

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Filipović**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing.

Student:

Ivan Filipović

Zagreb, 2016.

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

*Zahvaljujem mentoru, prof.dr.sc. Željku Šitumu, što mi je omogućio izradu rada nabavkom dijelova, te što je uvijek bio spreman nesebično odvojiti od svojega vremena kako bi pomogao.*

*Zahvaljujem prijatelju Denisu Petljaku što mi je pomogao u izradi rada.*

*Na kraju, najveće hvala mojim roditeljima, mami Ivkici i tati Šimunu, te bratu Antoniu i djevojci Ani, oni su mi bili najveća, beskrajna podrška.*

*Ivan Filipović*



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: **IVAN FILIPOVIĆ** Mat. br.: 0035188949

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE I IZRADA BEŽIČNE ANIMATRONIČKE ŠAKE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A WIRELESS ANIMATRONIC HAND**

Opis zadatka:

Bežična animatronička šaka (engl. *wireless animatronic hand*) predstavlja robotsku šaku kod koje se gibanje prstiju ostvaruje bežičnim putem pomoću upravljačke rukavice smještene na ljudskoj šaci. Može se koristiti u industrijskim procesima kod kojih je potrebno obavljanje određenih zadataka ljudskom rukom, ali bi zbog nepovoljnih uvjeta koji vladaju u radnoj okolini (izvor ionizirajućeg zračenja, rad s opasnim tvarima, visoke ili niske temperature okoline, prašina, vlaga i dr.) prisustvo čovjeka imalo nepovoljan učinak na njegovo zdravlje. Također, robotska šaka može služiti kao pomoć paraliziranim osobama u obavljanju određenih radnji te smanjiti vrijeme prisustva druge osobe za pomoć bolesniku. Za tehničku izvedbu animatroničke šake potrebno je riješiti bežičnu komunikaciju između upravljačke rukavice i mehatroničke robotske šake te upravljanje izvršnih članova koji pokreću prste robotske šake u cilju obavljanja određene radnje.

U radu je potrebno:

- projektirati robotsku šaku s integriranim servo motorima kao aktuatorima,
- opisati korištene komponente pogonskog, upravljačkog, izvršnog i mjernog dijela sustava,
- razmotriti načine upravljanja animatroničke šake i napisati upravljački program,
- izraditi robotsku šaku i ispitati rad sustava.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

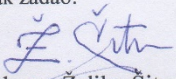
Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016.
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

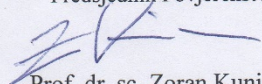
Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

  
 Prof. dr. sc. Željko Šitum

Predsjednik Povjerenstva:

  
 Prof. dr. sc. Zoran Kunica

**SADRŽAJ**

|   |     |
|---|-----|
| POPIS SLIKA .....                                       | II  |
| POPIS TABLICA.....                                      | IV  |
| POPIS OZNAKA .....                                      | V   |
| SAŽETAK.....  | VI  |
| SUMMARY .....   | VII |
| <br>  |     |
| 1. UVOD.....  | 1   |
| 2. ŠTO JE ANIMATRONIKA? .....                           | 3   |
| 3. PROJEKTIRANJE BEŽIČNE ANIMATRONIČKE ŠAKE .....       | 5   |
| 3.1. Robotska šaka.....                                 | 5   |
| 3.1.1. Upravljački dio robotske šake .....              | 5   |
| 3.1.2. Pogonski dio robotske šake .....                 | 7   |
| 3.1.3. Energetski dio robotske šake.....                | 11  |
| 3.2 Upravljačka (kontrolna) rukavica.....               | 13  |
| 3.2.1. Upravljački dio upravljačke rukavice .....       | 13  |
| 3.2.2. Mjerni sustav kontrolne rukavice .....           | 15  |
| 3.3. Bežična komunikacija .....                         | 19  |
| 3.4. Upravljački program .....                          | 24  |
| 3.4.1. Programski kod na strani kontrolne rukavice..... | 25  |
| 3.4.2. Programski kod na strani robotske šake .....     | 28  |
| 4. IZRADA BEŽIČNE ANIMATRONIČKE ŠAKE .....              | 30  |
| 4.1. Izrada robotske šake .....                         | 30  |
| 4.2. Izrada upravljačke rukavice .....                  | 31  |
| 4.3. Problemi u radu .....                              | 32  |
| 4.4. Budući planovi i moguća rješenja .....             | 33  |
| 5. ZAKLJUČAK.....                                       | 35  |
| LITERATURA.....   | 36  |
| PRILOZI.....  | 37  |

**POPIS SLIKA**

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Rad robota u ljevaonici .....                         | 1  |
| Slika 2. Sustav bežične animatroničke šake .....               | 2  |
| Slika 3. Čovjek i njezin android .....                         | 3  |
| Slika 4. Simboličko rukovanje robota i čovjeka .....           | 4  |
| Slika 5. Robotska šaka .....                                   | 5  |
| Slika 6. Raspored pinova na čipu ATmega328P .....              | 6  |
| Slika 7. Mikrokontroler Arduino UNO R3 .....                   | 7  |
| Slika 8. Električni motor Tower Pro Micro Servo SG90 .....     | 8  |
| Slika 9. Električni motor Tower pro Micro Servo SG92R .....    | 9  |
| Slika 10. Shema spajanja motora .....                          | 10 |
| Slika 11. Pulsno širinska modulacija .....                     | 11 |
| Slika 12. Spajanje 5 motora na izvor od 5V .....               | 12 |
| Slika 13. Prototipna pločica ( <i>engl. Breadboard</i> ) ..... | 12 |
| Slika 15. Električna pločica s gornje strane .....             | 14 |
| Slika 16. Električna pločica s donje strane .....              | 14 |
| Slika 17. Fleksijski senzor .....                              | 15 |
| Slika 18. Shema spajanja senzora .....                         | 16 |
| Slika 19. Shema spajanja fleksijskog senzora i motora .....    | 16 |
| Slika 20. Električna shema senzora .....                       | 17 |
| Slika 21. Mjerenje otpora senzora .....                        | 18 |
| Slika 22. Modul za bežičnu komunikaciju XBee S2 .....          | 19 |
| Slika 23. Topologija komunikacijskih protokola .....           | 20 |
| Slika 24. Komunikacija između XBee-a i mikrokontrolera .....   | 21 |
| Slika 25. USB programator .....                                | 22 |

---

|   |    |
|---|----|
| Slika 26. XBee modul na programatoru .....                | 22 |
| Slika 27. XBee štit ( <i>engl.shield</i> ).....           | 23 |
| Slika 28. Arduino sa shieldom i XBee-om.....              | 23 |
| Slika 29. Tok upravljanja sustava .....                   | 24 |
| Slika 30. Dijelovi sustava robotske šake .....            | 30 |
| Slika 31. Zalemljeni senzori.....                         | 31 |
| Slika 32. Sustav upravljačke rukavice.....                | 32 |
| Slika 33. Robotska šaka sa integriranim motorima.....     | 33 |
| Slika 34. Animatronička šaka izrađena na 3D printeru..... | 34 |

## **POPIS TABLICA**

|   |   |
|---|---|
| Tablica 1. Specifikacije mikrokontrolera Arduino UNO R3 ..... | 6 |
| Tablica 2. Karakteristike motora SG90.....                    | 8 |
| Tablica 3. Karakteristike motora SG92R .....                  | 9 |



**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>  |
|---------------|-----------------|--|
| $f$           | Hz              | Radni takt procesora                                 |
| $U$           | V               | Radni napon mikrokontrolera                          |
| $U_m$         | V               | Radni napon motora                                   |
| $m$           | g               | Masa motora  |
| $\vartheta$   | °C              | Dozvoljena radna temperatura motora                  |
| $t$           | $\mu$ s         | Vremenska mrtva zona ( <i>engl. Dead bandwidth</i> ) |
| $\omega$      | rad/s           | Kutna brzina motora                                  |
| $l$           | mm              | Duljina motora                                       |
| T             | ms              | Period trajanja impulsa                              |
| P             | ms              | Ukupno trajanje impulsa                              |
| $R_0$         | k $\Omega$      | Otpor senzora u početnom stanju                      |
| $R_{\max}$    | k $\Omega$      | Otpor senzora u krajnjem položaju                    |
| $R_{ot}$      | k $\Omega$      | Otpor otpornika pločice                              |
| $U_{out}$     | V               | Izlazni napon senzora                                |
| T             | Nm              | Zaustavni moment motora                              |

## **SAŽETAK**

Bežična animatronička šaka predstavlja robotsku šaku koja radi mimiku ljudske ruke preko upravljačke (kontrolne) rukavice. U radu su opisane komponente pogonskog, upravljačkog i mehaničkog dijela sustava. Poseban je naglasak stavljen na rješenje bežične komunikacije pomoću Xbee S2 komunikatora, te na upravljanje pomoću Arduino UNO R3 mikrokontrolera. Isto tako, dan je opis rada aktuatora u izvršnom dijelu sustava, te fleksijskih senzora u mjernom dijelu sustava. Rad sadrži opis projektiranja i izrade animatoničke šake te implementaciju dijelova u sustav.

Ključne riječi: Modul Xbee S2, Arduino UNO R3, fleksijski senzori, servo motori

## **SUMMARY**

Wireless animatronic hand represents a robotic hand which mimics the motion of human hand (fingers) through the control glove. The thesis discusses the components of drive, control, actuation, sensor and mechanical parts of the system. Special focus is put on a wireless communication by Xbee S2 radio, and control by Arduino UNO R3 Microcontroller. On top of that, thesis gives working description of actuators (servo motors) and flex sensors. Lastly, the final part consists of description of design and construction of the hand, and implementation of parts into the system.

Key words: Xbee S2 module, Arduino UNO R3, flex sensors, servo motors

## 1. UVOD

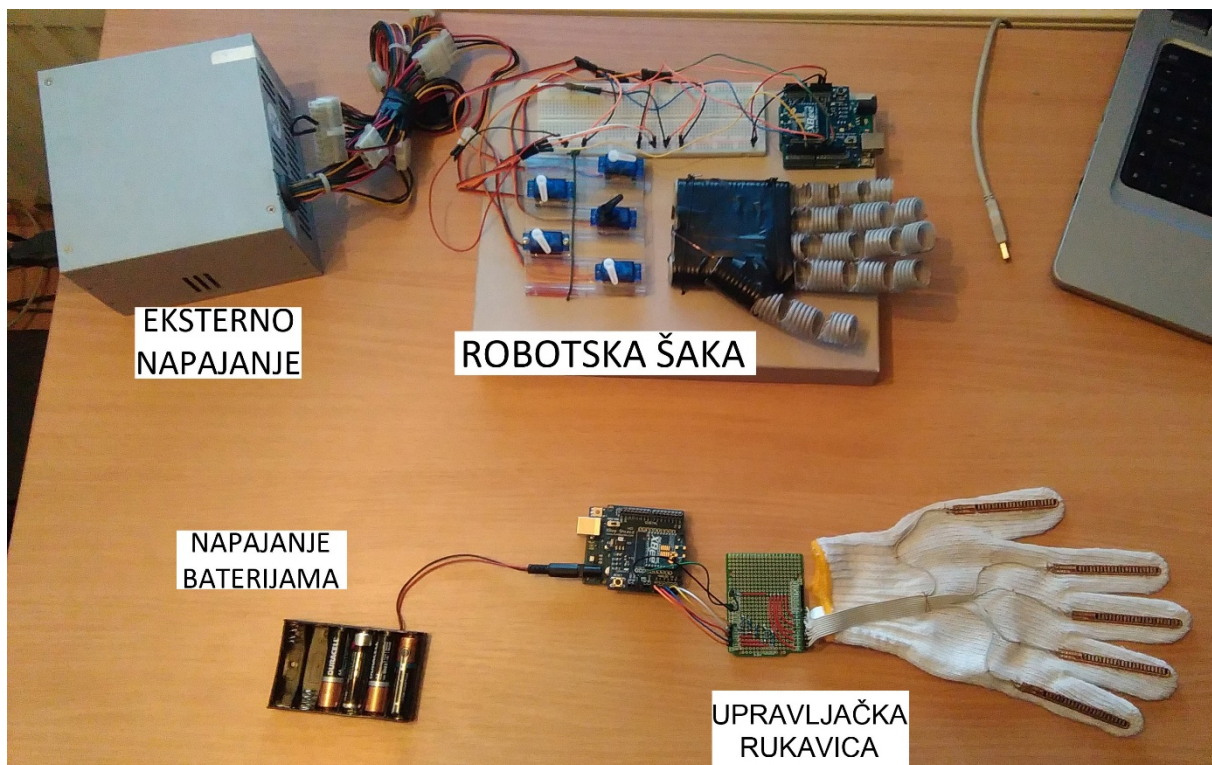
Čest je slučaj da težak i opasan rad u današnjoj industriji obavlja robot, te u potpunosti može zamijeniti čovjeka. U radnoj okolini čovjekovo zdravlje može biti narušeno, posebice u prisutnosti i rukovanju opasnim tvarima, visokim ili niskim temperaturama, te prisutnosti štetnog gama i x-zračenja. Predugo izlaganje radu može imati opasne posljedice na čovjekovo zdravlje, pa čak i smrt. Štetnost može biti kemijska, fizička, mehanička, biološka ili psihološka. Razvojem mikroracunala, bežičnog upravljanja, sensorike i umjetne inteligencije u prošlom stoljeću omogućena je konstrukcija i proizvodnja robota i manipulatora za rad u opasnim okolinama. Robot je efikasan, precizan te nije ograničen (ne treba odmor). Roboti se koriste u rudarstvu (opasnost od urušavanja), ispitivanju cjevovoda (opasni plinovi), svemirskim istraživanjima, u fleksibilnim izradbenim i montažnim sustavima te, posebice značajno, u radioaktivnoj okolini. U radioaktivnoj okolini robot je potreban za dekontaminaciju i demontiranje nuklearnog oružja. Kako visokoenergetsko ionizirajuće zračenje utječe i na samog robota, nakon rukovanja takvim materijalom i sam robot se smatra radioaktivnim otpadom, no robot se može zamijeniti, a ljudski život ne može.



Slika 1. Rad robota u ljevaonici

Isto tako, razvoj robotike i posebne grane robotike bionike i kibernetike, mehanički dijelovi mogu zamijeniti ili pomoći u kretnji dijelovima ljudskog tijela kao proteze i ortoze. Bežična animatronička robotska šaka može pomoći paraliziranim osobama u obavljanju određenih radnji (mali pomak određenog prsta obavlja određenu radnju).

Bežična animatronička šaka radi na način da se preko fleksijskih senzora sa upravljačke rukavice signal dovodi u mikrokontroler (Arduino UNO R3) koji procesira analogni signal senzora i daje rezultat Xbee S2 radiju (transmitter). Radio šalje signal na drugi Xbee S2 (reciver) i prenosi ga do drugog mikrokontrolera. Mikrokontroler za dobiveni signal zadaje pozicije aktuatoru koji na posljetku pomiče prste mehaničke robotske ruke.



Slika 2. Sustav bežične animatroničke šake

## 2. ŠTO JE ANIMATRONIKA?

Pojam animatronika (engl. *Animatronics*) se odnosi na uporabu robotskih dijelova kako bi se emulirali pokreti i ponašanje čovjeka ili životinje, ili kako bi se pridijelile osobine živih bića na nežive objekte. Robot izrađen da vjerno imitira čovjeka i njegove fizičke osobine naziva se android. Primjena animatronike danas može se vidjeti u filmskim specijalnim efektima i tematskim parkovima.



Slika 3. Čovjek i njezin android

Na slici 3. možemo vidjeti osobu i njezinog androida, gdje je android toliko sličan pravoj osobi da ih je teško razlikovati. Primanjem signala sa senzora postavljenih na osobi, dotični robot može vjerno imitirati izraze lica kao što su osmjeh ili mrštenje.

Animatronika je multidisciplinarno znanstveno polje koje objedinjuje grane robotike, anatomije i mehatronike. Animatronički objekti obično su pogonjeni pneumatskim, hidrauličkim ili električnim aktuatorima. Upravljanje je izvedeno pomoću računala ili ljudskom interakcijom pomoću senzora i teleoperacije (bežičnim upravljanjem). Kretnje animatroničkih dijelova

obično su napravljene tako da imitiraju pokrete mišića te tako vjerno rekreiraju pokrete ekstremiteta, bilo čovjeka ili životinja.



Slika 4. Simboličko rukovanje robota i čovjeka

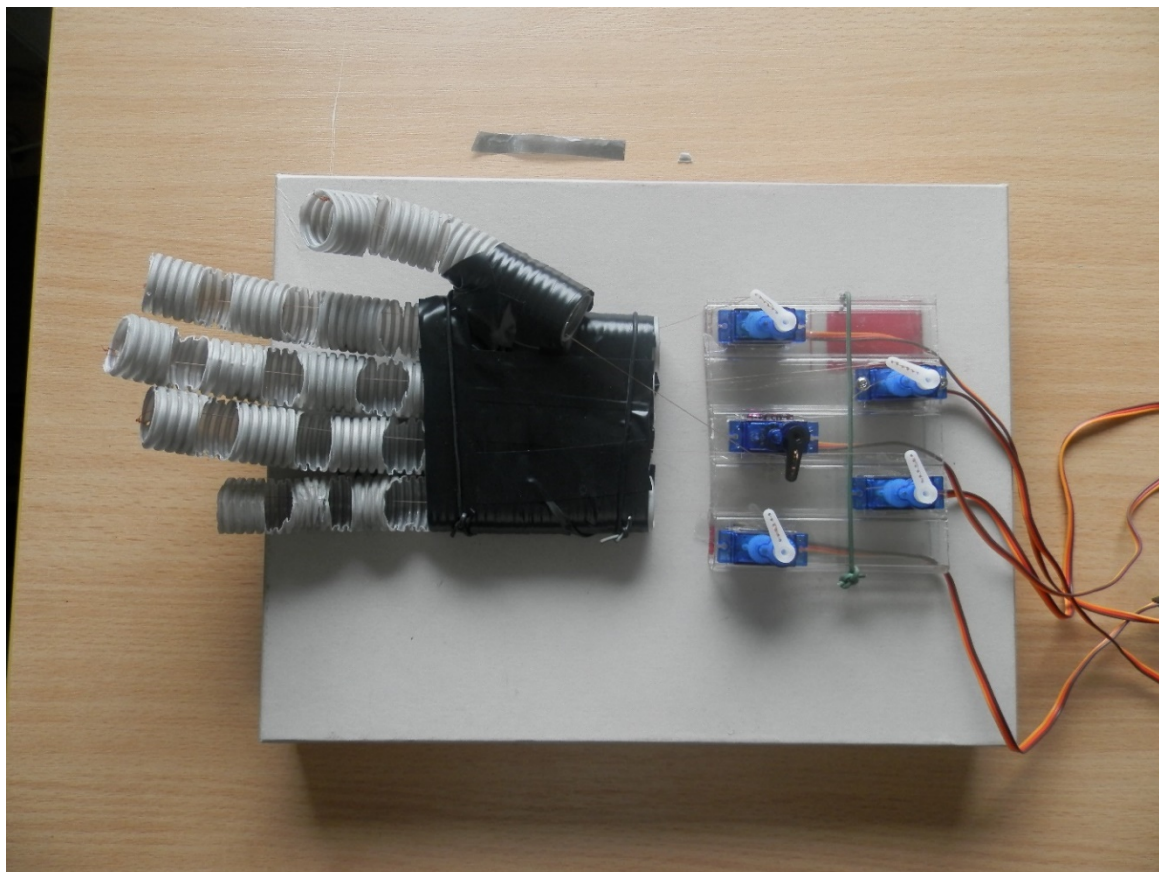
Animatronika, u skladu s bionikom, isprepliće rješenja iz živog, biološkog svijeta u svijet robotike. Ljudski i životinjski se načini gibanja implementiraju u robote, a isto se tako može desiti i obratno. Primjer je ako čovjek izgubi ekstremitet, ruku ili nogu, robotski dio konstruiran i napravljen po uzoru na izgubljeni ekstremitet može poslužiti kao proteza (ili ortoza).

Ovaj je rad zamišljen kako bi pokazao ostvarenje pokreta mehaničke robotske šake, upravljane bežično preko ljudske šake pomicanjem prstiju. Tako se dobiva animatronska šaka koja radi mimiku ljudskih pokreta.

### 3. PROJEKTIRANJE BEŽIČNE ANIMATRONIČKE ŠAKE

#### 3.1. Robotska šaka

Na sljedećoj je slici prikazana robotska šaka. Kao i ljudska šaka sastoji se od pet prstiju i pogonjena je s pet servomotora, za svaki prst jedan motor. U nastavku su opisani dijelovi upravljačkog i pogonskog dijela mehaničke robotske šake.



Slika 5. Robotska šaka

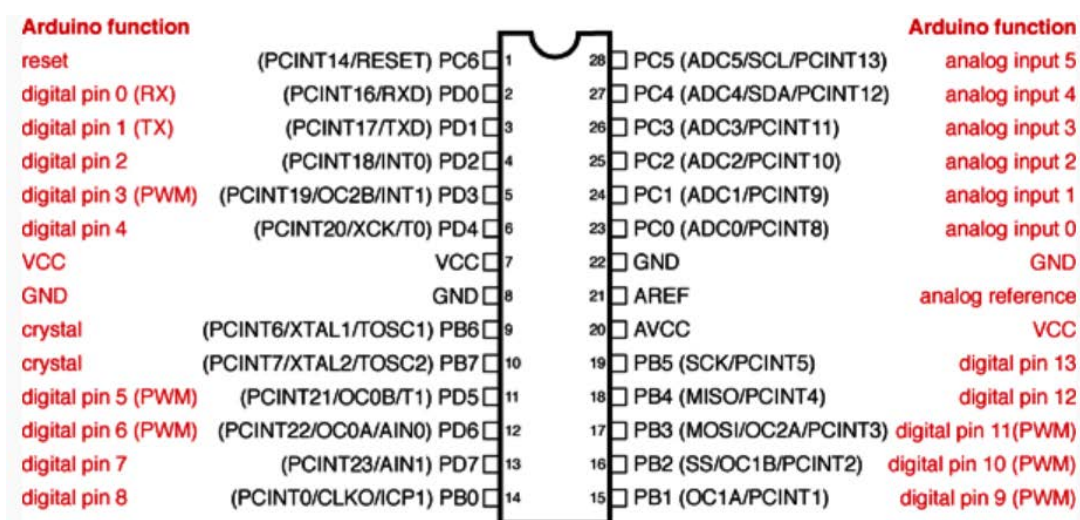
#### 3.1.1. Upravljački dio robotske šake

Za upravljački dio sustava odabran je mikrokontroler Arduino UNO R3 baziran na čipu ATmega328P. Mikrokontroler ima 14 digitalnih ulaza/izlaza (6 PWM izlaza) i 6 analognih ulaza. Procesor je 8-bitni uz 16 MHz procesor. Arduino je open-source platforma za kreiranje elektroničkih prototipova bazirana na sklopovlju i programskom paketu koji je fleksibilan i jednostavan za korištenje (velik broj preprogramiranih komponenti u integriranom library-u).



### 3.1.1.1. Specifikacija Arduino UNO R3 mikrokontrolera

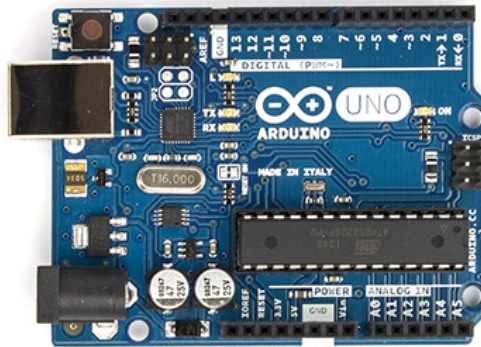
Prema [1], mikroracunalo je digitalni automat sposoban za izvršenje računskih operacija, a na osnovu programa pohranjenog u memoriji. Izvedeno je od jednog ili više integriranih krugova. Sastoji se od mikroprocesora (CPU) koji upravlja radom sustava i izvršava instrukcije programa koji se nalaze u memoriji. Upravljački program se izvršava sekvencijalno, instrukciju po instrukciju. Mikrokontroler je cijelo mikroracunalo u obliku jednog integriranog kruga i može sadržavati A/D, D/A pretvornike i slične elektroničke sklopove. Na sljedećoj je slici prikazan raspored pinova na čipu mikrokontrolera.



Slika 6. Raspored pinova na čipu ATmega328P

Tablica 1. Specifikacije mikrokontrolera Arduino UNO R3

| Mikrokontroler             | ATmega328P |
|----------------------------|------------|
| Radni napon                | 5 V        |
| Ulazni napon(preporučeni)  | 7-12 V     |
| Digitalni ulazi/izlazi     | 14         |
| PWM digitalni ulazi/izlazi | 6          |
| Analogni ulazi             | 6          |
| Flash memorija             | 32 KB      |
| SRAM                       | 2 KB       |
| EEPROM                     | 1 KB       |
| Radni takt procesora       | 16 MHz     |



Slika 7. Mikrokontroler Arduino UNO R3

### 3.1.2. Pogonski dio robotske šake

Prema [2], aktuator je dio dinamičkog sustava koji pretvara energiju u kretanje. Aktuator je tipično mehanička naprava koja uzima energiju (zrak, kapljevina, električna energija) i pretvara ju u neku vrstu gibanja. Tu se odvija upravljanje tokom energije ili materijala kako je zadano u upravljačkom programu. Oni pojačavaju energetski nivo izlaznih signala i prilagođavaju oblik energije trošilima (procesu). Osnovni je dio regulacijskog kruga i koristi se u raznim poljima upotrebe (automobilizam, energija, grijanje, vojna upotreba, transport, infrastruktura, robotika, svemirska znanost, proizvodnja itd.).

#### 3.1.2.1. Servomotor

Za pogonski dio robotske šake odabrani su analogni rotacijski mikro servomotori. Odabrani su zbog niske cijene, ali i preciznosti u pozicioniranju. Servomotori imaju široku upotrebu u robotici, CNC upravljanju i automatiziranoj proizvodnji baš zbog preciznosti u upravljanju. Za servomotor se mogu uzeti razne vrste motora.

U izradi animatronske šake uzeti su motori Microservo SG90 i SG92R kao aktuatori za pokretanje prstiju. SG90 i SG92R najjednostavnija su vrsta servomotora s mogućnošću regulacije pozicije kuta (0-180°). Očitavanje pozicije izvedeno je preko potenciometra (on-off upravljanje), tako da se motor uvijek giba ili maksimalnom brzinom ili stoji na mjestu. Ovakva vrsta motora nije u upotrebi u industriji, ali je isplativ u nekoj jednostavnijoj upotrebi.



Slika 8. Električni motor Tower Pro Micro Servo SG90

Tablica 2. Karakteristike motora SG90

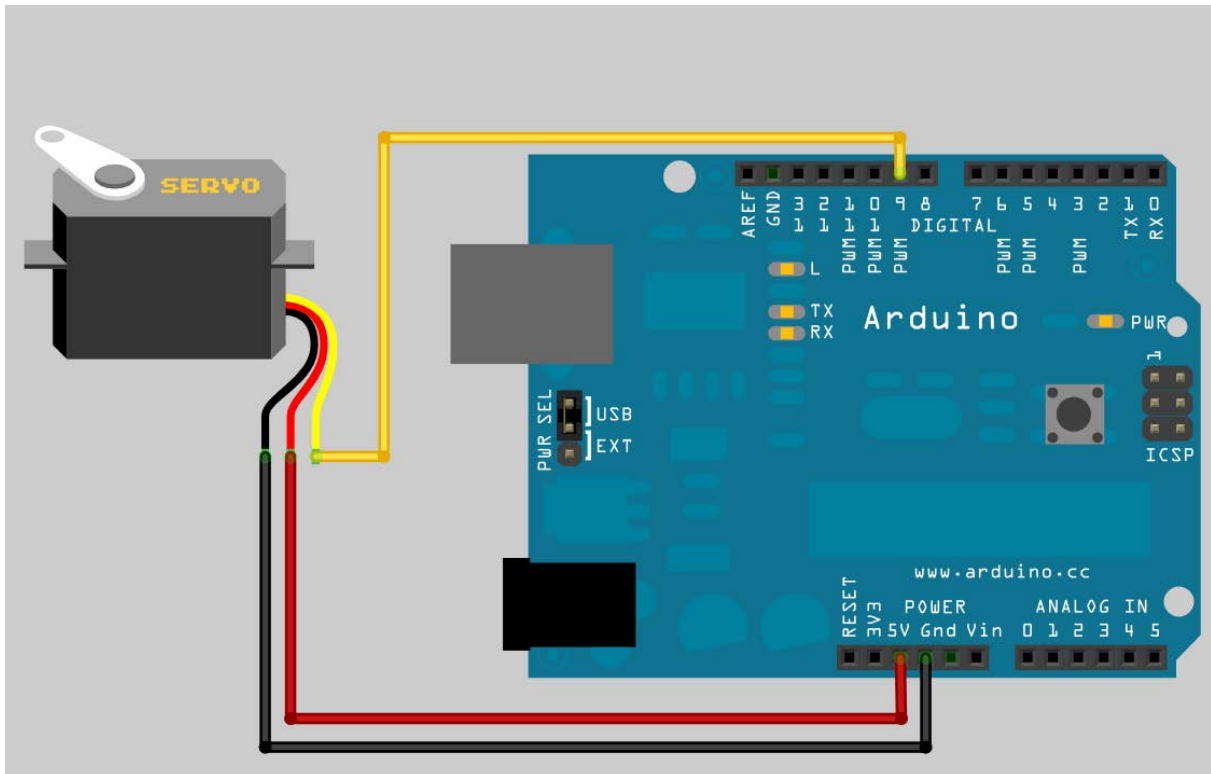
|                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| Masa                         | 9 g                 |
| Dimenzije                    | 22,2 x 11,8 x 31 mm |
| Zaustavni moment             | 0.1765 Nm           |
| Maksimalna kutna brzina      | 10,5 rad/s          |
| Radni napon                  | 4.8 V (~5 V)        |
| Vremenska mrtva zona         | 10 $\mu$ s          |
| Dozvoljena radna temperatura | 0 °C - 55°C         |



Slika 9. Električni motor Tower pro Micro Servo SG92R

Tablica 3. Karakteristike motora SG92R

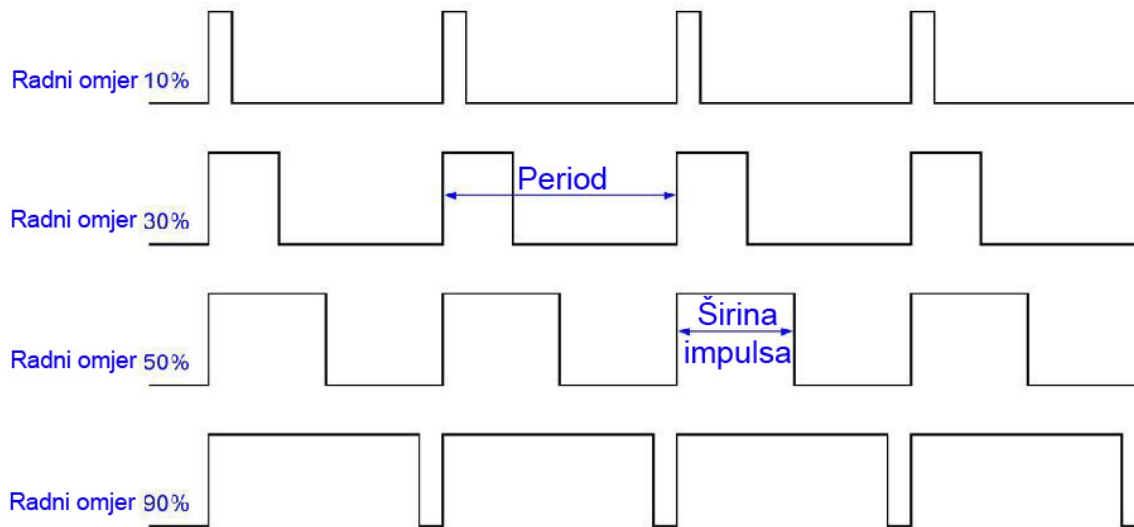
|                              |                   |
|------------------------------|-------------------|
| Masa                         | 9 g               |
| Dimenzije                    | 23 x 12.2 x 27 mm |
| Zaustavni moment             | 0.2452 Nm         |
| Maksimalna kutna brzina      | 10,5 rad/s        |
| Radni napon                  | 4,8 V (~5 V)      |
| Vremenska mrtva zona         | 1 $\mu$ s         |
| Dozvoljena radna temperatura | 0 °C - 55°C       |



Slika 10. Shema spajanja motora

Motori imaju tri izlazne žice. Crvena je dovod električne energije i spaja se na pin 5V, crna je uzemljenje i spaja se na pin Gnd, dok je žuta dovođenje signala i spaja se na bilo koji digitalni pin koji podržava PWM upravljanje. Motor se pozicionira ovisno o širini impulsa.

Pulsno širinska modulacija (*engl. Pulse Width Modulation-PWM*) je način pretvorbe digitalnog signala u analogni. Generira se pravokutni signal određenog perioda trajanja. Signal se mijenja između „on“ i „off“ (ima i nema signala). Ovaj način pretvorbe signala simulira određeni napon (0-5V) gdje je 0V „off“ stanje, a 5V „on“ stanje. Vremenski period u kojem je signal u „on“ stanju (5V) naziva se širina impulsa.



Slika 11. Pulsno širinska modulacija

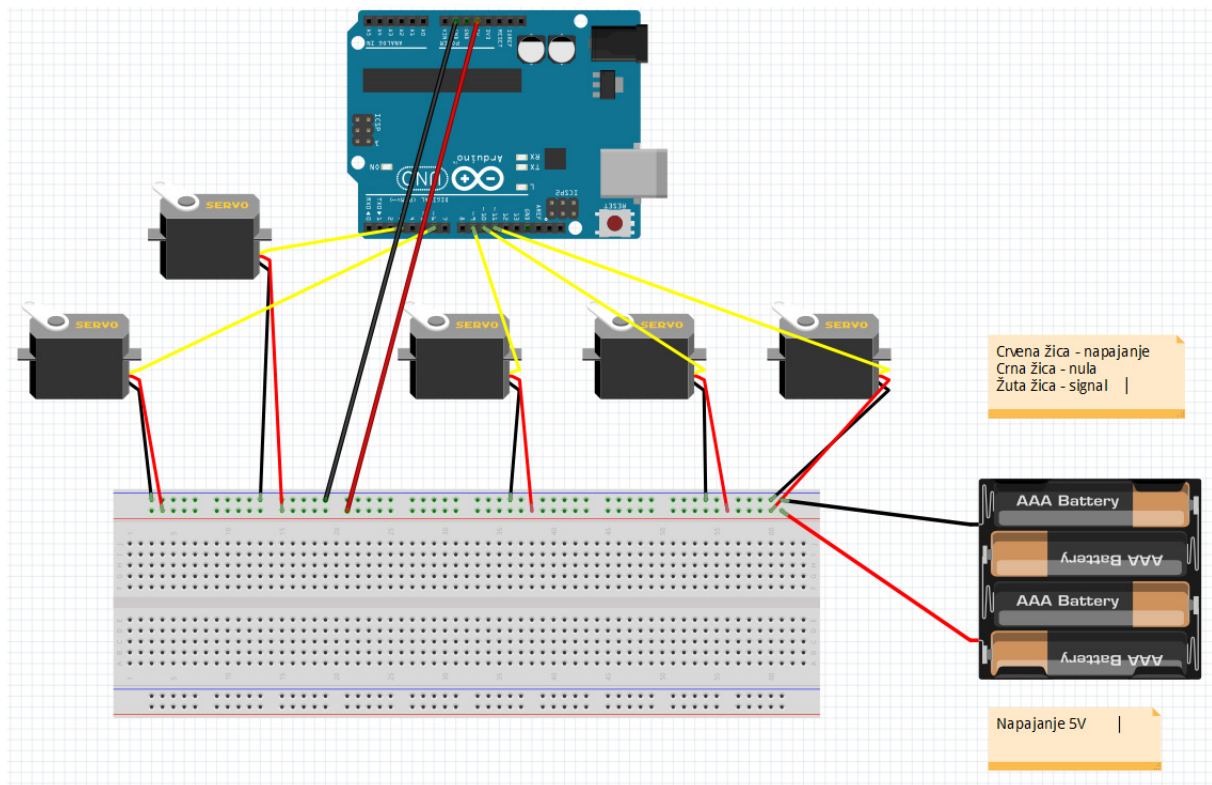
Radni omjer (*engl. Duty cycle*) je omjer vremenskog perioda trajanja (širina impulsa)  $T$  (ms) i ukupnog perioda  $P$  (ms), izražen u postocima.

$$D = \frac{T}{P} \cdot 100\%$$

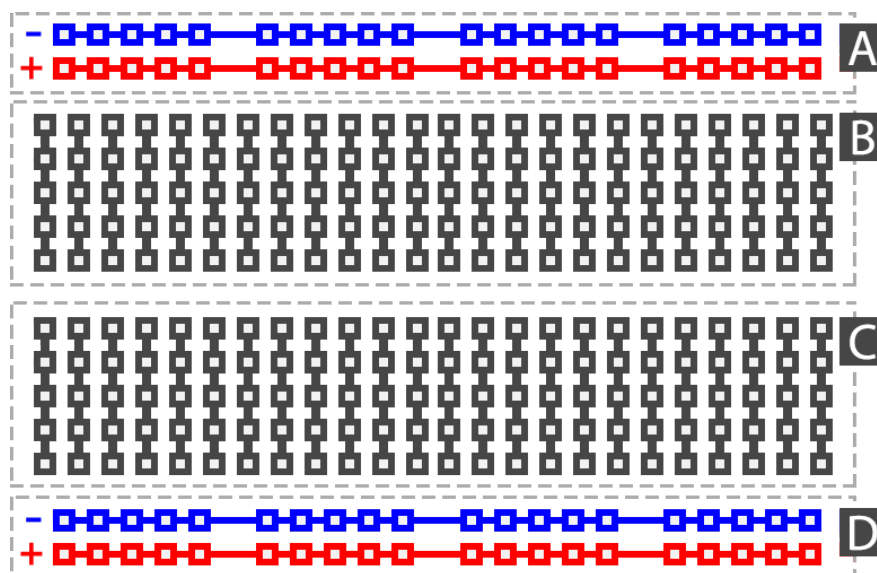
### 3.1.3. Energetski dio robotske šake

Potrebni radni napon pojedinog motora iznosi 5V. Kao izvor mogu se koristiti baterije ili eksterna napajanja električnom energijom. U radu je korišteno napajanje osobnog računala, koje ima istosmjerna napajanja od 3,3V (narančasta žica), 5V (crvena žica), 12V (žuta žica), -5V (bijela žica) te -12V (plava žica). Sve crne žice su nule.

Za svaki je prst potreban jedan motor, te ih se spaja paralelno kako bi napon od 5V ostao konstantan.



Slika 12. Spajanje 5 motora na izvor od 5V

Slika 13. Prototipna pločica (*engl. Breadboard*)

Kako bi se olakšalo spajanje strujnog kruga, koristi se prototipna pločica. Kao što se vidi na slici 13., breadboard ima krajnje ulaze spojene uzdužno (A i D), a srednje poprijeko (B i C). prototipna pločica omogućuje izradu električnih prototipova bez potrebe za lemljenjem.

### 3.2 Upravljačka (kontrolna) rukavica

Upravljačka rukavica je potrebna kako bi sakupljala signale sa senzora. Rukavica se nalazi na ljudskoj šaci i služi za proizvoljno upravljanje robotskom šakom. Na svaki prst rukavice prišiven je senzor savijanja. Signali se sakupljaju sa senzora i dovode do električne pločice. Preko električne pločice se signali dovode na analogne ulaze mikrokontrolera.



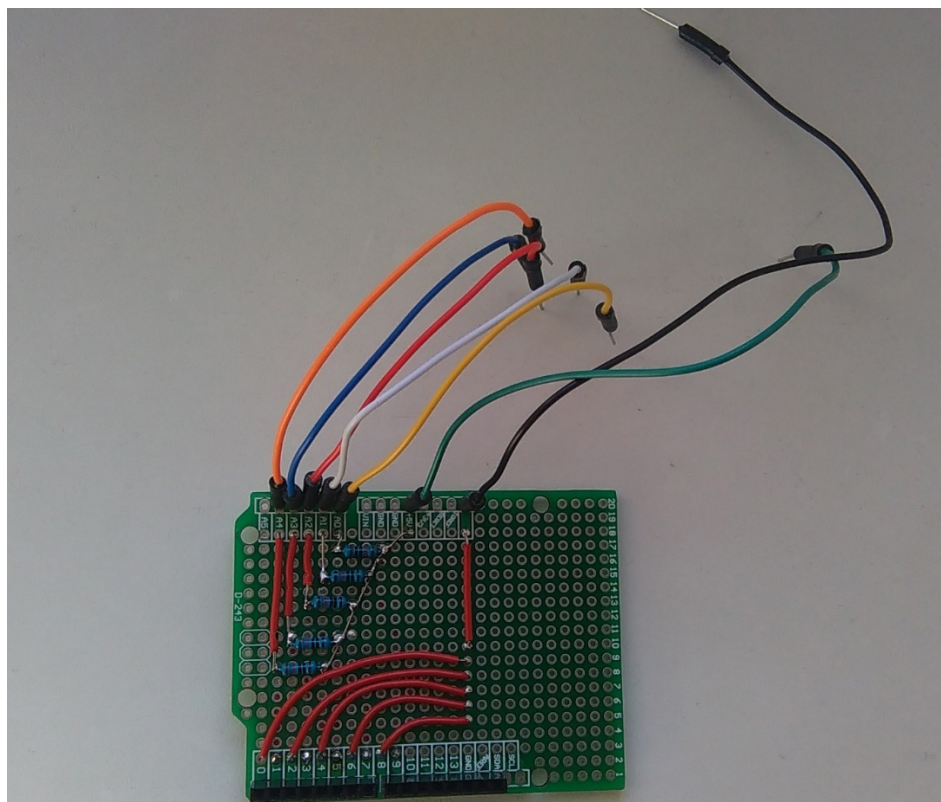
Slika 14. Kontrolna rukavica

#### 3.2.1. Upravljački dio upravljačke rukavice

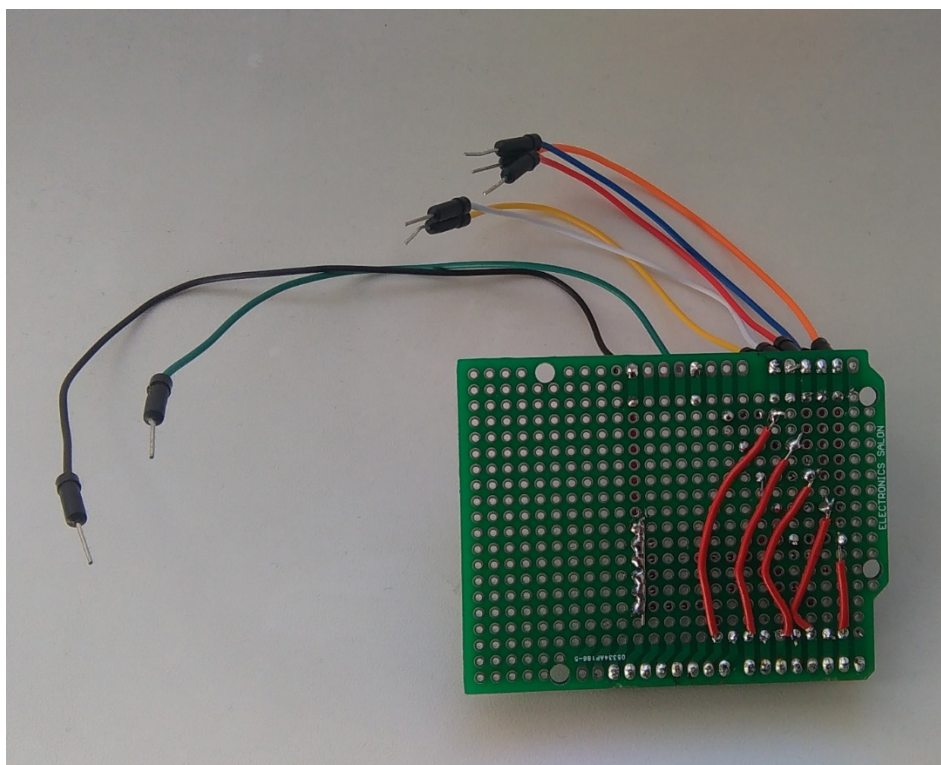
Isto kao i kod robotske šake, potreban je mikrokontroler za obradu podataka i slanje signala. Uzet je isti mikrokontroler, Arduino UNO R3. Specifikacije se mogu vidjeti u poglavlju 3.1.1. Umjesto breadboarda, za strujni je krug zalemljena pločica radi lakšeg i praktičnijeg korištenja.



3.2.1.2. Električna pločica



Slika 15. Električna pločica s gornje strane

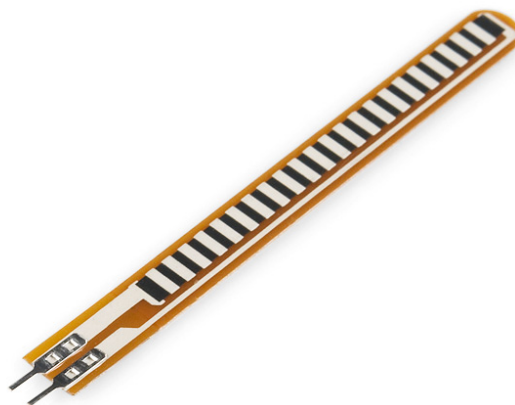


Slika 16. Električna pločica s donje strane

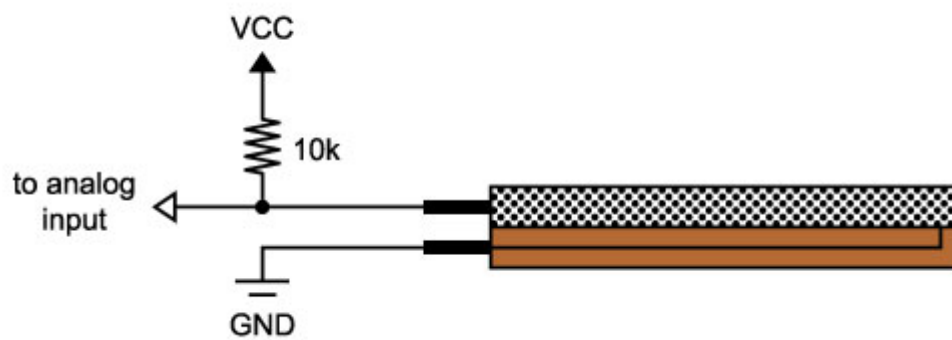
Slika 12. prikazuje zalemljenu električnu pločicu. U ulaze 1,3,5,7 i 9 dolaze signali sa senzora. Električna energija prolazi kroz otpornike (za svaki senzor jedan otpornik  $R_{ot} = 10k\Omega$ ). Napon dijeljen sa otporom od 10 k $\Omega$  dalje dolazi do žica koje se nalaze na A0-A4. Žice se spajaju na analogne ulaze mikrokontrolera za očitavanje vrijednosti. Ulazi 0,2,4,6 i 10 su nule, i sve nule su spojene na jednu žicu. Tamnozelena žica je dovod električne energije izvora (5V).

### 3.2.2. Mjerni sustav kontrolne rukavice

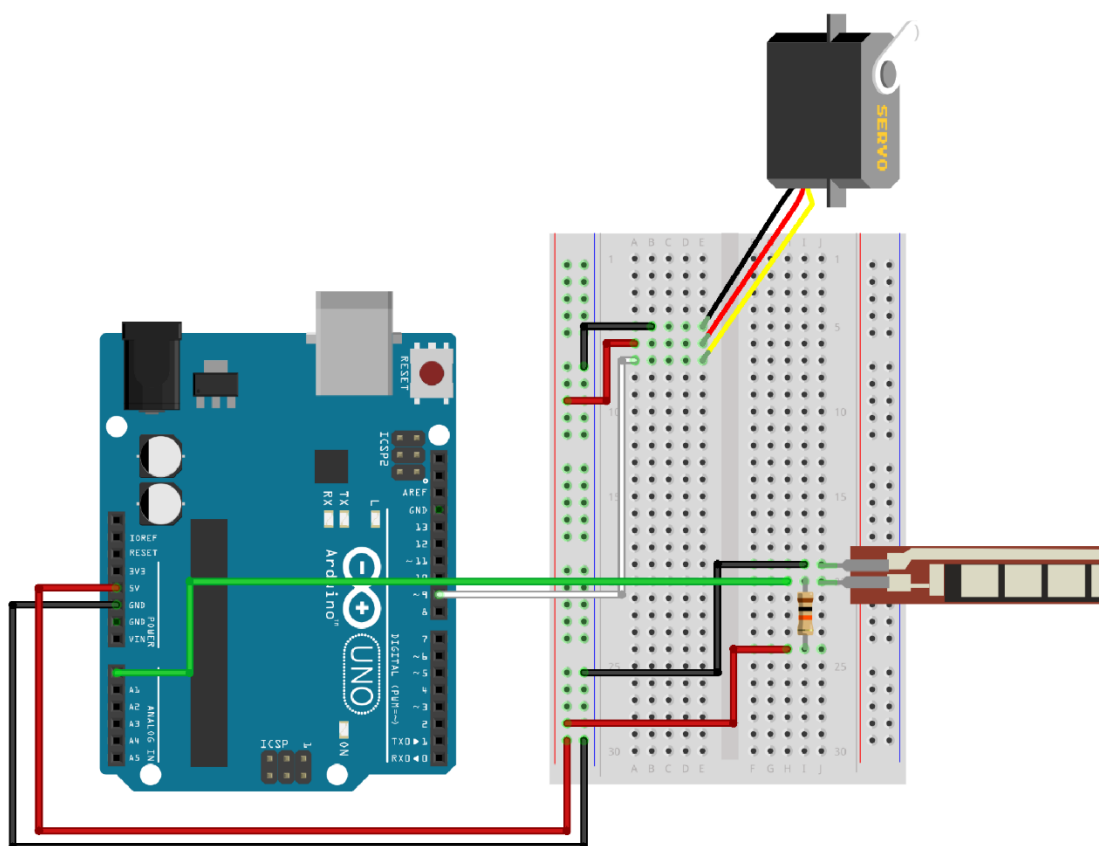
Senzor je uređaj koji mjeri fizikalnu veličinu i pretvara je u signal pogodan za daljnju obradu. Prema [1], oni su takvi elementi kod kojih neko električno svojstvo ovisi o jednoj fizikalnoj (neelektričnoj) veličini. Na kontrolnoj rukavici korišteni su fleksijski senzori SEN-10264 ROHS tvrtke Spectra symbol. Fleksijski se senzori ponašaju kao varijabilni otpornici. Savijanjem tijela senzora dolazi do promjene gustoće sastava površinskog materijala (savijanjem se čestice razmaknu) te se tako promjeni otpor.



Slika 17. Fleksijski senzor

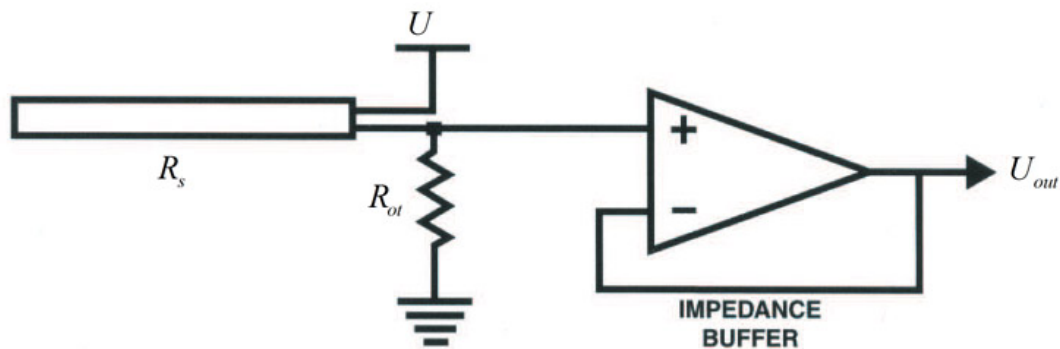


Slika 18. Shema spajanja senzora



Slika 19. Shema spajanja fleksijskog senzora i motora

Na slici 19. vidi se primjer spajanja fleksijskog senzora i motora. Na breadboard je dovedena struja od 5V. Senzor daje očitavanje na A0 ulaz mikrokontrolera (zeleni žica), dok je motor spojen na PWM digitalni izlaz 9 (bijela žica).



Slika 20. Električna shema senzora

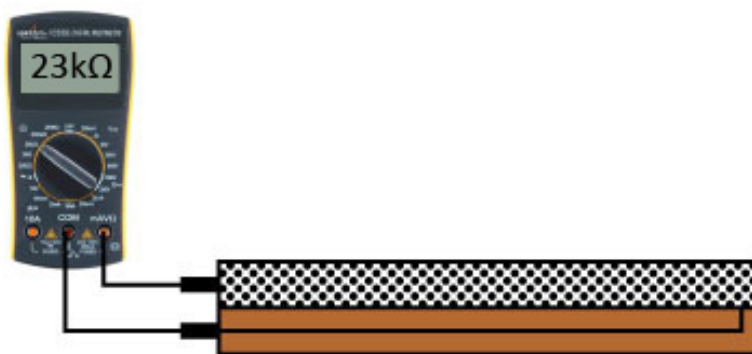
Izlazni napon  $U_{out}$  sa senzora se računa prema izrazu:

$$U_{out} = U \cdot \left( \frac{R_s}{R_s + R_{ot}} \right)$$

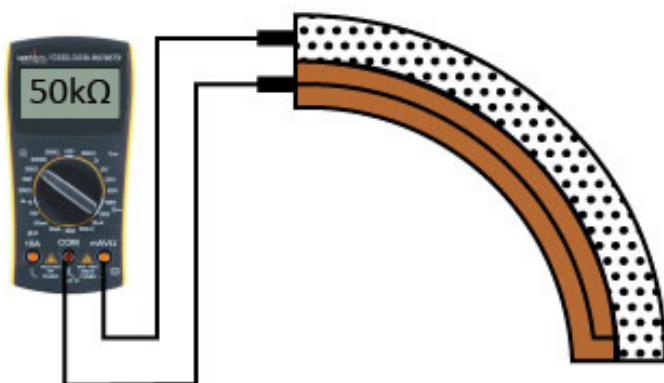
gdje su:  $U$  ulazni napon,  $R_s$  otpor senzora,  $R_{ot}$  otpor otpornika.

Na ovaj se senzor mogu staviti bilo koji otpornici, otpor senzora će se uvijek mijenjati a time i izlazni napon. Promijeniti će se izlazni napon, ali ne i izlazni opseg on je uvijek konstantan jer je  $R_s$ , odnosno minimalni i maksimalni otpor senzora uvijek isti. Morati će se jedino pripaziti na raspon očitavanja serial monitora u Arduino software-u kod podešavanja upravljačkog programa.

Pomoću multimetra, izmjereni su otpori senzora u početnom i krajnjem položaju savijanja. U početnom stanju otpor  $R_0 \approx 23k\Omega$ , dok izmjereni otpor u krajnjem položaju iznosi  $R_{\max} \approx 50k\Omega$ . Dani su približni otpori i za svaki se senzor malo razlikuju, ali to ne utječe na vođenje procesa jer se raspon definira unutar upravljačkog programa.



Senzor u nesavinutom stanju - provodljive čestice zbijene

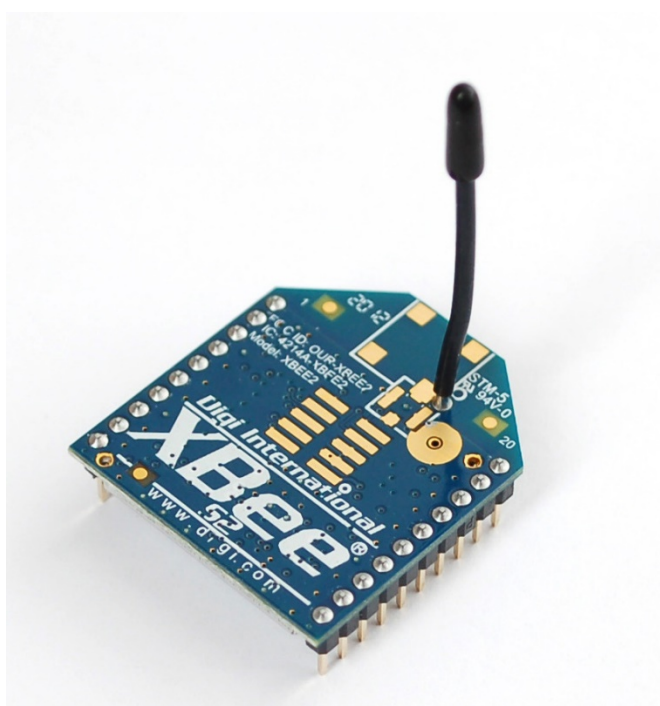


Senzor u savinutom stanju - provodljive čestice razmaknute

Slika 21. Mjerenje otpora senzora

### 3.3. Bežična komunikacija

Kako bi se riješila bežična komunikacija između kontrolne rukavice i robotske šake, odabrani su RF (*engl. Radio Frequency*) moduli XBee S2 tvrtke Digi International. To su modularni proizvodi koji omogućuju implementaciju bežične tehnologije u različite sustave. Bazirani su na većem broju komunikacijskih protokola koji se mogu mijenjati preko software-a što omogućuje veliku fleksibilnost.



Slika 22. Modul za bežičnu komunikaciju XBee S2

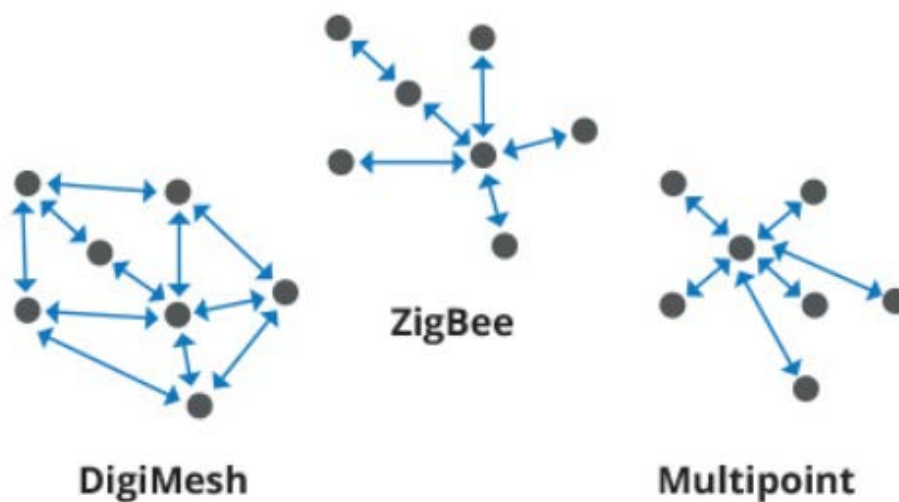
Firmware je programski kod pohranjen u trajnoj memoriji modula koji omogućuje kontrolu nad programom uređaja. Software XCTU omogućava promjenu firmware-a modula po korisnikovoj želji. To se radi pri konfiguraciji kada se žele definirati uloge pojedinih modula. Kod projektiranja animatronske šake potrebno je definirati jedan modul koji predstavlja koordinatora (prima signale) i router koji šalje signale (kontrolna rukavica).

Radio komunikacijski protokol je set pravila za razmjenu podataka između dva ili više modula. XBee moduli imaju podršku za različite protokole ovisno o vrsti modula i firmware-u.

XBee S2 ima podršku za sljedeće protokole:

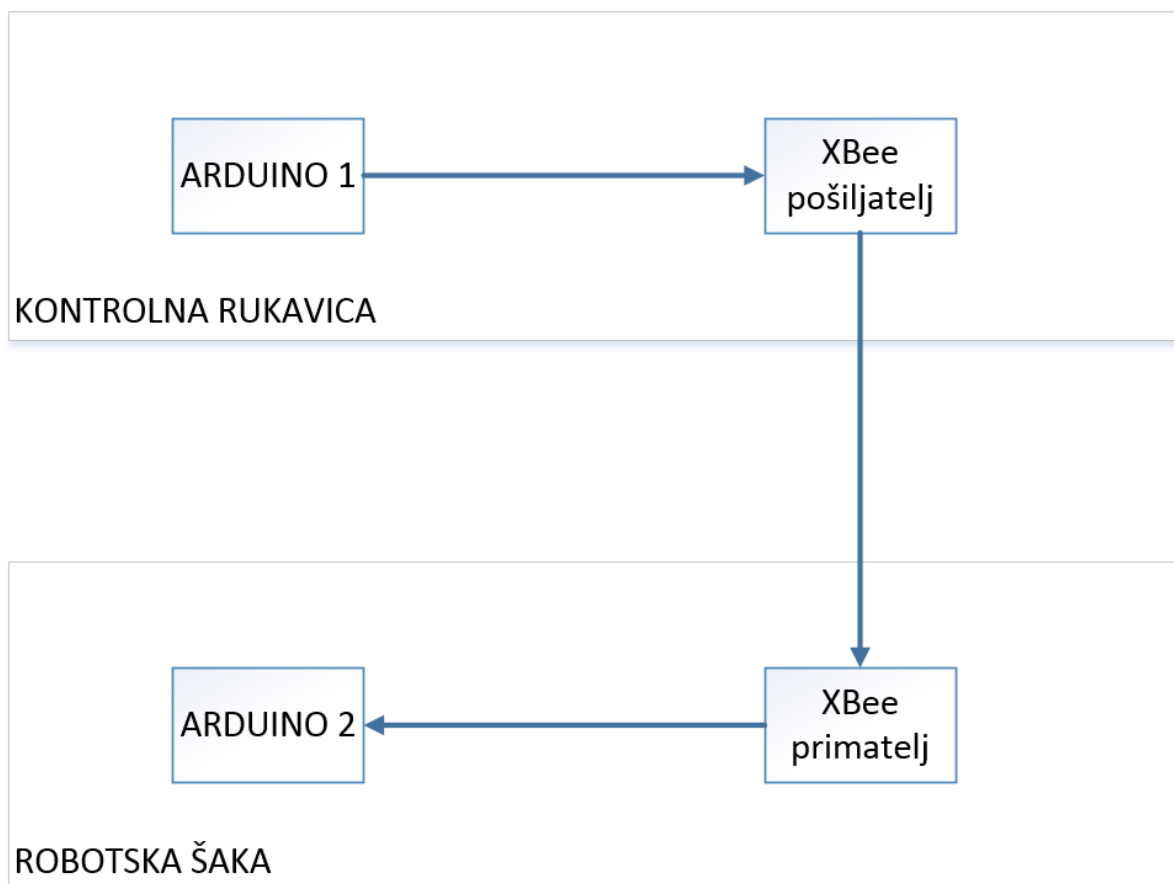
- ZigBee
- ZigBee Smart Energy
- DigiMesh
- ZNet
- IEEE 802.11 (Wi-Fi)
- Point-to-multipoint
- XSC

Ovisno o protokolu, moduli se povezuju u bežične mreže. Moduli se postavljaju u modove rada koordinatora, routera ili krajnjeg korisnika. Na sljedećoj je slici prikaz tipičnog povezivanja ovisno o protokolu.



Slika 23. Topologija komunikacijskih protokola

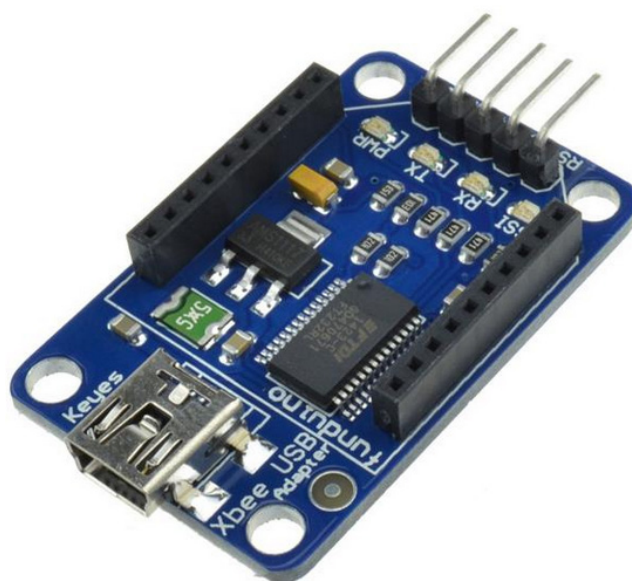
Bežična animatronička šaka mora raditi na način da se sakupljaju analogni signali sa senzora kontrolne rukavice, mikrokontroler ih sabire i preko serijske veze dolazi do komunikacije između dva XBee-a. Mikrokontroler na strani robotske šake dobiva informaciju o poziciji senzora i šalje signal na motore. Ta veza bi se mogla prikazati sljedećim dijagramom.



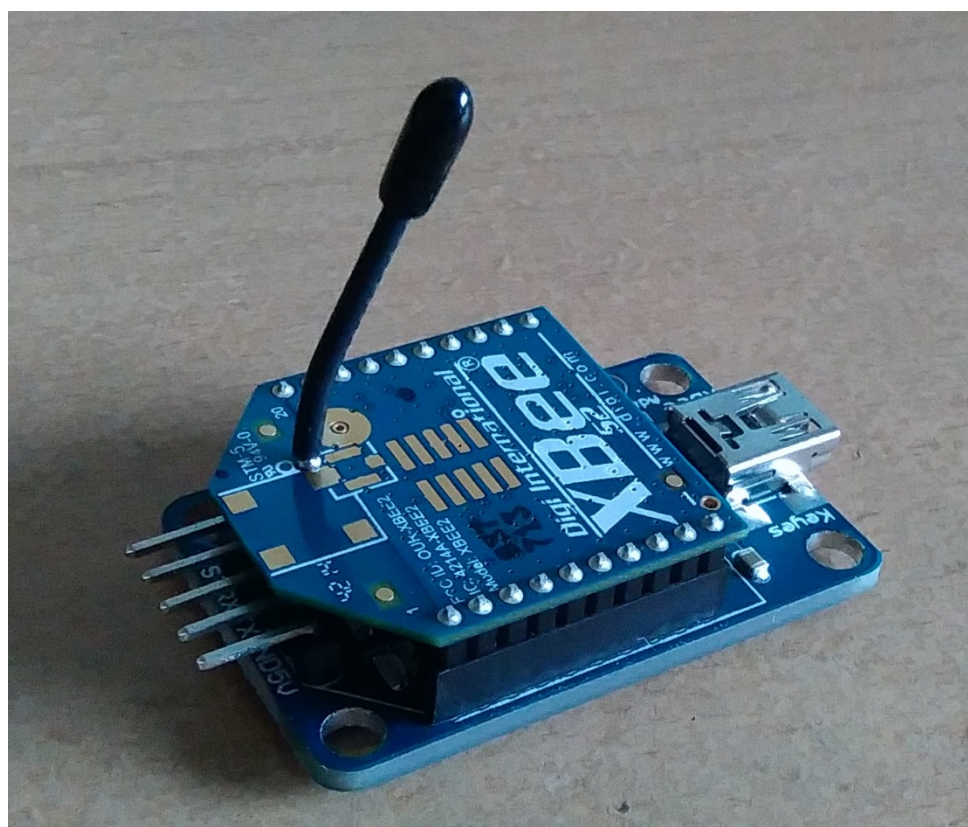
Slika 24. Komunikacija između XBee-a i mikrokontrolera

Kako XBee moduli rade na naponu od 3,3V, a programira se serijskom vezom preko USB porta koji daje 5V, potreban je programator koji će zaštititi modul od previsokog napona. Xbee se utakne na programator s gornje strane te se kablom spoji s USB-om. Isto tako, ima mogućnost spajanja na breadboard s prednje strane. Ulazi su 5V, nula, RX (receive) i TX (transmit).





Slika 25. USB programator

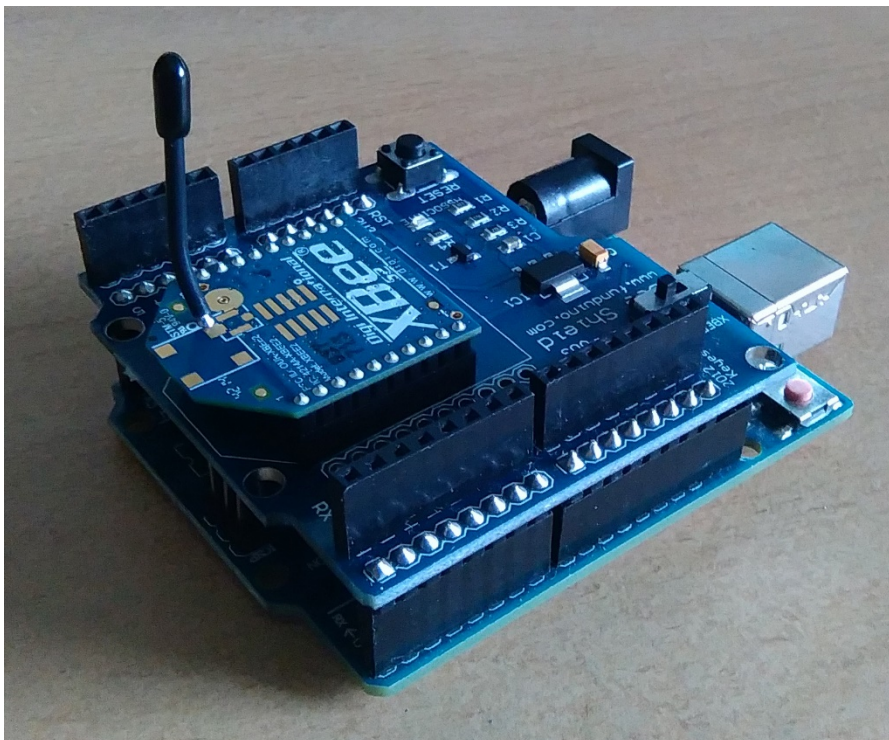


Slika 26. XBee modul na programatoru

Isto tako, kako bi se moduli lakše smjestili u sustavu, na rukavicu i robotsku šaku, odabrani su XBee shieldovi (štitovi) koji se stavljaju s gornje strane na Arduino (isti je raspored pinova) i ima isti raspored ulaza na headerima. Shield, isto kao i programator, ima s gornje strane utore u koje se umetne XBee. Shield se može koristiti i kao programator, jer ima prekidač koji prebacuje između USB veze i samog XBee-a. No, pokazalo se da zna biti problema kod prebacivanja te je zbog toga korišten programator za programiranje.



Slika 27. XBee štit (*engl.shield*)



Slika 28. Arduino sa shieldom i XBee-om

### 3.4. Upravljački program

Upravljački su programi napisani u Arduinovom IDE open-source IDE programskom jeziku. Programski je jezik baziran na C, C++ i Java programskim jezicima. Software sadrži veliku bazu preprogramiranih programa u library-u. Program se sastoji od dvije funkcije, *setup()* koja se izvrši jednom kada se pokrene program za inicijalizaciju procesa, te *loop()* funkcija koja se ponavlja ciklički sve dok se ne prekine dovod električne energije.

Kod programiranja bežične animatroničke šake potrebna su dva mikrokontrolera, pa tako i dva upravljačka programa. Jedan na strani kontrolne rukavice, a drugi na strani robotske šake. Algoritam bi trebao izgledati kao na slici 29.



Slika 29. Tok upravljanja sustava

### 3.4.1. Programski kod na strani kontrolne rukavice

```
#include <XBee.h>
```

Uključuje funkciju za korištenje Xbee modula iz library-a softwarea.

```
const int flex_senzor = 0;
```

```
const int flex_senzor2 = 1;
```

```
const int flex_senzor3 = 2;
```

```
const int flex_senzor4 = 3;
```

```
const int flex_senzor5 = 5;
```

Fleksijski senzori su pridruženi analognim ulazima mikrokontrolera zbog očitavanja. Svaki senzor mora imati svoju varijablu, odnosno svako očitavanje jedan iznos.

```
void setup()
```

```
{
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
}
```

U inicijalizacijskoj funkciji deklarira se uspostava serijske veze 9600 bita po sekundi.

```
void loop() {
```

```
  int pozicija_motora;
```

```
  int pozicija_motora2;
```

```
  int pozicija_motora3;
```

```
  int pozicija_motora4;
```

```
  int pozicija_motora5;
```

Na početku cikličke funkcije deklariraju se varijable u koje će se upisati vrijednosti ovisne o očitavanju stanja senzora.

```
int stanje_senzora;  
int stanje_senzora2;  
int stanje_senzora3;  
int stanje_senzora4;  
int stanje_senzora5;
```

Zatim se deklariraju varijable u koje će se zapisati očitana stanja pojedinog senzora.

```
stanje_senzora = analogRead(flex_senzor);  
stanje_senzora2 = analogRead(flex_senzor2);  
stanje_senzora3 = analogRead(flex_senzor3);  
stanje_senzora4 = analogRead(flex_senzor4);  
stanje_senzora5 = analogRead(flex_senzor5);
```

Funkcija *analogRead* omogućuje očitavanje analogne vrijednosti sa ulaza A0...A5 mikrokontrolera. U varijable *stanje\_senzora*, od 1 do 5, se upisuju očitane vrijednosti i spremaju u memoriju.

```
pozicija_motora = map(stanje_senzora, 725,900, 180,0);  
pozicija_motora2 = map(stanje_senzora2, 725,900, 0,180);  
pozicija_motora3 = map(stanje_senzora3, 725,900, 0,180);  
pozicija_motora4 = map(stanje_senzora4, 725,900, 0,180);  
pozicija_motora5 = map(stanje_senzora5, 725,900, 180,0);
```

U varijable *pozicija\_motora*, od 1 do 5, se preko funkcije *map()* zadaju stanja za pozicioniranje motora. Funkcija *map()* radi na način da se u zagradu mora zadati pet argumenata.

- *map(value, fromLow, FromHigh, toLow, toHigh)*

Za određenu varijablu (*value*) u našem slučaju stanje senzora, u rasponu očitavanja senzora (*fromLow, FromHigh*) zadaj poziciju motoru (*toLow, toHigh*). Preko serial monitora mogu se očitati stanja senzora, gdje bi *fromLow* bilo stanje kada senzor nije savijen i to iznosi približno 725, dok kod maksimalno savinutog senzora to iznosi oko 900. U razmjeru toga postavlja se vrijednost zakreta kuta motora od 0 do 180 stupnjeva, ili od 180 do 0 stupnjeva ovisno u koju stranu je potreban zakret. Vrijednosti 725 i 900 variraju i nisu konstantne i ovise od senzora do senzora. Eksperimentalnim očitavanjima ustanovljeno je kako se dobije stabilan rad upravo za 725 i 900. Ukoliko se krivo postavi raspon, može doći do nestabilnosti sustava i trzanja motora.

```
Serial.print(pozicija_motora);  
Serial.print(pozicija_motora2);  
Serial.print(pozicija_motora3);  
Serial.print(pozicija_motora4);  
Serial.print(pozicija_motora5);  
  
delay(90);  
}
```

Na kraju se funkcijom *Serial.print()* pošalju vrijednosti serijskom vezom kako bi XBee poslao vrijednosti na drugi XBee i Arduino. Funkcija *delay()* označava odgodu i zadaje se u milisekundama. Odgoda je potrebna kako bi u cikličkom izvođenju programa ostalo vremena procesoru za računanje i za sistemsku rezervu. Što je manji delay potreban je brži mikroprocesor. Kada je sustav spojen žično, moguće je smanjivanje delay-a i na 25 ms bez ikakvog kašnjenja u odzivu.

### 3.4.2. Programski kod na strani robotske šake

```
#include <XBee.h>
#include <Servo.h>
```

Uključuje funkciju za korištenje Xbee modula iz library-a softwarea, isto tako i funkciju Servo za upravljanje servomotorima.

```
Servo upravljanje;
Servo upravljanje2;
Servo upravljanje3;
Servo upravljanje4;
Servo upravljanje5;
```

Zatim se deklarira pet Servo funkcija za upravljanje motorima.

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

  upravljanje.attach(9);
  upravljanje2.attach(11);
  upravljanje3.attach(5);
  upravljanje4.attach(6);
  upravljanje5.attach(10);
}
```

S druge strane se također uspostavlja serijska veza s 9600 bita po sekundi. U inicijalizacijskoj funkciji se servo funkcije pridružuju (funkcijom *attach*) digitalnim izlazima mikrokontrolera. Mora se paziti da izlazi podržavaju PWM funkciju.

```
void loop()
{
  if(Serial.available() >=5)
```

Sa *if* petljom se provjerava da li je uspostavljena serijska veza za bežičnu komunikaciju.

```
{
  zakret_motora = Serial.read();
  zakret_motora2 = Serial.read();
  zakret_motora3 = Serial.read();
  zakret_motora4 = Serial.read();
  zakret_motora5 = Serial.read();
```

Ako je serijska veza uspostavljena, učitavaju se stanja i zapisuju u varijable zakret motora, od 1 do 5.

```
  upravljanje.write(zakret_motora);
  upravljanje2.write(zakret_motora2);
  upravljanje3.write(zakret_motora3);
  upravljanje4.write(zakret_motora4);
  upravljanje5.write(zakret_motora5);
}
```

U servo funkcije upisuju se vrijednosti zakreta motora te se šalju signali na digitalne izlaze.

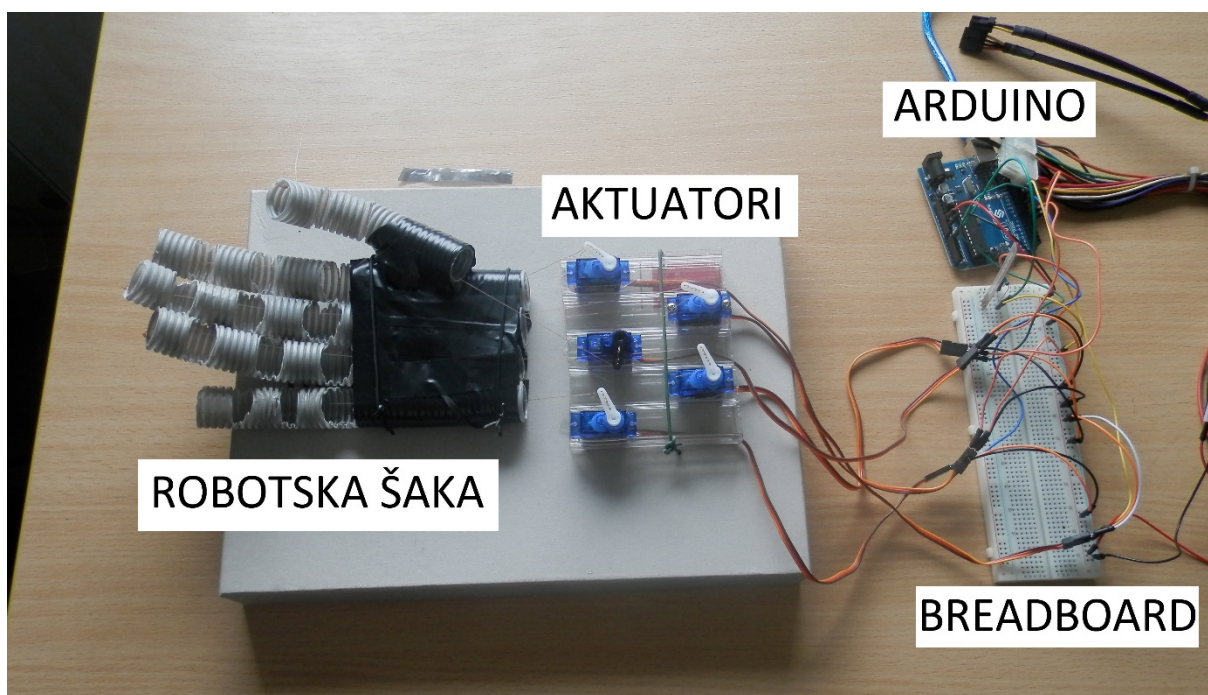


## 4. IZRADA BEŽIČNE ANIMATRONIČKE ŠAKE

### 4.1. Izrada robotske šake

U izradi prstiju robotske šake korištene su savitljive elektroinstalacijske cijevi promjera 16 mm. Korištene su iz razloga što imaju izvrsna mehanička svojstva. Cijevi su iznimno savitljive i ne pucaju lako. Otpuštanjem savinutog crijeva ono se vraća u početni položaj. Isto kao i ljudski prsti, prsti robotske šake imaju identičan broj zglobova. Na svakom je prstu napravljen V zarez kako bi se prsti lakše savijali. Na vrh svakog prsta zavezano je tanko čvrsto uže. Na dijelu šake prsti su povezani ljepljivom trakom i između je postavljena spužva da malo odvoji prste radi lakšeg kretanja bez međusobnog trenja.

Motora su fiksirani u pleksiglasno kućište rasporedom prikazanom na slici 30. Iskorištena su četiri motora SG 90 i jedan motor SG92R koji poteže palac šake. Druga strana užeta zavezana je za vrhove poluge koju zakreću motori.



Slika 30. Dijelovi sustava robotske šake

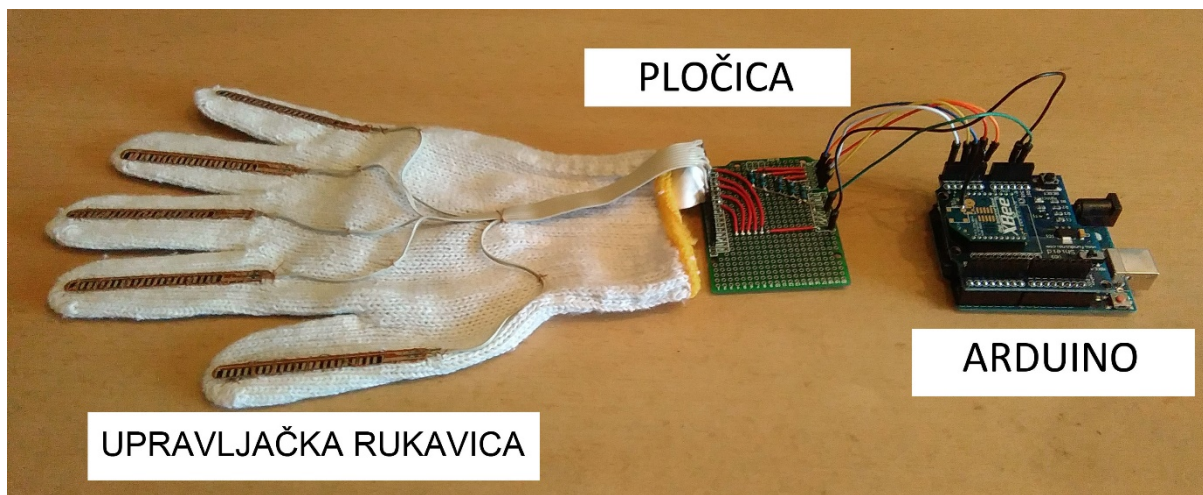
## 4.2. Izrada upravljačke rukavice

Da bi bilo moguće napraviti kontrolnu rukavicu prvo je potrebno zalemiti senzore i napraviti upravljačku pločicu. Senzori su zalemljeni na ATA kabel da bi se držali skupa i lakše zašili na rukavicu. S druge su strane zalemljeni pinovi koji se lako mogu utaknuti na ulaze na pločici.



Slika 31. Zalemljeni senzori

Nakon toga, potrebno je zašiti senzore za rukavicu. Uzeta je platnena rukavica da bi šivanje bilo lakše ostvareno. Zašiveni senzori moraju biti fiksirani za prste rukavice i ne smiju biti pomični naprijed natrag, već moraju pratiti konturu prstiju dok se savijaju.



Slika 32. Sustav upravljačke rukavice

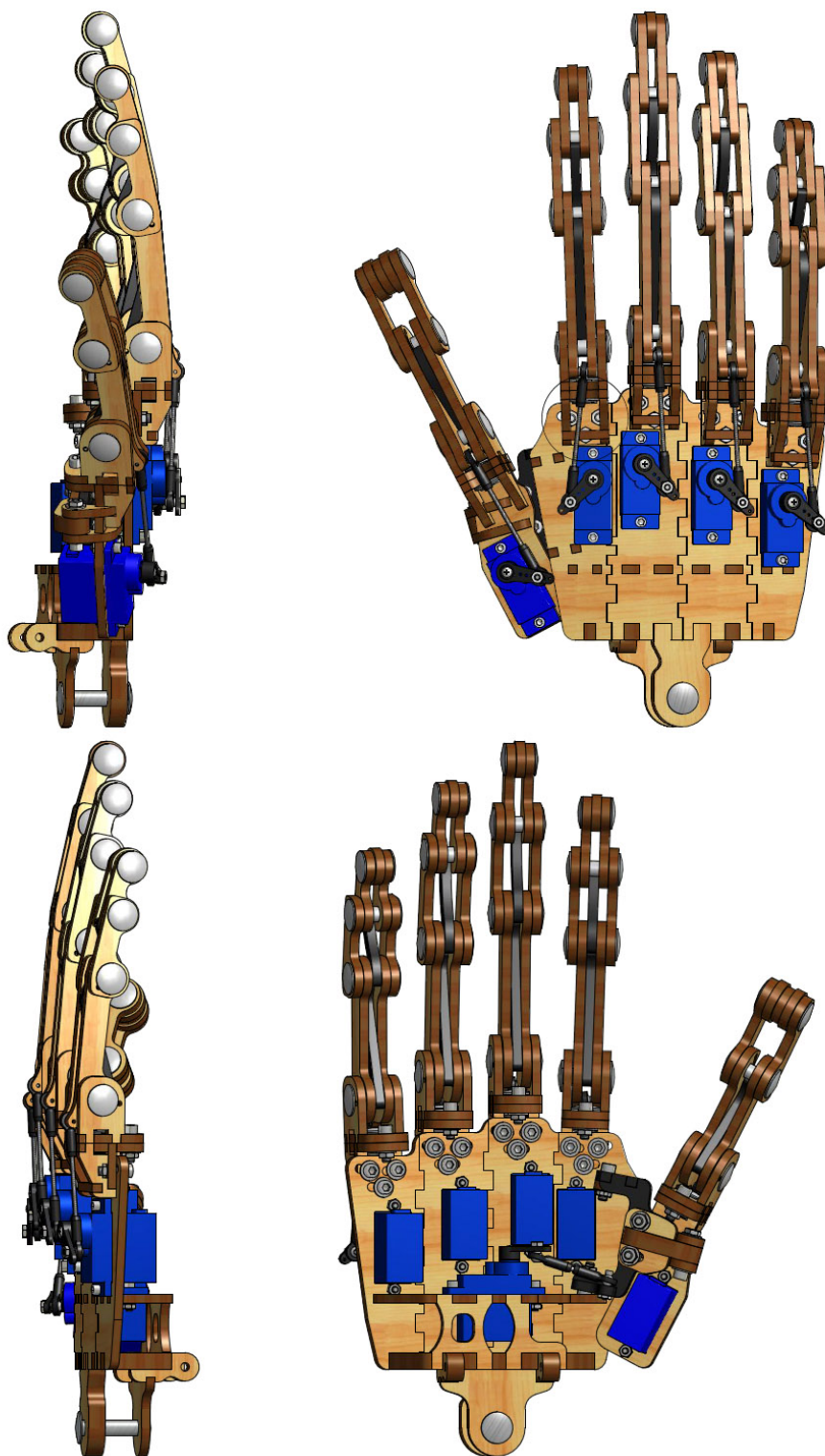
#### 4.3. Problemi u radu

Pri projektiranju i izradi, došlo je do više problema i izazova, kako kod izrade fizičkih dijelova tako i kod programiranja i stabilnosti sustava.

Na početku rada najveće je pitanje bilo koji materijal odabrati za prste robotske šake. Nakon razmatranja odabrana su savitljiva crijeva zbog najboljih mehaničkih svojstava. Zatim, bilo je problema sa motorima, koji se ako područje očitavanja senzora nije dobro definirano, ponašaju nestabilno i podrhtavaju. Tako je za svaki senzor bilo potrebno eksperimentalno odrediti područje očitavanja i implementirati u upravljački program.

Najveći je problem bio implementirati bežičnu vezu. Moduli XBee S2 sami po sebi nemaju mogućnost spajanja na računalo bez programatora i zaštite od previsokog napona. Isto tako, nemaju stabilnu komunikacijsku vezu s računalnom te je ponekad potrebno više puta učitati uređaj kako bi ga software prepoznao. Također, došlo je do problema prilikom uploada firmware-a na sam uređaj iz programskog sučelja X-CTU, a kako XBee moduli nemaju fizičku reset tipku već samo programski reset, bilo je potrebno nabaviti drugi uređaj.

#### 4.4. Budući planovi i moguća rješenja



Slika 33. Robotska šaka sa integriranim motorima

Na slici 33. prikazana je robotska šaka izrađena od drva i metala. Zglobovi su načinjeni od metalnih osovina i sistem pokretanja prstiju je drukčiji. Motori preko čvrstih metalnih veza guraju prste naprijed kako bi se savili. Isto tako, da bi se to moglo ostvariti motori su integrirani u dlan ruke, što je velika prednost, i postavljeni su na suprotnu stranu. Iako ovakva izvedba pruža najčvršću konstrukciju i može prenijeti najviše sile, konstrukcija je veoma složena.



Slika 34. Animatronička šaka izrađena na 3D printeru

Druga je opcija izrada šake na 3D printeru kao što je prikazano na slici 34. Ovo se rješenje najviše približava izgledu i obliku prave ljudske šake i moglo bi prenositi sile srednje veličine. Motori bi se morali pozicionirati isto kao i kod napravljene robotske šake.

## **5. ZAKLJUČAK**

Cilj je ovog rada bio demonstrirati način bežičnog upravljanja. Implementacija bioloških principa u robotske, ponajviše kinematičkih i dinamičkih principa, sve je veći trend u robotici. To je posljedica toga što su se biološki sustavi, čovjekovo tijelo, kroz evoluciju približili optimalnim rješenjima u smislu gibanja po prostoru. Kako se u tehnici uvijek teži optimalnom rješenju radi maksimalne efikasnosti sustava, dobro je polazište osvrnuti se na živi svijet pri izvedbi tehničkih rješenja.

Bežična animatronička šaka može biti polazište za daljnji razvoj upravljanja nekog složenijeg sustava. Za primjer, moglo bi se napraviti upravljanje robota koji radi u opasnom okolišu, te bi se pomicanjem prstiju kontrolne rukavice odvijale određene funkcije robota. Isto tako, mogla bi se iskoristiti u slučaju paraliziranih ili teško pokretnih osoba. Kao i prije navedeno pokreti prstiju bi određivali određene funkcije, npr. uključivanje i isključivanje svjetala, dozivanje medicinske sestre, podizanje i spuštanje kreveta i slično.

## LITERATURA

- [1] Davor Zorc, *Mikroprocesorsko upravljanje*, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [2] Ivan Gašparac, *Električni aktuatori*, predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva
- [3] Božidar Skalicki, Josip Grilec, *Električni strojevi i pogoni*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [4] *Overview*, [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc), pristup 5.2.2016.
- [5] *Servomotor*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Servomotor> , pristup 7.1.2016.
- [6] Karakteristike SG92R motora, <http://www.towerpro.com.tw/product/sg92r-7>, pristup 6.2.2016.
- [7] Karakteristike programatora i XBee štita, [www.funduino.de](http://www.funduino.de), pristup 9.2.2016.
- [8] Prof. Mrs. Shubhada Deshpande, Tejashree Dhamaourkar, Neelakshi Ghag, Aarti Kamble, Krutika Bhiwapurkur , *Wireless Animatronic Hand using Control Glove*, International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering, 2015.
- [9] Karakteristike fleksijskih senzora, [www.sparkfun.com](http://www.sparkfun.com), pristup 9.2.2016.
- [10] Karakteristike XBee modula, [www.digi.com](http://www.digi.com), pristup 9.2.2016.
- [11] *Animatronics*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Animatronics>, pristup 15.2.2016.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc