje se šire kada zaražena osoba kašlje ili izdahne. Svjetska zdravstvena organizacija procjenjuje stopu zaraze virusa između 1,4 i 2,5. Da bi se epidemiju stavilo pod kontrolu, stopa zaraze mora pasti ispod 1. [32]

Jedan od najvećih problema s kojim se svijet susreće u doba pandemije jest nedostatak medicinskog osoblja. Svaki dan je velik broj novozaraženih, a broj liječnika i medicinskog osoblja nije dovoljan da se nose s poslom koji treba obaviti. Osim toga, budući da se bolest vrlo lako širi, velik broj medicinskog osoblja se zarazi, bilo zbog nedostatka zaštitnog materijala ili zato što su izloženiji virusu od ostalih. Kolaboracija čovjeka i robota mogla bi spriječiti nepotrebno izlaganje medicinskog osoblja mogućnosti zaraze.

### **4.1. Kolaborativni robot za provjeru vitalnih znakova (KUKA LBR iiwa)**

Tijekom pandemije jedan od najvećih problema u bolnicama su prepuni odjeli hitne pomoći. Medicinsko osoblje ne može se nositi s tolikim brojem pacijenata koji dolaze u bolnicu, te nastaju duga čekanja. Bolnice su primale u prosjeku sedam puta više pacijenata nego inače. Pronalazak načina za ublažavanje posla bio bi od velike pomoći hitnoj službi.



Procedura prilikom ulaska na odjel hitne pomoći u svim bolnicama je slična, traže se osobni podaci, ispituje se razlog dolaska, provjeravaju se vitalni znakovi itd. Radi pandemije koronavirusa medicinskom osoblju savjetovalo se da smanje kontakt sa ljudima na najmanju moguću razinu, a jedini korak u protokolu koji zahtijeva fizički kontakt pacijenta i medicinskog osoblja je provjera vitalnih znakova. Kako bi se smanjila mogućnost zaraze mogao bi se koristiti robot koji bi provjeravao vitalne znakove pacijenata, a za to vrijeme bi medicinsko osoblje moglo unositi osobne podatke pacijenata i tako ubrzati proces.

Na tržištu već sada ima mnogo robota koji bi bili prikladni za obavljanje tih zadataka, kao naprimjer robot KUKA LBR iiwa, prikazan na slici 23. Opremljen s odgovarajućim senzorima bio bi u mogućnosti mjeriti:

- Tjelesnu temperaturu – robot bi morao biti opremljen termometrom ili termografskom kamerom, već sada postoji velik broj termometara koji bi se lako mogli pričvrstiti na robotsku ruku.
- Srčani ritam – brojni današnji pametni satovi opremljeni su vrlo pouzdanim pulsmetrima, ta razvijena tehnologija zasigurno bi se mogla primijeniti na robotskoj ruci.
- Krvni tlak – sistem s digitalnim tlakomjerom postavljenim na robotsku ruku također bi mogao mjeriti i srčani ritam, time bi se uštedjelo na instalaciji senzora s pulsmetrima.
- Zasićenost krvi kisikom – mjeri se pulsni oksimetrom koji se sastoji od pretvarača s dva dijela, odašiljačem svjetla i fotodetektorom, obično je u obliku štipaljke, kao što je prikazano na slici 24. [34] Budući da robotska ruka mora opremljena pulsni oksimetrom i digitalnim tlakomjerom, a oba ta uređaja mogu mjeriti i srčani ritam, treba zanemariti instalaciju pulsmetra.

Dakle, robotska ruka morala bi imati mogućnost izmjene tri uređaja: digitalnog termometra, tlakomjera i pulsni oksimetra. Provjera vitalnih znakova medicinskom osoblju traje oko pet minuta po pacijentu, ukoliko medicinsko osoblje mora obraditi 1000 pacijenata tjedno, primjena robota za provjeru vitalnih znakova uštedjela bi medicinskom osoblju u prosjeku 80 sati tjedno, a za to uštedeno vrijeme medicinsko osoblje moglo bi obraditi još toliko pacijenata.

Pogodan robot, koji je već spominjan, jest KUKA LBR iiwa (Slika 23.) [35]. „LBR“ je skraćenica od njemačke riječi „Leichtbauroboter“, što u prijevodu znači robot lake gradnje, pošto je proizveden od aluminija što ga čini znatno lakšim od nekih prijašnjih robota. Dizajniran je da oponaša ljudsku ruku sa svojih sedam osi za rotacijsko ili translacijsko gibanje.

Ima dojmrljive senzorske sposobnosti<sup>2</sup>, te softver koji mu omogućuje brzo učenje i lako upravljanje. Robot je pogodan za rukovanje osjetljivim predmetima bez opasnosti od drobljenja predmeta ili njegovog izmicanja (ispadanja) iz hvataljke.



**Slika 23. Robot KUKA LBR iiwa [35]**

---

<sup>2</sup> LBR iiwa ima funkciju otkrivanja sudara, te ugrađene senzore okretnog momenta u zglobovima kojima može otkriti kontakt i smanjiti brzinu djelovanja, također ima ugrađene senzore koji mu omogućuju samopozicioniranje i pružaju točnost i preciznost.



Slika 24. Pulsni oksimetar [34]

## 4.2. Kolaboracija pri testiranju na koronavirus (Robot Hospi)

Jedan od prvih zadataka koji se moraju obaviti u bolnici kada pacijent ima simptome koronavirusa je da se obavi test kako bi se utvrdilo da li je pacijent doista zaražen. Test PCR predstavlja glavni laboratorijski test za otkrivanje prisutnosti koronavirusa. On omogućava da se određeni virusni geni u formi molekula DNK umnožavaju i do milijardu puta, pa ukoliko se u uzorku nalazi čak i mala količina virusa, njega je moguće detektirati. [36] Za provjeru se uzima uzorak brisom iz nosa ili grla. Za uzimanje uzorka potrebna su dva medicinska radnika, jedan koji uzima bris iz nosa ili grla, te drugi koji drži sterilnu posudu i zatvori je nakon što se u nju položi uzorak. Dva radnika su potrebna kako onaj koji je u kontaktu s pacijentom ne bi dodirivao ništa drugo jer bi tako mogao prenijeti virus.

Uzimanje brisa iz nosa ili grla zahtijeva posebnu brigu o pacijentu jer se radi o osjetljivim područjima. Tu je važna taktičnost i empatija pa bi taj zadatak robot teško obavljao, a i u slučaju da ga obavlja robot, moglo bi se dogoditi da se pacijent osjeća neugodno, uplašeno i nepovjerljivo. Drugi dio posla koji se sastoji od držanja sterilne posude i zatvaranje bio bi idealan za korištenje robota i time bi se smanjio broj ljudi potrebnih za testiranje na samo jednu osobu i smanjio bi se rizik zaraze osoblja.

Glavni zahtjev je da robot mora moći otvoriti i zatvoriti sterilnu posudu kada medicinski radnik želi staviti uzorak u nju. Taj zadatak ne bi trebao biti prezahtjevan pošto brojni kolaborativni roboti obavljaju slične zadatke u industriji. Robot bi morao imati neku vrstu sučelja koje omogućuje komunikaciju s njime. Budući da medicinski tehničar ne smije dodirivati ništa osim uzorka, tipke, zaslon osjetljiv na dodir ili bilo koje vrste sučelja koje zahtijevaju izravni kontakt ne dolaze u obzir kako bi se spriječilo širenje virusa. Poželjna su sučelja preko kojih bi medicinski tehničar i robot mogli komunicirati gestama ili govorom. Robot bi preko sučelja primio informacije, te bi potom znao kako djelovati. Također, robot bi se morao moći samostalno kretati pošto ne smije imati nikakav kontakt s radnikom koji obavlja test. Robot bi trebao moći pratiti medicinskog tehničara kroz bolničke hodnike do laboratorija i ostati miran dok se prikupljaju uzorci.

Za ovaj posao najprikladniji bi bio robot koji se kreće pomoću kotača. Kretanje kotačima po bolnici ne bi predstavljalo problem pošto su bolnički hodnici već pripremljeni za kretanje invalidskih kolica i bolničkih kreveta, a bez problema bi mogao ići dizalom s jednog kata na drugi. Robot bi morao u sebi imati programiran tlocrt bolnice kako bi znao lokaciju svake sobe, također mora biti u stanju otkriti prepreke na svom putu i izbjeći sudare.

Robot Hospi, prikazan na slici 25., je autonomni mobilni robot koji obavlja transportne zadatke u bolnici. Proizvela ga je japanska tvrtka Panasonic. Najviše se koristi za transport lijekova i uzoraka krvi. Na temelju pohranjenih podataka s karte lako se kreće bolničkim hodnicima, a može koristiti i dizalo te tako ići na sve katove bolnice. Opremljen je sensorima koji mu daju informacije o preprekama koje mu se nađu na putu kako ne bi došlo do sudara. Ima ugrađena četiri laserska daljinomjera za prepoznavanje okoline. Ukoliko na svome putu naiđe na neku prepreku, primjerice na čovjeka u invalidskim kolicima, Hospi automatski prilagodi svoj put i zaobilazi prepreke. Karakteristike robota prikazane su u tablici 1.[37]

**Tablica 1. Karakteristike robota Hospi [37]**

Dimenzije, mm	600x725x1345
Masa, kg	120
Nosivost, kg	20
Najveća brzina, m/s	1.0
Trajanje rada	Više od 7 sati
Kontrolirane osi	dvije osi za vožnju jedna os za okretanje glave

Uz ove karakteristike i nekoliko nadogradnji, robot Hospi bio bi savršeno rješenje za prijevoz uzoraka testa PCR do laboratorija za testiranje. Potrebno ga je nadograditi komunikacijskim sučeljem koje ne zahtijeva fizički kontakt između robota i medicinskog tehničara. Također je poželjno da robot može samostalno otvarati i zatvarati svoj spremnik za uzorke.

**Slika 25. Robot Hospi [37]**

### 4.3. Troškovi implementacije kolaborativnih robota

Kolaborativni roboti u industrijskom sektoru ubrzo isplate uloženi novac. U zdravstvenom sektoru je često drugačije, jer bolnice primarno ne monetiziraju svoje usluge, tako da uvođenje kolaborativnih robota poboljšava kvalitetu njihove usluge, ali predstavlja isključivo trošak. U tablici 2. prikazani su okvirni troškovi uvođenja robota za kolaboraciju pri provjeri vitalnih znakova i pri testiranju na koronavirus.

**Tablica 2. Troškovi implementacije kolaborativnih robota**

<b>Prijedlog primjene</b>	<b>Roboti i oprema</b>	<b>Cijena</b>
<b>Provjera vitalnih znakova</b>	LBR iiwa	50 000 do 100 000 USD [35]
	Digitalni termometar	200 do 300 HRK [38]
	Digitalni tlakomjer	200 do 300 HRK [38]
	Pulsni oksimetar	200 HRK [38]
<b>Testiranje na koronavirus</b>	Hospi	100 000 USD [37]
	<b>Ukupno</b>	150 000 do 200 000 USD

U Hrvatskoj se nalazi 13 kliničkih ustanova, te 22 opće bolnice. [39] Budući da Hospi robot ima mogućnost rada oko 7 sati, svaka ustanova bi trebala biti opremljena s barem dva takva robota. Izračunom se dobije da bi implementacija kolaborativnih robota samo u najveće zdravstvene ustanove u Hrvatskoj koštala više od 67 milijuna kuna što nije malen iznos za hrvatske porezne obveznike, ali bi se uvelike smanjio teret medicinskog osoblja, te bi se smanjio broj zaraženih ljudi.

## 5. ZAKLJUČAK

Proces automatizacije svakim danom sve više napreduje. Razvoj novih tehnologija, ponajviše senzorskih tehnologija, doveo je do implementacije kolaborativnih robota koji dijele radni prostor sa čovjekom. U radu su nabrojene prednosti implementacije kolaborativnih robota zbog kojih oni nalaze sve širu primjenu. Zajamčena je sigurnost radnika pri radu, nije potrebno ograđivati robote, ne zauzimaju puno prostora i jednostavni su za programiranje.

Većina kolaborativnih robota opremljena je sofisticiranim sensorima, kolaborativnim sučeljima te poboljšanim sustavima upravljanja koji povećavaju sigurnost i sposobnost zajedničke suradnje čovjeka i robota. Spomenuti su sustavi za učenje kako bi se robot opremio kognitivnim i kooperativnim sposobnostima koje će mu omogućiti razumijevanje okoliša, te stjecanje željenih vještina koje će poboljšati njegove sposobnosti suradnje s ljudima.

U današnje vrijeme svijet se bori s pandemijom koronavirusa, a jedan od najvećih problema tijekom pandemije jest nedostatak medicinskog osoblja. Implementacijom kolaborativnih robota, koji bi provjeravali vitalne znakove kod pacijenata, te surađivao pri obavljanju PCR testa, smanjio bi se teret sa medicinskog osoblja, a samim time smanjila bi se i mogućnost širenja zaraze među medicinskim osobljem. U sklopu prijedloga primjene kolaborativnih robota, načinjen je i grub izračun troškova.

U budućnosti se očekuje još veća primjena kolaborativnih robota, budući da oni omogućuju automatizaciju zadataka koji se do sada nisu mogli automatizirati, posebno u sklopu usporedno povezanog razvoja umjetne inteligencije i težnji prema ostvarenju koncepta *Industrije 4.0*, kojim se uspostavljaju inteligentni proizvodni procesi odnosno inteligentne tvornice.

## 6. LITERATURA

- [1] Baure, A., Wollherr, D., Buss, M.: Human-Robot Collaboration: A Survey, Institute of Automatic Control Engineering (LSR) Technische Universität München 80290 Munich, 2007.
- [2] Karabegović, I., Karabegović, E.: Povećana sigurnost radnika primjenom kolaborativnih robota u proizvodnim procesima industrije 4.0, Univerzitet u Bihaću, 2019.
- [3] <https://www.mhlnews.com/technology-automation/article/21124077/a-brief-history-of-collaborative-robots>, Pristupljeno 2021.8.31.
- [4] <https://robots.ieee.org/robots/yumi/>, Pristupljeno 2021.8.31.
- [5] Wang, L., Liu, S., Liu, H., Wang, X.W.: Overview of Human-Robot Collaboration in Manufacturing, Department of Production Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2020.
- [6] <https://www.technologyreview.com/2014/09/16/171369/how-human-robot-teamwork-will-upend-manufacturing/>, Pristupljeno 2021.9.1.
- [7] <https://www.engineering.com/story/a-history-of-collaborative-robots-from-intelligent-lift-assists-to-cobots>, Pristupljeno 2021.9.1.
- [8] De Luca, A.: Control schemes for safe human-robot interaction, Dipartimento di Ingegneria Informatica, Automatica e Gestionale (DIAG), Genova, 2019.
- [9] <https://www.asadria.com/industrijska-automatizacija-za-efikasnije-fabrike/>, Pristupljeno 2021.9.3.
- [10] Regus, M., Patalas, A., Suszyński, M.: Variables of application of collaborative robots in ergonomic assembly working stations, Poznan University of Technology, Poland 2020.
- [11] <https://www.greencarcongress.com/2015/02/20150216-audikuka.html>, Pristupljeno 2021.9.4.



- [12] <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0209722EN/innovative-human-robotcooperation-in-bmw-group-production> , Pristupljeno 2021.9.4.
- [13] <https://blog.hirebotics.com/4-reasons-consider-welding-cobots>, Pristupljeno 2021.9.5.
- [14] <https://www.ctemag.com/products/snapweld-collaborative-robot-welding-package> , Pristupljeno 2021.9.5.
- [15] <https://www.automationworld.com/factory/robotics/news/13315476/agvs-and-robotics-converge>, Pristupljeno 2021.9.5.
- [16] <https://cacm.acm.org/magazines/2019/3/234915-exoskeletons-today/fulltext>, Pristupljeno 2021.9.5.
- [17] [http://www.eyeshenzhen.com/content/2019-12/06/content\\_22681944.htm](http://www.eyeshenzhen.com/content/2019-12/06/content_22681944.htm), Pristupljeno 2021.9.7.
- [18] <https://medicalnotes.co/issue-40/>, Pristupljeno 2021.9.7.
- [19] <https://xenex.com/>, Pristupljeno 2021.9.7.
- [20] <https://www.businesswire.com/news/home/20150519005310/en/St.-Elizabeth-Healthcare-Enters-Robotic-Age-TUG> , Pristupljeno 2021.9.7.
- [21] Ogenyi, E. U., Liu, J., Yang, C., Liu, H.: Physical Human–Robot Collaboration: Robotic Systems, Learning Methods, Collaborative Strategies, Sensors, and Actuators, Institute of Electrical and Electronics Engineers, SAD, 2019.
- [22] [https://www.researchgate.net/figure/The-Exo-UL7-a-two-arm-exoskeleton-system-with-7-DOFs-in-each-arm-a-System-overview\\_fig1\\_228674697](https://www.researchgate.net/figure/The-Exo-UL7-a-two-arm-exoskeleton-system-with-7-DOFs-in-each-arm-a-System-overview_fig1_228674697), Pristupljeno 2021.9.9.
- [23] Huo, W., Mohammed, S., Moreno, J., Amirat, Y.: Lower Limb Wearable Robots for Assistance and Rehabilitation: A State of the Art, IEEE Systems Journal, SAD, 2014.
- [24] [https://www.researchgate.net/figure/Architecture-of-Microsoft-Kinect-sensor\\_fig10\\_282477283](https://www.researchgate.net/figure/Architecture-of-Microsoft-Kinect-sensor_fig10_282477283) , Pristupljeno 2021.9.10.
- [25] Pang, G., Yang, G., Pang, Z.: Review of Robot Skin: A Potential Enabler for Safe Collaboration, Immersive Teleoperation, and Affective Interaction of Future Collaborative Robots, IEEE, SAD 2021.
- [26] <https://www.csail.mit.edu/research/using-muscle-signals-lift-objects-robots>, Pristupljeno 2021.9.10.
- [27] <https://www.tcd.ie/mecheng/research/robotics/projects/actuaor-for-hri.php>, Pristupljeno 2021.9.11.

- [28] Fernandez de Gea, J., Bingbin, Y., Bargsten, V., Zipper, M., Sprengel, H.: Design, Modelling and Control of Novel Series-Elastic Actuators for Industrial Robots, Robotics Innovation Center at German Research Center for Artificial Intelligence, Bremen, 2020.
- [29] Vircikova, M., Pala, M., Smolar, P., Sincak, P.: Neural Approach for Personalised Emotional Model in Human-Robot Interaction, Center for Intelligent Technologies, Dpt. of Cybernetics and AI, Technical University of Kosice, Slovakia, 2012.
- [30] Xiao, S., Wang, Z., Folkesson, J.: Unsupervised Robot Learning to Predict Person Motion, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, 2015.
- [31] Lee, D., Nakamura, Y.: Mimesis Scheme using a Monocular Vision System on a Humanoid Robot, Department of Mechano-Informatics The University of Tokyo, 2007.
- [32] <https://hr.wikipedia.org/wiki/COVID-19>, Pristupljeno 2021.9.11.
- [33] <https://news.google.com/covid19/map?hl=hr>, Pristupljeno 2021.9.11.
- [34] <https://bauerfeind.hr/pulsni-oksimer-apex-proizvod-1045/>, Pristupljeno 2021.9.13.
- [35] <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>, Pristupljeno 2021.9.13.
- [36] <https://www.slobodnaevropa.org/a/kako-funkcionise-pcr-test/30790385.html>, Pristupljeno 2021.9.14.
- [37] Mura, R., Sakai, T., Kawano, H., Matsukawa, Y., Kitano, Y., Honda, Y., Campbell, K.: A Novel Visible Light Communication System for Enhanced Control of Autonomous Delivery Robots in a Hospital, The International Journal of Robotics Research, SAD, 2018.
- [38] [https://www.medicaldirect.hr/?gclid=CjwKCAjwhaaKBhBcEiwA8acsHGxm3GK\\_H-GivJFTgI3ZAVmXels2mnEpvundULCXS-GkCEvY8Uii6hoCtIsQAvD\\_BwE](https://www.medicaldirect.hr/?gclid=CjwKCAjwhaaKBhBcEiwA8acsHGxm3GK_H-GivJFTgI3ZAVmXels2mnEpvundULCXS-GkCEvY8Uii6hoCtIsQAvD_BwE), Pristupljeno 2021.8.14.
- [39] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Dodatak:Popis\\_bolnica\\_u\\_Hrvatskoj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Dodatak:Popis_bolnica_u_Hrvatskoj), Pristupljeno 2021.9.21.