Izrada kapacitivnog senzora za "umjetnu kožu" robota

Pavičić, Morana

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:235:128449

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Morana Pavičić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Bojan Jerbić, dipl. ing.

Student:

Morana Pavičić

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Bojanu Jerbiću na savjetima tijekom izrade završnog rada te asistentu Josipu Vidakoviću na pomoći tijekom istraživanja i realizacije rada.

Također dugujem veliku zahvalnost obitelji na poticaju i neizmjernoj podršci.

Morana Pavičić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Morana Pavičić** Mat. br.: 0035200575

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **IZRADA KAPACITIVNOG SENZORA ZA "UMJETNU KOŽU" ROBOTA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DEVELOPMENT OF CAPACITIVE SENSOR FOR THE ROBOT'S ARTIFICIAL SKIN**

Opis zadatka:

Kapacitivni senzori mjere električni kapacitet između dvaju ili više vodiča u dielektričnom okruženju, obično u zraku ili tekućini. Kako je ljudsko tijelo električni vodič, dodirivanjem površine senzora mijenja se elektrostatsko polje, što je mjerljivo kao promjena kapaciteta. Na ovom principu moguće je razaznati ljudski dodir kao i neposrednu blizinu čovjeka. U sklopu rada potrebno je korištenjem postojećeg kapacitivnog senzorskog elementa razviti i izraditi senzorski sustav koji će industrijskom robotu omogućiti interakciju s čovjekom. Na temelju registriranog dodira ili blizine čovjeka robotu, isti treba biti u stanju prilagoditi svoju brzinu ili u potpunosti prekinuti svoje gibanje u bilo kojem trenutku rada. Potrebno je ispitati različite veličine osjetilnih elektroda, načine ožičenja te primijeniti različite načine filtriranja signala sa odgovarajućim filtracijskim parametrima, kako bi se postiglo vremenski stabilna detekcija prisutnosti čovjeka. Za razvijeno rješenje provesti laboratorijsku verifikaciju na jednom od robota u Laboratoriju za projektiranje izradbenih i montažnih sustava.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Bojan Jerbić

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1. UVOD ... 1
1.1. Osjetilo dodira ... 2
1.2. Postojeća rješenja ... 3
2. SASTAVNI DIJELOVI SUSTAVA ... 5
2.1. Senzori ... 5
2.1.1. Kapacitivni senzor (MPR121) ... 5
2.1.2. Senzor blizine (VCNL4010) ... 6
2.1.3. Osjetilna jedinica („stanica kože“ robota) ... 6
2.2. Mikroračunalo i robot ... 7
2.2.1. Mikroračunalo (Arduino UNO) ... 7
2.2.2. Robot (Universal Robots UR5) ... 8
2.3. Ostali dijelovi ... 11
3. POVEZIVANJE SASTAVNIH DIJELOVA ... 12
3.1. Senzori i mikroračunalo ... 12
3.2. Mikroračunalo, sklopnici i robot ... 12
4. NAČELO RADA ... 14
4.1. Komunikacija s robotom – *Ethernet Shield* ... 14
4.2. Komunikacija s robotom – digitalni signali ... 15
4.3. Detaljan prikaz procesa ... 16
4.3.1. Komunikacija među komponentama ... 17
4.3.2. Fizička interakcija čovjeka i robota ... 20
5. ZAKLJUČAK ... 26

POPIS SLIKA

Slika 1. Interakcija čovjeka i robota [1] ... 1
Slika 2. Vrste osjetnih stanica ... 2
Slika 3. Raspored senzora [2] ... 3
Slika 4. Fleksibilni modul s dvanaest taksela [3] ... 4
Slika 5. Senzorska pločica MPR121 [4] ... 6
Slika 6. Senzorska pločica VCNL4010 [5] ... 6
Slika 7. Model sustava konstruiran u programu *SolidWorks* ... 7
Slika 8. Arduino UNO [6] ... 7
Slika 9. Roboti proizvođača *Universal Robots* [7] ... 8
Slika 10. Usporedba karakteristika UR robota [8] ... 9
Slika 11. Upravljačka konzola UR robota [9] ... 10
Slika 12. Industrijski robot osiguran kavezom [10] ... 10
Slika 13. Kolaborativni UR robot [11] ... 10
Slika 14. a) *Breadboard*, b) Sklopnik JZC-11F, c) Žice ... 11
Slika 15. Prikaz spajanja senzora na mikroračunalo ... 12
Slika 16. Sklopnik LMR2-5D ... 13
Slika 17. Prikaz spajanja sklopnika na mikroračunalo i robot ... 13
Slika 18. Komunikacija unutar sustava – Arduino mrežni štit ... 14
Slika 19. Rapored električnog sučelja unutar upravljačke jedinice [12] ... 16
Slika 20. Komunikacija unutar sustava - digitalni ulazi ... 16
Slika 21. Funkcije mikroračunala koje čine izvršni program ... 18
Slika 22. Knjižnice (*libraries*) ... 18
Slika 23. Inicijalizacija postavki ... 19
Slika 24. Promjena stanja DO na temelju udaljenosti od senzora ... 20
Slika 25. Osjetilni modul montiran na robotsku ruku (1) ... 21
Slika 26. Osjetilni modul montiran na robotsku ruku (2) ... 21
Slika 27. Stanja digitalnih ulaza robota ... 22
Slika 28. Naredbe: a) *Thread*, b) *If* [13] ... 24
Slika 29. Dodjeljivanje posebnih uloga digitalnim ulazima [14] ... 25

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kombinacije stanja digitalnih ulaza 22

SAŽETAK

Čovjek u današnje vrijeme sve više teži automatizaciji i robotizaciji u svim područjima djelatnosti. Iz Tri zakona robotike proizlazi kako je robotski prioritet ne naštetiti čovjeku, što je od iznimne važnosti s obzirom na to da u mnogim procesima robot još uvijek nije u potpunosti autonoman te zahtijeva interakciju s čovjekom. Kontinuiranim razvojem modela interakcije pojednostavljuju se većinom složeni zadaci te se omogućuje intuitivno zadavanje zadataka. Cilj ovog rada je razvoj jednog takvog modela korištenjem jednostavnog sustava senzora koji predstavlja jednu stanicu „umjetne kože“ robota, a temelji se na vanjskim poticajima mjerenim pomoću dvije vrste senzora – kapacitivnog te senzora blizine. Spomenuti sustav senzora spojen je na Arduino Uno mikroračunalo koje je spojeno na robot. Na temelju ulaza (taktilnog podražaja) robot u konačnici reagira odgovarajućim pokretima.

Ključne riječi: interakcija čovjeka i robota, umjetna koža robota, sustav senzora

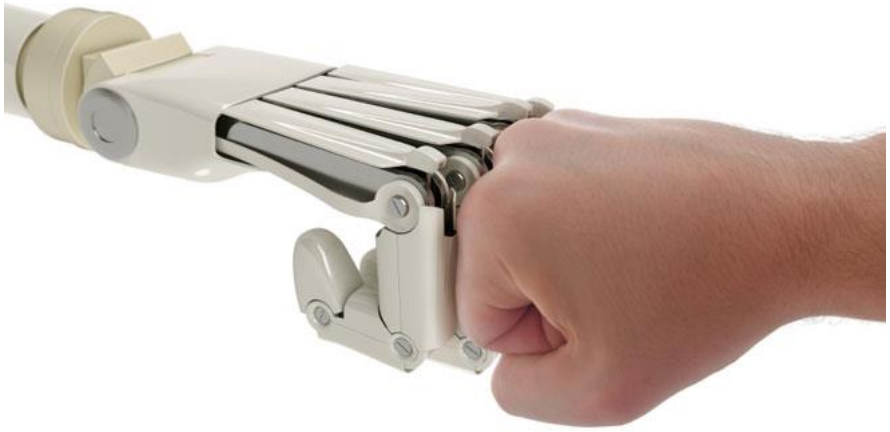
SUMMARY

Humans today aspire to incorporate automation and robotics in every field of activity. In accordance with the Three Laws of Robotics, robot's priority is not to harm the human operator in any way. This is of utmost importance given that in the majority of processes robot is still not fully autonomous and requires interaction with human operator. With continuous development of human-robot interaction models, many complex tasks are simplified and made more intuitive. The goal of this paper is to develop one such model using a simple sensory system that represents a single cell, based on external stimuli measured by two types of sensors – capacitive and proximity sensor. The aforementioned sensory system is connected to the Arduino Uno microcontroller which is connected to the robot. Based on inputs (external human stimulation), the robot ultimately responds in appropriate movements.

Key words: human-robot interaction, artificial robotic skin, sensors

1. UVOD

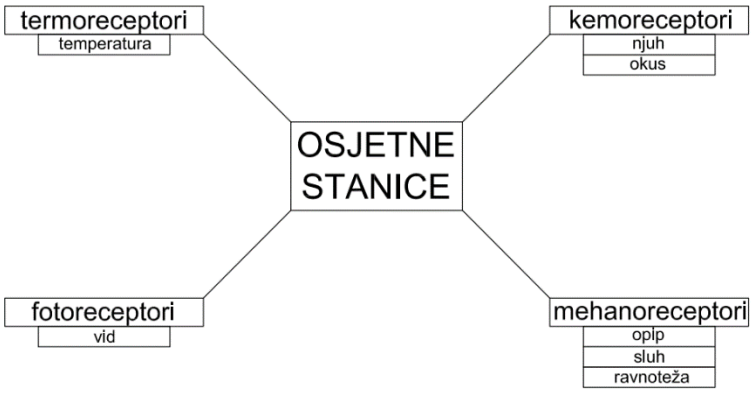
U današnje vrijeme tehnologija je uključena u svaki dio ljudskog života. Svakodnevno se razvijaju metode ljudske interakcije s tehnologijom, čime raste i složenost zadataka. Takva uzročno-posljedična veza zahtijeva kontinurano unaprjeđenje sustava zbog čega i vještine korisnika postaju sve kompleksnije, a time i traženije. Sve sposobniji strojevi omogućuju smanjenje grešaka pri obavljanju zadataka, povećavaju produktivnost te uvelike olakšavaju čovjeku za kojeg su takvi zadaci monotoni i umarajući. Zbog potrebe za naprednom tehnologijom koja poboljšava kvalitetu života i paradoksalno komplicira istu, neizbježno je pojednostaviti problem interakcije na način da se korisniku omogući intuitivno jasno upravljanje. Kontinuiranim razvojem na području senzorike otvara se mogućnost sve učestalije i kvalitetnije suradnje ljudskog operatera s robotom. Pravilnim iskorištavanjem ljudskih kvaliteta koje robot ne posjeduje, i obrnuto, tehnologija je sve bliže idealnoj simbiozi koja rezultira maksimalnom kvalitetom i minimalnim gubicima u obliku troškova i vremena. Temelj ovog istraživanja je taktilna uputa zadana robotu putem jedne vrste senzora te blizinska zadana putem druge. Riječ je o kapacitivnom senzoru i o senzoru blizine, a predstavljeni su kao jednostavna jedinica „kože“ robota prikladna za ostvarenje ranije spomenute intuitivne interakcije.



Slika 1. Interakcija čovjeka i robota [1]

1.1. Osjetilo dodira

Čovjek koristi osjetila za prikupljanje informacija iz okoline. Percepcija i integracija tih informacija omogućuju mu preživljavanje. Kao što slika 2. prikazuje, postoji nekoliko vrsta osjetnih stanica – kemoreceptori (njuh, okus), mehanoreceptori (opip, sluh, ravnoteža), termoreceptori (temperatura) i fotoreceptori (vid). Da bi robot i u najmanjoj mjeri postigao autonomiju, neophodno je da percipira sebe i svoju okolinu. Po uzoru na prirodu raznim se mjernim uređajima i sustavima nastoji oponašati način na koji čovjek kao najnaprednije biološko biće percipira okolinu te prikuplja i obrađuje informacije. Nije teško zamijetiti da je većina spomenutih osjetila već na neki način, primitivan ili napredan, implementirana u robotske sustave. S obzirom na to da se o svakom spomenutom osjetilu i njegovoj implementaciji u robotici može napisati zaseban rad, ovdje će fokus ostati na osjetilu dodira, što je i predmet rada.



Slika 2. Vrste osjetnih stanica

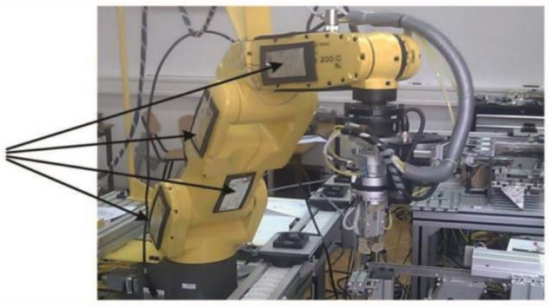
Dodirom se prikuplja jako velika količina podataka na temelju kojih se odvija svakodnevna ljudska socijalna interakcija. Kada bi dodir bio izostavljen, svaki bi se sustav oslanjao isključivo na vizualne podražaje, čime se gubi velika količina informacija koje su od velike važnosti. Kao odraz toga, ovaj rad teži implementaciji takvog sustava koji će na intuitivan i čovjeku prirodan način omogućiti upravljanje i zadavanje instrukcija robotu. Kada je riječ o tehnološki potpomognutim zadacima, ljudskom operateru je od velike pomoći oslanjanje na vlastitu intuiciju jer to ne iziskuje naprednu edukaciju i ubrzava proces učenja.

1.2. Postojeća rješenja

Taktilno prepoznavanje strateško je za provedbu sigurnih operacija robota koji su u interakciji s ljudima i predmetima. Kod uobičajenih robotskih zadataka (npr. uzmi-stavi operacije) gdje je interakcija očekivana ili planirana na određenim mjestima na robotu, potrebni parametri poput sile i momenta uspješno su usvojeni. S druge strane napredni robotski sustavi, npr. humanoidni roboti, zahtijevaju sposobnost kontroliranja složenijih oblika interakcije poput manipulacije i hvatanja čitavom šakom ili rukom. Prilikom izvođenja takvih operacija mjesto i karakteristike kontakta nisu predvidive i modelirane unaprijed. Iz tih je sigurnosnih razloga razvoj umjetne kože od iznimne važnosti. Potrebno je spomenuti da rad na ovakvom, zasad još uvijek nedovoljno istraženom i usvojenom sustavu, predstavlja mnoge tehničke izazove: prilagodba zakrivljenom robusnom tijelu robota, pouzdanost mjerenja, mogućnost podnošenja mnogih kontaktnih ciklusa te, konačno, jednostavnost i isplativost proizvodnje.

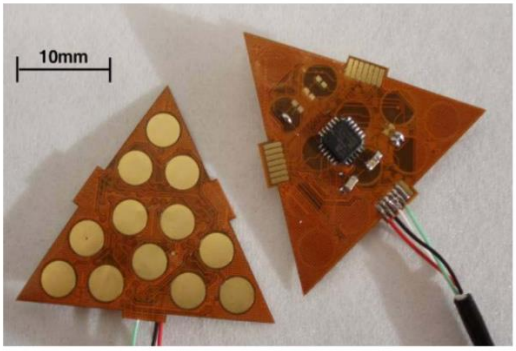
Razvoj umjetne kože robota sve je češći predmet znanstvenih radova i moguće je naći razna rješenja. Razvojem tehnologije i implementacijom raznovrsnih senzora čovjek se sve više približava rješenju koje postaje nalik ljudskoj koži i sadrži sve više „osjetnih stanica“. U proteklih su nekoliko godina napravljeni različiti pokušaji rješavanja problema u razvoju sustava „kože“ robota.

Jedan primjer koristi sličan princip onome koji će biti opisan u ovom radu. Na robot je montirano dvanaest taktilnih senzora spojenih na kapacitivni senzor. Dodir bilo kojeg od tih senzora ili kombinacija dodira rezultira određenim ponašanjem i vrlo intuitivnim modelom interakcije. Ovaj model omogućuje intuitivno prebacivanje iz automatskog načina rada u ručni, kao i kretanje u skladu s aktivnim senzorima [1]. Slika 3. daje prikaz rasporeda spomenutih senzora po robotskoj ruci.



Slika 3. Raspored senzora [2]

Još jedan, malo složeniji primjer, uključuje prekrivanje cijelog humanoidnog robota taktilnim modulima. Pruža mjerenje pritiska te oblikuje informacije o kontaktu između površine robota i okoliša. Svaki senzor ima dvanaest kapacitivnih dodirnih točaka, ima trokutasti oblik i sadrži fleksibilni supstrat u svrhu prilagodbe glatkim zakrivljenim površinama [2]. Na slici 4. vidljiv je jedan spomenuti modul.



Slika 4. Fleksibilni modul s dvanaest taksela [3]

Kao što će u daljnjem tekstu biti detaljnije opisano, na temelju proučavanih radova i dostupne opreme zamišljen je i realiziran jedan jednostavan sustav senzora koji na temelju podražaja reagira na određeni način. Iako je uporaba vizijskih sustava najzastupljenija kada je u pitanju interakcija čovjeka i robota, fizička interakcija nipošto ne smije biti izostavljena. Razlog tomu je značaj dodira u svakodnevnim socijalnim interakcijama, kao i ljudska navika da na taj način komuniciraju i obavljaju zadatke, bili oni jednostavni ili složeni.

2. SASTAVNI DIJELOVI SUSTAVA

2.1. Senzori

S obzirom na to da se ovo, kao i druga spomenuta istraživanja, temelji na suradnji robota i čovjeka, potrebno je za to odabrati odgovarajuće komponente. Ovo tehničko rješenje koristi dvije gotove senzorske pločice – senzor blizine i kapacitivni senzor osjetljiv na dodir. Osim gotovih komponenti razvijen je i kapacitivni senzor kao fleksibilna dvoslojna stanica „kože“, a sastoji se od gumene podloge i vodljive tkanine. Gumena je podloga neophodna jer služi kao izolator između vodljive tkanine i površine robota. Detaljniji opis pojedinih senzora dan je u nastavku.

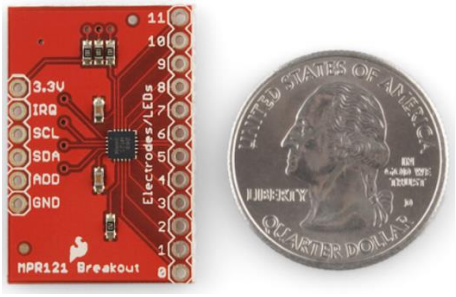
2.1.1. Kapacitivni senzor (MPR121)

Osnovni princip rada kapacitivnog senzora zasniva se na dva ili više vodiča između kojih se nalazi dielektrični (izolacijski) materijal, a grade kondenzator kapaciteta:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad \textbf{(1)}$$

pri čemu je S površina ploča, d razmak, ε_r relativna dielektična konstanta te ε_0 dielektična konstanta vakuuma.

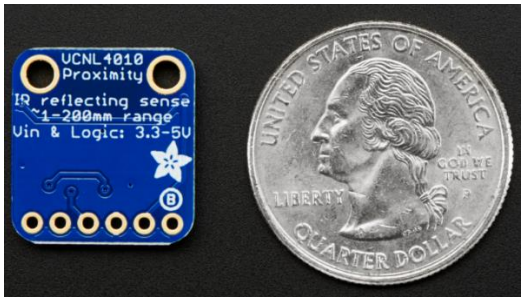
S obzirom na to da je ljudsko tijelo vodič, pri dodiru sa senzorom javlja se promjena kapaciteta te se na taj način opaža prisutstvo čovjeka. Dio senzora MPR121 koji mjeri promjenu kapaciteta je crni čip na sredini pločice, a može se vidjeti na slici 5. Potrebno je napajanje od 3.3 V do 5 V što ovaj senzor čini idealnim za potrebe ovog zadatka s obzirom na to da je korišteno Arduino mikroračunalo. Elektroda senzora vrlo je jednostavne konstrukcije – sadrži izolacijski sloj od gumene pjene i vodljivu tkaninu koja je žicom spojena na kapacitivni senzor. Izolacijski je sloj neophodan radi ispravnog rada senzora (moguće je prisutstvo smetnji polja koja nastaju u samom robotu).



Slika 5. Senzorska pločica MPR121 [4]

2.1.2. Senzor blizine (VCNL4010)

Senzor blizine VCNL4010 radi na principu mjerenja vremena putovanja svjetlosti. Koristi infracrvenu LED diodu koja emitira svjetlost, a njenim odbijanjem od predmeta dobiva se udaljenost istog. Kao i MPR121, ovaj je senzor idealan za korištenje u projektima koji koriste Arduino mikroračunalo. VCNL4010 namijenjen je za udaljenosti do 200 mm, što ga čini optimalnim izborom u radovima koji zahtijevaju opažanje ljudske ruke ili prepreka (npr. za sprječavanje sudara robota i zida). Iako se u primjeni pokazalo da je senzor najpreciznij na udaljenostima do 150 mm, to ga ne čini manje prikladnim izborom s obzirom na zahtjeve zadatka. Senzorska pločica također sadrži i ambijentalni svjetlosni senzor, a prikazuje ju slika 6.

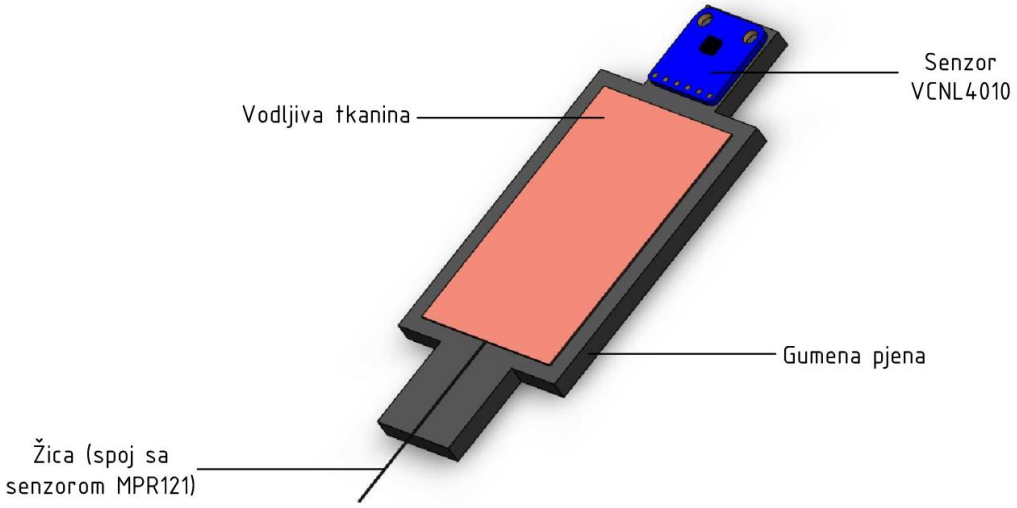


Slika 6. Senzorska pločica VCNL4010 [5]

2.1.3. Osjetilna jedinica („stanica kože“ robota)

Kao što je ranije spomenuto, cilj ovog rada je sastaviti u cjelinu navedene elemente u svrhu postizanja sustava nalik stanici kože. Korištenjem dostupne opreme kreiran je osjetilni modul koji omogućuje opažanje dodira, kao i blizine unutar dva različita raspona. Sastavni dijelovi

modula su gumena pjena kao izolator, obostrano ljepljiva traka, vodljiva tkanina, senzori i žice. Inicijalni model sustava konstruiran je u programu *SolidWorks*, a detaljno ga prikazuje slika 7.



Slika 7. Model sustava konstruiran u programu *SolidWorks*

2.2. Mikroračunalo i robot

2.2.1. Mikroračunalo (Arduino UNO)

Arduino je elektronička platforma otvorenog koda (*open-source*) koja se temelji na jednostavnom sklopovlju i programskoj podršci. Zahvaljujući lako dostupnim projektima korisnika i njihovoj pristupačnosti, Arduino se koristi u brojnim radovima i primjenama. Slika 8. prikazuje Arduino UNO mikroračunalo.



Slika 8. Arduino UNO [6]

Arduino UNO temelji se na ATmega328P mikroračunalu. Ima četrnaest digitalnih ulaza/izlaza te šest analognih ulaza. Jednostavno se spaja na računalo pomoću USB kabela, a moguće ga je napajati i baterijom. Pomoću upravljačkog sklopa i adekvatnog programa obrađuju se podaci koji se šalju na računalo koje zatim upravlja robotom.

2.2.2. Robot (Universal Robots UR5)

Sve robotske ruke proizvedene od danskog proizvođača Universal Robots razvijene su u svrhu kolaborativne robotike te za sve vrste zadataka, bez obzira na kompleksnost njihovih zahtjeva. Proizvode robote kao napredne alate kojima se mogu koristiti sve razine osoblja kako bi se povećala produktivnost te smanjila opasnost od ozljeda. Korištenjem robota može se automatizirati i pojednostaviti ponavljajuće ili potencijalno nesigurne procese kako bi se osoblje moglo dodijeliti poslovima koji im pružaju nove izazove. Universal Robots u ponudi ima tri veličine industrijskih robota, a sve su vidljive na slici 9. Slika 10. prikazuje usporedbu karakteristika UR robota.



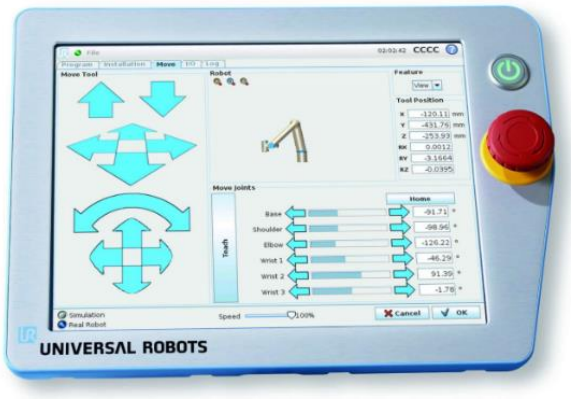
Slika 9. Roboti proizvođača *Universal Robots* [7]

	UR3	UR5	UR10
Performance			
Repeatability	±0.1 mm / ±0.0039 in (4 mils)	±0.1 mm / ±0.0039 in (4 mils)	±0.1 mm / ±0.0039 in (4 mils)
Ambient temperature range	0-50° *The robot can work in a temperature range of 0-50°C. At high continuous joint speed, ambient temperature is reduced.*	0-50°	0-50°
Power consumption	Min 90W, Typical 125W, Max 250W	Min 90W, Typical 150W, Max 325W	Min 90W, Typical 250W, Max 500W
Collaboration operation	15 advanced adjustable safety functions. TüV NORD Approved Safety Function Tested in accordance with: EN ISO 13849:2008 PL d	15 advanced adjustable safety functions. TüV NORD Approved Safety Function Tested in accordance with: EN ISO 13849:2008 PL d	15 advanced adjustable safety functions. TüV NORD Approved Safety Function Tested in accordance with: EN ISO 13849:2008 PL d
Specification			
Payload	3 kg / 6.6 lbs	5 kg / 11 lbs	10 kg /22 lbs
Reach	500 mm / 19.7 in	850 mm / 33.5 in	1300 mm / 51.2 in
Degrees of freedom	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints
Programming	Polyscope graphical user interface on 12 inch touchscreen with mounting	Polyscope graphical user interface on 12 inch touchscreen with mounting	Polyscope graphical user interface on 12 inch touchscreen with mounting

Slika 10. Usporedba karakteristika UR robota [8]

UR5 ima maksimalnu korisnu nosivost od 5 kg, na što upućuje broj u imenu robota. Namijenjen je za automatizaciju procesa u kojima sudjeluju predmeti manjih težina – izuzimanje i odlaganje predmeta te razna ispitivanja. Robotska ruka je srednje veličine, jedostavna za programiranje i postavljanje. Ima šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja (šest revolutnih zglobova), a radijus dosega iznosi 850 mm.

Upravljačka konzola sa sučeljem *PolyScope* omogućuje pisanje programa izravno na konzoli i dostatna je za izvršavanje većine zadataka poput paletiziranja i uzmi-stavi operacija. Upravljačku konzolu prikazuje slika 11.



Slika 11. Upravljačka konzola UR robota [9]

Ono što izdvaja UR robote od ostalih industrijskih robota je sigurnost i mogućnost rada u neposrednoj blizini radnika – automatski se zaustavljaju pri prekoračenju određene vrijednosti sile. Većina drugih robota korištenih u industriji mora biti osigurana kavezom (slika 12., odnosno 13.).



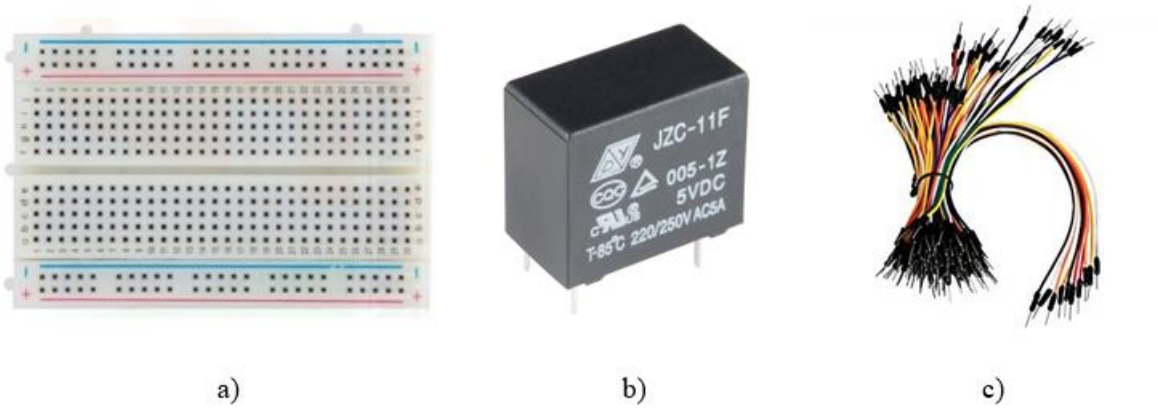
Slika 12. Industrijski robot osiguran kavezom [10]



Slika 13. Kolaborativni UR robot [11]

2.3. Ostali dijelovi

Osim prethodno navedenih, korištene su i sljedeće komponente neophodne za postizanje funkcionalnosti sustava: tri sklopnika (releja), eksperimentalna pločica za spajanje komponenti bez potrebe lemljenja (*breadboard*), USB kabel za spajanje Arduino mikroračunala s računalom te žice.

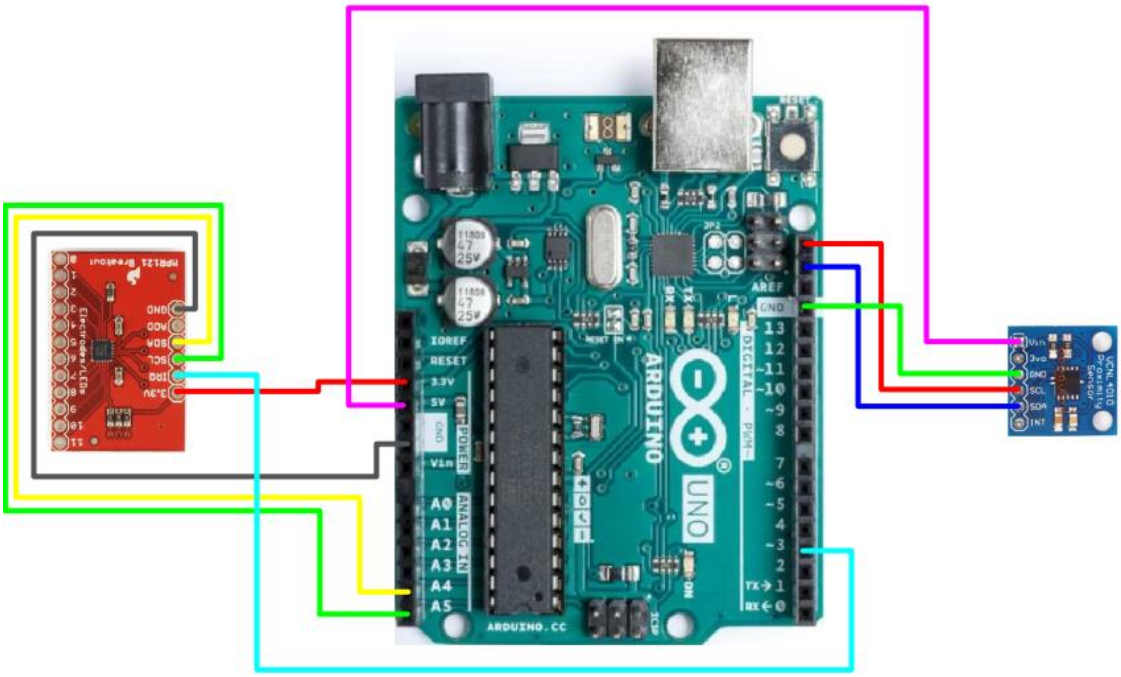


Slika 14. a) *Breadboard*, b) Sklopnik JZC-11F, c) Žice

3. POVEZIVANJE SASTAVNIH DIJELOVA

3.1. Senzori i mikroračunalo

Senzorske pločice spojene su na Arduino UNO mikroračunalo prema uputama proizvođača (slika 15.).



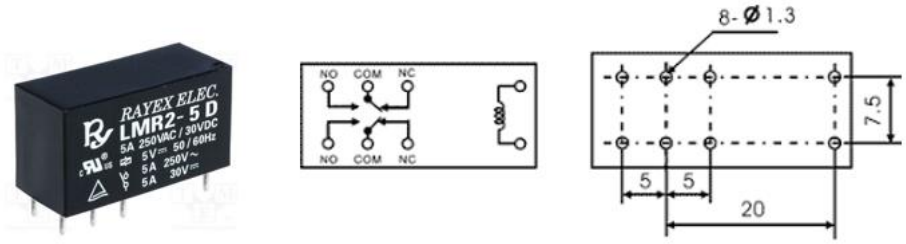
Slika 15. Prikaz spajanja senzora na mikroračunalo

Osim danog prikaza, važno je spomenuti da je na jednu od elektroda kapacitivnog senzora MPR121 spojena jedinica „kože“ robota s vodljivom tkaninom koja se koristi za očitavanje promjene kapaciteta (detekciju dodira). Senzor blizine VCNL4010 također je integriran u osjetilni modul te se na njemu izravno očitavaju promjene blizine objekata.

3.2. Mikroračunalo, sklopnici i robot

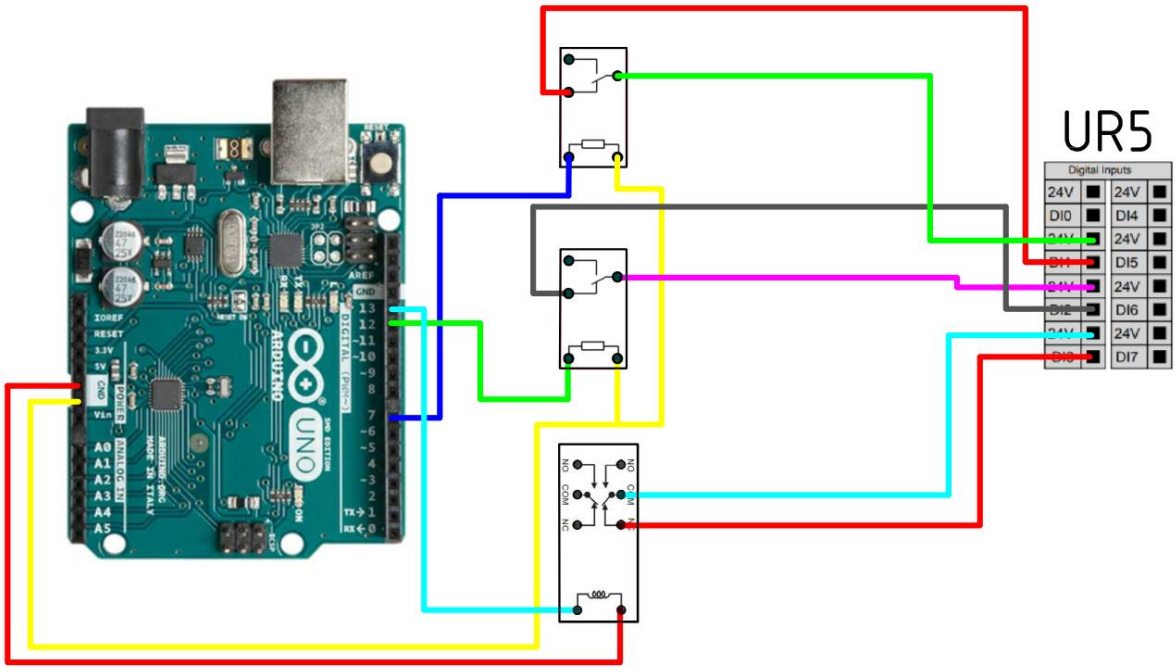
Pri realizaciji rješenja korištena su dva različita modela sklopnika (releja) – JZC-11F i LMR2-5D. Slika 14. b) prikazuje sklopnik JZC-11F, a slika 16. sklopnik LMR2-5D. Nije nužno spajanje različitih modela sklopnika, no ovakva implementacija pokazala se neophodnom zbog prisutstva tehničkih problema. Svrha ovih komponenti je električnom strujom u jednom krugu

uključivati ili isključivati električnu struju u drugome, a pojedinosti njihovoj ulozi u ovom radu dane su u idućem poglavlju.



Slika 16. Sklopnik LMR2-5D

Sklopnici su preko *breadboarda* spojeni na odgovarajući način s Arduino UNO mikroračunalom i robotom. Pojednostavljeni prikaz vidljiv je na slici 17. – digitalni ulazi (desno) odnose se na digitalne ulaze robota.



Slika 17. Prikaz spajanja sklopnika na mikroračunalo i robot

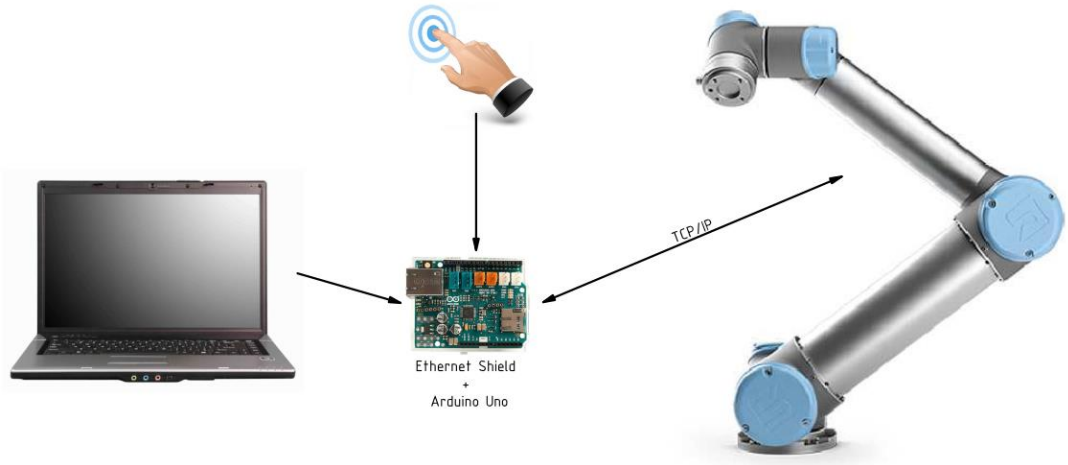
4. NAČELO RADA

4.1. Komunikacija s robotom – *Ethernet Shield*

Inicijalna ideja ovog rada bila je uspostavljanje komunikacije između Arduino upravljačkog sklopa i računala upotrebom TCP komunikacijskog protokola. Uspostava takve komunikacije zahtijeva korištenje Arduino mrežnog štita (*Ethernet Shielda*) koji omogućuje spajanje na mrežu koristeći TCP i UDP protokole. TCP/IP označava skupinu protokola koji omogućuju razmjenu podataka među računalima, a kratice potječu iz engleskog jezika - *Transmission Control Protocol* te *Internet Protocol*.

Svako računalo ima jedinstvenu IP adresu pomoću koje se informacije usmjeravaju do željenog odredišta. Na taj način aplikacija na poslužitelju „čeka“ poruku korisnika, a s obzirom na to da je korisničkoj aplikaciji poznata adresa na kojoj poslužitelj „čeka“, kao i njegov port, ona šalje zahtjev za uspostavu komunikacije – otvara tzv. *socket*. Na taj način odvija se komunikacija sve do trenutka zatvaranja *socketa* s obje adrese.

Uloga Arduino mikroračunala u ovom slučaju bila bi da posreduje primanjem i obradom signala koje šalju senzori te ih prosljeđuje u robot, a željeni ishod je određeno ponašanje robota na temelju programskog koda. Jednom učitani program na Arduinu ne mijenja se sve dok se ne učita novi, a za rad mu nije neophodno računalo, već samo napajanje u nekom od mogućih oblika – mikroračunalo se ponaša kao zasebno računalo. Smjer u kojem bi se komunikacija trebala odvijati unutar sustava prikazuje slika 18.



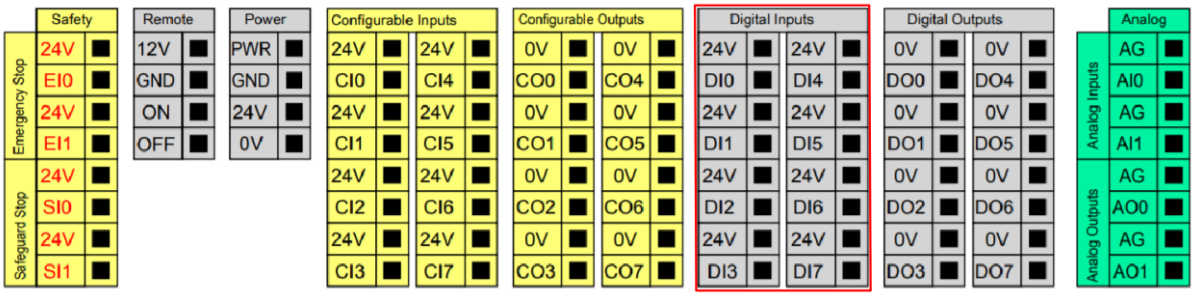
Slika 18. Komunikacija unutar sustava – Arduino mrežni štit

Većina projekata koji uključuju Arduino mikroračunalo i njegovo programiranje podrazumijeva znanje koje nije na ekspertnoj razini s obzirom na broj dostupnih materijala i *on-line* obuka. Također, za veliki broj aplikacija postoje već gotovi programi, što uvelike olakšava korisnicima prilikom izrade projekata te premješta fokus s uspostave sustava i osnovnih postavki na samu srž problema, odnosno rješenja. Za problematiku kojom se ovaj rad bavi nisu dostupni *on-line* materijali, već samo prijedlozi osnovnih funkcija koje bi mogle biti iskorištene u svrhu uspostavljanja komunikacije. To zahtijeva naprednu razinu znanja programiranja u programskom jeziku *C++*, odnosno u Arduinu.

S obzirom na prisutne probleme prilikom pokušaja uspostave veze između poslužitelja i korisnika, odnosno računala i robota, bilo je potrebno pronaći alternativno rješenje. Svi su parametri bili postavljeni u skladu sa zahtjevima spomenutih protokola, no uređaji nisu uspješno uspostavili komunikaciju. Eliminacijom svih mogućih grešaka može se zaključiti da je problem ili u sklopovlju (*hardwareu*), ili u glavnom kodu čija je svrha uspostava komunikacije i provjera iste. S obzirom na to da je otklanjanje grešaka unutar programa oduzimalo mnogo vremena bez pojave znakova napretka, javila se potreba za traženjem novog rješenja. Budući da je Arduino mrežni štit hardverski i/ili softverski zadužen za (neuspješno) spajanje s robotom, logičan zaključak bio je uklanjanje istog. Kada je riječ o načinima slanja signala na robot, nešto jednostavniji, no i dalje funkcionalan pristup svodi se na manipulaciju digitalnim ulazima robota na temelju različitih ulaznih signala sa senzora.

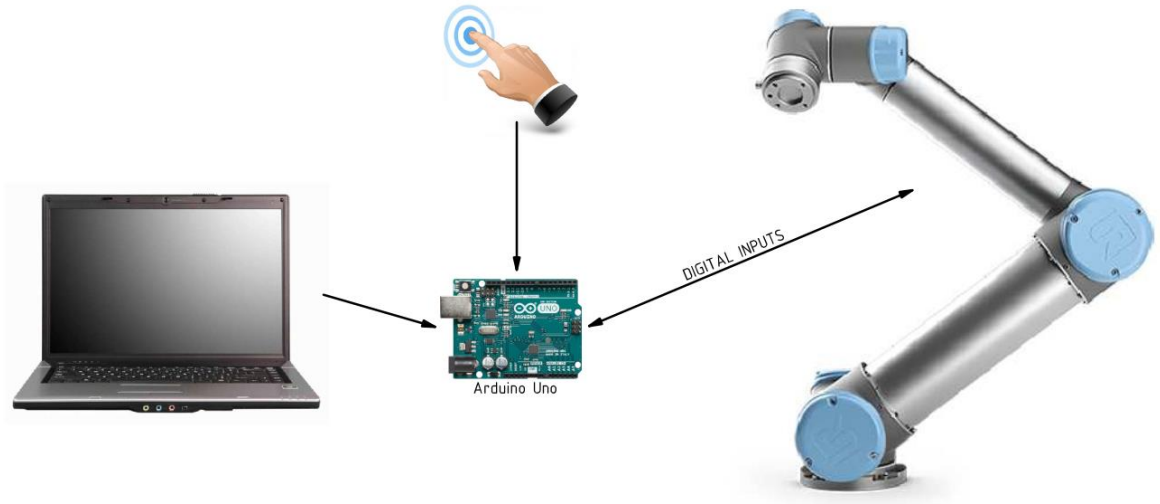
4.2. Komunikacija s robotom – digitalni signali

Upravljačka jedinica UR5 robota sadrži iznimno fleksibilno električno sučelje, što znači da se može koristiti za širok raspon opreme – od releja do industrijskih računala (PLC-a). Ta sposobnost robota da šalje i prima digitalne signale (DI – *Digital Input*; DO – *Digital Output*) omogućuje realizaciju alternativnog rješenja i potpuno novi pristup problemu. Ono što je bitno za ovaj rad su digitalni ulazi opće namjene – crni tekst na sivoj podlozi (slika 19.)



Slika 19. Rapored električnog sučelja unutar upravljačke jedinice [12]

Pomoću digitalnih signala upravljačka jedinica komunicira s drugim elementima sustava. U ovom radu spomenute elemente sustava predstavlja Arduino UNO mikroračunalo u spoju sa senzorima i sklopnicima koji pomoću adekvatnog programskog koda na jednostavan način komuniciraju s upravljačkom jedinicom robota. „Jednostavna“ komunikacija podrazumijeva vrlo intuitivan način upravljanja i slanja signala te nešto zahtjevniji programski kod, no i dalje jednostavniji od onog potrebnog za uspostavu prethodno spomenute TCP/IP komunikacije. Ova, alternativna, komunikacija unutar sustava prikazana je na slici 20.



Slika 20. Komunikacija unutar sustava - digitalni ulazi

4.3. Detaljan prikaz procesa

Kao što je vidljivo iz slika 15. i 17., dva senzora (kapacitivni MPR121 i senzor blizine VCNL4010) spojena su na Arduino UNO mikroračunalo koji je istovremeno spojen na tri

sklopnika. Senzori kao elektroničke komponente prikupljaju podatke iz fizičkog svijeta i pretvaraju ih u elektične impulse. Tri sklopnika izravno povezuju robot s ostatkom sustava.

U nastavku slijedi detaljan prikaz tijeka procesa popraćen objašnjenjem programskog koda – „mozga“ sustava.

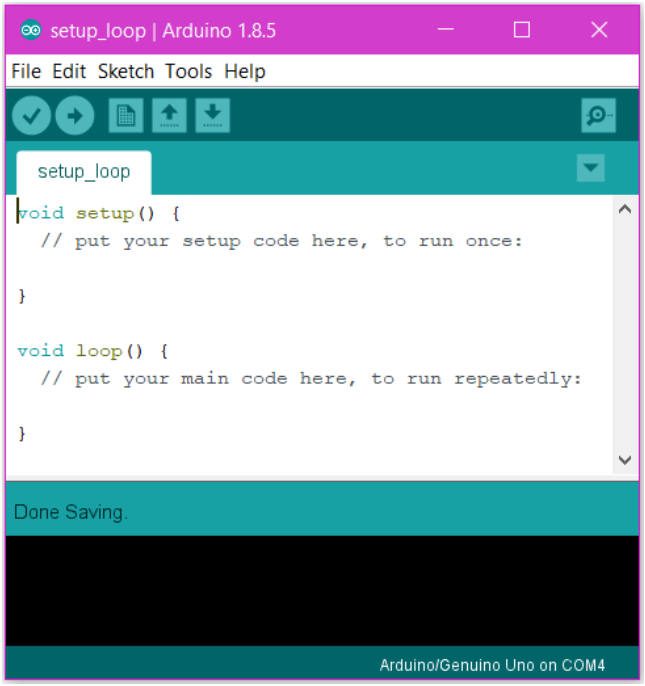
4.3.1. Komunikacija među komponentama

Načelno, komunikacija među komponentama može biti serijska ili paralelna. Serijska komunikacija omogućuje prijenos jednog bita u određenom vremenskom trenutku, a paralelna istovremeni prijenos više od jednog bita, najčešće bajt (osam bitova). Zbog toga serijska komunikacija zahtijeva bitno manje komunikacijskih linija nego paralelna. Arduino UNO je mikroračunalo koje sadrži I^2C sabirnicu. To je sinkrona, serijska sabirnica namijenjena međusobnom povezivanju raznih digitalnih i upravljivih analognih sustava, a naziv potječe iz engleskog jezika (*Inter-Integrated Circuit*). Sve se spomenute komponente na I^2C sabirnicu spajaju izravno. Najvažnija prednost ove sabirnice je da mikroračunalo može upravljati s mnogo senzora koristeći samo dvije upravljačke linije – SDA (*Serial Data*) i SCL (*Serial Clock*). Također, komponente je moguće proizvoljno dodavati i uklanjati sa sabirnice, čak i tijekom rada.

Arduino IDE programska podrška dolazi sa softverskom knjižnicom (*Wire Library*) za komunikaciju s drugim uređajima, što čini ulazno/izlazne operacije jednostavnijima s obzirom na to da nema potrebe za dodatnim programiranjem. Sve što korisnik treba je definirati dvije osnovne funkcije koje čine izvršni program (slika 21.):

- *setup()* – funkcija se izvodi jednom na početku programa za inicijalizaciju postavki
- *loop()* – funkcija se zove više puta u petlji sve dok se uređaj ne isključi

Bitno je spomenuti da svaki uređaj koji se spaja na Arduino ima jedinstvenu adresu. To je od iznimne važnosti prilikom pisanja koda jer na taj način mikroračunalo (*master*) zahtijeva od uređaja (*slavea*) da šalje bajtove te se na taj način odvija komunikacija. Kapacitivni je senzor na adresi 0x5C, a senzor blizine na 0x13.



Slika 21. Funkcije mikroračunala koje čine izvršni program

Prije same inicijalizacije postavki potrebno je učitati gotove knjižnice (*libraries*) proizvođača senzora. One pružaju dodatnu funkcionalnost programiranju skica (*sketches*) radeći u skladu sa sklopovljem i manipulirajući podacima. Knjižnice korištene pri izradi programa vidljive su na slici 22.

```
#include "mpr121.h"
#include "Adafruit_VCNL4010.h"
#include <Wire.h>
```

Slika 22. Knjižnice (*libraries*)

Pri inicijalizaciji postavki potrebno je postaviti brzinu prijenosa podataka u bitovima po sekundi za serijski prijenos. To se izvršava naredbom *Serial.begin()* (slika 23.). Nadalje, naredbom *pinMode()* vrši se konfiguracija pojedinih pinova kao ulaza ili izlaza. Na kraju inicijalizacije pokreće se *Wire* knjižnica i pridružuje se uloga *mastera* sabirnici.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(irqpin, INPUT);
  digitalWrite(irqpin, HIGH);

  Wire.begin();
```

Slika 23. Inicijalizacija postavki

Pinovi 7, 12 i 13 konfigurirani su za ponašanje kao digitalni izlazi. Razlog tomu je princip rada sklopnika. COM (*Common*) pin sklopnika je dio koji se pomiče i ostvaruje kontakt s pinovima NO i NC (*Normally Open*, odnosno *Normally Closed*). Kada je sklopnik isključen, COM je u kontaktu s NC. NO pin sklopnika spaja se tek kada se sklopnik uključi – tada se COM pomiče s NC na NO. Budući da su digitalni ulazi robota spojeni na NC pin, sve dok struja prolazi tim strujnim krugom i COM je spojen na 24 V robota, digitalni ulazi robota biti će u visokom stanju (*True*, odnosno *High*). Moguće je spojiti digitalne ulaze i na NO pin pri čemu su digitalni ulazi inicijalno u niskom stanju. Zbog promjena stanja robota vidljivih na teach pendantu, pouzdano znamo kada je sklopnik fizički spojen s robotom te da je veza uspostavljena.

Sklopnik je preko preostala dva pina spojen na Arduino – jedan pin spaja se s na *Ground* (0 V) mikroračunala, a drugi na jedan od digitalnih izlaza. Potrebno je naglasiti da su u pitanju izlazi određeni programom (slika 22.) jer je signal sa senzora u konačnici digitalni izlaz koji aktivira sklopnik i propušta struju kroz drugi strujni krug kako bi se uspostavio kontakt s NO ili NC pinom.

Kada je dodirnuta vodljiva tkanina koja je spojena na jednu od elektroda kapacitivnog senzora pripadajući digitalni izlaz na Arduinu (DO7) prelazi u visoko stanje. Tim prijelazom aktvira se pripadajući sklopnik, COM pin uspostavlja kontakt s NO pinom (ili NC, ovisno o načinu spajanja) te je krajnji ishod promjena stanja digitalnog ulaza robota (DI1).

Princip rada senzora blizine i okidanje sklopnika slično je onom kod kapacitivnog senzora. Razlika je u tome što kod ovog senzora postoje dva slučaja (dva raspona blizine) te se na temelju tih vrijednosti aktivira jedan od dva pripadajuća sklopnika. Time je omogućena manipulacija s drugim i trećim digitalnim ulazom robota (DI2, DI3). Slika 24. prikazuje dio programskog koda

koji se odnosi na promjenu stanja digitalnih izlaza mikroračunala za aktivaciju sklopnika ovisno o tome je li objekt na udaljenosti manjoj od 6 cm od senzora ili se nalazi između 6 cm i 12 cm. Za postavljanje digitalnih izlaza Arduina u visoko stanje koristi se funkcija *digitalWrite().*

```
  if ( proxy  >= prvaudaljenost && drugaudaljenost > proxy) { //ako je udaljenost manja od 12 cm ali veca od 6 cm
    digitalWrite(12, HIGH);
  }
  else if (proxy >= drugaudaljenost) { //ako je udaljenost manja od 6cm
    digitalWrite(13, HIGH);//ukljucuje drugi relej
    digitalWrite(12, HIGH);
  }
  else {//ako je udaljenost veca od 12cm
    digitalWrite(13, LOW);
    digitalWrite(12, LOW);
  }

  delay(100);
}
```

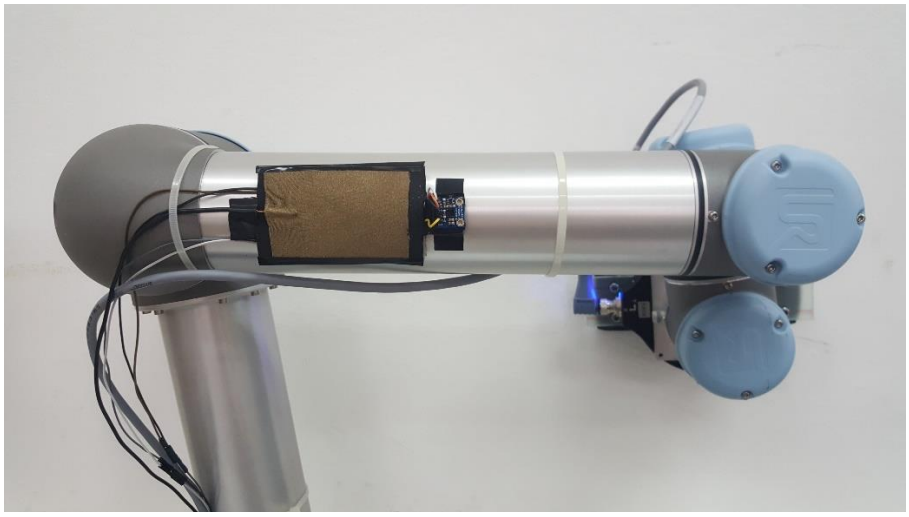
Slika 24. Promjena stanja DO na temelju udaljenosti od senzora

Potpuni programski kod nalazi se u prilogu rada (Prilog II.).

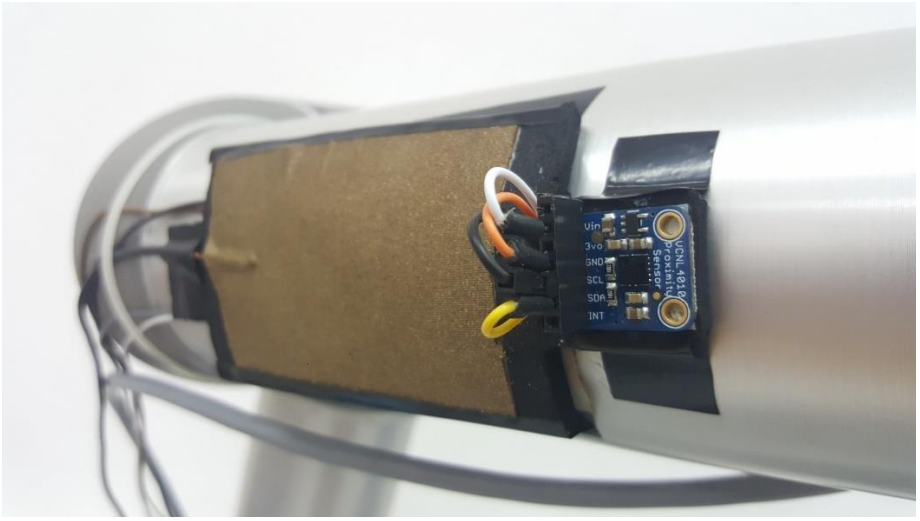
4.3.2. Fizička interakcija čovjeka i robota

U prethodnom poglavlju pobliže je objašnjen tijek procesa od uzročnog dodira senzora (ili približavanja senzoru) do posljedičnog odziva digitalnih ulaza robota, a u ovom će biti objašnjena važnost toga za ovaj rad – primjena, odnosno fizička interakcija s robotom.

Realizirani model osjetilne jedinice inicijalno konstruirane u programu *SolidWorks* (slika 7.) prikazuju slika 25. i slika 26. Montaža na robot izvršena je pomoću obostrano ljepljive montažne trake te je osjetilna jedinica dodatno osigurana od odvajanja pomoću crne trake uz nastojanje očuvanja estetike.



Slika 25. Osjetilni modul montiran na robotsku ruku (1)

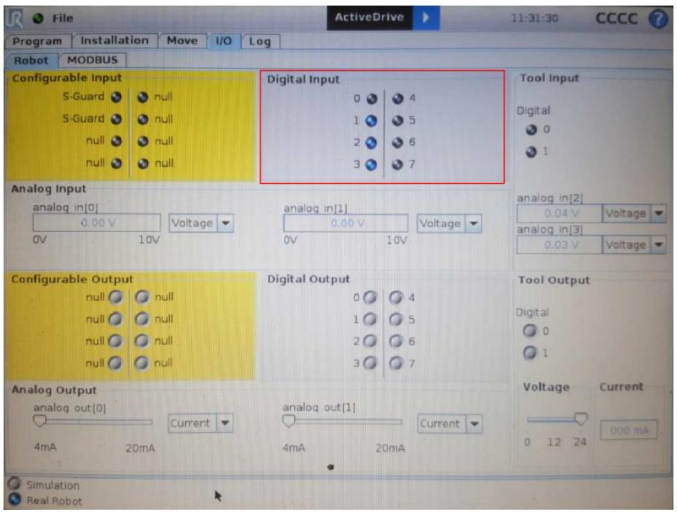


Slika 26. Osjetilni modul montiran na robotsku ruku (2)

Prikaz stanja digitalnih ulaza robota vidljiv je na upravljačkoj konzoli u već spomenutom sučelju *PolyScope*. Sučelje posjeduje posebnu karticu „I/O“ kako bi praćenje rada robota bilo olakšano. Ovo je od iznimne važnosti s obzirom na to da je moguće izravno vidjeti koji je senzor (ili kombinacija senzora) aktivan, što olakšava postupak programiranja te istovremeno daje potvrdu o ispravnosti sklopovlja i programske podrške.

Na slici 27. vidljivo je visoko stanje tri digitalna ulaza – DI1, DI2 te DI3. Ta tri stanja ukazuju na uspješnu uspostavu komunikacije izravno sa sklopnicima i potvrđuju princip rada opisan u prethodnom poglavlju. Ispitivanjem rada senzora, odnosno približavanjem senzoru blizine i

dodirivanjem elektrode kapacitivnog senzora isti ti digitalni ulazi ponašaju se na očekivani način, što ukazuje na uspješnu uspostavu komunikacije i s ostatkom sustava.



Slika 27. Stanja digitalnih ulaza robota

Svaki pojedini sklopnik utječe na jedan digitalni ulaz robota i na dva njegova moguća stanja – visoko i nisko. S obzirom na to da su u sklopu prisutne tri takve komponente, to znači da je ukupni broj mogućih kombinacija 2^3, odnosno 8 (tablica 1.).

KOMBINACIJE STANJA DIGITALNIH ULAZA ($2^3 = 8$)			
1.	LOW	LOW	LOW
2.	LOW	LOW	HIGH
3.	LOW	HIGH	LOW
4.	HIGH	LOW	LOW
5.	LOW	HIGH	HIGH
6.	HIGH	HIGH	LOW
7.	HIGH	LOW	HIGH
8.	HIGH	HIGH	HIGH

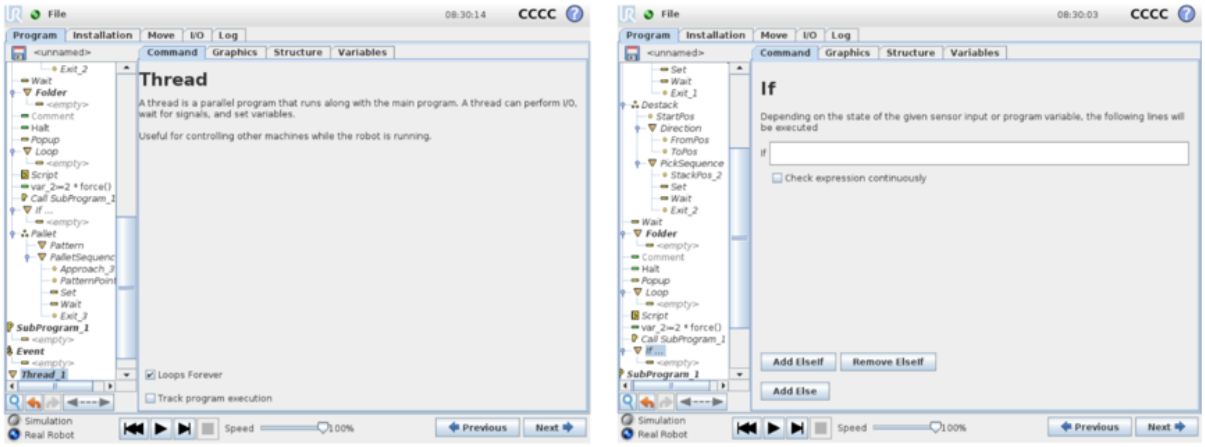
Tablica 1. Kombinacije stanja digitalnih ulaza

Za potrebe ovog rada uspješno je isprobano nekoliko naredbi ovisnih o spomenutim digitalnim ulazima kojima je robot upravljan. Pomoću promjene stanja ulaza trebalo bi biti moguće regulirati brzinu kretanja robota, napraviti stanku ili ga zaustaviti u željenom trenutku. Preostalih pet kombinacija stanja koristilo bi se za druge radnje poput promjene smjera kretanja, vraćanja u određenu početnu točku („*Home Button*“) i sl.

4.3.2.1. Inicijalna zamisao

Inicijalna zamisao bila je da se glavni program sastoji od jednostavnog pokreta iz početne u konačnu točku ili više točaka – reprezentativna kretnja koja ubuduće može biti bilo što od uzmistavi do drugih automatiziranih industrijskih operacija (npr. umetanje predmeta u sklop).

Naredba koja se koristi za gibanje robota je *MoveJ*. Ta je naredba prikladna jer putanja kojom alat dolazi do odredišne točke nije od velike važnosti. Ostatak je programa određen nizom *Thread* naredbi. *Thread* je proces koji se odvija usporedno s glavnim programom i uglavnom se koristi za upravljanje vanjskim uređajima neovisnima o robotskoj ruci (slika 28. a)). To znači da usporedno s glavnim programom koji pokreće robotsku ruku niz paralelnih programa „čeka“ određenu kombinaciju signala kako bi istovremeno odreagirao na određeni način. Ono što svaki usporedni program mora sadržavati je niz *If* naredbi (slika 28. b)) koje određuju uvjet pod kojim se željena radnja odvija. Jedan od primjera je aktivacija kapacitivnog senzora (dodir elektrode) u svrhu njenog ponašanja poput „*Home Buttona*“. To bi značilo da u bilo kojem trenutku procesa dodirom vodljive tkanine na osjetilnom modulu operater „šalje“ robot u točku unaprijed određenu kao *home* položaj. *If* naredba u tom slučaju mora sadržavati uvjet pod kojim se ta kretnja odvija. Analogno tome postavljaju se preostali uvjeti, a kao rezultat dobivaju željene radnje.



Slika 28. Naredbe: a) *Thread*, b) *If* [13]

4.3.2.2. Ostvarivanje procesa

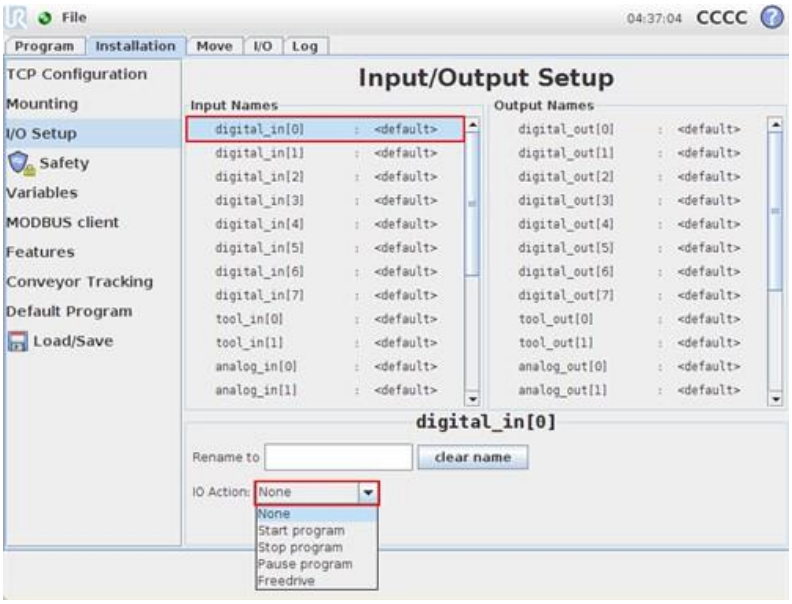
Ostvarivanje inicijalne zamisli pokazalo se zahtjevnijim od očekivanog. Kolaborativni UR5 robot nedvojbeno je odličan izbor kada je riječ o uzmi-stavi operacijama ili drugim unaprijed određenim industrijskim procesima, no prilikom provedbe procesa koji nisu unaprijed određeni njegova funkcionalnost postaje upitna.

Unatoč tome što je cjelokupno sklopovlje zajedno s programskom podrškom do samog trenutka provedbe radilo bez teškoća, prepreke su nastale zbog samih mogućnosti koje robot pruža. Najveće ograničenje je u tome što nije moguće provesti proces na zamišljeni način, a razlog tomu je sukob koji se javlja unutar programa robota. Naime, ukoliko se robot kreće zadanom putanjom i aktivira se *Thread* naredba koja uključuje promjenu njegovog gibanja jednim od načina (zaustavljanjem, odlaskom na *home* poziciju ili promjenom smjera gibanja), automatski se zaustavlja cijeli program jer robot takve dvije usporedne naredbe nije sposoban izvršiti – shvaća to kao nemogući zahtjev da bude istovremeno na dva različita mjesta. Alternativni pristup bio je korištenje naredbe *Event*. Ona se koristi za praćenje ulaznog signala te na temelju toga robot vrši zadanu radnju. Razlikuje se od naredbe *Thread* u tome što prilikom svog izvršavanja ne zaustavlja glavni program, već on nastavlja s radom. I ovaj je pristup rezultirao istim sukobom unutar programa kao prilikom korištenja naredbe *Thread*.

Konačno rješenje svodi se na glavni program koji se sastoji od određenog broja potprograma. Pozivanje potprograma u glavnom programu rezultira pokretanjem programskih linija koje se

nalaze u potprogramu, a nakon izvršenja istih glavni program nastavlja s izvršavanjem idućeg zadanog retka. U ovom slučaju potrebni su uvjeti sadržani unutar glavnog programa te on poziva određeni potprogram u slučaju zadovoljenja jednog od postavljenih uvjeta – jedne od osam mogućih kombinacija digitalnih ulaza robota.

Osim spomenutog, sučelje UR5 robota pruža i dodjeljivanje posebnih funkcija digitalnim ulazima i izlazima. To znači da je moguće unaprijed definirati ulogu pojedinog digitalnog ulaza što uvelike pridonosi ostvarivanju cilja ovog završnog zadatka, a to je intuitivno upravljanje. Ta mogućnost robotskog sučelja pronašla je svrhu u pokretanju programa te u njegovom privremenom zaustavljanju („*Start Button*“ i „*Pause Button*“). Na taj način moguće je robot postaviti i u ručni način upravljanja (*freedrive*) te potpuno zaustaviti program, a sve su mogućnosti vidljive na slici 29. Za potrebe ovog rada dodijeljene su samo dvije funkcije kako bi ostalo prostora za proizvoljne kretnje i zadavanje uvjeta.



Slika 29. Dodjeljivanje posebnih uloga digitalnim ulazima [14]

Kolaborativni robot UR5 u konačnici je na temelju prethodno objašnjenih načela uspješno dobio „osjetila“ i sposobnost djelovanja na očekivan i intuitivan način. Osim tri uloge oponašanja gumba („*Start Button*“, „*Pause Button*“ i „*Home Button*“), pomoću stanice „umjetne kože“ robota omogućeno je i upravljanje zadovoljenjem pojedinih uvjeta, primjerice promjena putanje gibanja, zatvaranje prihvatnice ili potpuno zaustavljanje programa.

5. ZAKLJUČAK

Kontinuiranim razvojem tehnologije taktilna interakcija postaje sastavni dio sve većeg broja sustava. Svakodnevni napredak zahtijeva sve kompleksnije vještine operatera, a razvoj sustava poput ovoga uvelike olakšava rad u tehnološki potpomognutom okruženju. Očekivanim dodirom čovjeka i robota uspostavljen je komunikacijski kanal koji omogućuje zadavanje naredbi na čovjeku intuitivan način. Unatoč teškoćama i ograničenjima prisutnima prilikom realizacije ovog završnog rada, postignut je željeni cilj – izrada „umjetne kože“ robota. Kao krajnji ishod podaci poslani na robot i njegov odgovor na iste uspješno su ispitani u Laboratoriju za projektiranje izradbenih i montažnih sustava.

Ovaj rad predstavlja čvrst temelj za potencijalnu nadogradnju sustava. Primjerice, implementacijom većeg broja raznovrsnih senzora robot može dobiti više „osjećaja“ poput topline ili pritiska. Ovakav smjer razmišljanja neophodan je za budućnost s obzirom na to da se od robota sve češće očekuje sposobnost djelovanja u nestrukturiranoj okolini nasuprot onoj prisutnoj u industriji. Industrijska je okolina gotovo besprijekorno strukturirana i uređena, no pravi izazov leži upravo u razvoju sustava koji primjenu nalaze u svakodnevnom, nesređenom okruženju.

LITERATURA

[1] http://sayginlab.ucsd.edu

[2] Jerbić, B., Šekoranja, B., Šuligoj, F., Švaco, M., Bašić, D.: Human-Robot Interaction Based on use of Capacitive Sensors, 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013.

[3] Cannata, G., Maggiali, M., Metta, G., Sandini, G.: An Embedded Artificial Skin for Humanoid Robots, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2008.

[4] https://www.sparkfun.com

[5] https://learn.adafruit.com

[6] https://store.arduino.cc

[7] https://www.universal-robots.com

[8] https://www.universal-robots.com

[9] https://atngmbh.com

[10] https://www.crossco.com

[11] http://www.directindustry.com

[12] Universal Robots User Manual UR5/CB3, Version 3.0

[13] https://www.universal-robots.com

[14] https://www.universal-robots.com

PRILOZI

I. CD-R disk

II. Programski kod (Arduino IDE)

Programski kod (Arduino IDE)

```
// ucitavanje potrebnih knjiznica
#include "mpr121.h"
#include "Adafruit_VCNL4010.h"
#include <Wire.h>

Adafruit_VCNL4010 vcnl;

int irqpin = 3;
// 12 elektroda kapacitivnog senzora
boolean touchStates[12];
// ~12 cm
const int prvaudaljenost = 2550;
// ~6 cm
const int drugaudaljenost = 4000;

// inicijalizacija postavki
void setup() {

  // brzina prijenosa podataka [bps]
  Serial.begin(9600);
  // uspostavljane veze sa senzorom blizine
  Serial.println("Trazenje VCNL4010");

  if (! vcnl.begin()) {
    Serial.println("Senzor nije pronaden");
    while (1);
  }
  Serial.println("VCNL4010 pronaden!");

  // konfiguracija pinova kao ulaza/izlaza
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(irqpin, INPUT);
  digitalWrite(irqpin, HIGH); //enable pullup resistor

  Wire.begin();

  mpr121_setup();
}

void loop() {
  readTouchInputs();
  readProxyInputs();
}

// kapacitivni senzor MPR121
void readTouchInputs() {
  if (!checkInterrupt()) {

    // ocitavanje stanja sa senzora (adresa: 0x5C)
    Wire.requestFrom(0x5C, 2);

    byte LSB = Wire.read();
    byte MSB = Wire.read();
```

```
    // 16 bitova - stanja dodira
    uint16_t touched = ((MSB << 8) | LSB);

    // provjera dotaknute elektrode
    for (int i = 0; i < 12; i++) {
      if (touched & (1 << i)) {

        if (touchStates[i] == 0) {
          // elektroda i dotaknuta, output 7 prelazi u visoko
stanje, ukljucen prvi sklopnik
          digitalWrite(7, HIGH);
          Serial.print("elektroda ");
          Serial.print(i);
          Serial.println(" je dotaknuta");

        } else if (touchStates[i] == 1) {
          // elektroda i jos uvijek dotaknuta
        }

        touchStates[i] = 1;
      } else {
        if (touchStates[i] == 1) {
          digitalWrite(7, LOW);
          Serial.print("elektroda ");
          Serial.print(i);
          Serial.println(" vise nije dotaknuta");

          // elektorda i vise nije dotaknuta, iskljucen prvi
sklopnik
        }

        touchStates[i] = 0;
      }
    }
  }
}

// senzor blizine VCNL4010
void readProxyInputs() {
  // ocitavanje stanja sa senzora
  Serial.print("Ambijent: "); Serial.println(vcnl.readAmbient());
  Serial.print("Blizina: "); Serial.println(vcnl.readProximity());
  delay(100);

  // proxy - vrijednost za usporedbu
  unsigned int proxy = vcnl.readProximity();

  // ako je udaljenost manja od 12 cm i veca od 6 cm
  if ( proxy  >= prvaudaljenost && drugaudaljenost > proxy) {
    // ukljucen drugi sklopnik
    digitalWrite(12, HIGH);
  }

  // ako je udaljenost manja od 6 cm
  else if (proxy >= drugaudaljenost) {
    // ukljucen treci sklopnik
    digitalWrite(13, HIGH);
    digitalWrite(12, HIGH);
  }
```

```
  //ako je udaljenost veca od 12cm
  else {
    // iskljuceni drugi i treci sklopnik
    digitalWrite(12, LOW);
    digitalWrite(13, LOW);
  }

  delay(100);
}

// postavljanje kapacitivnog senzora MPR121
void mpr121_setup(void) {

  set_register(0x5C, ELE_CFG, 0x00);

  set_register(0x5C, MHD_R, 0x01);
  set_register(0x5C, NHD_R, 0x01);
  set_register(0x5C, NCL_R, 0x00);
  set_register(0x5C, FDL_R, 0x00);

  set_register(0x5C, MHD_F, 0x01);
  set_register(0x5C, NHD_F, 0x01);
  set_register(0x5C, NCL_F, 0xFF);
  set_register(0x5C, FDL_F, 0x02);

  // pragovi svih elektroda
  set_register(0x5C, ELE0_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE0_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE1_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE1_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE2_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE2_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE3_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE3_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE4_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE4_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE5_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE5_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE6_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE6_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE7_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE7_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE8_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE8_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE9_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE9_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE10_T, TOU_THRESH);
  set_register(0x5C, ELE10_R, REL_THRESH);

  set_register(0x5C, ELE11_T, TOU_THRESH);
```

```
  set_register(0x5C, ELE11_R, REL_THRESH);

  // konfiguracija filtriranja
  set_register(0x5C, FIL_CFG, 0x04);

  // konfiguracija elektroda, osposobljavanje svih 12
  set_register(0x5C, ELE_CFG, 0x0C);

  set_register(0x5C, ELE_CFG, 0x0C);

}

boolean checkInterrupt(void) {
  return digitalRead(irqpin);
}

void set_register(int address, unsigned char r, unsigned char v) {
  Wire.beginTransmission(address);
  Wire.write(r);
  Wire.write(v);
  Wire.endTransmission();
}
```