

Utjecaj kolaborativnih robota na ergonomske čimbenike i radne značajke operatera

Marković, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:470148>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lovro Marković

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Hrvoje Cajner, dipl. ing.

Student:

Lovro Marković

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Hrvoju Cajneru na vodstvu, savjetima, uloženom vremenu i korekcijama koje su pomogle u izradi ovog rada te svojim najbližima na strpljenju i razumijevanju.

Lovro Marković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске 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 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lovro Marković** JMBAG: **0035230270**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj kolaborativnih robota na ergonomske čimbenike i radne značajke operatera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The impact of collaborative robots on ergonomic factors and operators work performance**

Opis zadatka:

Kolaborativni roboti i njihova integracija u proizvodne sustave predstavljaju važnu tehnologiju koncepta Industrije 4.0. Interakcija između ljudi i robota, nazvana ljudsko-robotska suradnja (HRC), ima za cilj poboljšanje efikasnosti i učinkovitosti sustava. Fokus suvremenih istraživanja je na detaljnom istraživanju učinka bliske interakcije kolaborativnih robota na radnike, identificirajući značajnost faktora koji utječu na uspješnu integraciju u proizvodni sustav. Dosadašnji rezultati istaknuli su važnost povjerenja i prihvaćanja kao ključne zahtjeve za uspješno uvođenje HRC-a, dok su faktori poput stresa i radnog opterećenja radnika istovremeno pozitivno i negativno utjecali na HRC. Svrha ovog rada je analizirati koncept suradnje ljudi i robotskih sustava, identificirajući kako utjecaj rada operatera na HRC sustav tako i utjecaj rada robota na operatera. Potrebno je provesti pregled dosadašnjih istraživanja glavnih faktora HRC-a na radne performanse operatera. Posebice dati presjek istraživačkih metoda korištenih u evaluaciji utjecaja robotskog sustava na radne performanse i ergonomske parametre.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

izv. prof. dr. sc. Hrvoje Cajner

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. TEORIJSKI OKVIR	2
2.1. Povijesni razvoj kolaborativnih robota.....	2
2.2. Značajke kolaborativnih robota	4
2.3. Primjene kolaborativnih robota	6
2.3.1. Opsluživanje strojeva.....	6
2.3.2. Kontrola kvalitete.....	7
2.3.3. Zdravstvo	8
2.4. Utjecaj na proizvodnju.....	9
2.5. Ljudsko-robotska suradnja	11
3. INTERAKCIJA ČOVJEKA I ROBOTA	15
3.1. Utjecaj operatera na ljudsko-robotski sustav.....	15
3.1.1. Priopćavanje promjene.....	16
3.1.2. Obuka i razvoj radne snage.....	16
3.1.3. Posvećenost i podrška višeg menadžmenta	16
3.2. Utjecaj robota na čovjeka	17
3.2.1. Poboljšanje radnih uvjeta.....	17

3.2.2. Psihološki aspekti.....	17
4. UTJECAJ KOLABORATIVNIH ROBOTA NA RADNIKA.....	19
4.1. Analiza ljudsko-robotske suradnje	19
4.1.1. Posljedice HRC-a na performanse radnika	20
4.1.2. Pregled individualnih faktora koji utječu na radne performanse operatera	21
4.2. Istraživačke metode korištene pri evaluaciji utjecaja HRC-a na radnika	23
4.2.1. Sigurnost	23
4.2.2. Ergonomija.....	26
4.3.3. Produktivnost	32
5. ZAKLJUČAK	38
LITERATURA.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1. Moderna inačica LBR KUKA kobota [3]	3
Slika 2. Vrijednost globalnog tržišta kobota [4].....	3
Slika 3. Kobot u izvršavanju operacije opsluživanja stroja [8].....	6
Slika 4. Kobot UR3 provodi kontrolu kvalitete [9].....	7
Slika 5. Egzoskeleton za rehabilitaciju [12].....	8
Slika 6. DaVinci kirurški kobot [13]	9
Slika 7. Prikaz vrijednosti OFE za ljudski i robotski upravljane proizvodne linije [16]	11
Slika 8. Vrste interakcije čovjeka i robota [18]	12
Slika 9. AIRSKIN zaštitna koža postavljena na kobota [19]	13
Slika 10. Primjer ljudsko-robotske suradnje [17].....	14
Slika 11. Robot Baxter [27].....	25
Slika 12. Shematski prikaz metode [28].....	27
Slika 13. Kolaborativni robot korišten u eksperimentu [30]	29
Slika 14. Postava eksperimenta (A) [30].....	29
Slika 15. Rezultati eksperimenta udaljenosti [30].....	30
Slika 16. Rezultati eksperimenta brzine [30]	31
Slika 17. Rezultati eksperimenta informiranosti [30]	31
Slika 18. Scenarij A: ručno obavljanje odabira i sortiranja [31]	33
Slika 19. Scenarij B: Ručno odabiranje i automatizirano sortiranje [31].....	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razlike između kobota i industrijskih robota, izrađeno prema [5].....	4
Tablica 2. Aspekti radnih performansi pod utjecajem HRC-a, izrađeno prema [24]	20
Tablica 3. Ključni individualni faktori za radne performanse operatera, izrađeno prema [24]	21
Tablica 4. Matrica rizika, izrađeno prema [26]	24
Tablica 5. REBA razine aktivnosti, izrađeno prema [29].....	28

POPIS KRATICA

Kratika	Značenje kratice
HRC	Ljudsko-robotska suradnja (<i>eng. Human-robot collaboration</i>)
HRI	Ljudsko-robotska interakcija (<i>eng. Human-robot interaction</i>)
OEE	Ukupna učinkovitost opreme (<i>eng. Overall equipment effectiveness</i>)
OFE	Ukupna učinkovitost tvornice (<i>eng. Overall factory effectiveness</i>)
JIT	Proizvodnja upravo na vrijeme (<i>eng. Just in time manufacturing</i>)
JSA	Analiza sigurnosti posla (<i>eng. Job safety analysis</i>)
FMEA	Analiza uzroka i posljedica kvarova (<i>eng. Failure mode and effect analysis</i>)
FTA	Analiza stabla pogrešaka (<i>eng. Fault tree analysis</i>)
REBA	Brza procjena cijelog tijela (<i>eng. Rapid entire body assessment</i>)
SPR	Reakcija potencijala kože (<i>eng. Skin potential response</i>)

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Značenje
N_S	–	Ukupan broj polica u prostoru za pripremu kompleta
$l_{s,j}$	m	Duljina j -te police
$t_{KOMP,I}$	s	Vrijeme dohvaćanja informacija o komponenti
$t_{KOMP,T}$	s	Vrijeme traženja komponente
$t_{U,qj}$	s	Vrijeme uzimanja jedne komponente s police
$t_{U,qd}$	s	Vrijeme uzimanja $(q_i - 1)$ dodatnih komponenti
α	s	Dodano vrijeme za komponente s lošom lakoćom prikupljanja
$t_{KOMP,P}$	s	Vrijeme potvrđivanja preuzimanja komponente
$t_{KMPL,I}$	s	Vrijeme dohvaćanja informacija o kompletu
$t_{KMPL,T}$	s	Vrijeme traženja spremnika kompleta
$t_{s,P}$	s	Vrijeme stavljanja prve komponente u komplet
$t_{s,N}$	s	Vrijeme stavljanja $(q_i - 1)$ naknadnih komponenti u komplet
$t_{KMPL,P}$	s	Vrijeme potvrđivanja stavljanja komponenti u komplet
t_P	s	Vrijeme pokretanja kolica
t_{PARK}	s	Vrijeme parkiranja kolica
V_{OP}	m/s	Prosječna brzina hoda operatera
$t_{KOLAB,P}$	s	Vrijeme odlaganja prve komponente u kolaborativnu zonu
$t_{KOLAB,N}$	s	Vrijeme odlaganja $(q_i - 1)$ naknadnih komponenti u kolaborativnu zonu
$t_{IZMJENE}$	s	Vrijeme potrebno kobotu da obavi izmjenu alata
t_Z	s	Vrijeme potrebno kobotu da zahvati komponentu
ϵ_i	%	Stopa neuspjeha kobota pri zahvaćanju komponente i
$V_{CB,UNUT}$	m/s	Brzina kobota unutar kolaborativne zone
$V_{CB,VAN}$	m/s	Brzina kobota izvan kolaborativne zone
d_{UNUT}	m	Jednosmjerna udaljenost koju kobot prelazi unutar kolaborativne zone
$d_{KMPL,j}$	m	Udaljenost između kolaborativne zone i spremnika j

SAŽETAK

Kolaborativni roboti, ili kolokvijalno koboti, razvili su se iznimno brzo i uspješno. Od tehnologije koja je do prije samo desetak godina još uvijek bila u nastajanju te nailazila na mnogo skepticizma danas se razvila najbrže rastuća grana industrijske robotike. Osim daljnjeg razvoja kolaborativnih robota, velika važnost se pridaje i analizi utjecaja kojeg koboti imaju na čovjeka kako bi se saznalo u kojim aspektima ljudsko-robotske suradnje ima najviše prostora za napredak.

Ovaj rad ima za cilj predstaviti teorijske osnove koncepta suradnje ljudi i robotskih sustava, analizirati njihovu međuovisnost te pregledom relevantnih istraživanja dati uvid u podatke o tome koje su evaluacijske metode korištene u svrhu prikupljanja podataka vezanih za utjecaj robotskih sustava na radne performanse i ergonomske čimbenike radnika.

Ključne riječi: kolaborativni roboti, ljudsko-robotska suradnja, ergonomija, radne performanse, operater

SUMMARY

Collaborative robots, or colloquially known as cobots, have developed extremely quickly and successfully. Technology that was still in its infancy until 10 years ago and was met with a lot of skepticism has developed into the fastest growing branch of industrial robotics. Along with the further development of collaborative robots, great importance is also given to the analysis of the impact that cobots have on humans in order to find out in which aspects of human-robot cooperation there is the most room for improvement.

This paper aims to present the theoretical foundations of the concept of human-robot collaboration, analyze their interdependence, and provide an overview of relevant research, giving insights into the data on the evaluation methods used to gather information related to the impact of robotic systems on work performance and ergonomic factors of workers.

Key words: collaborative robots, human-robot collaboration, ergonomics, work performance, operator

1. UVOD

U posljednjem desetljeću svjedočimo tome kako ljudsko-robotska interakcija (*eng. HRI*) i suradnja (*eng. HRC*) sve manje postaju novost, a sve više normalan način rada mnogih poduzeća diljem svijeta. Jedna od najvećih prednosti kolaborativnih robota naspram tradicionalnih je njihova sposobnost prilagođavanja različitim zadacima što ih čini idealnom nadopunom ljudskome radu. Upravo ta fleksibilnost omogućuje bržu prilagodbu promjenama u proizvodnim zahtjevima, a posljedično i povećanu produktivnost. Kolaborativni roboti također doprinose poboljšanju kvalitete proizvodnje. Njihova preciznost i konzistentnost smanjuju mogućnost ljudskih pogrešaka što rezultira manjim brojem defektnih proizvoda, dodatno povećavajući kvalitetu i efikasnost proizvodnih procesa. Između ostalog, imaju mogućnost preuzimanja opasnih i tjelesno napornih zadataka što je doprinijelo dobrobiti radnika, čemu dodatno ide u prilog i sposobnost takvih robota da uspješno funkcioniraju u neposrednoj blizini ili izravno s ljudima, čime se osigurava da radnici ostanu sigurni tijekom suradnje.

Međutim, uspješna integracija kolaborativnih robota u proizvodne sustave ne ovisi samo o tehničkim mogućnostima robota, već i o određenim faktorima koji se tiču radnika. Nedostatak adekvatne obuke, otpor prema promjenama, manjak povjerenja u tehnologiju ili pak loša ergonomija radnog mjesta neki su od razloga koji mogu dovesti do neuspješne integracije takvih robota u proizvodni sustav. Iz tih razloga od velike je važnosti analizirati postojeća istraživanja vezana za sve učinke koje kolaborativni roboti imaju na radnike, prije svega na njihove radne performanse i ergonomske parametre pri radu, kako bi se u budućnosti što više olakšala i ubrzala implementacija robotskih sustava te radnicima omogućilo lagodnije izvršavanje posla u takvim uvjetima.

2. TEORIJSKI OKVIR

Kolaborativni roboti su roboti konstruirani za rad s ljudima zahvaljujući tehnologijama poput povratne informacije o sili, malih servo motora, elastičnih aktuatora i sustava za detekciju sudara koje ograničavaju njihovu snagu i mogućnost primjene sile na razine prikladne za kontakt s operaterima. Kompaktniji su od konvencionalnih robota te najčešće imaju konstrukciju sastavljenu od laganijih materijala, sa zaobljenim rubovima i minimalnim brojem točaka uklještenja. [1]

Kako bi se definirao pojam ljudsko-robotske suradnje, prvo će se pojasniti povijest njihovog nastajanja te kroz nekoliko primjera поближе razraditi značajke i upotreba kolaborativnih robota.

2.1. Povijesni razvoj kolaborativnih robota

Prva definicija kobota potječe iz američkog patenta napravljenog 1999. za "aparatus i metodu za izravnu fizičku integraciju između osobe i manipulatora opće namjene kojim upravlja računalo." Opis se odnosi na nešto što bismo danas nazvali inteligentnim uređajem za ispomocu (*eng. Intelligent assist device*). Radi se o praocu modernih kobota koji je proizašao iz nastojanja *General Motorsa* da implementira robotiku u automobilski sektor. Novi uređaj mogao se kretati u okruženju bez kaveza kako bi pomogao ljudima u operacijama sastavljanja, ali iz sigurnosnih razloga nije imao unutarnji izvor snage kretanja.

Godine 2004. njemačka tvrtka *KUKA*, poznata po proizvodnji industrijskih robota, razvila je LBR3, lagani kolaborativni robot s vlastitom snagom kretanja. Ovaj napredak bio je rezultat dugogodišnje suradnje s Njemačkim institutom za svemirski centar, a LBR3 je kasnije unaprijeđen i napokon predstavljen tržištu u dva izdanja, 2008. i 2013. godine. Jedan takav njihov kobot je prikazan na slici 1.

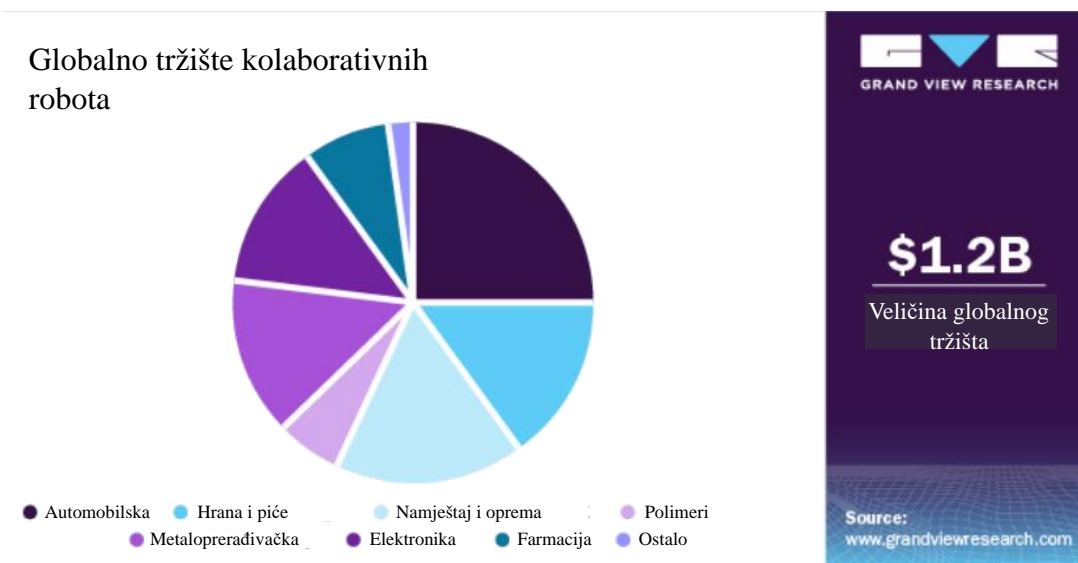
Međutim, firma koja je 2008. godine prodala prvi komercijalni kobot bila je danski proizvođač *Universal Robots*. Njihov kobot UR5 mogao je sigurno raditi uz zaposlenike, eliminirajući potrebu za sigurnosnim kavezima ili ogradama. Novi robot pomogao je pokrenuti eru fleksibilnih, korisnički naklonjenih i troškovno učinkovitih kolaborativnih robota. Zahvaljujući njemu, i mali i srednji proizvođači mogli su automatizirati svoje pogone bez značajnih ulaganja u skupu tehnologiju ili potpuno preuređenje proizvodnih linija. [2]



Slika 1. Moderna inačica LBR KUKA kobota [3]

Navedene firme bile su pioniri u proizvodnji kolaborativnih robota, nakon čega je sve više kompanija počelo slijediti njihov primjer. U narednim su godinama *Rethink Robotics*, *ABB*, *Fanuc*, *Doosan*, *Yaskawa* i mnoge druge predstavile vlastite inačice kobota.

U to doba mnogi su menadžeri vidjeli kobote kao revolucionarnu tehnologiju, ali su dovodili u pitanje mogućnost njihove integracije u stvarno radno okruženje. Danas, međutim, tržište industrijskih kobota ima godišnju stopu rasta od 50% te je 2022. bilo procijenjeno na 1,2 milijarde dolara [4]. Na slici 2. prikazani su udjeli kolaborativnih robota po industrijskim granama.



Slika 2. Vrijednost globalnog tržišta kobota [4]

2.2. Značajke kolaborativnih robota

Glavna razlika između kobota i industrijskih robota je ta što su koboti rađeni prema određenim sigurnosnim standardima koji uzimaju u obzir rad s ljudima. Opremljeni su, između ostalog, sensorima sile i okretnog momenta pomoću kojih detektiraju trenutak dodira sa čovjekom ili nekim drugim objektom te reagiraju sukladno tome, usporavajući ili zaustavljajući se u potpunosti kako bi spriječili potencijalnu nezgodu. S druge strane, industrijski su roboti uobičajeno odvojeni od radnika sigurnosnim kavezima ili određenim ogradama pošto predstavljaju potencijalan rizik zbog svoje brzine, snage i veličine. [5]

Dakako, osim sigurnosti, spomenute vrste robota razlikuju se i u aspektima koji se tiču fleksibilnosti, lakoće programiranja, cijene i mnogih drugih. Neki od njih u nastavku su prikazani tablicom.

Tablica 1. Razlike između kobota i industrijskih robota, izrađeno prema [5]

	KOBOTI	INDUSTRIJSKI ROBOTI
FLEKSIBILNOST I PRILAGODLJIVOST	visoka fleksibilnost, jednostavna konfiguracija	manje fleksibilni, konstruirani za specifične zadatke, kompleksni za relociranje zbog velike težine
PROGRAMABILNOST I INTEGRACIJA	programiranje prilagođeno korisniku, mogućnost brzog reprogramiranja, prilagodljivi	potrebno znanje specijaliziranih programskih jezika, strmija krivulja učenja, dulje vrijeme pripreme za rad
TROŠKOVI I POVRAT INVESTICIJE	manji početni troškovi i troškovi treniranja osoblja, brži povrat uloženog novca	veći početni troškovi, dodatni troškovi poput sigurnosne infrastrukture, softvera i integracije u rad
LJUDSKA INTERVENCIJA	zahtijevaju ljudsku intervenciju za programiranje, održavanje i kolaboraciju	jednom postavljeni mogu samostalno raditi te zahtijevaju ljudsku intervenciju primarno za održavanje, nadogradnju ili otklanjanje grešaka
IZDRŽLJIVOST I NOSIVOST	konstruirani za manje "gruba" okruženja, nisu toliko robusni te imaju relativno malu nosivost	izdržljivi i robusni, namijenjeni za rad u teškim uvjetima, imaju dulji radni vijek i znatno veću nosivost

Industrijski roboti mogu se potencijalno „transformirati“ u kolaborativne uz primjenu odgovarajućih sigurnosnih specifikacija poput ISO 10218-1 i ISO 10218-2. Taj standard regulira sigurnost industrijskih robota prikupljajući sigurnosne zahtjeve za proizvođače robota, a koji se tiču konstrukcije robota i sigurnosnih značajki pri njihovom radu. Međutim, koboti su jedini roboti koji su od početka rađeni u vidu rada s ljudima zbog čega podliježu dodatnim zahtjevima na sigurnost u njihovoj konstrukciji te prilikom rada. [6]

Tehnička specifikacija ISO TS-15066 pruža dodatne informacije i vodstvo vezane uz operacije s kolaborativnim robotima predstavljajući 4 metode za sigurnu ljudsko-robotsku suradnju [7]:

- Sigurnosno zaustavljanje (*eng. Safety Monitored Stop*) – značajka korištena kod kobota koji pretežito rade sami i kojima čovjek rijetko ulazi u radno okruženje, npr. ako zaposlenik mora namjestiti obradak kojim kobot rukuje, on će obustaviti sve kretanje, ali se neće potpuno isključiti kako bi lagano mogao nastaviti sa radom kada se radnik udalji
- Ručno vođenje (*eng. Hand guiding*) – značajka koja služi tome da čovjek doslovce „vodi“ robota kroz sekvencu pokreta potrebnih za izvršenje zadatka koristeći uređaj za upravljanje na robotu ili u neposrednoj blizini; pri tome robot može utvrditi svoju poziciju u svakom trenutku tog procesa što mu omogućuje da uči na primjeru
- Nadzor kretanja i položaja (*eng. Speed and separation monitoring*) – u slučajevima češće ljudske intervencije i/ili rada sa većim kobotima, u radno okruženje se može ugraditi sustav laserskog vida što omogućuje robotu da osjeti kada je u blizini operatera, slično kao i kod principa sigurnosnog zaustavljanja; primjenom ove značajke robot će postepeno sve više usporavati kako se radnik približava, potpuno se zaustavljajući u slučaju da dođe preblizu te ponovno ubrzavajući kada se on udalji
- Ograničavanje snage i sile (*eng. Power and Force Limiting*) – roboti ograničeni na ovaj način mogu u svojim zglobovima očitavati vrijednosti pritiska, otpora ili udara zahvaljujući ugrađenim sensorima; kada osjeti bilokakav poremećaj, robot se zaustavi i nastavi kretanje u drugome smjeru; ovakvi modeli kobota imaju unutarnje motore i ožičenja u cilju da se njihova veličina što više smanji

2.3. Primjene kolaborativnih robota

Do sada su mnoge industrije primijetile razvoj i potencijal kolaborativnih robota u zadnjem desetljeću te su ih implementirale u svoje poslovanje u određenom obliku. Tu je primarno riječ o proizvodnoj industriji, gdje se kolaborativni roboti koriste za zadatke u svim stadijima procesa izrade proizvoda, od zavarivanja i opsluživanja strojeva pa sve do kontrole kvalitete i paletiziranja. Međutim, iako je većina kobotova svoju primjenu našla u automobilskoj, metaloprerađivačkoj i sličnim industrijama, zbog svoje se fleksibilnosti koriste i u mnogim drugim sektorima, od agrikulture do medicine i farmacije. U ovome će se poglavlju detaljnije razraditi upotreba kobotova u proizvodnji (pobliže pri opsluživanju strojeva i kontroli kvalitete) te u zdravstvenom sektoru.

2.3.1. Opsluživanje strojeva

Opsluživanje strojeva je proces u kojem radnik opskrbljuje strojeve predmetima rada iz ulaznog spremnika, umeće ih i vadi po završetku operacije te potom prebacuje gotov predmet u izlazni spremnik. Ovakav posao je iznimno repetitivan i monoton zbog čega može postati riskantan u slučaju da radnik razvije osjećaj dosade te prestane obavljati posao maksimalno fokusirano. Kolaborativni su roboti našli savršenu primjenu u ovome poslu jer se njihovim uvođenjem radnike oslobodilo monotonog zadatka te im po mogućnosti učinilo posao zanimljivijim kroz interakciju sa robotom. Također, koboti su doprinijeli povećanju produktivnosti smanjenjem vodećeg vremena i standardizirajući takt proizvodnje te su na taj način iskorišteni za opsluživanje strojeva za razne operacije poput glodanja, tokarenja, brušenja, injekcijskog prešanja, zavarivanja, kovanja i mnogih drugih. Na slici 3. je prikazan kolaborativni robot koji opslužuje jednu CNC stanicu. [8]



Slika 3. Kobot u izvršavanju operacije opsluživanja stroja [8]

2.3.2. Kontrola kvalitete

Kontrola kvalitete je proces koji uključuje provjeru i mjerenje više karakteristika nekog proizvoda uspoređujući ih sa određenim standardima, čime se nastoji pronaći nedostatke u pojedinim komadima proizvoda. Uvođenje kobotu opremljenih sa 2D i 3D senzorima vida u ovaj proces znatno je poboljšalo točnost pronalaska nesukladnih proizvoda te pozitivno utjecalo na produktivnost. Za rad s njima operateri ne moraju biti vješti u programiranju jer su jednostavni za korištenje te, jednom postavljeni, mogu provoditi kontrolu kvalitete na proizvodima raznih oblika i veličina uz promjenu odgovarajućih ulaznih parametara. [8]

Japanska tvrtka *Koyo Electronics Industries*, koja proizvodi elektroniku za automobilsku industriju, uvela je kobotu tvrtke *Universal Robots* u svoj odjel kontrole kvalitete (Slika 4.). Nakon integracije robota u rad primijetilo se kako je dnevno radno vrijeme smanjeno sa 10 na 8 sati, pri čemu je produktivnost porasla za 31%. [9]

Kolaborativni roboti imaju široku primjenu u kontroli kvalitete: od automobilske industrije, kontrole zavara i pregleda avionskih motora pa sve do provjere dimenzija voća ili povrća u agrikulturni.



Slika 4. Kobot UR3 provodi kontrolu kvalitete [9]

2.3.3. Zdravstvo

Kolaborativni roboti imaju značajnu primjenu u medicini i zdravstvenom sektoru gdje se primarno koriste za rehabilitaciju te prilikom operacija.

U rehabilitaciji, koboti se koriste za pomoć tijekom fizikalne terapije pružajući precizne i ponovljive pokrete, prilagođavajući se pacijentima s raznim medicinskim stanjima uključujući cerebralnu paralizu, moždani udar te ozljede kostiju i mišića. Primjer takvog kobota je robotski egzoskelet koji pomaže paraliziranim pacijentima u kretanju udova (slika 5). Ovaj sustav funkcionira kao vanjski okvir koji podupire i potiče pokrete tijela koristeći kombinaciju senzora, aktuatora i kontrolnog sustava koji analizira podatke s navedenih senzora i upravlja aktuatorima u stvarnom vremenu. [10]

Što se kirurgije tiče, uvođenje kobota omogućilo je veću preciznost tijekom operativnih zahvata, smanjujući rizik od ljudske pogreške. Robotski sustav DaVinci najčešće je korišteni kolaborativni robot u kirurgiji. Sastoji se od robotske ruke i konzole za upravljanje koja kirurzima pruža ergonomski udoban položaj, smanjujući umor i omogućujući im bolju koncentraciju tijekom duljih operacija. Sustav nudi trodimenzionalni pogled na operativno polje, stvarajući bolju percepciju dubine i detalja tijekom operacija što rezultira visokom preciznošću i mogućnosti izvođenja minimalno invazivnih operacija. Takav jedan kobot prikazan je na slici 6. [11]



Slika 5. Egzoskeleton za rehabilitaciju [12]



Slika 6. Da Vinci kirurški robot [13]

2.4. Utjecaj na proizvodnju

Kolaborativni roboti (i industrijski roboti općenito) pozitivno su utjecali na dinamiku proizvodnje, povećavajući ključne pokazatelje uspješnosti (*eng. KPI*) te doprinoseći time rastu i razvoju kompanija.

Propusnost (*eng. throughput*) je jedan od indikatora produktivnosti tvornice. Zahvaljujući tome što roboti zadatke mogu obaviti brže i to konstantnom brzinom, u stanju su maksimizirati propusnost određene radne pozicije. Tvrtka Nestlé profitirala je od korištenja robota za utovar i istovar paleta na način da je zabilježila povećanje produktivnosti od 53% u svom proizvodnom pogonu, što je posljedično smanjilo i ukupno vrijeme isporuke proizvoda (*eng. OFCT*). [14]

Do sličnog su rezultata u svome radu došli Graetz i Michaels (2015.). Promatrajući kako intenzitet robotizacije utječe na produktivnost i dodanu vrijednost proizvoda unutar proizvodnog pogona, zaključili su kako su firme koje su većom brzinom provodile robotizaciju svoje proizvodnje zauzvrat zabilježile veći rast produktivnosti i dodane vrijednosti i to na način da su firme, koje su najvećim intenzitetom provodile robotizaciju (poput elektroničkih), vidjele proporcionalno najveći rast spomenutih veličina. [15]

U drugome je radu ispitana promjena ukupne učinkovitosti tvornice (*eng. OFE*), indeksa temeljenog na ukupnoj učinkovitosti opreme (*eng. OEE*).

OEE predstavlja složeni pokazatelj uspješnosti koji mjeri izlaz temeljen na kapacitetu, uzimajući u obzir raspoloživost, efikasnost i kvalitetu procesa te se računa prema sljedećoj formuli [16]:

$$OEE = (Raspoloživost) \times (Efikasnost) \times (Kvaliteta) \quad (1)$$

pri čemu je *Raspoloživost* omjer stvarnog i planiranog vremena proizvodnje, *Efikasnost* omjer idealnog i stvarnog vremena ciklusa te *Kvaliteta* omjer ispravnog i ukupnog broja dijelova.

S obzirom na to da *OEE* mjeri stvarnu produktivnost opreme u odnosu na njezinu maksimalnu sposobnost, njegova jednadžba se može dodatno pojednostaviti kao [16]:

$$OEE = \frac{\text{Stvarna propusnost opreme u ukupnom vremenu}}{\text{Teorijska propusnost opreme u ukupnom vremenu}} \quad (2)$$

Ako se jednadžba u takvom obliku proširi na razinu cijele tvornice, dobivamo *OFE*:

$$OFE = \frac{\text{Stvarna propusnost tvornice u ukupnom vremenu}}{\text{Teorijska propusnost tvornice u ukupnom vremenu}} \quad (3)$$

Razlika je u tome što *OEE* pokazatelj mjeri isključivo performanse jednog stroja ili proizvodne linije, dok *OFE* mjeri identičnu veličinu, ali na razini cijele tvornice kombinirajući aktivnosti i odnose između različitih strojeva i procesa.

U svom istraživanju Barosz i suradnici mjerili su, između ostalih veličina, kolika je vrijednost *OFE* pokazatelja uspješnosti u tvornici gdje proizvodnim linijama upravljaju radnici, a kolika u slučaju kada je proizvodna linija u određenoj mjeri robotizirana. Rezultat istraživanja pokazuje kako je u svakom vremenskom intervalu rada (jedan dan, dva dana, godina...) *OFE* približno 30% veći kod robotizirane proizvodne linije nego za slučaj onih kojima upravljaju zaposlenici. Spomenuti rezultati vidljivi su na slici 8. ispod teksta [16].

Vrijeme simulacije [h]	Limit proizvodnje LP [kom]	Linija kojom upravljaju ljudi			Robotski upravljanja linija		
		Prosječna proizvodnja P_{PROSJ} [kom]	Std. dev.	OFE	Prosječna proizvodnja [kom]	Std. dev.	OFE
24	1536	664.6	8.4	0.432682	867.1	1.05	0.56451
48	3072	1656.2	10.1	0.539128	2165.1	1.29	0.70478
120	7680	4624.1	14.9	0.602096	6062.7	2.23	0.78941
480	30,720	18,517	18.3	0.602767	24,243	3.7	0.78916
2880	184,320	110,739	89.0	0.600798	145,437	6.8	0.78904
5760	368,640	222,146	115	0.60261	290,856	21.2	0.78899

Slika 7. Prikaz vrijednosti OFE za ljudski i robotski upravljane proizvodne linije [16]

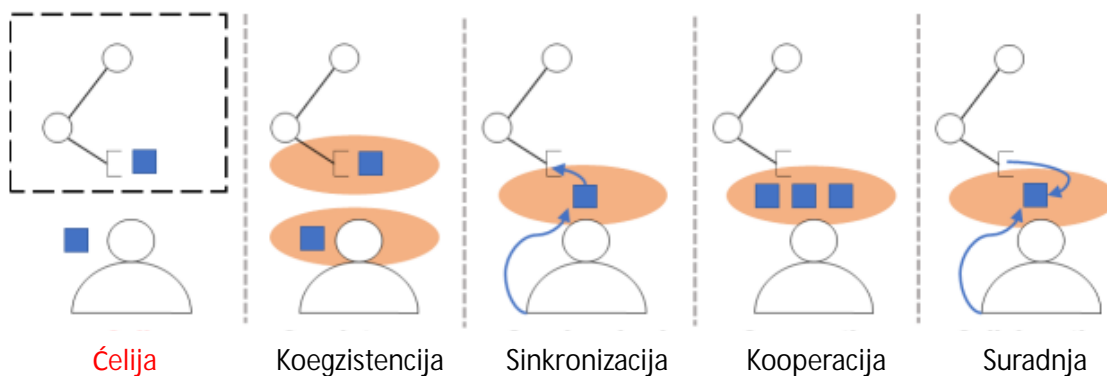
2.5. Ljudsko-robotska suradnja

Ljudsko-robotska suradnja (*eng. Human-robot collaboration*) odnosi se na interakciju između ljudi i robota unutar zajedničkog radnog okruženja, pri čemu je glavni cilj suradnje iskoristiti snagu, izdržljivost i preciznost robota te ljudsku intuiciju, osjetila i svestranost kako bi se obavili zadaci koje čovjek i robot inače ne bi mogli izvršiti sami ili bi ih obavili manje učinkovito bez međusobne pomoći. [17]

Najprije je važno definirati različite načine suradnje koji su se javljali s razvojem kolaborativnih robota. Reiner Müller i suradnici u svojem su članku predložili klasifikaciju za različite načine na koje su čovjek i robot zajedno radili kroz povijest. Na slici 7. prikazani su svi stadiji interakcije između čovjeka i robota koji su uslijedili nakon izvorne robotske ćelije odvojene sigurnosnim kavezom. Ovaj će se završni rad fokusirati na obrađivanje zadnjeg stadija ljudsko-robotske suradnje sa slike, kojemu je jednostavno pridano ime „suradnja“ te kod kojega će jedine razlike biti to u kojoj mjeri roboti rade sami tj. koliko učestalo čovjek ulazi u radno okruženje robota [18].

- Koegzistencija (*eng. Coexistence*) – operater i kobot se nalaze u istom okruženju, ali generalno nemaju nikakvih interakcija jedno s drugim
- Sinkronizacija (*eng. Synchronized*) – operater i kobot rade u istom radnom prostoru, ali u različitim vremenskim intervalima

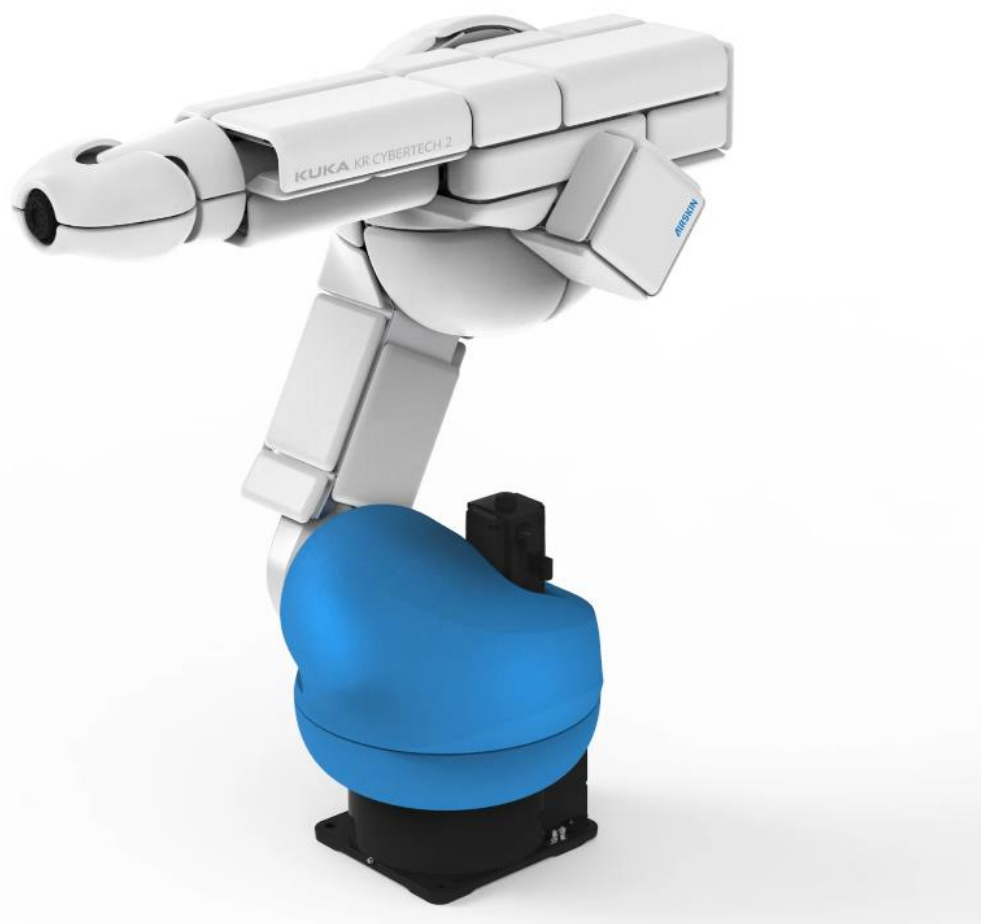
- Kooperacija (*eng. Cooperation*) – operater i kobot rade u istom radnom prostoru u isto vrijeme, ali se svaki fokusira na svoje vlastite zadatke
- Suradnja (*eng. Collaboration*) – operater i kobot zajedno izvršavaju zadatak, pri čemu svaka radnja operatera utječe na robota i obrnuto



Slika 8. Vrste interakcije čovjeka i robota [18]

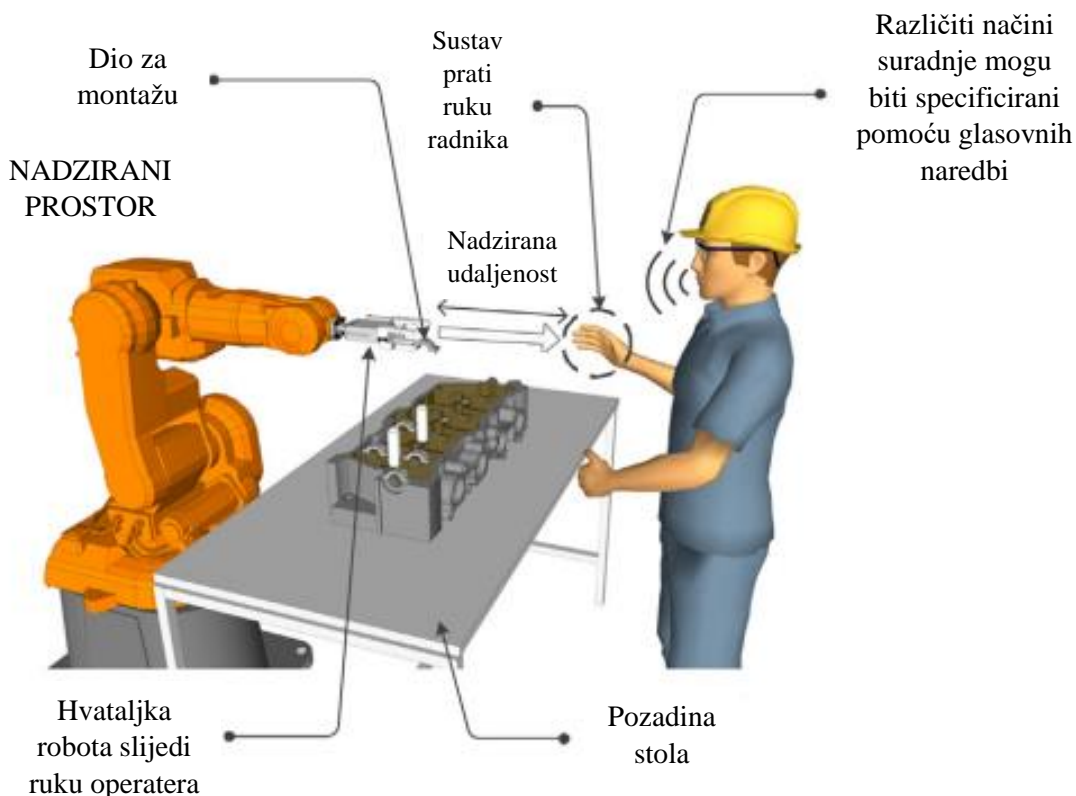
U prethodnom je odlomku spomenut pojam zajedničkog radnog okruženja, koji se prema normi (ANSI/RIA 15.06.) definira kao kolaborativni radni prostor. On predstavlja prostor unutar zaštićenog područja u kojem kolaborativni robot i operater mogu istovremeno obavljati zadatke tijekom proizvodnih procesa. Takav prostor mora biti jasno označen te se unutar njega ne smiju nalaziti nikakvi predmeti koji bi potencijalno mogli biti opasni za radnika. Oprema koja može biti dio kolaborativnog radnog prostora, pod uvjetom da zadovoljava propisane uvjete zaštite na radu, uključuje opremu za rukovanje materijalom, alate, hvataljke i aktuatorne te same alatne strojeve. Kolaborativni radni prostor uključuje i integraciju određenih sigurnosnih rješenja u sustav, ovisno o prisutnosti potencijalne opasnosti. Sigurnosni senzori i sigurnosni prekidači su uređaji koji se najčešće primjenjuju jer oni predstavljaju osnovnu razinu zaštite te ih je ujedno i najlakše ugraditi u radno okruženje. U radnim prostorima gdje je opasnost konstantno prisutna ili gdje određene operacije mogu izazvati opasnost, moguće je uvođenje dodatnih sigurnosnih rješenja poput sigurnosnih svjetlosnih zavjesa/barijera. To su elektro-osjetljivi zaštitni uređaji sa više svjetlosnih zraka koji uzrokuju automatsko zaustavljanje stroja ako se jedan od njih prekine, tj. ako radnik uđe u opasno područje. [1]

Osim osiguravanja radnog prostora i kobote se može učiniti sigurnijima za rad s ljudima opremajući ih odgovarajućim zaštitnim slojevima koji su mekši od njihove izvorne konstrukcije. Time se bavi austrijska firma *Blue Danube Robotics* koja je patentirala AIRSKIN, čvrstu kožu osjetljivu na dodir koja se postavlja na konstrukciju kolaborativnog (ili bilo kojeg industrijskog) robota. Koža se za svakog robota radi po mjeri što im omogućava rad s robotima svih veličina, oblika i funkcija. Izrađuje se od elastomera i može detektirati kontakt s operaterom ili nekom preprekom pomoću senzora osjetljivih na dodir koji su u stanju očitati silu u iznosu od samo 0,5 N zahvaljujući maloj debljini kože. Primjer njihovog proizvoda montiranog na kobota prikazan je slikom 8. [19]



Slika 9. AIRSKIN zaštitna koža postavljena na kobota [19]

U usporedbi s potpuno automatiziranim sustavima s jedne strane i isključivo ručnim operacijama koje izvodi čovjek s druge, ljudsko-robotska suradnja nudi znatno unaprijeđene radne performanse kod većine zadataka, kombinirajući vještine čovjeka i robota. Međutim, ona predstavlja dinamičko okruženje u kojem se od robota očekuje da povremeno mijenja svoje trenutno definirane zadatke kako bi mogao efikasno surađivati sa čovjekom u radnom prostoru. To nije bilo izvedivo primjenom iste tehnologije korištene kod tradicionalnih industrijskih robota upravljanih pomoću unaprijed generiranih programskih kodova, već je zahtijevalo razvoj novih metoda kontrole i komunikacije s robotom. Te metode uključuju glasovne naredbe, prepoznavanje određenih gesti, interakciju pomoću dodira i mnoge druge. Za većinu njih zaslužno je duboko učenje koje je robotu omogućilo da obavlja zadatke poput klasificiranja različitih tipova proizvoda (npr. na montažnoj liniji), prepoznavanja proizvoda i njihovog položaja u prostoru (za zadatke poput odabira i postavljanja proizvoda; *eng. pick-and-place*) ili pak za percepciju okruženja u kojem robot djeluje kako bi se osigurala sigurna i efikasna suradnja sa čovjekom. Na slici 9. ilustriran je primjer ljudsko-robotske suradnje u kojem operater ima na raspolaganju neke od navedenih metoda za komunikaciju (rad) s robotom. [17]



Slika 10. Primjer ljudsko-robotske suradnje [17]

3. INTERAKCIJA ČOVJEKA I ROBOTA

Ljudsko-robotska interakcija (*eng. Human-Robot interaction*) je aktivnost koja predstavlja načine na koje ljudi i roboti komuniciraju te se može podijeliti na 4 različita područja razmatranja [20]:

- Nadziranje rada robota od strane čovjeka prilikom obavljanja zadataka u raznim okruženjima, npr. u industrijskim pogonima, skladištima, bolnicama...
- Upravljanje na daljinu zemaljskim, zračnim, svemirskim ili podvodnim vozilima u svrhu obavljanja nerutinskih zadataka u opasnim ili teško pristupačnim okruženjima
- Automatizirana vozila u kojima su ljudi putnici, poput automatiziranih cestovnih i pružnih vozila ili zrakoplova
- Socijalna interakcija čovjeka i robota, uključujući robotske uređaje za zabavu, učenje, pomoć za djecu, starije i nemoćne itd...

U ovome će završnom radu fokus biti na ljudsko-robotskoj interakciji opisanoj u prvoj točki, поближе na interakciji čovjeka i robota.

Na učinkovitost ljudsko-robotske interakcije utječu mnogi čimbenici koji se tiču kako robota tako i čovjeka. Istraživanje tih faktora je kompleksan zadatak koji zahtijeva multidisciplinarnu suradnju u kojoj sudjeluju stručnjaci iz područja robotike, kognitivne psihologije i društvenih znanosti. Neki od tih utjecajnih faktora će biti navedeni u ovom poglavlju i поближе opisani kako bi se dao uvod u kasniju analizu istraživanja rađenih na temu utjecaja robota na čovjeka pri ljudsko-robotskoj suradnji. [20]

3.1. Utjecaj operatera na ljudsko-robotski sustav

Uloga operatera u ljudsko-robotskom sustavu je iznimno bitna jer oni jednim dijelom utječu na učinkovitost i produktivnost cijelog sustava. Njihova stručnost, iskustvo i pristup poslu ključni su za optimalno obavljanje zadatka, pri čemu važnu ulogu igra ispravan odabir, obuka i vještine samih radnika. Te tehničke vještine zajedno s psihološkim aspektima (poput sposobnosti čovjeka da prihvati robota kao dio „tima“) važni su kako bi se u potpunosti iskoristio potencijal kolaborativnih robota. U nastavku će biti razmotreni neki od faktora koji su bitni za otklanjanje nesigurnosti radnika prema radu s robotima.

3.1.1. Priopćavanje promjene

Učinkovita komunikacija u poduzeću može poslužiti kao sredstvo kojim se zaposlenicima pružaju informacije o tome zašto, kako i kada će se dogoditi promjene, u ovome slučaju uvođenje kolaborativnih robota u poslovni proces. Na taj se način zaposlenike informira o tome kako će njihovi budući zadaci izgledati te ih se upoznaje s ostalim pitanjima vezanima uz promjenu unutar organizacije. Štoviše, empirijska istraživanja pokazala su kako postojanje formalne rute komunikacije unutar poduzeća koje provodi određenu promjenu smanjuje neizvjesnost i povećava predanost radnika, što uvelike olakšava prihvaćanje novog modela rada. Ključnim se također pokazalo i sudjelovanje radnika u provođenju samih promjena, gdje je utvrđeno kako zaposlenici kroz sudjelovanje preuzimaju osjećaj kontrole u vezi s nadolazećom promjenom što zauzvrat povećava njihovu spremnost. U svojem su istraživanju Boyer i suradnici došli do zaključka kako se sudjelovanje zaposlenika u provedbi promjene pokazalo ključnim za uspješnu implementaciju vitke proizvodnje (*eng. lean management*) u mnoga poduzeća. [21]

3.1.2. Obuka i razvoj radne snage

Jedna od ključnih tema koja se u literaturi veže s uspješnom implementacijom novih proizvodnih tehnologija je obuka i razvoj radne snage. U relevantnoj je literaturi predloženo kako je obučavanje radne snage važna stavka prilikom uvođenja naprednih proizvodnih tehnologija poput kolaborativnih robota. Prethodna empirijska istraživanja provedena pri implementaciji JIT (*eng. just in time*) modela rada, proizvodnje pomoću ćelija te vitke proizvodnje identificirala su prikladno osposobljavanje i obrazovanje radnika kao jedan od glavnih elemenata uspjeha tih implementacija. U slučaju ljudsko-robotske suradnje, adekvatna obuka i trening radnika koji znaju kako ispravno surađivati i boraviti u radnom prostoru robota značajno bi doprinijeli sigurnosti na radnom mjestu, što bi posljedično pozitivno utjecalo i na povjerenje radnika u suradnju. [21]

3.1.3. Posvećenost i podrška višeg menadžmenta

U većini poduzeća viši menadžment tradicionalno uvodi inicijative za promjene unutar tvrtke. Mnoštvo studija je ukazalo na činjenicu kako nesposobnost višeg rukovodstva da stane iza određene promjene tj. adekvatno je podupre, u većini slučajeva osuđuje projekt na propast prije nego što uopće započne. To je iz razloga što viši menadžment, osim donošenja ključnih odluka

vezanih za strategiju organizacije, predstavlja uzor svim ostalim zaposlenicima u hijerarhijskoj strukturi. Njihovo ponašanje i izjave mogu djelovati kao snažno sredstvo za komuniciranje koje su inicijative bitne unutar poduzeća. Zato su predanost i podrška menadžmenta novoj tehnologiji ključni za uspješnu implementaciju novih projekata jer oni ukazuju na ozbiljnost inicijative u pitanju, a posljedično i povećavaju prihvaćanje promjene od strane samih radnika. [21]

3.2. Utjecaj robota na čovjeka

Rad u suradnji s kolaborativnim robotima zahtijeva prilagodbu radnika na novi način rada, promjenu radnih navika i razvoj novih vještina. U ovom poglavlju istražiti će se kako prisutnost i rad robota utječu na fizičke, psihološke i kognitivne aspekte rada operatera te kako se ti utjecaji odražavaju u njihovoj radnoj učinkovitosti, zadovoljstvu i općem zdravlju.

3.2.1. Poboljšanje radnih uvjeta

Najznačajniji doprinos kolaborativnih robota te industrijskih robota općenito je taj da preuzimaju obavljanje zadataka koje radnici nerado obavljaju zbog loših radnih uvjeta. To se primarno tiče monotonih, fizički zahtjevnih ili potencijalno opasnih poslova koji na bilo koji način mogu ugroziti dobrobit čovjeka. Osim toga, imaju sposobnost jednako efikasno raditi u svako doba dana što otvara mogućnost za uvođenje noćnih smjena koje bi obavljali isključivo roboti uz minimalnu uključenost radnika. No, primarna tendencija u njihovoj dosadašnjoj primjeni ipak je bila smanjenje broja regularnih radnih sati.

Iako roboti stvaraju bolje radno okruženje eliminirajući potrebu ljudi da rade u nepovoljnim uvjetima, oni sami nekad mogu predstavljati opasnost te uzrokovati potencijalne ozljede. Iz tog je razloga iznimno važno imati sigurnost u vidu prilikom konstruiranja takvih robota kao i primijeniti potrebne sigurnosne standarde tokom njihovog rada s ljudima. [22]

3.2.2. Psihološki aspekti

Jedna od glavnih prepreka koje se javljaju prilikom uvođenja robota u rad je ta da on može promijeniti dosadašnju interakciju između radnika, što može uzrokovati negativne psihološke posljedice. Provođenjem studije zabilježeno je kako je jedna od najvećih bojazni radnika prema integraciji robota u rad ta da će imati manje prilika za komunikaciju i interakciju s ostalim

članovima odjela što posljedično može dovesti do osjećaja otuđenja te stvaranja otpora prema radu s robotom.

Također, isto je istraživanje pokazalo da je većina ispitanih radnika, makar lišena monotonog i napornog rada, odgovorila kako osjećaju veći stres u radu nego prije uvođenja promjene. Kao razloge su naveli povećani pritisak i odgovornost uzrokovane novim zadacima koje se od njih očekuje da obavljaju, a koji se tiču nadziranja, upravljanja i pripreme robota za rad. Sve to može uzrokovati pad motivacije i produktivnosti radnika, što dodatno naglašava važnost adekvatne obuke i pripreme radnika za rad s robotom. [23]

4. UTJECAJ KOLABORATIVNIH ROBOTA NA RADNIKA

U prethodnom je poglavlju opisana ljudsko-robotska interakcija kao i utjecaji koje čovjek i robot imaju jedno na drugo prilikom zajedničke komunikacije. Ona predstavlja širi pojam od ljudsko-robotske suradnje pa je pomoću nje dan uvid u određene faktore na koje bi trebalo obratiti pozornost prilikom interakcije čovjeka i robota općenito, a koji mogu utjecati na njenu uspješnost. Međutim, kako je svrha rada analiza suradnje čovjeka i robota pri zajedničkom radu tj. pri izradi određenih proizvoda, u ovome će se poglavlju analizirati kako točno HRC utječe na radne performanse operatera, kao i detaljnije prikazati istraživačke metode korištene za evaluaciju tog utjecaja.

4.1. Analiza ljudsko-robotske suradnje

Kako bi shvatili na koji se način mijenjaju performanse operatera s ljudsko-robotskom suradnjom, De Simone i suradnici (2022.) napravili su pregled znanstvene literature i prikupili sve rezultate iz odabranih izvora s ciljem pronalaska eventualnih propusta u postojećim istraživanjima te kako bi postavili temelje za buduća. Znanstvena baza podataka „Scopus“ korištena je za pretraživanje literature, pri čemu su izabrani skupovi ključnih riječi koji se tiču HRC-a, performansi radnika te industrijskog sektora, kako bi pretraga obuhvatila što relevantnije izvore. Analiza literature provedena je u vidu dobivanja odgovora na 2 istraživačka pitanja [24]:

- U kojim aspektima HRC utječe na performanse radnika?
- Koji individualni faktori najviše pridonose tom utjecaju?

Probiranje literature je bilo podijeljeno u dva stadija. Prvi je podrazumijevao čitanje samo naslova i sažetaka radova gdje su radovi bili uključeni ili isključeni iz izbora ovisno o definiranim kriterijima (npr. u slučaju da tekst rada nije bio dostupan ili ako rad nije bio povezan ni sa jednim od tri skupa ključnih riječi). Drugi stadij sastojao se od čitanja cjelokupnog teksta radova odabranih u prvom stadiju i probiranja onih najrelevantnijih temeljem spomenutih kriterija. Pretraživanje baze podataka rezultiralo je s 921 potencijalnim člankom, prvi stadij probiranja sa 177 dok je nakon drugog stadija broj smanjen na 27 relevantnih studija. U nastavku će biti analizirani rezultati istraživanja koji u određenoj mjeri daju odgovore na 2 istraživačka pitanja iz uvodnog dijela. [24]

4.1.1. Posljedice HRC-a na performanse radnika

Analizom odabrane literature koja je za cilj imala odgovaranje na prvo istraživačko pitanje došlo se do zaključka kako HRC utječe na performanse radnika u 3 aspekta: sigurnost, ergonomija i produktivnost. Oni su ilustrirani tablicom 2. u nastavku.

Tablica 2. Aspekti radnih performansi pod utjecajem HRC-a, izrađeno prema [24]

Performanse	Značajke
Sigurnost	Mogućnost mehaničkog rizika za operatora zbog sudara s robotom unutar zajedničkog radnog prostora Implementacija sigurnosnih mehanizama koji će osigurati izbjegavanje sudara ili bilo kakve štete vezane uz njega
Fizička ergonomija	Poboljšanje fizičke ergonomije zahvaljujući pomoći robota pri repetitivnim i fizički zahtjevnim zadacima
Produktivnost	Smanjenje vremena ciklusa u odnosu na ručno provođenje operacije

Većina odabrane literature bila je fokusirana na sigurnost ljudsko-robotske suradnje. Ona se bavi prepoznavanjem rizika i opasnosti pri radu te implementacijom odgovarajućih sigurnosnih mjera. Uvođenjem kolaborativnih robota u tvornice sigurnost je postala još bitniji segment razmatranja pošto su kolaborativni sustavi konstruirani na način da dozvoljavaju fizičku interakciju između čovjeka i robota. Oni imaju unaprijed ugrađene sigurnosne mjere koje dozvoljavaju sigurnu primjenu, no s obzirom na to da se HRC uobičajeno odvija u dinamičkom okruženju te koegzistencija čovjeka i robota u istom radnom prostoru stvara potencijalno opasnu situaciju, odgovarajući sigurnosni sustavi za izbjegavanje sudara i ublažavanje dodira, kao i sigurnosne mjere vezane za konstrukciju radne ćelije, moraju biti adekvatno implementirani. [24]

Mada unutar ergonomije postoji više domena, za HRC su najrelevantnije fizička i kognitivna. Fizička ergonomija bavi se fizičkom interakcijom između ljudi i drugih elemenata određenog sustava. Ona je bitan aspekt razmatranja na radnom mjestu zato što njen nedostatak može dovesti do biomehaničkog stresa na radnike, a posljedično i do mišično-koštanih poremećaja. Prednost kolaborativnih robota je ta što mogu obavljati razne repetitivne i ne-ergonomične zadatke te na taj način osloboditi operatera svih aktivnosti koje predstavljaju rizik po njihovo fizičko zdravlje. [24]

Kognitivna ergonomija bavi se principima prihvaćanja interakcije s robotima minimizirajući psihološku nelagodu operatora pri dijeljenju radnog mjesta s robotom. S obzirom na to da ljudsko-robotska suradnja operatoru može predstavljati psihološki stres, njezine je aspekte nužno uključiti u stadije konstruiranja kolaborativnih radnih ćelija. [24]

Što se produktivnosti tiče, kombinacija pozitivnih aspekata robota poput snage, brzine, preciznosti, ponovljivosti te onih čovjeka kao što su inteligencija, kreativnost i vještine, poboljšavaju produktivnost. Tranzicija s ručne proizvodne linije u hibridnu omogućila je smanjenje vremena takta pošto koboti obavljaju određene zadatke i to najčešće brže od čovjeka. Također, zahvaljujući njihovoj preciznosti i ponovljivosti, smanjuju broj defektnih proizvoda uzrokovanih ljudskom pogreškom. [24]

4.1.2. Pregled individualnih faktora koji utječu na radne performanse operatera

Poboljšanje radnih performansi ne može biti sagledano neovisno o radnog snazi s kojom su koboti u interakciji. Naime, uspješnost ljudsko-robotske suradnje ovisi o nizu individualnih faktora koji mogu činiti razliku između uspjeha i neuspjeha u primjeni HRC-a te koji posljedično utječu na performanse operatera. Analizom odabranih istraživanja ustanovljeno je kako su ključni faktori vezani uz drugo istraživačko pitanje: stres, radno opterećenje, upotrebljivost, prihvaćanje i povjerenje. Tablica 3. prikazuje navedene faktore i njihov prepoznati utjecaj na operatere. Oni, iako iznimno ovisni o primjeni, kontekstu i individualnom operateru, moraju biti uzeti u razmatranje pri evaluaciji kobota i njihove sposobnosti da poboljšaju performanse operatera i samog ljudsko-robotskog sustava. [24]

Tablica 3. Ključni individualni faktori za radne performanse operatera, izrađeno prema [24]

Faktori	Mogući utjecaj na radnike
Stres	Moguće povećanje mentalnog stresa operatora zbog velikih brzina robota i male udaljenosti između njih
Radno opterećenje	Smanjenje fizičkog radnog opterećenja i moguće povećanje mentalnog
Upotrebljivost	Visoka razina lakoće upotrebe omogućuje poboljšanje performansi, dobrobiti radnika i veću razinu prihvaćanja robota
Prihvaćanje	Strah operatera od gubljenja posla u korist robota te nedostatak predispozicija za rukovanje novim tehnologijama može dovesti do manje učinkovitog rada operatera s kobotima
Povjerenje	Za dobivanje pozitivnih rezultata, operatori moraju uspostaviti "odnos povjerenja" sa kobotom

Radeći bok uz bok sa robotom može povećati mentalni stres čovjeka, primarno zbog fizičkih značajki robota poput njegovog izgleda (veličine i oblika) ili njegovih kretnji (udaljenosti, brzine...). Kako je stres operatera povezan sa sviješću o situaciji oko njega, a na tu svijest utječu stresori fizičke i psihološke prirode, mentalni bi stres mogao porasti u slučaju da se robot neprimjetno ili velikom brzinom približi operateru.

Radno opterećenje odnosi se na napor operatera tokom obavljanja zadatka te se može ocijeniti alatima koji uključuju parametre poput fizičkog i mentalnog zahtjeva, napora, performansi i drugih. Uvođenje kolaborativnih robota u rad povezano je sa smanjenjem fizičkog radnog opterećenja zbog već ranije spomenutih razloga vezanih uz ergonomiju. Što se mentalnog opterećenja tiče, u radu se navodi kako se primjenom HRC-a operater pomiče na poziciju nadzora radne situacije što uzrokuje kognitivni napor uslijed preraspodjelu njegove pažnje i energije sa starih na nove, manje fizičke aktivnosti.

Upotrebljivost se, nakon sigurnosti, pokazala kao najvažniji zahtjev koji mora biti ispunjen za uspješno uvođenje kolaborativnih robota u određeno poduzeće. Definirana je kao mjera u kojoj se sustav, proizvod ili usluga može upotrebljavati od strane korisnika za efikasno i efektivno postizanje specifičnih ciljeva u kontekstu uporabe. Visoke razine upotrebljivosti mogu poboljšati performanse i dobrobit radnika te razinu prihvaćanja kolaborativnih robota.

Kroz aspekt prihvaćanja promatra se kakva je percepcija o kolaborativnim robotskim sustavima unutar određene zajednice. Firma ili proizvodni pogon koji planira korištenje kolaborativnih robota mora imati odgovarajuće predispozicije za takve vrste tehnologija kako bi se izbjegla loša upotreba robota i frustracija pri radu. Pokazalo se da ugrađivanje dodatnih socijalnih naznaka na robota poput kimanja glavom ili pokreta očima dodatno povećava dimenziju prihvaćanja.

Povjerenje je još jedan ključni faktor za optimalnu ljudsko-robotsku suradnju jer bi u njegovom odsustvu radnici mogli nedovoljno koristiti robota ili ga ne koristiti uopće, što bi dovelo do pada u radnim performansama. Na povjerenje jednim dijelom utječe izgled robota, pri čemu bi određene izvedbe njihovih konstrukcija mogle dovesti do veće sklonosti operatera za suradnju (robot manjih dimenzija, dodavanje socijalnih naznaka na robota...). [24]

4.2. Istraživačke metode korištene pri evaluaciji utjecaja HRC-a na radnika

Na prethodnim je stranicama dan uvid u utjecaj koji ljudsko-robotska suradnja ima na operatera u aspektima sigurnosti, ergonomije i produktivnosti. Za evaluaciju tih utjecaja korištene su razne istraživačke metode, od provođenja anketa i intervjua pa sve do korištenja metoda temeljenih na simulacijama ili analizi pojedinih radnih zadataka na licu mjesta. U nastavku će biti navedene i ukratko objašnjenje neke od metoda korištenih za evaluaciju radnih performansi operatera.

4.2.1. Sigurnost

Kolaborativni roboti, iako manji i sporiji od industrijskih robota, kreiraju potencijalnu opasnost za radnike pošto nisu odvojeni zaštitnom ogradom. U skladu s time razvijene su različite metode procjene sigurnosti i minimiziranja rizika u kolaborativnim zadacima kako bi se otklonila mogućnost pojave različitih opasnosti i ozljeda.

Jednu od metoda pod nazivom analiza sigurnosti posla (*eng. JSA*) koristili su Gopinath i Johansen (2016.) u svojem istraživanju. Ona spada pod metode procjene rizika iz perspektive pojedinih kolaborativnih zadataka te se definira kao sistematični pregled zadatka namijenjen identificiranju potencijalnih opasnosti, procjeni prirode njihovog nastajanja i evaluaciji praktičnih mjera za njihovo otklanjanje. Proces provođenja metode je sljedeći [25]:

1. Odabrani proizvodni zadatak se razloži na podzadatke te se svakom podzadatku pridruži sudionik koji ga izvršava, pri čemu su mogući sudionici robot, operator ili kolaborativni zadatak kojeg robot i operator obavljaju zajedno.
2. Svaki se podzadatak zasebno analizira za potencijalne opasnosti, pri čemu se analiza fokusira na interakciju sudionika koji obavlja zadatak sa ostalim sudionicima. Na primjer, ako podzadatak T1 obavlja operator, analiza bi trebala pokriti interakciju koju operator ima sa kobotom i sa radnim okruženjem tokom obavljanja T1 podzadatka.
3. U posljednjem se koraku za svaki podzadatak procjenjuju ozbiljnost i vjerojatnost nastanka opasnosti pomoću alata za procjenu rizika (matrice rizika, grafovi rizika, numeričko bodovanje...). Ta se saznanja zatim koriste za pronalazak rješenja koja će minimizirati rizik nastajanja opasnosti. Jedan od alata za procjenu rizika, točnije matrica rizika, prikazan je tablicom 4.

Tablica 4. Matrica rizika, izrađeno prema [26]

Vjerojatnost pojave ozljede	Težina ozljede			
	Katastrofična	Ozbiljna	Umjerena	Mala
Vrlo vjerojatno	Visok	Visok	Visok	Srednji
Vjerojatno	Visok	Visok	Srednji	Nizak
Malo vjerojatno	Srednji	Srednji	Nizak	Zanemariv
Gotovo nemoguće	Nizak	Nizak	Zanemariv	Zanemariv

Analiza sigurnosti posla koristi se prilikom razvoja novih kolaborativnih radnih ćelija kako bi se prije same konstrukcije sustava specificirali svi potrebni sigurnosni zahtjevi, ovisno o rezultatima analize. Osim nje postoje i druge metode za procjenu rizika poput analize stabla pogrešaka (*eng. FTA*) i analize uzroka i posljedica kvarova (*eng. FMEA*) koje su češće korištene i imaju veći stupanj točnosti, ali nisu primjenjive u ovom slučaju zato što ne uzimaju u obzir konkretan zadatak koji se obavlja te zato što je za njihovu uporabu potrebno prijevremeno poznavati informacije o mogućim rizicima.

Sauppé i Mutlu (2015.) koristili su drugu metodu za procjenu sigurnosti. Ona je podrazumijevala provođenje terenske studije koja se sastoji od intervjuiranja zaposlenika u odabranim firmama te analize prikupljenih podataka. Kako bi se ustanovilo kakva je percepcija zaposlenika o kobotima unutar poduzeća, odabrane su tri kompanije za provođenje studije, pri čemu je fokus stavljen na one koje posjeduju *Baxter* robota razvijenog od strane firme *Rethink Robotics*. Riječ je o dvorukom robotu koji je konstruiran po uzoru na čovjeka te uključuje ekran koji glumi „lice“ na kojem su prikazane oči. Robot je optimiziran primarno za obavljanje zadataka odabira i postavljanja u kojima, koristeći hvataljke na jednoj ili obje „ruke“, prikuplja proizvode s jedne lokacije te ih premješta na drugu, npr. sa pokretne trake u spremnik s gotovim proizvodima. Izgled robota prikazan je na slici 11. [27]



Slika 11. Robot Baxter [27]

Prije samih intervjua, prikupljeni su podaci o različitim aspektima integracije robota u proizvodno okruženje poput motivacije za kupnju robota, procesa integracije u postojeći tok rada, organizacijskih promjena potrebnih za željenu uporabu robota itd. Također, prikupljeni su podaci o samome radu robota u sve 3 firme. Oni su uključivali stvari poput interakcije robota sa obližnjom opremom i interakcije čovjeka i robota te također stvari poput toga kako je robot izvršavao svoj zadatak i kako je reagirao na nepredviđene situacije.

Što se intervjua tiče, fokus je bio na faktorima koji bi mogli utjecati na percepciju radnika o njegovoj interakciji sa robotom, a uključivali su izgled robota, njegovo ponašanje i njegovo uvođenje u radno okruženje. U svakoj su firmi intervjuirani zaposlenici iz odjela menadžmenta i održavanja te operateri.

Osoblje iz odjela menadžmenta je uključivalo zaposlenike koji su bili odgovorni za odluke vezane uz nabavu robota te za postavljanje i praćenje ciljeva kompanije. Oni su bili pitani pitanja koja se tiču veličine i misije kompanije, demografije radne snage te efekta kojeg je robot imao na metrike poput produktivnosti i profita. [27]

Zaposlenici iz održavanja radili su na popravku i pregledu stanja strojeva u proizvodnom pogonu, ali su također bili zaduženi i za integraciju i programiranje robota kao i za obuku zaposlenika koji će raditi s njim. Pitanja na koja su oni odgovarali bila su vezana uz njihovu ulogu pri integraciji i

programiranju robota, njihovu interakciju s robotom te vještine koje su usvojili pri eventualnom otklanjanju problema na robotu.

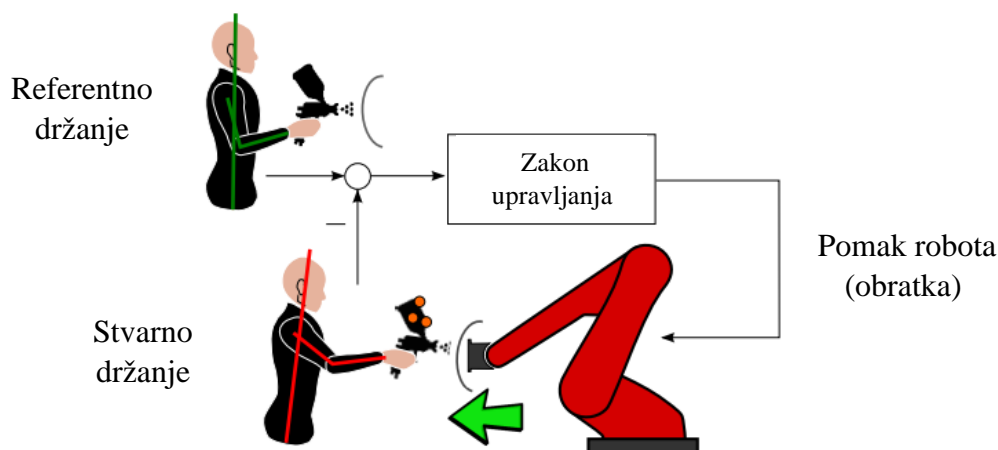
Operateri su zaposlenici koji su nadzirali robota te radili s njim na jednoj ili više različitih radnih stanica u proizvodnom pogonu. Oni su pitani pitanja vezana uz njihove percepcije o robotu i interakcije s njim, proces otklanjanja problema na koje robot naiđe te uz njihovo prijašnje iskustvo u proizvodnji tj. jesu li imali iskustvo ručnog izvršavanja zadataka koji su sada dodijeljeni robotu. Sveukupno je u sve 3 firme intervjuirano 17 zaposlenika i to 6 menadžera, 8 zaposlenika iz održavanja te 3 operatera.

Za analizu dobivenih tekstualnih podataka korištena je Teorija utemeljena na istraživanju (*eng. Grounded Theory*) u kojoj se, za razliku od tradicionalnih pristupa, iz dobivenih podataka razvije teorija. U tom se procesu prikupljeni podaci „kodiraju“ na način da se razlože na manje dijelove te se etiketiraju kako bi se dobili koncepti ili reference koje su od nekog značaja. Na taj se način identificirajući odnose između koncepata razvije teorija koja objašnjava izvorno dobivene rezultate. [27]

4.2.2. Ergonomija

Za mjerenje ergonomskih parametara su također dostupne brojne metode koje mogu biti subjektivne (poput upitnika i intervjua) ili pak one koje se fokusiraju na direktno mjerenje određenih veličina: performansi i ponašanja operatera, sila koje djeluju na operatera tokom rada, kretnji njegovog tijela i drugih. Fizičku ergonomiju primarno zanima optimalno držanje pri radu, zamor i zakretanje zglobova te aktivnost mišića. U vezi nje će se obraditi metoda pomoću koje robot, na temelju podataka o ergonomskoj analizi operatera, može minimizirati njegovo radno opterećenje i osigurati optimalnu posturu.

Zanchettin i suradnici (2019.) predložili su kontrolnu strategiju koju kolaborativni robot može koristiti s ciljem pomicanja obratka u poziciju koja bi osigurala optimalno držanje tijela operatera koji obavlja zadatak. Predloženi model se u suštini sastoji od robota koji pridržava obradak i čije su kretnje rezultat izlaza određenog zakona upravljanja temeljenog na usporedbi stvarnog i referentnog držanja tijela operatera. Metoda je primijenjena i isprobana u procesu bojanja branika automobila, a vizualna reprezentacija metode je prikazana slikom 12. [28]



Slika 12. Shematski prikaz metode [28]

Za odabir referentnog ergonomskog držanja korištena je metoda bodovanja pod nazivom REBA. Ona koristi sistematični proces u kojem se postura operatera promatra po pojedinim dijelovima tijela (trup, vrat, noge, nadlaktice, podlaktice i zapešća) te se svaki segment boduje prema odgovarajućim tablicama ovisno o njegovoj poziciji, pri čemu se neprirodne i nepovoljne pozicije dijelova tijela boduju većim vrijednostima. Na taj se iznos zatim nadodaju bodovi u slučaju da radnik barata teretom ili ako primjenjuje određenu silu. Također se promatra i interakcija između čovjeka i objekta kojim on rukuje tj. koliko je to rukovanje prikladno i prilagođeno čovjeku, pri čemu se loši uvjeti rukovanja dodatno boduju. Na kraju, dodatni se bodovi pridaju i za aktivnost ovisno o opsegu i frekvenciji izvođenja pokreta. Svi pojedini rezultati se zatim pribroje kako bi se dobio finalni REBA rezultat koji može biti u rasponu između 1 (zanemariv rizik) i 15 (vrlo visok rizik). On je prikazan tablicom 5. Minimalni se rezultat može dobiti sa više različitih kombinacija bodovanja te je za potrebe ove metode odabrana ona koja najviše odgovara predviđenom zadatku, što je rezultiralo referentnim ergonomskim držanjem koje podrazumijeva odručenje ruke od 10 stupnjeva, rotaciju od 20, fleksiju nadlaktice od 10 te fleksiju podlaktice od 90 stupnjeva [29]. Za pridržavanje branika korišten je *Comau Smart Six* robot, dok je pozicija radnika praćena pomoću *Microsoft Kinect* kamere. Pozicija i orijentacija alata praćene su preko *RGB-D* kamere unutar *Kinect* senzora te 3 obojene oznake postavljene na alat. Pozicija i orijentacija alata te referentno i stvarno držanje radnika računani su pomoću algoritama računalnog vida. Te su informacije zatim slane na računalo koje je interpoliralo podatke te prema postavljenom zakonu upravljanja računalo i slalo robotskom kontroleru naredbe o tome kako pozicionirati obradak. U radu je zabilježeno kako se amplituda kretnji operatera značajno smanjila, bez negativnog utjecaja na preciznost u obavljanju zadatka [28].

Tablica 5. REBA razine aktivnosti, izrađeno prema [29]

Razina aktivnosti	REBA rezultat	Razina rizika	Potreba za daljnjom evaluacijom
0	1	Zanemariva	Nije potrebno
1	od 2 do 3	Niska	Možda će biti potrebno
2	od 4 do 7	Srednja	Potrebno
3	od 8 do 10	Visoka	Potrebno uskoro
4	11	Vrlo visoka	Potrebno ODMAH

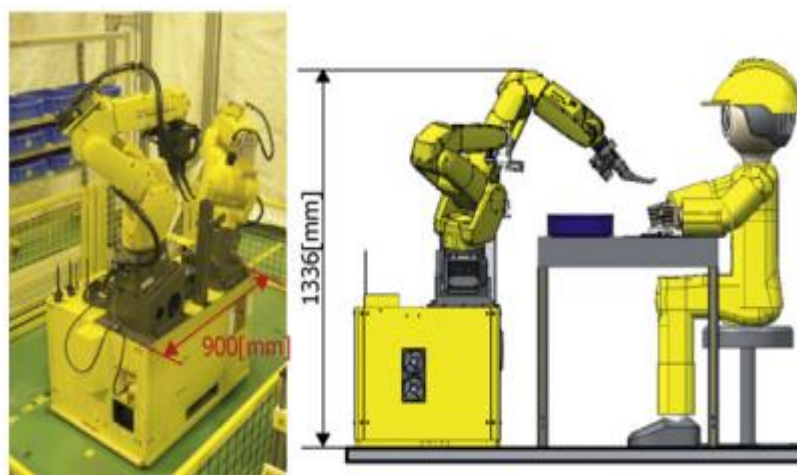
Što se tiče kognitivne ergonomije, ona se bavi mjerenjem razina mentalnog napora, psihološkog stresa te sigurnosti koju zaposlenici percipiraju na radnom mjestu. Arai i suradnici (2015.) se u svome radu bave time kako ljudsko-robotska suradnja utječe na ranije spomenute veličine. Pri tome koriste metodu mjerenja reakcije potencijala kože (*eng. SPR*). To je pojava pri kojoj se električni potencijal na koži mijenja uslijed aktivnosti simpatičkog živčanog sustava. Ta promjena potencijala manifestira se kao pojava znoja na koži kao posljedica nervoze operatera izazvane, u ovome slučaju, naglim i iznenadnim pokretima robota. Metoda se temelji na mjerenju znoja kože tj. promjene potencijala od nekoliko mV u odnosu na normalni iznos i na taj način detektira kada operater postane nervozan. S obzirom na to da *SPR* uzrokuje skokove od nekoliko sekundi u električnom potencijalu, veličine mjerene u eksperimentu bile su amplituda i učestalost skokova. Osim mjerenja potencijala kože, korišten je i upitnik kako bi se ispitala subjektivnost mentalnog napora te kako bi se dobila saznanja o psihološkim stanjima koja ne mogu biti izmjerena fiziološki. Upitnik je ocjenjivao „strah“, „iznenađenje“ i „nelagodu“ u iznosu od 0 do 6, pri čemu su ispitanici trebali odgovoriti u kojoj su mjeri osjetili ta 3 psihološka stanja nakon svakog pokusa.

Eksperiment je proveden koristeći dvoruki robot iz kolaborativne ćelije u kojoj radnik sastavlja proizvod pomoću dijelova kojima ga robot opskrbljuje. Za procjenu mentalnog napora operatera odabrana su 3 konstrukcijska parametra robota koja bi ga mogla izazvati [30]:

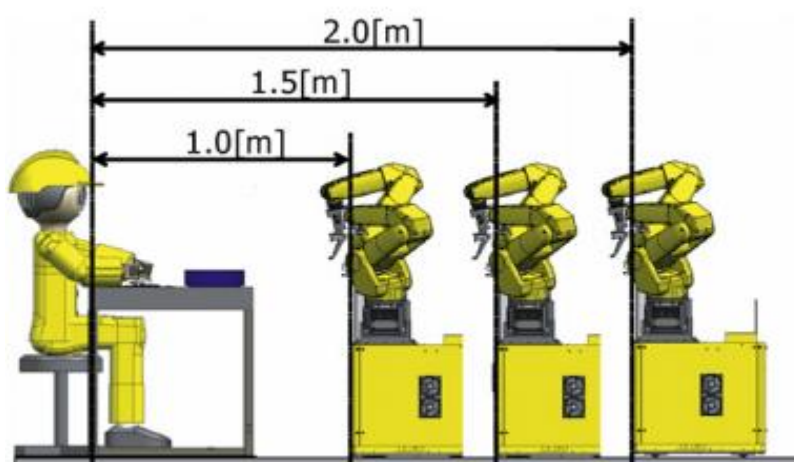
- (A) Udaljenost: Udaljenost između operatera i robotske ruke tokom brzih pokreta robota
- (B) Brzina: Brzina kojom se robotska ruka približava operateru
- (C) Informiranost: Efekt prethodnog obavješćavanja operatera o pokretima robotske ruke

U eksperimentu (A) robot je postavljen na 3 različite udaljenosti od operatera: 1, 1.5 i 3 metra. U (B) je robotska ruka programirana da obavlja zadatak odabira i postavljanja (*eng. pick and place*) maksimalnim brzinama od 250, 500 i 1000 mm/s. U eksperimentu (C) napravljena je usporedba mentalnog napora u slučaju kada je operater prethodno obavješten o maksimalnoj brzini robota pri obavljanju zadatka iz (B) te u slučaju kada nije prethodno obaviješten. Za istraživanje je odabrano 5 zaposlenika koji su prošli svaki eksperiment, pri čemu su imali odmor od 5 minuta između susjednih mjerenja [30].

Izgled korištenog robota kao i prikaz postavljanja eksperimenta (A) prikazani su slikama 13 i 14, dok će na sljedećim stranicama biti razrađeni rezultati pokusa.



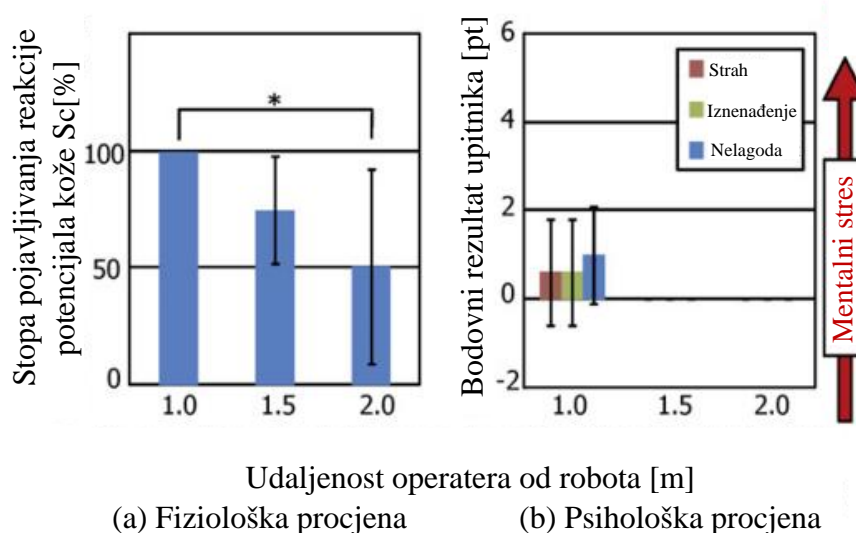
Slika 13. Kolaborativni robot korišten u eksperimentu [30]



Slika 14. Postava eksperimenta (A) [30]

Eksperiment A

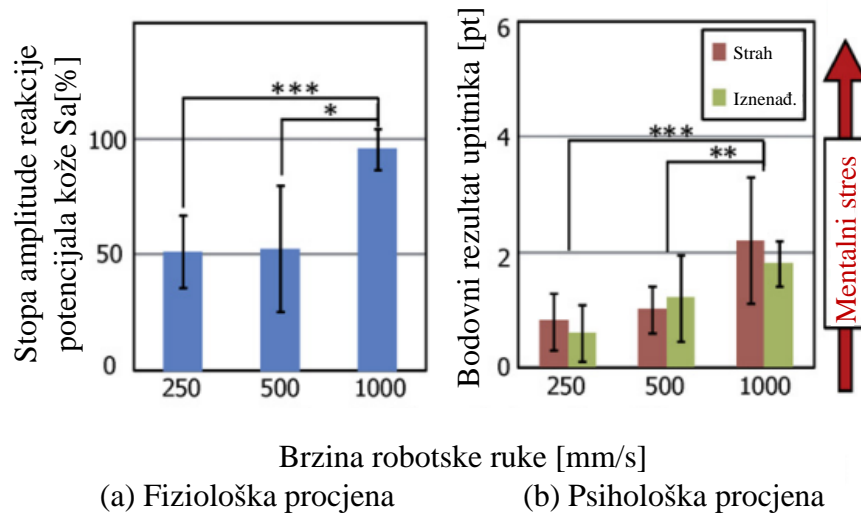
Rezultati eksperimenta o udaljenosti dani su slikom 15. Lijevi graf prikazuje stopu pojavljivanja SPR-a (Sc), a desni graf rezultate upitnika o psihološkim stanjima, pri čemu horizontalna os u oba grafa predstavlja udaljenost. Iz lijevog grafa je vidljivo kako robot pri udaljenosti od 1 m uzrokuje gotovo pa jednaki strah kod svih ispitanika, pri 1.5 m blaži strah kod nekih od njih, dok za udaljenost od 2 m, s obzirom na iznos standardne devijacije, postoji veliki raspon u stopi pojave reakcije potencijala kože. Rezultati upitnika na desnom grafu prikazani su jedino za udaljenost od 1 m pošto su za ostale udaljenosti prosječni rezultat i standardna devijacija bili jednaki nuli. Drugim riječima, za udaljenosti od 1.5 i 2 m mentalni napor operatera nije se mogao izmjeriti psihološki, već samo fiziološki [30].



Slika 15. Rezultati eksperimenta udaljenosti [30]

Eksperiment B

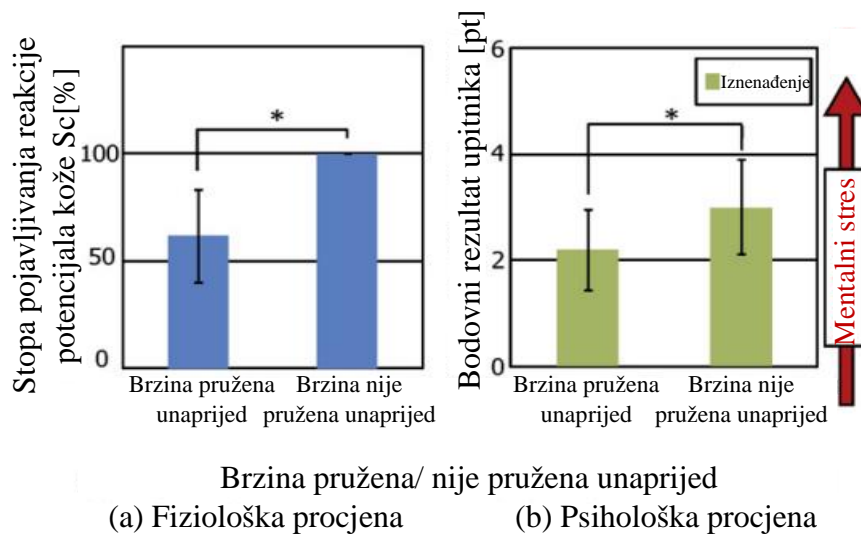
Rezultati eksperimenta brzine prikazani su na slici 16., pri čemu lijevi graf prikazuje stopu amplitude SPR-a (Sa), a desni graf rezultate psihološkog upitnika u ovisnosti o brzini kretanja robota. Najveća amplituda reakcije potencijala kože zabilježena je pri brzini kretanja od 1000 mm/s i to gotovo dvostruko veća nego pri ostalim brzinama. Rezultati osjećaja straha i iznenađenja iz upitnika podupiru rezultate dobivene u lijevom grafu, s obzirom na to da su oni uvjerljivo najveći za brzinu od 1000 mm/s [30].



Slika 16. Rezultati eksperimenta brzine [30]

Eksperiment C

Rezultati eksperimenta informiranosti dani su slikom 17. koja prikazuje iste veličine kao i slika 15., ali u odnosu na to je li operater prethodno obaviješten o brzini robotske ruke ili ne. Stopa pojavljivanja S_c veća je za slučaj kada operater nije prethodno obaviješten o brzini robota nego u slučaju da je. Time je potvrđeno kako prethodno poznavanje informacije o brzini robotske ruke smanjuje mentalni napor operatera [30].



Slika 17. Rezultati eksperimenta informiranosti [30]

Ovim je istraživanjem potvrđeno kako se određene vrste napora ne mogu izmjeriti isključivo subjektivno već je potrebno korištenje metoda fiziološke evaluacije. Nadalje, neki od ispitanika u eksperimentu bili su ljudi koji su navikli raditi s industrijskim robotima te su čak i oni pokazali znakove mentalnog stresa. Time je potvrđeno kako operateri razvijaju osjećaj nelagode kada se robot kreće u njihovoj neposrednoj blizini čak i nakon određenog vremena provedenog u radu s njima. U zaključku studije se kao najbitnija saznanja iz eksperimenata navodi sljedeće [30]:

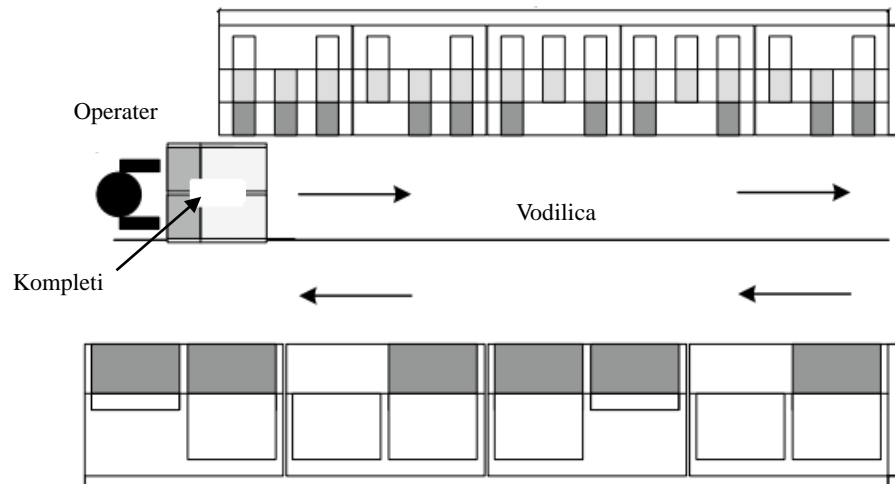
- Operateri osjećaju značajan mentalni napor prilikom kretanja robota u njihovoj okolini; minimalna udaljenost između operatera koja se preporučuje iznosi 2 m
- Brzina kretanja robota prema čovjeku bi trebala biti manja od 500 mm/s
- Preporučuje se kako bi operater trebao biti obaviješten o kretanjama robota prije nego se one krenu odvijati

4.3.3. Produktivnost

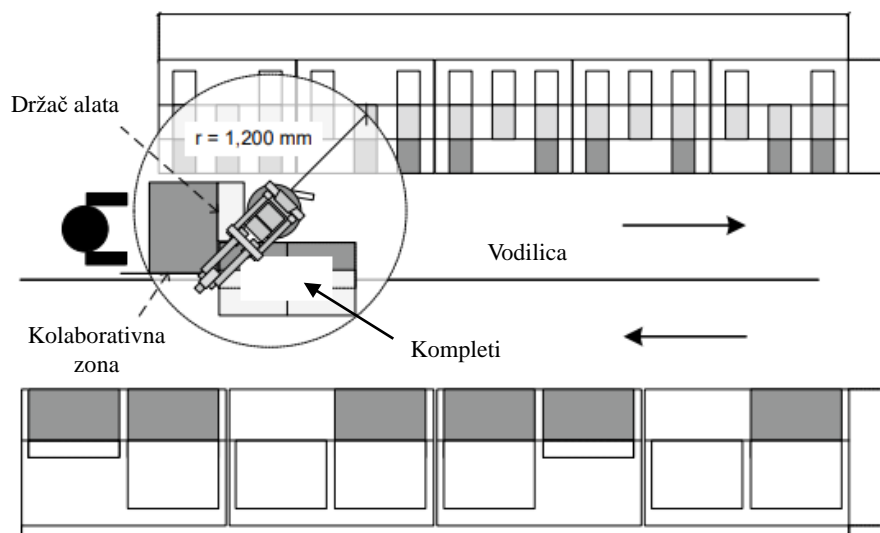
Produktivnost proizvodnog sustava vezana je uz praćenje određenih veličina poput propusnosti, količine resursa utrošenih u provođenje određenog procesa, broja defektnih proizvoda itd. Istraživanjima je potvrđeno kako brzina, preciznost i ponovljivost robota u kombinaciji s kreativnošću, vještinom i inteligencijom čovjeka povećavaju produktivnost montažnih/proizvodnih linija.

Produktivnost se može mjeriti različitim metodama, a jednu od njih predložili su Fager i suradnici (2019.) u obliku matematičkog modeliranja kojim se uspoređuje vrijeme ciklusa ručne i robotom potpomognute opskrbe materijalom za automobilsku montažnu liniju na kojoj se sastavlja više različitih proizvoda. Komponente za sastavljanje proizvoda dopremaju se na liniju u unaprijed sortiranim kompletima, pri čemu se istovremeno priprema nekoliko kompleta za više različitih proizvoda. To znači da je posao operatera, uz odabir odgovarajućih komponenti sa policama, također i sortiranje komponenti po kompletima. U scenariju A (slika 15.), operater ručno obavlja zadatke odabira i sortiranja komponenti na način da kroz prolaz sa policama gura kolica na kojima su 4 spremnika za 4 različita kompleta, pri čemu je svaki komplet predviđen za jedan proizvod koji će se sastavljati. Scenarij B (slika 16.) podrazumijeva robota koji umjesto operatera obavlja zadatak

sortiranja dok on odabire komponente sa police. Operaterov zadatak odabiranja izvodi se identično kao u prvom slučaju, ali umjesto da komponente stavi direktno u jedan od spremnika za komplete, operater ih odlaže u kantu većih dimenzija koja služi kao kolaborativna zona. Robot zatim preuzima komponente iz kolaborativne zone te ih sortira po spremnicima pomoću tehnike računalnog vida. Kobot je pri radu postavljen na kolica, a operateru pri guranju pomaže električni motor kako bi mogao pomicati kolica jednakom brzinom kao u slučaju A [31].



Slika 18. Scenarij A: ručno obavljanje odabira i sortiranja [31]



Slika 19. Scenarij B: Ručno odabiranje i automatizirano sortiranje [31]

U nastavku će biti opisan matematički model za procjenu vremena ciklusa u scenarijima A i B. U oba se scenarija odabir komponenti vrši prema listi narudžba s N redova. Svaki red narudžbe i odgovara jednoj komponenti i specificira količinu koju treba odabrati s police te koliko se odabranih komponenti treba staviti u svaki od 4 kompleta [31].

Scenarij A

S obzirom na to da se u scenariju A svi zadaci izvršavaju ručno, vrijeme ciklusa T_A odgovara vremenu T_{OP} koje je potrebno operateru da obavi posao pa vrijedi [31]:

$$T_A = T_{OP} \quad (4)$$

Operaterov utrošak vremena se može definirati kao suma vremena potrošenog na hodanje $T_{HODA,OP}$, vremena potrebnog za odabir komponenti $T_{ODAB,OP}$ i vremena potrebnog za sortiranje komponenti po kompletima $T_{SORT,OP}$. Iz toga slijedi [31]:

$$T_{OP} = T_{OP,ODAB} + T_{OP,SORT} + T_{OP,HODA} \quad (5)$$

Vrijeme odabira komponenti $T_{OP,ODAB}$ sastoji se od vremena dohvaćanja informacija o lokaciji i količini komponente $t_{KOMP,I}$, vremena traženja komponente $t_{KOMP,T}$, vremena uzimanja ukupne količine komponenti $t_{KOMP,U}$ te vremena potrebnog za potvrđivanje preuzimanja komponente na uređaju $t_{KOMP,P}$. Sva vremena osim $t_{KOMP,U}$ odvijaju se jednom po redu narudžbe i za sve redove u listi narudžba N koja se trenutno ispunjava. Vrijeme uzimanja ukupne količine komponenti ovisi o broju komponenti te o lakoći kojom se komponente mogu primiti tj. odvojiti od ostatka komponenti u spremniku. Što se količine komponenti tiče, za uzimanje jedne komponente potrebno je vrijeme $t_{U,qj}$ dok je za svaku dodatnu komponentu potrebno vrijeme $t_{U,qd}$. Lakoća uzimanja komponenti dolazi do izražaja kada se komponente spoje jedna za drugu unutar spremnika što iziskuje dodatno vrijeme potrebno za odabir. Ona je zastupljena preko varijable p , pri čemu $p = 1$ znači da se komponente mogu normalno primiti bez poteškoća, a $p = 0$ da se komponente ne mogu primiti kako spada. Vrijednost p_i određuje se za svaku komponentu i , a ukupno vrijeme potrošeno na odabir se sada može zapisati kao [31]:

$$T_{OP,ODAB} = N \times (t_{KOMP,I} + t_{KOMP,T} + t_{KOMP,P}) + \sum_{i=1}^N (t_{U,qj} + t_{U,qd} \times (q_i - 1) + \alpha \times (1 - p_i)) \quad (6)$$

pri čemu je q_i količina komponente i , a α dodatno vrijeme potrebno za komponente s lošom lakoćom prikupljanja.

Vrijeme sortiranja komponenti $T_{OP,SORT}$ uključuje vrijeme dohvaćanja informacija o tome koji broj komponenti staviti u koji komplet $t_{KMPL,I}$, vrijeme traženja spremnika kompleta $t_{KMPL,T}$, vrijeme stavljanja komponenti u komplete $t_{KMPL,S}$ i vrijeme potvrđivanja stavljanja komponenti $t_{KMPL,P}$.

Vremena dohvaćanja informacija o kompletima $t_{KMPL,I}$ i traženja spremnika $t_{KMPL,T}$ odvijaju se jednom po svakom redu narudžbe i u listi narudžba N . Prilikom sortiranja komponenti, operater ih stavlja u spremnike kompleta jednu po jednu i potvrđuje ostavljanje prije prelaska na sljedeći komplet. Nakon stavljanja prve komponente ($t_{S,P}$), operater se nalazi u neposrednoj blizini spremnika što znači da će stavljanje naknadnih komponenti ($t_{S,N}$) iziskivati manje vremena. Iz gore navedenog sada se može zapisati [31]:

$$T_{OP,SORT} = N \times (t_{KMPL,I} + t_{KMPL,T}) + \sum_{i=1}^N (t_{S,P} + t_{S,N} \times (q_i - 1) + t_{KMPL,P} \times q_i) \quad (7)$$

Vrijeme potrošeno na hod $T_{OP,HODA}$ može se procijeniti iz ukupne prijeđene udaljenosti tokom odabira komponenti, koja odgovara sumi omjera duljine j -te police $l_{S,j}$ i prosječne brzine hoda v_{OP} . Određeni se zadaci mogu izvršavati istovremeno sa hodanjem po prolazima, poput dohvaćanja informacija o komponentama ($t_{KOMP,I}$) i traženja komponenti ($t_{KOMP,T}$). Ovdje je pretpostavljeno kako operater pomiče kolica policu po policu za sve police N_S , pri čemu se informacije mogu dohvaćati i komponente mogu tražiti istovremeno s hodanjem za prvu komponentu u svakoj polici. Također, kolica se moraju pokrenuti (t_P) i parkirati (t_{PARK}) na početku i na kraju svake ture odabira i sortiranja. U skladu s tim, ukupno vrijeme hoda odgovara [31]:

$$T_{OP,HODA} = N_S \times (t_P + t_{PARK}) - (t_{KOMP,I} + t_{KOMP,T}) \times \sum_{j=1}^S \frac{l_{S,j}}{v_{OP}} \quad (8)$$

Scenarij B

U scenariju B, vrijeme ciklusa ovisiti će o tome koliko uspješno operater i robot surađuju. Za svaki red narudžbe i , operater izvršava zadatak odabiranja. Jednom kad operater odloži komponente u kolaborativnu zonu, robot ih može početi sortirati po kompletima. Dok robot obavlja zadatak, operater prelazi na odabiranje komponenti za sljedeći red narudžbe $i + 1$ te ako s tim završi prije nego što robot obavi sortiranje komponenti prijašnjeg reda iz liste narudžbi, mora čekati robota. Isto tako, ako kobot završi prije operatera, on mora čekati. Za prvi red iz liste narudžbi $i = 1$ kobot će mirovati pošto je kolaborativna zona prazna, dok će za zadnji red $i = N$ mirovati operater kako više nema komponenti koje treba odabrati. Iz toga slijedi ukupno vrijeme ciklusa B [31]:

$$T_B = T_{OP,BI} + T_{CB,N} + \sum_{i=2}^{N-1} T_{Bi} \quad (9)$$

pri čemu je

$$T_{Bi} = \max(T_{OP,Bi+1}, T_{CB,Bi}) \quad (10)$$

Vrijeme koje operater i robot provedu obavljajući kolaborativni zadatak (odlaganje komponenti u kolaborativnoj zoni od strane operatera i njihovo dohvaćanje i sortiranje od strane kobota) predstavljeno je veličinama $T_{OP,KOLAB}$ i $T_{CB,KOLAB}$. Vrijeme koje operater provede obavljajući zadatak u scenariju B može se zapisati kao [31]:

$$T_{OP,B} = T_{OP,ODAB} + T_{OP,HODA} + T_{OP,KOLAB} \quad (11)$$

pri čemu se vrijeme odabira komponenti $T_{OP,ODAB}$ i vrijeme hodanja $T_{OP,HODA}$ određuje na isti način kao u scenariju A, iz jednažbi (3) i (5). Iako je operater oslobođen zadatka sortiranja, još uvijek mora odabrane komponente odložiti u kolaborativnu zonu. To vrijeme je opisano veličinom $T_{OP,KOLAB}$ i za njega je zapažanjima u laboratoriju ustanovljeno kako je proporcionalno količini komponentata te da za odlaganje prve komponente ($t_{KOLAB,P}$) treba nešto više vremena nego za odlaganje svih naknadnih ($t_{KOLAB,N}$). Iz toga slijedi [31]:

$$T_{OP,KOLAB} = \sum_{i=1}^N (t_{KOLAB,P} + t_{KOLAB,N} \times (q_i - 1)) \quad (12)$$

Vrijeme koje kobot potroši na obavljanje zadatka može se opisati sljedećom jednažbom [31]:

$$T_{CB,KOLAB} = T_{CB,PUTA} + T_{CB,VIDA} + T_{CB,ALATA} + T_{CB,SORT} + T_{CB,KOLAB} \quad (13)$$

Ovdje vrijeme puta kobota odgovara vremenu hoda operatera, ali s obzirom na to da robot može raditi tokom „putovanja“ kroz prolaze, njegovo vrijeme $T_{CB,PUTA}$ bit će uvijek jednako nuli. Također, vrijeme $T_{CB,VIDA}$ će biti nula pošto je kamera računalnog sustava vida postavljena iznad kolaborativne zone što omogućuje kontinuirano procesuiranje slike. Vrijeme izmjene alata $T_{CB,ALATA}$ jednako je za izmjenu bilo koja dva alata, ali ovisi o tome zahtijeva li komponenta $i + 1$ jednaki alat kao komponenta i . To je sadržano u parametru $\theta(i)$ koji ima iznos 1 kada nije potrebna izmjena alata, a iznos 0 u slučaju da je. Također, robot uvijek započinje sortiranje s ispravnim alatom pa je stoga $\theta(1) = 1$. Time dobivamo vrijeme utrošeno na izmjenu alata [31]:

$$T_{CB,ALATA} = t_{IZMJENE} \times \sum_{i=2}^N (1 - \theta_i) \quad (14)$$

Prilikom dohvaćanja komponente iz kolaborativne zone, stopa neuspjeha zahvaćanja komponente iz prvog pokušaja ε ovisi o vrsti hvataljke robota i o karakteristikama komponente. Vrijeme zahvaćanja t_Z jednako je za sve komponente uspješno zahvaćene iz prvog pokušaja. Stoga vrijeme koje kobot provede u kolaborativnom radu iznosi [31]:

$$T_{CB,KOLAB} = t_Z \times \sum_{i=1}^N (q_i \times (1 + \varepsilon_i)) \quad (15)$$

Vrijeme koje je kobotu potrebno da obavi zadatak sortiranja ovisi o tome u koje spremnike za komplete mora odložiti komponente. Pretpostavka je da kobot premješta svaku komponentu iz središta kolaborativne zone u središte spremnika j i to u ravnoj liniji koja ima udaljenost d_{KMPLj} . Svaki komplet j iz trenutne serije kompleta M trebao bi primiti $q_{KMPLi,j}$ količinu komponenti i . Vrijeme potrebno za stavljanje komponente u spremnik kompleta $t_{CB,S}$ je jednako za sve komponente i neovisno o tipu robotske hvataljke. Brzina robota unutar kolaborativne zone $v_{CB,UNUT}$ je iz sigurnosnih razloga uvijek manja od njegove brzine izvan kolaborativne zone $v_{CB,VAN}$. Također, robot se nakon sortiranja uvijek vraća u kolaborativnu zonu istim putem. Prema tome, vrijeme sortiranja komponenti u scenariju B glasi [31]:

$$T_{CB,SORT} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{2 \times d_{UNUT}}{v_{CB,UNUT}} + \sum_{j=1}^M \frac{2 \times q_{KMPLi,j} \times d_{KMPLj}}{v_{CB,VAN}} + t_{CB,S} \times q_i \right) \quad (16)$$

Uvođenjem ovih 13 jednadžbi moguće je procijeniti vrijeme ciklusa u scenarijima A i B. Za provođenje usporedbe vremena ciklusa korišteni su eksperimentalni podaci iz prijašnjih relevantnih studija. Vrijednosti parametara za aktivnost ručnog odabiranja u oba scenarija procijenjene su na temelju ranijih studija rađenih na tu temu. Što se tiče zadatka dohvaćanja i sortiranja komponenti za slučaj robota, vrijednosti parametara su također procijenjene na temelju relevantne literature te kroz razgovor s proizvođačem kobota. Kao ulaz za testiranje modela nasumično je generirano 1000 različitih lista narudžbi, pri čemu je svaka lista podrazumijevala slaganje 4 kompleta komponenti [31].

5. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad sažima ključne aspekte ljudsko-robotske suradnje, s posebnim naglaskom na utjecaj kolaborativnih robota na radne performanse operatera. Najprije je prikazana teorijska pozadina kolaborativnih robota kroz pregled povijesti njihovog razvoja te opis značajki i područja njihove primjene. Zatim je definiran koncept ljudsko-robotske suradnje kao i ljudsko-robotske interakcije koji predstavlja generalizaciju HRC-a.

U glavnom dijelu rada analizom znanstvene literature je ustanovljeno da su kolaborativni roboti doprinijeli povećanju produktivnosti u proizvodnim procesima kao i smanjenju opterećenja i poboljšanju ergonomske uvjeta operatera. Međutim, utjecaj kobota na sigurnost radnika nije toliko jasan. S jedne strane, određeni bi operateri mogli imati poteškoća prilikom suradnje s robotima u zajedničkom prostoru zbog straha od potencijalne nezgode. S druge strane, međunarodni sigurnosni standardi koji imaju za cilj minimiziranje opasnosti prilikom ljudsko-robotske suradnje značajno su razvijeni posljednjih godina. Uz to, stres, radno opterećenje, upotrebljivost, prihvaćanje i povjerenje identificirani su kao ključni faktori koji najviše utječu na radne performanse operatera. Pokazalo se kako HRC negativno utječe na stres operatera zbog potencijalne opasnosti koju oni percipiraju glede robota, dok je radno opterećenje doživjelo smanjenje u fizičkom te rast u mentalnom aspektu. Ostatak literature ukazao je na to kako su performanse radnika pod značajnim utjecajem upotrebljivosti, prihvaćanja i povjerenja te da u njihovoj odsutnosti može doći do pada istih. Na posljetku su kroz pregled dosadašnjih istraživanja identificirane različite istraživačke metode korištene za procjenu utjecaja robotskih sustava na operatere, uključujući metodu analize sigurnosti posla (*eng. JSA*), ergonomsku procjenu REBA metodom, analizu produktivnosti pomoću matematičkog modela i druge. Ovi rezultati upućuju na potrebu za kontinuiranim prilagodbama uvođenju robotskih sustava u razne industrijske sektore kako bi se osigurala njihova optimalna integracija, a posljedično i očuvanje zdravlja i dobrobiti radnika.

Buduća istraživanja trebala bi se fokusirati na to kako HRC utječe na druge aspekte radnih performansi pored sigurnosti, ergonomije i produktivnosti. Također, bilo bi korisno proučiti kako određene ljudske karakteristike utječu na uspješnost provođenja HRC-a, na primjer pridonosi li dob radnika ili njegovo prijašnje iskustvo u radu s robotima dodatnom povećanju radnih performansi prilikom uvođenja robotskih sustava u rad poduzeća.

LITERATURA

- [1] Omron: A guide to collaborative robot safety: Strategies for ensuring safe operation in collaborative applications: A Whitepaper, 2019.
- [2] „A brief history of collaborative robots“, *Material Handling & Logistics*, <https://www.mhlnews.com/technology-automation/article/21124077/a-brief-history-of-collaborative-robots> (Pristupljeno 8. lipnja 2024.)
- [3] „A History of Collaborative Robots: From Intelligent Lift Assists to Cobots“, *Engineering.com*, <https://www.engineering.com/story/a-history-of-collaborative-robots-from-intelligent-lift-assists-to-cobots> (Pristupljeno 8. lipnja 2024.)
- [4] „Market Analysis Report“, *Grand View Research*, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/collaborative-robots-market> (Pristupljeno 9. lipnja 2024.)
- [5] „Cobots vs Robots: Understanding key differences and applications“, *Wevolver*, <https://www.wevolver.com/article/cobot-vs-robot> (Pristupljeno 17. lipnja 2024.)
- [6] „Collaborative Robots Versus Traditional Industrial Robots“, *Universal Robots* <https://www.universal-robots.com/blog/how-to-choose-between-collaborative-and-traditional-industrial-robots/> (Pristupljeno 17. lipnja 2024.)
- [7] „A History of Collaborative Robots: From Intelligent Lift Assists to Cobots“, *Engineering.com* <https://www.engineering.com/story/a-history-of-collaborative-robots-from-intelligent-lift-assists-to-cobots> (Pristupljeno 17. lipnja 2024.)
- [8] Kakade S., Patle B., Umbarkar A.: Applications of collaborative robots in agile manufacturing, *Department of Mechanical Engineering, MIT-SOE, MIT Art, Design and Technology University*, str. 10-12, 2023.
- [9] „How cobots can improve production quality inspection“, *Wiredworkers*, <https://www.wiredworkers.io/blog/how-cobots-can-improve-production-quality-inspection/> (Pristupljeno 19. lipnja 2024.)
- [10] „Revolutionizing the Healthcare Industry With Collaborative Robots“, *aiTechPark*, <https://ai-techpark.com/collaborative-robots-in-healthcare/#a4> (Pristupljeno 19. lipnja 2024.)
- [11] Bodner J., Augustin F., Wykypiel H.: The da Vinci robotic system for general surgical applications, *Swiss Med Weekly*, str. 674-676, 2005.

- [12] „Lower Limb Exoskeletons and Exosuits“, *ETH Zurich*, <https://sms.hest.ethz.ch/research/past-research-projects/lower-limb-exoskeletons-and-exosuits.html> (Pristupljeno 19. lipnja 2024.)
- [13] „Da Vinci Surgery“, *Unity Medical Centre*, <https://www.unitymedcenter.com/hospital/davinci-surgical-system.html> (Pristupljeno 20. lipnja 2024.)
- [14] „How Robot Implementation Impacts Manufacturing Plant Productivity“, *Locus Robotics*, <https://locusrobotics.com/blog/robots-manufacturing-productivity> (Pristupljeno 31. srpnja 2024.)
- [15] Graetz G., Michaels G.: Robots at Work, *IZA*, str. 10-21, 2015.
- [16] Barosz P., Golda G., Kampa A.: Efficiency Analysis of Manufacturing Line with Industrial Robots and Human Operators, *MDPI*, str. 5-9, 2020.
- [17] Wang L., Gao R., Vancza J.: Symbiotic human-robot collaborative assembly, *ELSEVIER*, str. 703, 2019.
- [18] Matheson E., Minto R., Zampieri G.G. E.: Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications, *MDPI*, str. 1-3, 2019.
- [19] „Enabling Safe Human and Robot Collaboration With Blue Danube Robotics“, *Carbon*, <https://www.carbon3d.com/resources/case-study/enabling-safe-human-and-robot-collaboration-with-blue-danube-robotics> (Pristupljeno 21. lipnja 2024.)
- [20] Sheridan B. T.: Human-Robot Interaction: Status and Challenges, str. 525-530, 2016.
- [21] Charalambous G., Fletcher S., Webb P.: Identifying the key organisational human factors for introducing human-robot collaboration in industry: an exploratory study, *Int J Adv Manuf Technol*, 81, str. 2143-2155, 2015.
- [22] Ebel K.: The Impact of Industrial Robots on the World of Work, *Robotics 3* str. 65-72, 1987.
- [23] Argote L., Goodman S. P., Schkade D.: The Human Side of Robotics: How Worker's React to a Robot, *Sloan Management Review*, str. 1-34, 1983.
- [24] De Simone V., Di Pasquale V., Giubileo V., Human-Robot Collaboration: an analysis of worker's performance, *Procedia Computer Science 200*, str. 1540-1549, 2022.
- [25] Gopinath A., Johansen K.: Risk Assessment Process for Collaborative Assembly – A Job Safety Analysis Approach, *Procedia CIRP 44*, str. 199-203, 2016.
- [26] Etherton R. J.: Industrial Machine Systems Risk Assessment: A Critical Review of Concepts and Methods, *Risk Analysis, Vol 27, No.1*, 2007.

[27] Sauppé A., Bilge M.: The Social Impact of a Robot Co-Worker in Industrial Setting, *CHI, April*, str. 18-23, 2015.

[28] Zanchettin M. A., Lotano E., Rocco P.: Collaborative Robot Assistant for the Ergonomic Manipulator of Cumbersome Objects, *IROS*, str. 4-8, 2019.

[29] Hignett S., McAtamney L.: Rapid Entire Body Assessment (REBA), *Applied Ergonomics* 31, str. 201-205, 2000.

[30] Arai T., Kato R., Fujita M.: Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 59, str. 5-8, 2010.

[31] Fager P., Calvazara M., Sgarbossa F.: Kit Preparation with Cobot-supported Sorting in Mixed Model Assembly, *IFAC PapersOnLine* 52-13, str. 1878-1883, 2019.