

Sinteza kolaborativne svesti kod robota

Aleksandar Rodić
IMP Centar za robotiku
Institut "Mihajlo Pupin" doo. Beograd
Beograd, Srbija

aleksandar.rodic@pupin.rs
<https://orcid.org/0000-0002-5595-9724>

Abstract— Rad se bavi uvođenjem veštačke inteligencije u upravljačku arhitekturu kolaborativnih robota (kobotova) kako bi se poboljšala interakcija čoveka i robota u industriji, posebno u proizvodnim okruženjima sa niskim obimom i visokom prilagodljivošću. Sistem koristi višemodalni interfejs sa dubinskim kamerama, senzorima pokreta i fiziološkim indikatorima za stalno praćenje psihofizičkog stanja radnika—umora, stresa, dekoncentracije ili zdravstvenih problema. Fazi sistem zaključivanja analizira te podatke i određuje stanje radnika na skali od 0 (bezbedno) do 1 (kritično), omogućavajući kobotu da u realnom vremenu prilagodi ponašanje: upozori radnika, smanji brzinu izvršavanja zadatka, ili preuzme deo kognitivno-fizičkog opterećenja. Kobot je umrežen sa digitalnim radnim okruženjem i ima pristup proizvodnim planovima, tehničkoj dokumentaciji i operativnim podacima. Prikazan sistem povećava bezbednost, efikasnost i produktivnost u fleksibilnoj proizvodnji.

Cljučne reči—kolaborativni roboti, AI, veštačka svest

I. UVOD

Ljudi su razvili robote kako bi im pomogli u fizički zahtevnim, opasnim i repetitivnim zadacima, stvarajući mašine koje oponašaju ljudsku anatomiju, ponašanje i kognitivne sposobnosti. Svesni prirodnih psihofizičkih sposobnosti i bioloških ograničenja (kao što su umor, gubitak koncentracije, stres i fizičke slabosti uzrokovane različitim stanjima), kao i tehničkih mogućnosti i ograničenja savremenih robota, ljudi su stvorili kolaborativne robote. Zajedničkim radom kao partneri, ljudi-radnici i kolaborativni roboti smanjuju sopstvena ograničenja i maksimizuju svoje komplementarne sposobnosti, postizujući rezultate koji nadmašuju mogućnosti svakog sistema pojedinačno. Da bi roboti mogli bezbedno i društveno prihvatljivo da rade uz ljude, moraju posedovati osobine kolaborativne svesnosti, solidarnosti i empatije prema svojim biološkim saradnicima. Ova studija se fokusira na razvoj sintetičke kolaborativne svesnosti kod robota korišćenjem inovativnih algoritama veštačke inteligencije, omogućavajući im da u potpunosti iskoriste svoj tehnički potencijal u radnom procesu. Istraživanje predstavljeno u ovom radu predstavlja nastavak proučavanja kolaborativne svesnosti i oslanja se na koncept opisan u [1].

A. Definicije pojmova

Kolaborativni rad podrazumeva pojedince ili grupe koji zajednički rade ka zajedničkom cilju, naglašavajući saradnju, međusobnu podršku, komunikaciju i kolektivni napor. Kolaborativni roboti, ili koboti, predstavljaju specijalizovanu klasu robota dizajniranih za rad u neposrednoj blizini ljudi u zajedničkom radnom prostoru.

Svest, odnosno svesnost, pojam koji se proučava u filozofiji, psihologiji i neuronaukama, odnosi se na subjektivno iskustvo, percepciju, misli i emocije koje pojedinci imaju o sebi i svojoj

okolini. Ključne karakteristike svesti uključuju *subjektivnost*, jer predstavlja jedinstveno lično iskustvo; *budnost*, koja omogućava organizmu da reaguje na spoljašnje podražaje; *samosvest*, koja omogućava pojedincima da reflektuju o svojim mislima i emocijama; i *intencionalnost*, koja usmerava pažnju na određene objekte, misli ili iskustva. Integracijom ovih principa u robotske sisteme, razvoj kolaborativne inteligencije može omogućiti da roboti funkcionišu u harmoniji sa ljudskim radnicima, optimizujući produktivnost, bezbednost i efikasnost u savremenim industrijskim okruženjima.

II. PREGLED STANJA U OBLASTI

Nedavni napreci u oblasti kolaborativne inteligencije i razvoj kolaborativnih robota (kobota) značajno su unapredili interakciju čoveka i robota u industrijskim okruženjima. Opsežan pregled literature koji je predstavljen u radu [2] ističe rastuće polje kolaborativne inteligencije i pokazuje vrednost koju timovi ljudi i veštačke inteligencije mogu doneti u različitim primenama. Kada je reč o kobotima, sistematski pregled literature iz rada [3] razmatra sve veću ulogu veštačke inteligencije u industriji, identifikujući ključne pravce razvoja u periodu od 2018. do 2022. godine. Ovaj pregled analizira izazove sa kojima se suočavaju savremeni industrijski kolaborativni roboti i daje smernice za buduća istraživanja. Dodatno, studija iz rada [4] analizira postojeće primene kolaborativne robotike, nudeći uvid i u naučnu literaturu i u praktične implementacije. Sistematski pregled koji su sprovedli Semeraro i saradnici [5] istražuje integraciju tehnika mašinskog učenja u saradnju čoveka i robota, naglašavajući značaj uvođenja vremenskih zavisnosti u algoritme mašinskog učenja radi poboljšanja kolaborativnih zadataka. Zajedno, ovi radovi naglašavaju ključnu ulogu naprednih AI (IQ/EQ) algoritama u razvoju kobota koji mogu neprimetno i bezbedno da sarađuju sa ljudima-radnicima, otvarajući put ka efikasnijoj i inteligentnijoj industrijskoj automatizaciji.

Ovaj pristup sintezi i ugradnji kolaborativne veštačke svesnosti u industrijske robote uvodi niz inovativnih elemenata koji ga izdvajaju od postojećih rešenja u literaturi. Ključna inovacija je upotreba fazi estimatora za procenu psihofizičkog stanja čoveka-radnika, koji koristi ulazne podatke povezane sa pravilnošću tehnološkog procesa i specifične indikatore stanja radnika. Ova detaljna procena omogućava robotu da pruži *personalizovanu podršku (pomoć)*, bilo kroz fizičku asistenciju, bilo putem verbalnih i neverbalnih upozorenja radi poboljšanja fokusa i radnog učinka čoveka. Iako su aktuelna istraživanja već obuhvatila AI-podržane kolaborativne robote sa mogućnošću obrade prirodnog jezika i prilagođavanja zadacima pomoću mašinskog učenja, akcenat ovog pristupa na praćenju i reagovanju u realnom vremenu na psihofizičko stanje čoveka unosi personalizovanu dimenziju u interakciju čoveka i robota.

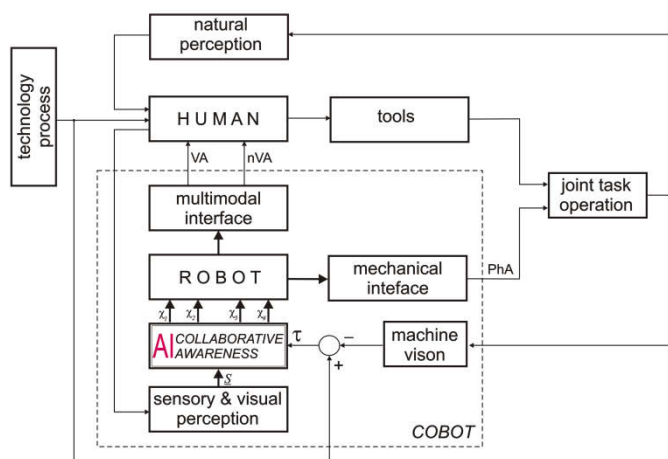
Ovaj pristup ne samo da povećava efikasnost zadatka, već i stavlja akcenat na dobrobit radnika – aspekt koji je manje zastupljen u postojećim studijama. Takođe, dizajn sistema koji omogućava robotu da prilagođava svoju pomoć na osnovu kontinuirane procene kako parametara procesa, tako i stanja čoveka, predstavlja značajan iskorak u razvoju istinski kolaborativnih i respozivnih robotskih partnera u industrijskim okruženjima. Ova dinamična adaptivnost, zasnovana na podacima u realnom vremenu, razlikuje ovaj pristup od statičnih modela asistencije koji preovlađuju u savremenim primenama.

III. KOLABORATIVNA SVEST

U industrijskim okruženjima, kolaborativna svesnost kod robota podrazumeva da robot, kao partner čoveku-radniku, poseduje odgovarajuće perceptivne i kognitivne sposobnosti da prepozna i razume:

(i) stanje i vremenski sled operacija unutar tehnološkog procesa kroz njegove faze. Ovo podrazumeva da robot može da detektuje kašnjenja ili ubrzanja u izvršavanju tehnoloških operacija koje obavlja biološki partner, kao i da pravovremeno uoči i prepozna greške koje je čovek napravio usled različitih psihofizičkih faktora.

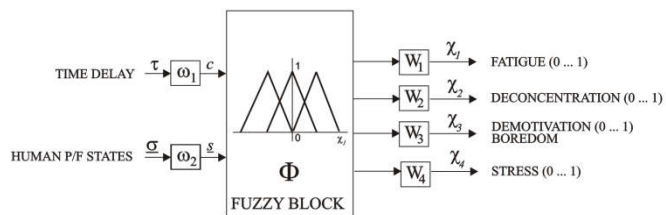
(ii) psihofizičko stanje ljudskog radnika tokom izvođenja zajedničkih zadataka, kao što su umor, nedostatak koncentracije, demotivisanost, dosada, stres i fizička napetost zbog neiskustva i nedovoljne obuke za posao, fizička slabost usled bolesti, itd.



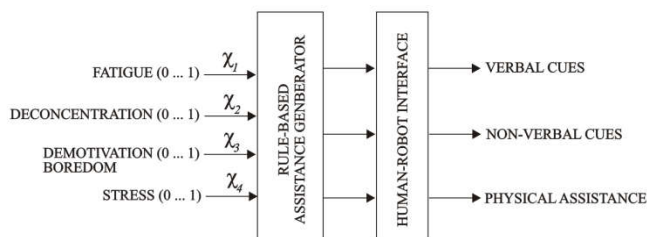
Sl. 1. Blok dijagram hibridnog kolaborativnog sistema čovek-robot. Kolaborativna svest zasnovana na veštačkoj inteligenciji integrisana u upravljačku strukturu kobota.

Modul „Kolaborativna svest zasnovana na veštačkoj inteligenciji” (CA) (Slika 1) prima relevantne informacije iz okruženja putem senzora i kamera, kao i podatke o tehnološkom procesu (npr. redosled operacija u zajedničkom zadatku, alati koje radnik koristi za obavljanje zadataka, konkretne tehnološke intervencije koje robot sprovodi i njihovo vremensko usklađivanje) iz baze podataka. CA modul takođe prikuplja informacije o psihofizičkom stanju svog partnera – čoveka. Na osnovu prikupljenih podataka, robot opremljen CA modulom procenjuje stanje sistema i predviđa odgovarajuće akcije pomoći sa ciljem pružanja fizičke i kognitivne pomoći radniku putem odgovarajućeg mehaničkog interfejsa, ili

isporučuje verbalne (VA) i/ili neverbalne (nVA) signale upozorenja putem multimodalnog interfejsa kako bi se povećala budnost radnika i podstakla posvećenija i fokusiranija realizacija zadatka.



Sl. 2. Blok dijagram fazi procenitelja stanja kolaborativnog sistema čovek-robot, sintetizovanog za detekciju psiho-fizičkog stanja čoveka-radnika kao partnera kobota.



Sl. 3. Generator pomoći čoveku u okviru kolaborativnog svesnog robota.

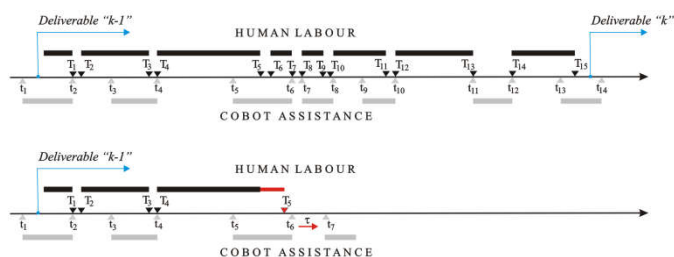
Fazi procenitelj psihofizičkih stanja čoveka-radnika predstavlja funkcionalno jezgro bloka kolaborativne svesti (CA) pokretane veštačkom inteligencijom. Ovaj blok ima dva ulazna porta, kao što je prikazano na Slici 2. Prvi ulazni port prima informacije o regularnosti izvođenja tehnološkog procesa, poput kašnjenja ili ubrzanja, uzimajući u obzir vremensku konstantu τ . Drugi ulazni port prihvata vektor indikatora stanja $\underline{s}$ koji karakterišu psihofizičko stanje radnika angažovanog u zajedničkom tehnološkom zadatku sa robotom. Izlazni portovi fazi procenitelja stanja isporučuju numerički izražene vrednosti četiri dominantna stanja čoveka koja određuju kvalitet obavljanja posla, pri čemu vrednosti stanja variraju u intervalu $\chi_j \in (0, 1), j = 1, \dots, 4$. Ulazne promenljive u fazi bloku, prikazane na Slici 2, predstavljaju uočljive znake (indikatore) psihofizičkog stanja ljudskog radnika. U Tabeli 1 dat je primer nekoliko karakterističnih indikatora *zamora* radnika. Isto važi i za preostala tri stanja svesnosti – *dekoncentraciju*, *demotivaciju* (dosadu) i *stres*. U radu su korišćena jednostavna fazi pravila za sintezu kolaborativne svesnosti. Na osnovu procenjenih indikatora psihofizičkih stanja radnika, razvrstanih uglavnom u tri kategorije izraženosti – *uočljivo*, *umereno uočljivo* i *nepostojeće* – fazi pravila generišu odgovarajuće reakcije, u rasponu od verbalnih ili gestovnih upozorenja do direktne fizičke pomoći, kao što su prilagođavanje brzine izvršavanja zadatka, rukovanje alatima ili privremena preraspodela radnog opterećenja. Dodatno, svakoj izlaznoj promenljivoj u fazi bloku na Slici 2 dodeljen je jedan faktor težine $W_j, j = 1, \dots, 4$ koji služi za naglašavanje ili umanjenje značaja neke od posmatranih promenljivih. Vrednosti faktora težine su promenljive i mogu se postaviti u opsegu od 0 do 1.

TABELA I. POKAZATELJI ZAMORA KOD ČOVEKA-RADNIKA.

rbr.	Opis tehnološke operacije
1	Tamjni podočnjaci – Nedostatak sna i produženi fizički ili mentalni napor dovode do zadržavanja tečnosti i pigmentacije ispod očiju.
2	Crvenilo očiju – Oči mogu postati crvene zbog suvoće, iritacije ili produženog naprezanja vida.
3	Opadajući kapci – Teški ili poluzatvoreni kapci ukazuju na pospanost i mentalni umor.
4	Bezizražajno ili umorno lice – Nedostatak izraza lica i usporene reakcije mogu ukazivati na mentalni zamor.
5	Težak izraz lica i smanjen tonus mišića – Umor može dovesti do opuštenog ili beživotnog izraza lica.
6	Nestabilan stisak alata ili predmeta – Smanjena kontrola stiska, slabiji pritisak prstiju i otežano držanje ukazuju na zamor mišića šake i podlaktice.
7	Usporeni pokreti ruku – Radnik postepeno usporava radne operacije, što može biti znak fizičkog ili mentalnog zamora.
...	...

Procenjene i kvantifikovane vrednosti psihofizičkih stanja radnika $\chi_j \in (0, 1)$, koje se generišu kao izlazi iz fazi bloka, dalje se obrađuju u bloku „Generator Pomoći“ (Slika 3). Ovaj generator, kao odlučujuću, uzima dominantnu (najvišu) vrednost među promenljivama stanja $\chi_j, j = 1, \dots, 4$, koja određuje vrstu reakcije robota, tj. modalitete pomoći koje robot upućuje čoveku. Ukoliko dve promenljive stanja χ_j imaju iste ili približne vrednosti, tada „Generator Pomoći“ naizmenično šalje komande za akcije pomoći radniku, odgovarajući najpre jednom, a zatim drugom stanju, npr. zamoru i demotivaciji. Izlazne vrednosti iz ovog bloka direktno se šalju ka modulima koji čine sistem interakcije čovek-robot (HRI) u okviru kolaborativnog robota. Kroz HRI, kolaborativni robot nudi fizičku pomoć radniku (fizički pomaže ili preuzima alat i izvršava zadatak umesto čoveka), ili pruža verbalne i/ili neverbalne signale pomoći (zamenjuje, podstiče, fokusira, itd.) s ciljem poboljšanja radnikove spremnosti (na odmor, bolju koncentraciju na zadatak, poboljšanje tehnike rukovanja alatom, ili jednostavno usmeravanje pažnje na tekuću operaciju).

Slika 4 prikazuje dijagram toka tehnoloških operacija duž vremenske ose. Isprekidane crne linije na dijagramima označavaju trajanje operacija koje obavlja robot, dok siva područja predstavljaju operacije koje sprovodi čovek. Operacije robota obično prethode radnjama radnika kako bi se pripremili tehnološki uslovi za kontinuirano i pouzdano izvršavanje zadatka. To može uključivati dodavanje odgovarajućeg alata radniku, postavljanje objekta na pozicioner, pridržavanje predmeta dok radnik vrši operacije na njemu i slično. Ponekad operacije robota i čoveka mogu teći paralelno, ali moraju biti usklađene sa fazama tehnološkog procesa koje su unapred propisane. Ukoliko iz bilo kog razloga radnik kasni u realizaciji određene faze procesa, zadatak kolaborativnog robota je da to uoči i, na osnovu kolaborativne svesnosti, pomogne čoveku da se uskladi sa procesom.



Sl. 4. Primer jedne tipične vremenske ose tehnološkog procesa koja ilustruje trajanje pojedinačnih operacija koje obavljaju radnik i kolaborativni robot. Gornji dijagram toka prikazuje proces bez kašnjenja, dok donji deo dijagrama prikazuje isti proces ali sa kašnjenjem.

IV. HARDVERSKI I SOFTVERSKI ZAHTEVI ZA SINTEZU

Za sintezu kolaborativne svesnosti kod industrijskih robota koji pomažu ljudima-radnicima, neophodno je integrisati odgovarajući hardver i razviti odgovarajući aplikacioni programski interfejs (API) koji podržava funkcije kolaborativne svesnosti. Hardverski zahtevi uključuju naprednu senzorsku opremu, kao što su kamere visoke rezolucije, LiDAR sistemi i senzori sile i momenta, kako bi se omogućilo precizno opažanje okruženja i interakcija čoveka i robota. Ovi senzori moraju biti tehnološki spremni za akviziciju i obradu podataka u realnom vremenu kako bi se tačno pratili tehnološki proces i radnje biološkog partnera.

Sa softverske strane, sistem treba da sadrži algoritme mašinskog učenja, zaključivanja i donošenja odluka u cilju tumačenja podataka sa senzora, predikciju namera čoveka i procenu psihofizičkog stanja radnika, uključujući faktore poput umora, stresa ili nepažnje. API treba da omogućiti pouzdanu, besprekidnu komunikaciju između upravljačkog sistema robota i senzorskog aparata, omogućavajući dinamičko prilagođavanje ponašanja robota u skladu sa promenama u okruženju ili stanju ljudskog partnera.

Pored toga, usklađenost sa bezbednosnim standardima kao što su ISO 10218 i ISO/TS 15066 je od ključnog značaja za bezbednu i efikasnu saradnju čoveka i robota. Ovi standardi daju smernice o bezbednosnim funkcijama i performansama koje se zahtevaju za kolaborativne robote, naglašavajući važnost procene rizika i primene bezbednosnih mera za sprečavanje nezgoda. Ispunjavanjem ovih hardverskih i softverskih zahteva, robot može postići nivo kolaborativne svesnosti koji unapređuje njegovu sposobnost da efikasno i bezbedno pomaže ljudskim radnicima u industrijskom okruženju.

V. VERIFIKACIJA IDEJE

Provera sposobnosti kolaborativne svesnosti robota i njenih efekata u primeni na tipičan kolaborativni zadatak predviđen u industriji predstavljena je u ovom pasusu. Tipičan tehnološki proces, u kojem je uključivanje kolaborativnog robota opravdano i ekonomski i ergonomski održivo, odnosi se na zadatak sklapanja proizvoda u industriji nameštaja. Kao ilustracija toga, na Slici 5 prikazan je jedan zadatak ovog tipa.



Sl. 5. Jedan tipičan kolaborativni zadatak robota – montaža proizvoda u industriji nameštaja.

Kao studija slučaja, korišćen je mali noćni ormarić IKEA Brimnes [6]. Veb-sajt [7] nudi uputstvo korisniku za sklapanje ovog proizvoda ilustrovano crtežima i simbolima. Proces sklapanja se sastoji od 27 koraka (faza), kako je prikazano u priručniku za sklapanje [7]. OpenAI-jev ChatGPT analizirao je *.pdf fajl iz izvora [7] i identifikovao svih 27 operativnih koraka, pružajući njihove narativne opise, koji su delimično (zbog raspoloživog prostora) prikazani u Tabeli 2. Pored toga, za svaki korak je procenjeno i očekivano vreme trajanja operacije, koje je takođe navedeno u tabeli. Koristeći prikaz sličan onom na Slici 4, generisana je vremenska osa procesa sklapanja sa precizno definisanim trajanjem svake pojedinačne faze.

Dalje, ChatGPT je procenio da bi sklapanje jednog ormarića IKEA Brimnes, ako ga izvodi isključivo čovek, trajalo 150 minuta. Međutim, ako kolaborativni robot (kobot) asistira radniku u procesu, isti zadatak mogao bi biti završen za svega 90 minuta. Ovo ukazuje na to da kolaborativni robot pomaže čoveku-radniku tako što mu omogućava da tokom osmočasovnog radnog ciklusa održi bolje fizičko i kognitivno stanje (svežinu i koncentraciju). Kao rezultat toga, radnik koji samostalno radi može da sastavi 3 ormarića, dok uz pomoć kolaborativnog robota može da kompletira čak 5 proizvoda, koristeći kratke pauze od 10-15 min.

TABELA II. USER MANUAL – ASSEMBLY INSTRUCTIONS FOR THE IKEA BRIMNES NIGHTSTAND [7].

Korak br.	Opis tehnološke operacije	Trajanje (min)
1	Priprema delova i alata: Pripremiti sve neophodne delove i alat za sklapanje.	5
2	Sklapanje bočnih stranica: Povezati bočne stranice sa donjom pločom koristeći odgovarajuće tiplove i šrafove.	10
3	Ugradnja zadnje stranice: Pričvrstiti zadnju stranicu za bočne stranice.	5
4	Postavljanje gornje ploče: Postaviti gornju ploču na bočne stranice i pričvrstiti je.	10
5	Učvršćivanje rama: Proveriti stabilnost konstrukcije i po potrebi ojačati spojeve.	5
...	...	...
27	Završetak sklapanja: Osigurati da su svi delovi pravilno montirani i da je noćni ormarić spreman za upotrebu.	5

Na ovaj način demonstriran je pozitivan uticaj primene robota sa ugrađenom kolaborativnom inteligencijom na

efikasnost obavljanja zajedničkih tehnoloških zadataka u industriji i na povećanje proizvodne produktivnosti. Ovde će takođe biti prikazano kako kolaborativna svest kod robota pozitivno utiče na očuvanje radne sposobnosti radnika, odnosno njegovih psihofizičkih sposobnosti (smanjenje umora, stanja dekoncentracije ili stresa) tokom radnog vremena. Pregledom literature iz oblasti medicine rada [8], ustanovljeno je da se radna sposobnost radnika menja tokom radnog vremena i to ne linearno već neravnomerno. Tokom prvih 4 sata rada, radna sposobnost radnika se održava bliže gornjoj granici mogućnosti, dok nakon toga naglo opada. U zavisnosti od težine posla (fizičkog i kognitivnog napora) koji radnik obavlja, ovo povećanje osećaja umora kod radnika može dostići i do 70% do kraja radnog vremena ukoliko se uzme u obzir da osoba na početku radnog vremena ima 0% umora, uslovno govoreći kao potpuno odmorna osoba. Radi verifikacije koncepta asistivnog (inverzivnog) delovanja kolaborativnog robota i njegovog uticaja na očuvanje radnih sposobnosti radnika, biće sprovedena simulacija pojednostavljenog modela kolaborativnog čovek-robot sistema koji radi na zajedničkim tehnološkim zadacima.

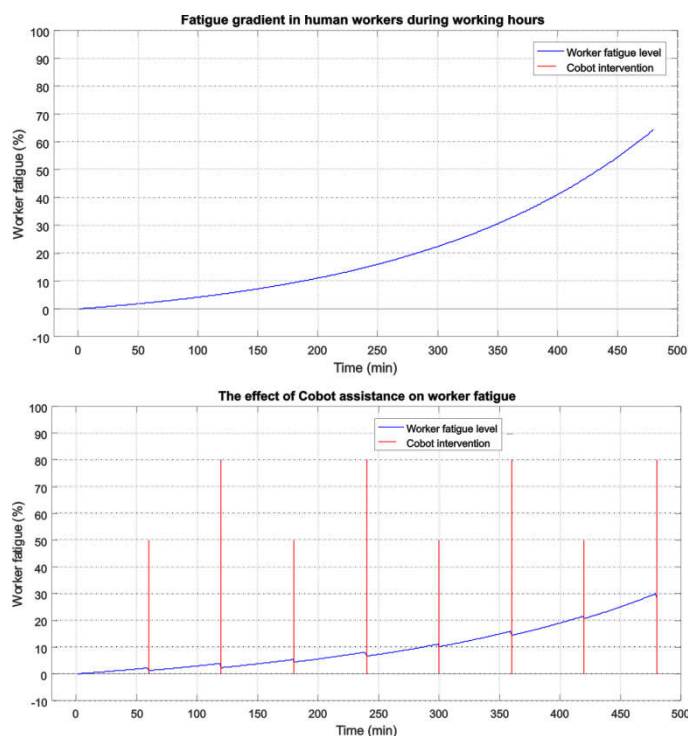
Umesto simulacije kinematike i dinamike fizičkog ponašanja robota i radnika koji zajedno izvršavaju zajedničke zadatke, za potrebe verifikacije koncepta korišćen je pojednostavljen model sistema u vremenskom domenu. Ovaj pojednostavljen model uzima u obzir ponašanje sistema u vremenskom domenu uvođenjem odgovarajućih vremenskih konstanti. Vremenske konstante korišćene u modelu opisuju vreme reakcije sistema, tj. vremenska kašnjenja usled fizičkog i kognitivnog umora ili iz drugih razloga povezanih sa individualnim stanjima radnika (motivacija, stres, koncentracija na zadatke, itd). Model koji se koristi za analizu u ovom radu može se predstaviti kao diskretni sistem u vremenskom domenu gde su ključne promenljive:

- *Psihofizičko stanje* radnika $S(t)$ – može se meriti kroz nivo umora, dekoncentracije, demotivacije, stresa, grešaka u radu ili pada efikasnosti.
- *Vremenska konstanta zamora* τ_f – opisuje koliko brzo radnik gubi efikasnost bez asistencije robota.
- *Vremenska konstanta oporavka* τ_r – opisuje koliko brzo se radnik vraća u optimalno stanje kada robot interveniše.
- *Tip i učestalost intervencija* robota – verbalna i neverbalna asistencija, fizička pomoć, sugestije za pauzu, itd.

Matematički model se može zasnivati na diskretnoj jednačini oblika:

$$S(t + \Delta t) = S(t) + \frac{S(t)}{\tau_f} - \frac{I(t)}{\tau_r} \quad (1)$$

$$\Delta t = 1 \text{ min}; \tau_f = 200 \text{ min}; \tau_r = 50 \text{ min}; \quad (2)$$



Sl. 6. Simulacioni primer. Efekti uticaja pomoći kolaborativnog robota na radnu sposobnost ljudskog radnika. a) Napredovanje zamora osobe koja samostalno obavlja manipulativni zadatak. b) Napredovanje zamora ljudskog radnika uz pomoć kolaborativnog robota.

Primenom relacije (1), koja opisuje promenu stanja zamora radnika tokom radnog vremena u slučaju kada mu kolaborativni robot pomaže svojom fizičkom pomoći ili (ne)verbalnim znacima i gestovima $I(t)$ različitog intenziteta i trajanja, mogu se analizirati efekti aktivne pomoći robota čoveku u cilju očuvanja njegove radne sposobnosti i kondicije. U primeru analiziranom u ovom radu, izabrane su vremenske konstante čije su vrednosti date u (2). Robot, kao što je ilustrovano na grafikonu na Slici 6, svakih 60 minuta pomaže osobi podižući njen nivo pažnje periodičnom verbalnom pomoći. Taj efekat je kvantitativno izražen vrednošću $I(t)=0,5$. Robot takođe preduzima pomoćnu fizičku pomoć svakih 120 minuta kako bi podržao čoveka-radnika kako bi smanjio njegove napore. Kvantifikovano je na takav način da je $I(t)=0,8$. Adaptivna pomoć robota sledi ako fazi estimator zamora (Slike 2 i 3) navodi da je čovek prešao nivo zamora od 70%. Zatim se pomoć kvantifikuje kao $I(t)=1,0$. Analizom Slike 6, potvrđeno je da kolaborativni robot, pružajući pomoći radniku, smanjuje nivo zamora i do 30%, što značajno poboljšava radnu sposobnost čoveka.

VI. ZAKLJUČAK I DALJI PRAVCI RAZVOJA

Prikazana inovativna integracija fazi logike za procenu ljudskih psihofizičkih stanja i naknadne strategije adaptivne pomoći doprinose novoj perspektivi u razvoju kolaborativnih robota, poboljšavajući i operativnu efikasnost i sinergiju čoveka i robota. U narednom periodu, u planu je implementacija razvijenih algoritama na realnom robotu na način da se kolaborativni robot obuča da pruža fizičko-kognitivnu pomoć radniku u jednoj realnoj industrijskoj aplikaciji kao što je montaža modularnog nameštaja manjih gabarita namenjenih za domaćinstva ili kao što je recimo montaža elektronskog uređaja koji se sastoji iz većeg broja sastavnih komponenti.

ZAHVALNICA

Rezultati prikazani u ovom radu su rezultati istraživanja koje je podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije, po ugovoru br. 51-03-136/2025-03/200034 od 04.02.205.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] A. Rodić, "Building AI-Supported Collaborative Awareness in Industrial Humanoids: Conceptual Framework and Methodological Approach", Book chapter in: Artificial Intelligence in Industry 4.0: The future that comes true, Special Editions ANUB&H CCXV, pp. 62-93, 2024-09, DOI: 10.5644/pi2024.215.04
- [2] E. Schleiger, C. Mason, C. Naughtin, A. Reeson, and C. Paris, "Collaborative Intelligence: A Scoping Review Of Current Applications", APPLIED ARTIFICIAL INTELLIGENCE, Taylor & Francis, Vol. 38, No. 1, e2327890 (23 pages), <https://doi.org/10.1080/08839514.2024.2327890> (2024)
- [3] A. Borboni, KVV. Reddy, I. Elamvazuthi, MS. AL-Quraishi, E. Natarajan, Azhar Ali SS, "The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works". Machines., 11(1):111. <https://doi.org/10.3390/machines11010111> (2023)
- [4] E. Montini, F. Daniele, L. Agbomemewa, et al., "Collaborative Robotics: A Survey From Literature and Practitioners Perspectives", J Intell Robot Syst 110, 117, <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02141-z> (2024)
- [5] F. Semeraro, A. Griffiths, A. Cangelosia, "Human-robot collaboration and machine learning: a systematic review of recent research", Cognitive Robotics Laboratory, The University of Manchester, Manchester, United Kingdom, arXiv:2110.07448v4 [cs.RO]. Published by: Cornell University arXiv:2110.07448
- [6] IKEA-BRIMNES. Product description. <https://www.ikea.com/rs/sr/p/brimnes-nocni-stolic-bela-10234942/?msocid=0dedd7707a8e6d2a1766c5107b936c3c>, last accessed 2025/02/15.
- [7] IKEA-BRIMNES. Assembly instructions. https://www.ikea.com/rs/sr/assembly_instructions/brimnes-nocni-stolic-bela_AA-2523142-1-2.pdf, last accessed 2025/02/15.
- [8] Labor medicine. https://www.medradanis.rs/docs/knjiga_medicina_rada.pdf?utm_source=chatgpt.com

ABSTRACT

This paper presents a concept for developing collaborative awareness in industrial robots that assist human workers in performing shared technological tasks. A model is proposed that integrates advanced sensors, artificial intelligence, and an appropriate API to monitor the worker's psycho-physical state and dynamically adjust the robot's behavior in real time. The experimental part of the paper uses the assembly of an IKEA nightstand as a representative case to analyze the robot's impact on efficiency and the worker's condition. Results show that with the help of a collaborative robot, the assembly time can be reduced by 40%, while preserving the worker's performance during the work shift. Furthermore, a simplified mathematical model was developed to quantify the worker's psycho-physical state over time, demonstrating the positive effects of robotic assistance in reducing fatigue and stress.

SYNTHESIS OF A COLLABORATIVE AWARENESS WITH ROBOTS Aleksandar Rodić