

# Hijerarhijsko distribuirano upravljanje kolaborativnim industrijskim humanoidnim robotom podržano oblak-arhitekturom

Jovan Šumarac, Ilija Stevanović, Aleksandar Rodić

**Apstrakt**—Ovaj rad predstavlja jednu hijerarhijsku, distribuiranu upravljačku arhitekturu dvoručnog, kolaborativnog, humanoidnog servisnog robota podržanom tehnologijom “računarstva u oblaku”. Ova upravljačka struktura dizajnirana je namenski za izvršavanje robotskih zadataka koji zahtevaju primenu složenijih manipulativnih i kognitivnih veština u okviru industrijskog proizvodnog tehnološkog procesa. Upravljačka struktura robota osmišljena je tako da zadovolji potrebe tzv. pametne proizvodnje u okviru platforme Industrije 4.0, odnosno da omogući i olakša kooperaciju čoveka i robota kao njemu komplementarnog inteligentnog sistema, neophodnog u industrijskim zadacima koje čovek ne može samostalno sprovesti. Ovaj rad prikazuje strukturu i način funkcionisanja sistema hijerarhijskog distribuiranog upravljanja, organizovan na tri operativna nivoa: a) strateškom, b) taktičkom i c) izvršnom. To je omogućeno zahvaljujući korišćenju arhitekture oblak-računarskog sistema. Hardver upravljačkog sistema uspostavljen je na tri nivoa: fizičkom, komunikacionom i aplikativnom. Zahvaljujući distribuiranoj arhitekturi, sistem oblaka omogućava distribuirano izvršavanje pojedinačnih upravljačkih zadataka što rezultira uravnoteženim opterećenjem multiprocesorskog sistema i smanjenjem vremena odziva na stimulse iz fizičkog okruženja robota.

**Ključne reči**—upravljanje u oblaku, kolaborativni roboti, distribuirana inteligencija, pametna proizvodnja, Industrija 4.0

## I. UVOD

Od kada je kompanija „General Motors” u Detroitu (SAD) 1961. napravila prvog industrijskog robota za manipulaciju (UNIMATE) i koristila ga u automobilske industriji za sklapanje delova, timovi naučnika, inženjera i tehnologa razmišljali su o tome kako da automatizuju ljudske manipulacione i kognitivne veštine što je više moguće i kako da robote učine bezbednim i kolaborativnim. Prethodne generacije industrijskih robota za manipulaciju, kao deo svojih kontrolera, koristile su algoritme za “imitaciju” ljudskih manipulativnih veština uz korišćenje petlji povratne sprege po poziciji odnosno brzini i po sili odnosno momentu. Ovo je

Jovan Šumarac – Centar za Robotiku, Institut “Mihajlo Pupin”, Univerzitet u Beogradu, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (e-mail: jovan.sumarac@pupin.rs).

Aleksandar Rodić – Centar za Robotiku, Institut “Mihajlo Pupin”, Univerzitet u Beogradu, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (e-mail: aleksandar.rodic@pupin.rs).

Ilija Stevanović – Centar za Robotiku, Institut “Mihajlo Pupin”, Univerzitet u Beogradu, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (e-mail: ilija.stevanovic@pupin.rs).

uglavnom bilo dovoljno za obavljanje tehnoloških operacija u okviru proizvodnih procesa u visoko tehnološki strukturiranim infrastrukturnim okruženjima – tehnološkim proizvodnim linijama. Međutim, takav pristup je imao relativno nizak nivo fleksibilnosti i prilagodljivosti poremećajima i promenama u proizvodnim procesima.

Sa napretkom informacionih tehnologija, bežičnih komunikacija, “Interneta stvari”, senzorskih tehnologija i mašinske vizije, otvorene su nove perspektive automatizacije tehnoloških procesa tako što je industrijskim robotima omogućeno da, sa svojstvenom preciznošću i brzinom, ostvare sofisticirane attribute ljudske mikro-manipulativne i taktilne veštine na visokom nivou kognitivne percepcije i sposobnosti rasuđivanja [1].

Cilj ovog rada jeste da predstavi kako se ljudske veštine i znanje kvalifikovanih radnika mogu sticati, čuvati i koristiti u bazi podataka na sistemu oblaka (odnosno “Cloud” sistemu), odakle se ovi podaci mogu analizirati i koristiti za obuku (tj. za učenje veština) industrijskog humanoidnog robota u izvođenju različitih manipulativnih i kolaborativnih zadataka u saradnji sa ljudima. U tu svrhu razvijen je originalni dvoručni kolaborativni robotski sistem (industrijski humanoidni servisni robot) koji omogućava implementaciju i verifikaciju različitih algoritama za automatizaciju ljudskih manipulativnih i kognitivnih veština u proizvodnim procesima [2]. Originalni robotski sistem sa svim hardverskim i softverskim komponentama razvijen je u Centru za robotiku Instituta “Mihajlo Pupin”.

## II. INDUSTRIJSKI HUMANOID

### A. Mehanički dizajn prototipa robota

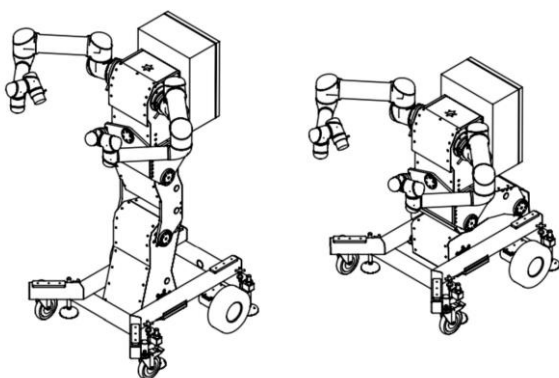
Industrijski humanoid je dvoručni (ili bi-manuelni) kolaborativni servisni robot namenjen industrijskim zadacima [3]-[7], koji po svojoj strukturi podseća na svoj biološki model – čoveka. U mehaničkom smislu industrijski humanoid ima sledeće module: (i) sistem podrške za sletanje montiran na mobilnu platformu (motorizovana kolica), (ii) segmentirani trup - torzo robota, (iii) dve industrijske robotske ruke sa odgovarajućim hvatačima (Sl. 1).

Humanoidni robot je montiran na motorizovana kolica sa diferencijalnim upravljanjem na par pogonskih (aktivnih) točkova. Kolica imaju i dva pomoćna (pasivna) točka, koja se okreću oko sopstvenih vertikalnih osa. Zahvaljujući takvoj strukturi, kolica robota imaju mogućnost da se kreću u tri koordinatna pravca: napred-nazad, levo-desno i da se okreću

oko sopstvene ose u opsegu od 0 do 360 stepeni. Nosivi sistem bimanuelnog robota je tehnička varijanta (imitacija) ljudskih nogu. Mehanizam za noge robota može se savijati oko tri ose. Jedna osa rotacije prolazi kroz skočni zglobov, druga osa kroz zglobov kolena, a treća kroz zglobov kuka. Na ovaj način se sinhronizovanim pokretima u pomenutim zglobovima može podesiti položaj (orijentacija) trupa humanoida u odnosu na površinu oslonca.

Gornji deo trupa robota (torzo) ima mogućnost savijanja oko sagitalnog pravca u frontalnoj ravni (levo-desno). Uz mogućnost promene nagiba trupa napred-nazad u sagitalnoj ravni (promenom konfiguracije nogu), ovo omogućava humanoidnom robotu da se prilagodi svom operativnom prostoru zadatka.

Kolaborativni dvoručni robot ima dve industrijske robotske ruke UR5 sa odgovarajućim hvatačima koje mu daju mogućnost različitih manipulacija objektima kao i fizičke interakcije sa okolinom. Takođe, svaka robotska ruka ima instaliran zglobovni senzor sile/momenta na završnom uređaju.



Sl. 1. 3D prototip modela industrijskog robota.

Visina ovog humanoida iznosi oko 175cm a njegov raspon ruku iznosi oko 2300 mm. Ideja iza projektovanja ovakvog sistema jeste da njegove dimenzije budu približne čovekovim kako bi robot mogao lako da zameni čoveka u određenim zadacima, ali i da bi mogao prirodno da obavlja zadatke u kojima postoji kolaboracija sa čovekom. Analiza njegovog radnog prostora pokazala je dobru manipulativnost ovog

sistema u oblastima zajedničkog radnog prostora obe robotske ruke, pogotovo u zonama ispred samog torzoa robota [8].

Na Sl. 1. može se videti i ormarić koji je okačen na robotski torzo kao svojevrsni “ranac”. U njemu se nalaze različite elektronske komponente neophodne za funkcionisanje celokupnog sistema (mikrokontroleri, uključujući i glavni mikrokontroler odnosno “mozak” sistema, zatim napajanja, bezbednosne sklopke, releji i dr.).

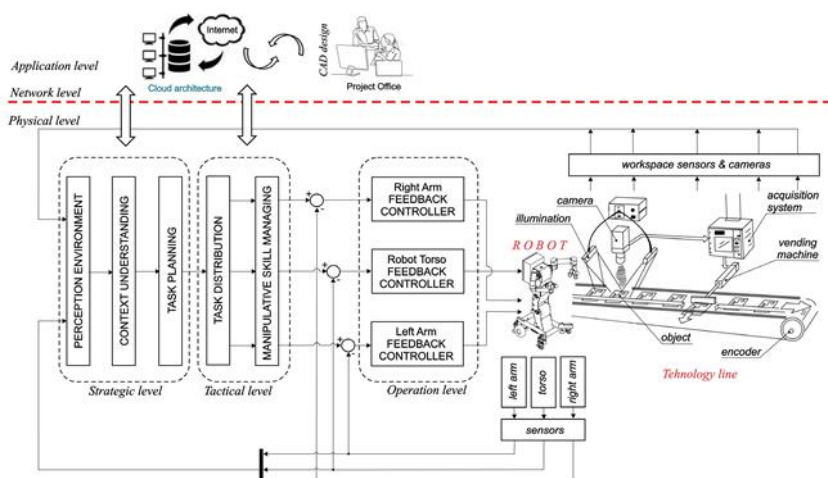
### B. Arhitektura hardvera kontrolera robota

Hardverska struktura celokupnog sistema upravljanja industrijskog servisnog robota prikazanog na Sl. 1 je projektovana kao distribuirana računarsko-senzorska mreža [9] koja funkcioniše na tri funkcionalna nivoa (Sl. 2): (i) fizički nivo, (ii) nivo mreže i (iii) aplikativni nivo.

Na fizičkom nivou, postoji robot sa pripadajućim senzorima i kamerama, poseban kontroler trupa robota, kao i nezavisni kontroleri robotskih ruku i pridruženih robotskih hvatača. Globalno posmatrano, to je prilično složena struktura dizajnirana da omogući specifične sposobnosti robota. Takođe na fizičkom nivou, u okruženju robota postoje odgovarajuće mašine alatke sa svojim upravljačkim jedinicama i na kraju ljudi (radnici) koji zajedno sa dvoručnim robotom čine deo tehnološkog procesa.

Mrežni, odnosno komunikacioni nivo hardverske strukture “Cloud” kontrole, zadužen je za brzu i efikasnu međusobnu komunikaciju između sastavnih komponenti robotske ćelije i odgovarajućeg tehnološkog procesa. Uloga mreže je da obezbedi pouzdan prenos informacija i senzorskih podataka do svih i od svih konstitutivnih elemenata sistema. Komunikacioni nivo dakle obezbeđuje umrežavanje robota u lokalnu računarsku mrežu (LAN) korišćenjem Wi-Fi pristupa ili GSM-GPRS modema (u slučaju informaciono strukturiranog okruženja) i povezivanje robota na Internet.

Na nivou aplikacije postoji nekoliko računara koji međusobno komuniciraju i koriste zajedničku bazu podataka. Svaki, pojedinačni računar ima strogo definisane zadatke. Jedan obrađuje podatke koji se odnose na karakteristike objekata (delova) i njima manipuliše, obrađuje podatke koji se odnose na mašine alatke preuzete iz okoline, njihove dimenzije, prostornu lokaciju itd. Drugi računar je zadužen za



Sl. 2. Blok dijagram hardverske strukture robotskog kontrolera industrijskog humanoida (levo). Sastavljeni prototip robota (desno)..

analizu, učenje i operacionalizaciju ljudskih manipulativnih i kognitivnih veština koje su karakteristične za tehnološke procese. Treći računar se bavi tehnikama i metodama formalizacije određenih industrijskih tehnoloških procesa (npr. obrada, montaža delova, fizička pomoć ljudskim radnicima, itd.) na način koji će biti razumljiv za mašinu (kontroler robota). Informacije koje se odnose na tehnološke operacije se uglavnom svode na podatke kojim redosledom i kojim alatima treba izvršiti određene tehnološke operacije, na koji način, u kojoj tački uhvatiti objekat, kojom silom ili momentom, kojom brzinom to učiniti, itd.

Zadaci koji se obavljaju na računarima, koji su deo aplikativnog nivoa, u velikoj meri se oslanjaju na baze podataka u vezi sa aplikacijama koje su operativni domen industrijskog humanoida. Baze podataka sadrže informacije koje se odnose na geometrijske attribute objekata koji su predmet tehnološkog procesa, zatim informacije od interesa o tehnikama ljudskih veština karakterističnim za iskusne radnike (stručnjake) i informacije o fazama ili redosledu izvođenja pojedinih tehnoloških operacija i detalje o tome kako se one izvode sa specifičnim numeričkim indikatorima (kompozitna brzina, pozicija, sila, obrtni moment, itd.).

Ljudskim operaterima "Cloud" arhitektura omogućava daljinsko upravljanje robotom pomoću pametnog telefona sa Android aplikacijom ili standardnog PC računara sa odgovarajućom aplikacijom sa grafičkim korisničkim interfejsom. Ovo pretpostavlja Wi-Fi hot spot ili GSM-GPRS modem na robotu koji donosi dodatnu funkcionalnost daljinske komunikacije sa ovlašćenim pristupom i mogućnošću praćenja parametara sistema i/ili daljinskog prenosa slike i zvuka.

### III. UPRAVLJAČKI NIVOI

Za upravljanje dvoručnim kolaborativnim robotom prikazanim na Sl. 1, koristi se arhitektura upravljanja u oblaku (odnosno "Cloud" kontrola) prikazana na Sl. 2. Ova kontrolna konfiguracija podržava koncept takozvane hijerarhijski distribuirane kontrole implementirane na tri nivoa kontrole: (i) strateški, (ii) taktički i (iii) izvršni nivo. Svi navedeni nivoi upravljanja imaju precizno diferencirane kontrolne zadatke i postoji jasna podređenost operacija u sistemu.

#### A. Strateški nivo

Na strateškom nivou upravljanja definišu se globalni ciljevi, planiranje procesa, tehnološke operacije koje robot treba da obavlja samostalno ili u saradnji sa čovekom ili mašinom, kao i manipulativne i kognitivne veštine koje robot treba da demonstrira dok obavlja svoje aktivnosti, poštujući redosled tehnoloških operacija i bezbednosne standarde. Strateška kontrola koristi informacije dobijene na fizičkom nivou (Sl. 2) kao i iz odgovarajuće baze podataka. U bazama podataka se čuvaju informacije relevantne za robota industrijske usluge koje se odnose na prepoznavanje geometrije objekata, informacije o fazama i tehnikama izvođenja određenih tehnoloških procesa u koje je robot uključen i na kraju informacije o manipulativnim i kognitivnim veštinama pretvorene u formu razumljivu mašini

(robotski kontroler). U bazi se čuvaju i podaci o bezbednosnim standardima za obavljanje određenih robotskih zadataka, budući da je industrijski humanoid namenjen za kolaborativni rad sa ljudima. Takođe, na nivou strateške kontrole vodi se računa o ispunjavanju standarda kvaliteta izvođenja tehnoloških operacija. Rezultati ovog nivoa kontrole su jasno definisani ciljevi visokog nivoa i redosled ostvarivanja tehnološkog procesa, tehničko-tehnološka ograničenja, način izvođenja procesa, alati koji se koriste i odgovarajuće veštine, razvrstane na podciljeve koje treba postići na nižem, podređenom hijerarhijskom nivou – taktičkom.

#### B. Taktički nivo

Na nivou taktičke kontrole, kako sama reč kaže, definiše se taktika ostvarivanja skupa podciljeva dobijenih sa strateškog nivoa upravljanja. Na ovom nivou planira se postizanje skupa podciljeva kao što su planiranje putanje robotskih ruku (pozicija, orijentacija i brzina krajnjih efektora robota), sinhronizacija rada dve robotske ruke kako bi se izbegao sudar, definisanje referentne sile i momenta na hvataču robota, zatim, orijentisanje kamera u radnom prostoru zadatka, itd. Izlazni podaci sa nivoa taktičke kontrole predstavljaju referentne (tj. željene) vrednosti promenljivih koje predstavljaju ulaze za izvršni nivo upravljanja (na servo nivou).

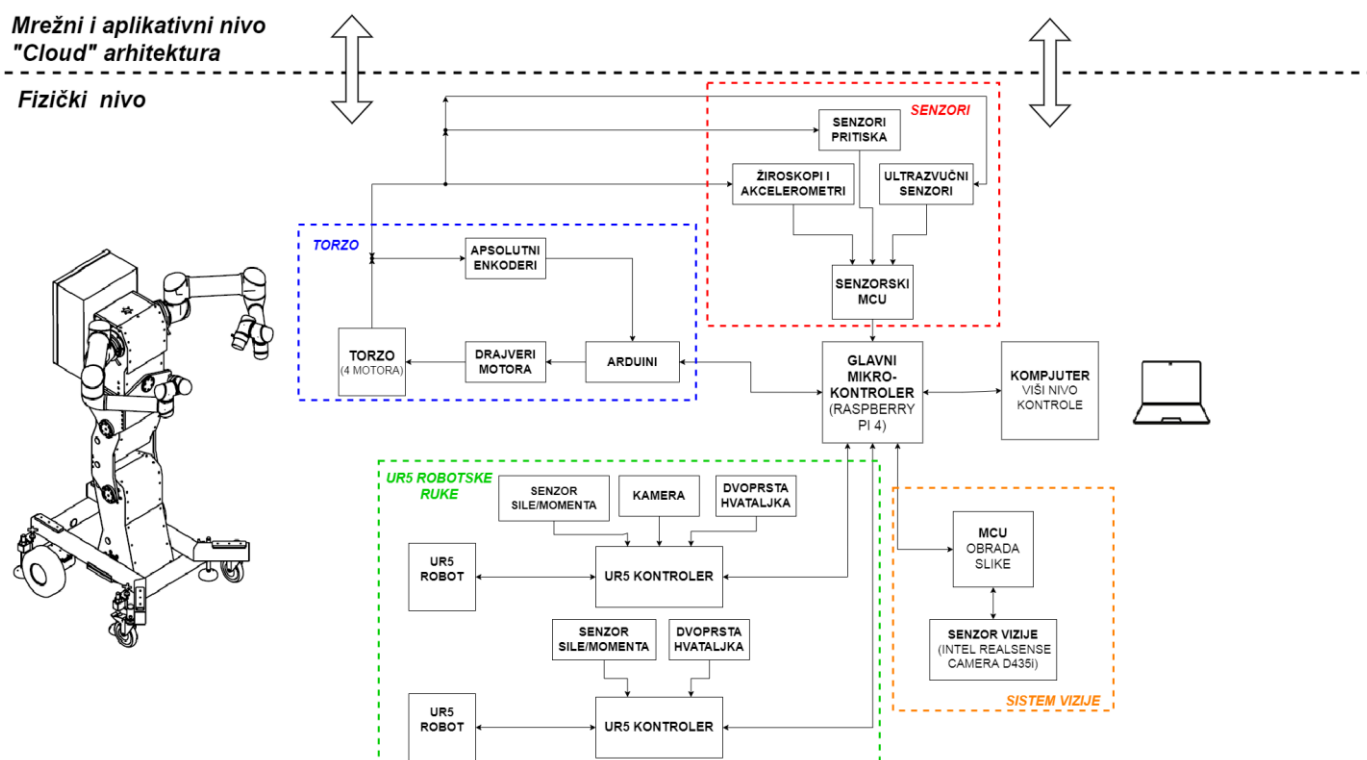
#### C. Izvršni nivo

Na izvršnom nivou upravljanja komanduje se radom servo pogona koji obezbeđuju izvršavanje određenih aktivnosti. Korišćenjem povratnih petlji po poziciji/orijentaciji, brzini, sili/momentu, na izvršnom nivou postiže se željeno kretanje sistema u skladu sa taktikom i strategijom izvršavanja procesa koji su određeni na višim nivoima systemske kontrole. Na izvršnom nivou, senzorne informacije i podaci senzora prikupljaju se sa robota i/ili iz njegovog fizičkog okruženja. Takođe se obavlja akvizicija slike i/ili video tokova iz sistema vizije robota za njihovo slanje na viši, taktički nivo upravljanja gde se vrši obrada tih signala. Dobijene povratne informacije su od velikog značaja na taktičkom nivou za vršenje neophodnih korekcija tehnike izvođenja procesa redefinisanjem referentnih vrednosti. Na ovaj način se obezbeđuje tok informacija odozgo nadole, kao i inverzni tok informacija odozdo prema gore od najvišeg nivoa upravljanja ka najnižem i obrnuto.

#### D. Upravljanje robotom na fizičkom nivou "Cloud" sistema

Na Sl. 3 prikazan je blok dijagram upravljanja dvoručnim kolaborativnim robotom. Upravljanje izvršnim nivoom se realizuje korišćenjem dva nezavisna industrijska kontrolera robotskih ruku UR5 koji se isporučuju sa svojim fabričkim kontrolerima zatvorenog tipa sa već realizovanim algoritamskim rešenjima za regulator položaja/brzine i regulator sile/momenta.

Torzo robota, robotske ruke i sistem vizije se nezavisno kontrolišu, dok se centralna mikrokontrolerska jedinica (MCU) koristi za sinhronizaciju celog upravljačkog sistema,



Sl. 3. Blok šema upravljačkog sistema razvijena na fizičkom nivou industrijskog servisnog robota upravljano "iz oblaka".

delegiranje zadataka, komunikaciju sa udaljenim operaterima, itd. Torzo robota (Sl. 2) ima četiri zgloba aktuirana DC motorima bez četkica koji se pokreću preko drajvera. Svaki od drajvera kontroliše nezavisni Arduino mikrokontroler. Na svaki motor montiran je rotacioni enkoder koji pruža informacije o trenutnoj ugaonoj brzini i položaju motora, koje Arduino koristi za kontrolu položaja motora. Arduino mikrokontroleri komuniciraju sa glavnim MCU putem CAN bus komunikacije velike brzine. Na torzo i kolica robota postavljeni su različiti senzori uključujući i senzore kontakta/pritiska, žiroskope i akcelerometre, ultrazvučne senzore, itd. Senzori pritiska su posebno važni jer se koriste za izračunavanje tačke nultog momenta (ZMP) mobilnog industrijskog humanoida kao indikatora stabilnosti. Ove informacije se koriste da bi se utvrdilo da li je bezbedno da torzo i ruke robota stignu u datu poziciju bez pada ili prevrtanja. Sirove informacije sa senzora se obrađuju na posebnoj mikroprocesorskoj jedinici, a potom se obrađeni podaci, po potrebi, CAN komunikacijom šalju glavnom MCU, koji ih koristi za kontrolne zadatke, mere bezbednosti, itd. Ruke robota UR5 su fizički montirane na priрубnicama koje se nalaze na vrhu torza. Priрубnice su zakrivljene pod uglom od oko 15 stepeni u odnosu na torzo robota jer se time povećava opseg korisnog radnog prostora ispred torzoa.

UR5 roboti su konvencionalne industrijske ruke sa 6 stepeni slobode. Svaka od robotskih ruku ima senzor sile/momenta i hvatač sa dva prsta koji je montiran na svom vrhu. Jedna od ruku takođe ima montiranu kameru na zglobu i ovo će biti glavna ruka u dvoručnim zadacima. Servo kontrola niskog nivoa zglobova ruku robota se vrši preko originalnih

UR5 kontrolera koji se isporučuju zajedno sa robotskim rukama. UR5 kontroleri komuniciraju sa MCU preko fizičkih veza (I/O signali sa MODBUS vezom), preko žičane (Ethernet) ili bežične (Wi-Fi pristup) mreže i preko ROS-a (Robot Operating System).

Sistem robotske vizije je važan kontrolni podsistem koji celokupnom sistemu obezbeđuje vizuelnu povratnu informaciju. Senzor vida (Intel RealSense D435i dubinska kamera) je montiran na vrhu torzoa. Njegova uloga je da obezbedi robotu mogućnost 3D vizije sa senzorom dubine. Takav sistem se koristi za opažanje robotskog okruženja, praćenje zadataka, izbegavanje fizičkih stacionarnih ili mobilnih prepreka itd. Kamera će biti povezana sa posebnom mikrokontrolerskom jedinicom koja će se koristiti za obradu slika primljenih sa kamere. Softver koji će se koristiti za procesiranje vizuelnih podataka sastoji se kako iz klasičnih algoritama kompjuterske vizije tako i iz algoritama dubokog učenja i neuralnih mreža za obradu i prepoznavanje slika. Ovaj mikrokontroler će takođe biti povezan na glavni MCU.

Glavna jedinica mikrokontrolera (Raspberry Pi 4 sa 8GB RAM-a) je sastavni deo kontrolnog sistema. Ovaj MCU komunicira sa mrežnim nivoom (slika 2), odakle prima informacije o referentnim zadacima robotskog sistema koje treba da izvrši. Takođe prima povratne informacije od svakog kontrolnog podsistema. MCU obrađuje sve ove informacije i sinhronizuje ceo sistem (torzo+2 ruke+2 hvatača+kamera), delegira zadatke svakom podsistemu i zaustavlja aktuatoru u slučaju opasnosti ili kvara. Komplementarni računar se može dodati glavnom MCU kao lokalni nadzorni sistem. Koristi se uglavnom kao pomoćno sredstvo za razvoj sistema

upravljanja, testiranje i verifikaciju rezultata rada zadataka.

#### IV. ZAKLJUČAK

U radu je predložena višestepena upravljačka arhitektura servisnog industrijskog kolaborativnog robota. Hijerarhijska distribuiranost ovog sistema dozvoljava najbolje iskorišćenje pojedinačnih kontrolnih podsistema kao i već postojećih kontrolera i stavlja fokus na delegiranje zadataka na manje procesorske jedinice i sinhronizaciju pojedinačnih delova sistema. Korak dalje u dizajniranju ovakvih sistema predstavlja implementacija "Cloud" arhitekture koja omogućava daljinsko upravljanje i nadzor nad sistemom, kao i čuvanje raznih ulaznih i izlaznih sistemskih podataka na serveru.

Dalji rad autora nastaviće se u ovom pravcu. Po finalnoj montaži celokupnog sistema radiće se eksperimentalna verifikacija različitih upravljačkih zadataka. Potom će gotov sistem biti pogodan za različita istraživanja u oblasti dvoručne manipulacije, kolaboracije čoveka i robota, inteligentnog hvatanja, robotske vizije i dr.

#### ZAHVALNICA

Razvoj prototipa kolaborativnog robota rezultat je bilateralnog R&D projekta pod nazivom „Razvoj i eksperimentalna verifikacija performansi mobilnog robota sa dve ruke za saradnju sa čovekom“ iz „Programa razvoja nauke i tehnologije – finansiranje zajedničkih istraživačko-razvojnih projekata“. R. Srbija i NR Kina“, 2017-2019.

#### LITERATURA

- [1] A. Rodić, I. Stevanović, M. Jovanović, „Smart Cyber-Physical System to Enhance Flexibility of Production and Improve Collaborative Robot Capabilities – Mechanical Design and Control Concept“, Proceedings of the 27th International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2018), In book: *Advances in Service and Industrial Robotics*, Eds. Nikos A. Aspragathos, Panagiotis N. Koustoumpardis, Vassilis C. Moulianitis, Part of the *Mechanisms and Machine Science* book series (Mechan. Machine Science, Vol. 67), pp. 627-639, 2018
- [2] A. Rodić, J. Šumarac, I. Stevanović, M. Jovanović, "Cloud-Enabled Bi-manual Collaborative Robot with Enhanced Versatility for Customized Production", Proceedings of the 30th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Futuroscope-Poitiers, France, pp. 240-249, June, 2021.
- [3] N. Kashiri et al., "CENTAURO: A Hybrid Locomotion and High Power Resilient Manipulation Platform," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1595-1602, April 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2896758.
- [4] M. Fuchs et al., "Rollin' Justin - Design considerations and realization of a mobile platform for a humanoid upper body," 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009, pp. 4131-4137, doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152464..

- [5] S. S. Srinivasa et al., "Herb 2.0: Lessons Learned From Developing a Mobile Manipulator for the Home," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 8, pp. 2410-2428, Aug. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2200561.
- [6] A. Rodić, B. Miloradović, S. Popić, S. Spasojević, B. Karan, "Development of Modular Compliant Anthropomorphic Robot Hand", In Book: *New Trends in Medical and Service Robots. Theory and Integrated Applications*, Series: *Mechanisms and Machine Science*, Springer Publishing House, Vol. 16, Pislá, D.; Bleuler, H.; Rodic, A.; Vaida, C.; Pislá, A. (Eds.), 2014, VIII, 238 p. 167, ISBN 978-3-319-01591-0, Due: September 30, (2013).
- [7] A. Rodić, B. Miloradović, S. Popić, Đ. Urukalo, "On developing lightweight robot-arm of anthropomorphic characteristics". In Book: *New Trends in Medical and Service Robots. Book 3*, Series: *Mechanisms and Machine Science*, Springer Publishing House, Vol. 38, Bleuler, H.; Pislá, D.; Rodic, A.; Bouri, M.; Mondada, F.; (Eds.), ISBN: 978-3-319-23831-9, Book ID: 332595\_1\_En, (2015).
- [8] J. Šumarac, K. Jovanović, A. Rodić, "Workspace Analysis of a Collaborative Bi-manual Industrial Robotic System" ROII.1, In Proceedings of the IcETAN2021, Banja Vrućica, Bosnia and Herzegovina, September, (2021)
- [9] A. Rodić, M. Jovanović, S. Popić, G. Mester, "Scalable Experimental Platform for Research, Development and Testing of Networked Robotic Systems in Information Structured Environments". In *Proceedings of the IEEE SSCI2011, Symposium Series on Computational Intelligence, Workshop on Robotic Intelligence in Information Structured Space*, pp. 136-143, Paris, France, (2011).

#### ABSTRACT

This paper presents a multi-level cloud-enabled control architecture of a bi-manual collaborative humanoid service robot. This architecture is designed to perform robotic tasks that require the implementation of advanced manipulative and cognitive skills within the industrial manufacturing process. The control structure of the robot is designed to meet the needs of the so-called smart production within Industry 4.0, enough to enable and facilitate the cooperation of man and robot as a complementary intelligent system, necessary in industrial tasks that humans cannot perform independently. This paper presents a hierarchically distributed management system organized into three operational levels: a) strategic, b) tactical and c) executive, enabled by the use of cloud architecture. The hardware of the control system is established on three levels: physical, communication and application. Thanks to the distributed architecture, the cloud system enables distributed execution of individual control tasks, which results in a balanced load on the multiprocessor system and reduced stimulus response time from the physical environment of the robot.

#### **Hierarchically Distributed Control of Collaborative Industrial Humanoid Robot Supported by Cloud-Computing Architecture**

Jovan Šumarac, Aleksandar Rodić, Ilija Stevanović