

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Leon Malnar
Andrija Gložinić
Ivan Fanjek
Davor Širinić
Luka Mišković
Tomislav Kosor

BIONIČKI ROBOTSKI SUSTAVI S PNEUMATSKIM I ELEKTRIČNIM POGONOM

Zagreb, 2018.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za strojarsku automatiku, Zavoda za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava pod vodstvom prof. dr. sc. Željka Šituma i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA.....	V
1. UVOD.....	1
2. ROBOT ZA IGRANJE ŠAHA.....	2
2.1. Projektiranje i izrada konstrukcije robota za interaktivno igranje šaha.....	2
2.2. Kinematički model robota	11
2.3. Mjerni uređaji i implementacija	18
3. DVONOŽNI HODAJUĆI ROBOT.....	22
3.1. Projektiranje i izrada konstrukcije dvonožnog robota	22
3.2. Pogonski sustav robota	33
3.3. Upravljanje gibanjem sustava.....	36
4. BIONIČKA ŠAKA.....	39
4.1. Projektiranje i izrada bioničke šake.....	39
4.2. Elektronički sustav bioničke ruke.....	45
4.3. Upravljanje bioničkom rukom.....	52
5. EGZOSKELETONSKA RUKA.....	55
5.1. Projektiranje i izrada konstrukcije egzoskeletonske ruke.....	56
5.2. Energetski sustav ruke	58
5.3. Upravljački sustav ruke	63
6. ZAKLJUČAK.....	68
Zahvala.....	69
Literatura.....	70
Sažetak	71
Summary	73
Životopis	75

POPIS SLIKA

Slika 1.	Izgled siluete figura.....	3
Slika 2.	Bočni prikaz šahovskih figura.....	4
Slika 3.	Model držača figura	4
Slika 4.	Izgled zatvorene (lijevo) i otvorene (desno) hvataljke.....	5
Slika 5.	Model sklopa hvataljke	6
Slika 6.	Prikaz načina prijenosa rotacije glavnog nosača.....	7
Slika 7.	Model gotovog glavnog nosača	8
Slika 8.	Bočni prikaz dijelova segmenata	9
Slika 9.	Prikaz gotovog modela robota u različitim položajima	10
Slika 10.	Prikaz solidificiranih dijelova sustava	11
Slika 11.	Bočni prikaz s glavnim dimenzijama.....	12
Slika 12.	Prikaz upravljivih stupnjeva slobode	13
Slika 13.	Shematski prikaz položaja hvataljke u prostoru	15
Slika 14.	Planarni shematski prikaz položaja hvataljke	16
Slika 15.	Trokut za analizu unutarnjih koordinata	16
Slika 16.	Shema matričnog povezivanja senzora	19
Slika 17.	Donja strana ploče sa sensorima.....	20
Slika 18.	Gotov robotski sustav za igranje šaha.....	21
Slika 19.	Konstrukcija robota.....	22
Slika 20.	Kompresor Viair 400C.....	23
Slika 21.	Spremnik zraka Festo CRVZS-2.....	23
Slika 22.	Pripremna grupa Festo LFRS-1/8-D-7-MINI-A	24
Slika 23.	Ventilski blok Festo	24
Slika 24.	Prigušno-nepovratni ventil Festo GR-QS-6.....	25
Slika 25.	Umjetni pneumatski mišići Festo DMSP.....	25
Slika 26.	Specifikacije baterije.....	26
Slika 27.	Arduino Leonardo	26
Slika 28.	Primjer enkodera s magnetskim prstenom	27
Slika 29.	Arduino MPU-6050	27
Slika 30.	Geometrija noge.....	28
Slika 31.	Gornji članak noge	29
Slika 32.	Izrađeni robot	30
Slika 33.	Konstrukcija trupa.....	31
Slika 34.	Trup robota.....	32
Slika 35.	Spreg pneumatskih mišića	33
Slika 36.	Shema pneumatskog sustava robota	35
Slika 37.	Prikaz hoda robota	37
Slika 38.	Robot u nultom položaju.....	38
Slika 39.	Rješenje savijanja mehaničkog prsta	40

Slika 40.	Pokreti ljudskog palca.....	40
Slika 41.	Mehanički palac	41
Slika 42.	Sustav štapova za prenošenje snage s pneumatskih mišića na prste šake.....	41
Slika 43.	Prva verzija bioničke ruke.....	42
Slika 44.	Dlan nove verzije bioničke ruke	43
Slika 45.	Presjek prsta	43
Slika 46.	Podlaktica s pripadnim elektroničkim komponentama.....	44
Slika 47.	CAD model druge verzije bioničke ruke	44
Slika 48.	Dijelovi sustava bioničke ruke.....	45
Slika 49.	EMG senzor	46
Slika 50.	Princip rada EMG senzora	46
Slika 51.	Signali EMG MyoWare senzora	47
Slika 52.	FSR senzor s pripadnom karakteristikom	47
Slika 53.	Serijski spoj litij-ionskih baterija	48
Slika 54.	MG90S servomotor.....	50
Slika 55.	Upravljački modul Arduino Uno	51
Slika 56.	Elektronička konfiguracija bioničke ruke	51
Slika 57.	Snimljeni signal EMG senzora	52
Slika 58.	Spajanje elektroda EMG senzora na površinu kože.....	53
Slika 59.	PID regulacija	53
Slika 60.	Simulacija PID regulacije	54
Slika 61.	Hvatanje predmeta	54
Slika 62.	Mobilni stroj Hardiman.....	55
Slika 63.	Prototip robota HAL	56
Slika 64.	Konstrukcija ortoze	57
Slika 65.	Plastična tipla	58
Slika 66.	Matica s gumicom.....	58
Slika 67.	McKibbenov pneumatski mišić	59
Slika 68.	Antagonistički par pneumatskih mišića	59
Slika 69.	Mini kompresor.....	60
Slika 70.	Ventil MHE2-MS1H-3/2G-QS-4-K	61
Slika 71.	Lateks cjevčica.....	61
Slika 72.	Flexo pletivo u opuštenom i skupljenom stanju.....	62
Slika 73.	Ulazni kraj mišića	62
Slika 74.	Zatvoreni kraj mišića	63
Slika 75.	Oznake pinova mikrokontrolera Arduino Nano.....	64
Slika 76.	Shema sklopa za upravljanje.....	65
Slika 77.	MyoWare EMG senzor	66
Slika 78.	Simulacija rada.....	66
Slika 79.	Ortoza na ruci.....	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike korištene litij-ionske baterije	49
Tablica 2. Karakteristike MG90S servomotora	50
Tablica 3. Specifikacije razvojne platforme Arduino Nano	63
Tablica 4. Tablica pinova za Arduino Nano	64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b_h	[mm]	Širina hvataljke
b_{s1}	[mm]	Širina segmenta 1
b_{s2}	[mm]	Širina segmenta 2
d_m	[mm]	Udaljenost ravnine za montažu motora od osi rotacije
L_{s1}	[mm]	Duljina segmenta 1
L_{s2}	[mm]	Duljina segmenta 2
L_n	[mm]	Visina glavnog nosača
L_{hy}	[mm]	Udaljenost držala figure od zgloba na hvataljci po osi y
L_{hz}	[mm]	Udaljenost držala figure od zgloba na hvataljci po osi z
p_x	[mm]	Vanjska koordinata x prihvata figure
p_y	[mm]	Vanjska koordinata y prihvata figure
p_z	[mm]	Vanjska koordinata z prihvata figure
q_1	[rad]	Kut zakreta motora 1
q_2	[rad]	Kut zakreta motora 2
q_3	[rad]	Kut zakreta motora 3

1. UVOD

Bionika (starogrčki: βίος, što znači "jedinica života" i sufiks-ic, što znači "poput" ili "na način", stoga "kao život") je međuznanstvena disciplina koja se bavi konstrukcijom takvih tehničkih uređaja, najčešće elektroničkih, koji bi u svojem djelovanju tehnički reproducirali rad nekoga biološkog sustava [1].

Oponašanje prirode može biti vrlo korisno jer je većina živih bića proizvod dugotrajne evolucije, a njihov se današnji način života temelji na golemu iskustvu. Tako je, npr., životinjski mišić djelotvoran mehanički motor, sunčeva se energija pohranjuje u biljkama u kemijskom obliku s gotovo 100%-tnom djelotvornošću, prijenos informacija unutar živčanog sustava mnogo je složeniji nego u najvećemu telekomunikacijskom centru, u rješavanju problema ljudski je mozak uspješniji od najjačeg računala. Iz toga proizlaze dva glavna područja istraživanja u bionici: obradba informacija i pretvorba energije. Jedan je od važnijih ciljeva tzv. umjetni list, koji bi tehnički oponašao fotosintezu, a poseban je interes usmjeren na strukturalna svojstva i radni učinak živčanih stanica te na funkcioniranje osjetnih organa i receptora u životinja (npr. orijentacija hruštava i termita prema silnicama Zemljina elektromagnetskog polja). Međutim, izravno je oponašanje prirode vrlo teško, gotovo nemoguće, ali je važno razumjeti načela po kojima se nešto u prirodi zbiva, a oponašati samo detalje. Tako je dosad samoregulacija biološkog procesa poslužila kao model za poboljšanje nekih industrijskih procesa, poznavanje djelovanja nekih osjetnih životinjskih organa pomoglo je pri konstrukciji novih tipova regulatora u tehnici, proučavanje gibanja dupina u vodi donijelo je nove spoznaje u hidrodinamici, način kojim se šišmiš služi ultrazvukom radi orijentacije u prostoru primijenjen je pri izgradnji minijaturnih akustičnih radara za slijepe itd.

Primjena bionike vrlo je široka. Bionika se primjerice u medicini koristi za zamjenu organa ili nadogradnja organa ili dijela tijela mehaničkom verzijom. Bionički implantati točno oponašaju originalnu funkciju ili je čak nadmašuju, npr. umjetna pužnica, silikonska rožnica, umjetno srce i umjetna crvena krvna zrnca. Primjeri bionike u inženjerstvu su bionički koncept automobila, "spajanje" organizma i stroja, hibridni sustavi koji kombiniraju biološke i inženjerske dijelove tzv. kibernetički organizmi. Vojna industrija isto tako koristi bioničke sustave od kojih su neki primjeri leteći roboti (stršljan, muha) koji može loviti, fotografirati ili ubiti svoj cilj. Kroz ovaj rad bit će detaljno opisani izrađeni bionički sustavi koji koriste električne i/ili pneumatske aktuatorne.

2. ROBOT ZA IGRANJE ŠAHA

2.1. Projektiranje i izrada konstrukcije robota za interaktivno igranje šaha

Da bi se moglo započeti projektiranje potrebno je prvo odrediti generalne smjernice kojih će se trebati pridržavati tijekom konstruiranja. To se najviše odnosi na tehnologije izrade i korištene materijale. Zbog dostupnosti i cijene odlučeno je da će se probati najveći dio dijelova izraditi od laserski rezanog aluminijskog lima od 3 mm, neki dijelovi će se tokariti i glodati, a dijelovi kompleksnije geometrije će se printati.

Odabir komponenti

Kod odabira komponenti se prvenstveno gledaju pogonski motori i aktuator na hvataljci.

Motori koji bi se mogli koristiti su kontinuirani DC motor, servo motor i koračni motor. Promatrani su tzv. hobby servo motori koji se odlikuju jednostavnošću upravljanja ali zbog malih dimenzija, pa time i snage normalno da nisu u rangu industrijskih motora. Jedan od takvih motora s najvećim izlaznim momentom je TowerPro MG996R. Karakteristike tog motora koje su dostupne od proizvođača su prikazane u tablici 2. Može se odmah spomenuti da će se u nastavku teksta pod pojmom motor 1 podrazumijevati motor koji robota okreće oko z osi, motor 2 je onaj koji upravlja segmentom 1, a motor 3 upravlja polugom, a samim time i segmentom 2.

Da bi se izbjeglo korištenje PWM pinova na Raspberry Pi-u, a i da se motori električki odvoje, za upravljanje motorima će se koristiti Adafruit 16-channel servo driver. To je modul koji omogućuje upravljanje sa 16 motora istovremeno uz napajanje iz nezavisnog izvora. On dolazi u HAT (Hardware Attached on Top) izvedbi za Raspberry Pi, a informacije prima preko I2C komunikacije [2].

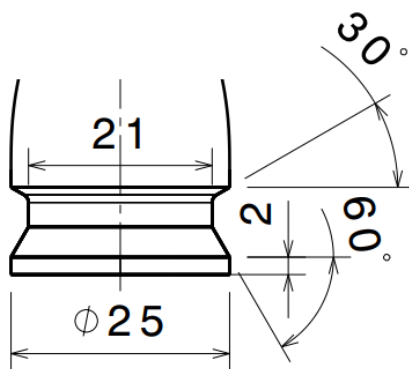
Preostaje još odabrati aktuator za hvataljku robota. Konstrukcija same hvataljke je obuhvaćena u sljedećem poglavlju, ali potrebno je prvo definirati vrstu pogona i odabrati komponentu koja će se koristiti. Za hvataljku robota je bitno da se može nalaziti u dva stanja, tj. da je normalno otvorena, a kod prihvaćanja figure da se zatvori do kraja. Kako nije potrebno upravljati pozicijom aktuatora, dovoljna je samo binarna logika. Generalno se za takvu primjenu koriste pneumatski cilindri, no to bi značilo da bi se u sklop morao staviti još i kompresor i razvodnik. Svi dijelovi sustava rade na električnu energiju pa je onda najbolje i za hvataljku koristiti električni aktuator. Najjednostavnije i najjeftinije rješenje je korištenje linearnog elektromagneta koji se još često

naziva solenoid. Linearni elektromagneti s nazivnim naponom od 5 V na koliko radi cijeli ostatak sustava imaju premale sile povlačenja i premali hod, pa je bilo potrebno naći neki koji radi na 12 V. Odabran je linearni elektromagnetski aktuator JF-0730B.

Da bi se odabralo adekvatno napajanje, potrebno je razmotriti potrošnju svakog dijela sustava. Na kraju su odabrani V-TAC 12 V 60 W za napajanje, i podesivi step-down DC-DC konverter nepoznatog proizvođača od 300W.

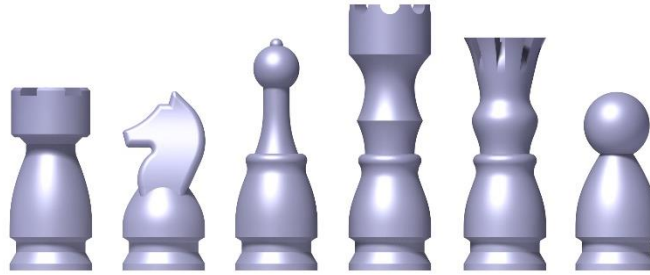
Konstrukcija figura i hvataljki

Generalna ideja je da hvataljka primi šahovsku figuru pri njenom dnu, zato što sva dna figura mogu biti jednaka što hvataljku čini jednostavnijom. Prvi zadatak je definiranje figura koje će služiti za igranje šaha. Pretraživanje gotovih figura daje brojne rezultate, ali dna tih figura u većini slučajeva nisu jednaka, a ona koja su jednaka nisu dobro prilagođena za prihvata. Zato je odlučeno da će se figure samostalno konstruirati i izraditi. Mjesto prihvata je napravljeno tako da bude malo više od onog što se može vidjeti na ostalim figurama na tržištu što omogućava dobro prihvaćanje figura i ako robot nije precizno pozicioniran.



Slika 1. Izgled siluete figura

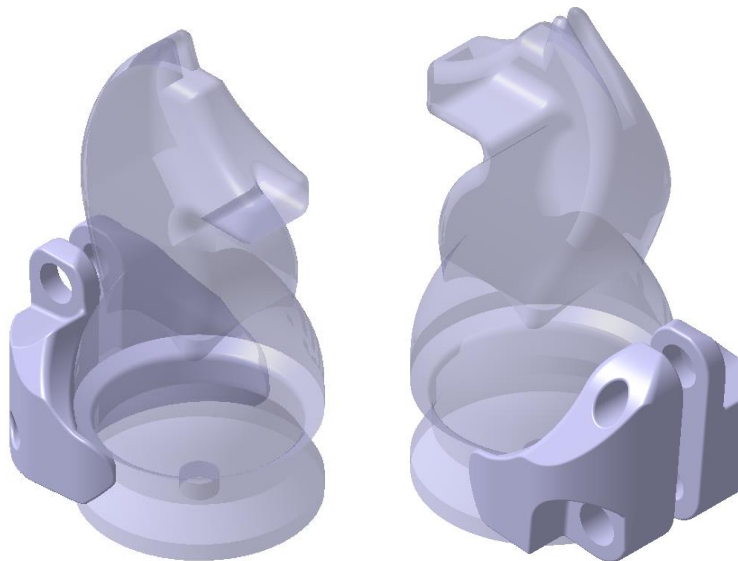
Također, stavljena su skošenja koja zbog kojih će se figure nasloniti na oblik hvataljke i pri podizanju će ostati poravnate. Ostatak figura je modeliran bez posebnih konstrukcijskih zahtjeva, uzimajući u obzir samo vizualne aspekte. Bitno je napomenuti da je najviša figura „kralj“ s visinom od 80 mm. Ta je dimenzija bitna za konstrukciju hvataljke jer ona definira duljinu poluga. Modeli svih figura su prikazani na slici 2.



Slika 2. Bočni prikaz šahovskih figura

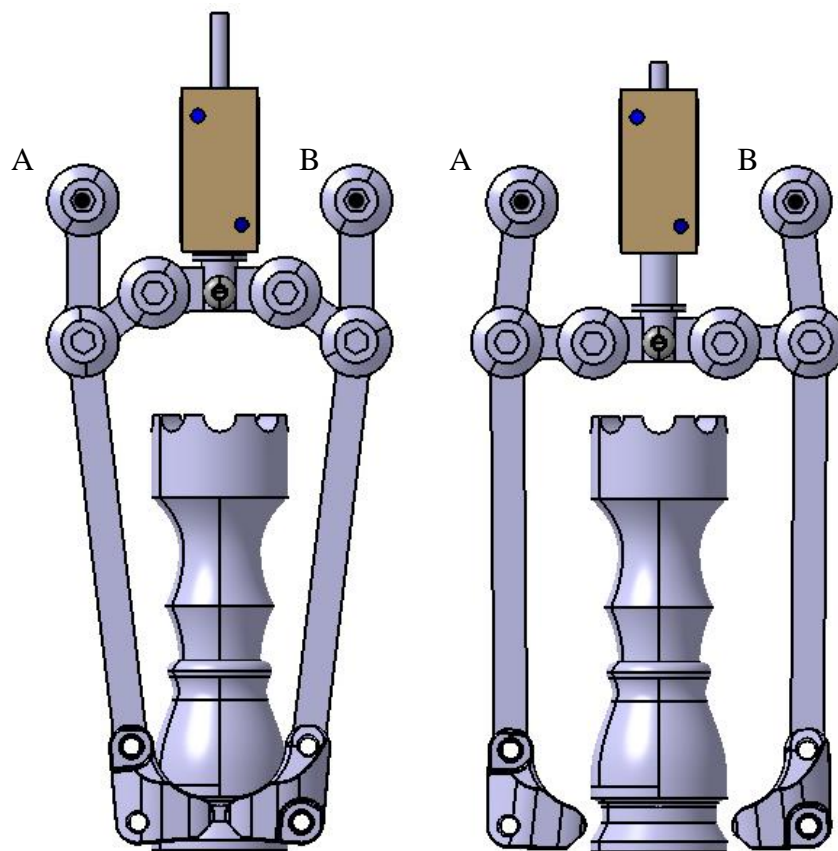
Osim visine, potrebna je bar približna veličina polja koja će se koristiti da se može ograničiti otvaranje hvataljke. Odabrana je veličina polja od 50 x 50 mm. Ta dimenzija je dovoljno velika da se ostavi mjesta za hvataljku, a dovoljno mala da segmenti robota ne budu preveliki što ima za posljedicu povećanje mase. Ako se pretpostavi da su sve figure pozicionirane točno u sredini, onda je najmanja udaljenost između dvije figure udaljene 2 polja jednaka 75 mm. Potrebno je uzeti još neki faktor sigurnosti zbog nepravilnog pozicioniranja pa se najveća udaljenost na točkama hvataljke ograničava na 65 mm.

Nakon što su definirani mehanizam i figure, može započeti konstruiranje dijelova hvataljke. Taj proces počinje konstrukcijom držača koji je izrađen prema ofsetu siluete figura za 0.1 mm. Spajanje s polugama se ostvaruje pomoću dva M4 vijka. Dimenzije su prilagođene tako da držač zauzima minimalno mjesta u polju. Zbog kompleksne geometrije će se taj dio izraditi 3D printanjem.



Slika 3. Model držača figura

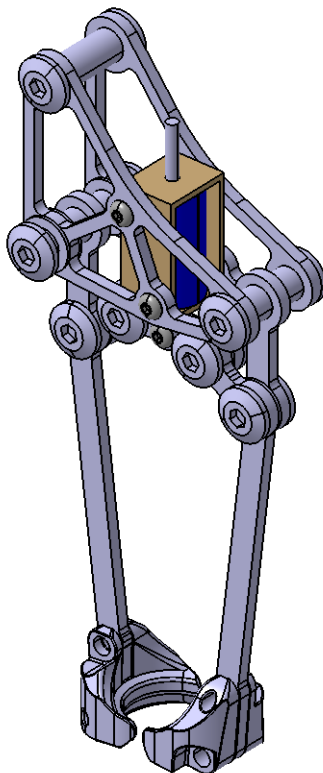
Prije početka konstruiranja ostatka dijelova potrebno je odrediti dimenzije. Dimenzije su određene tako da su unutar Sketch-a postavljena geometrijska ograničenja definirana mehanizmom na slici 4, koji je dobiven iz [3]. Potom su se neodređene dimenzije iteracijski mijenjale da se zadovolje tri uvjeta. Prvi uvjet je taj da su poluge hvataljke vertikalne kad je ona otvorena. Time se dobije najmanji pomak poluga u odnosu na pomak osovine pri početku gibanja. Samim time, smanjena je potrebna sila privlačenja. Drugi uvjet je da je linija koja predstavlja dimenziju poluge otprilike prolazi kroz predviđene rupe na držaču kad je hvataljka zatvorena. Time poluga može ostati tanka da se ne sudara u ostale figure. Treći uvjet je da se iskoristi puni hod osovine od 10 mm da nije potrebno stavljati dodatna ograničenja.



Slika 4. Izgled zatvorene (lijevo) i otvorene (desno) hvataljke

Potrebno je još napraviti nosač hvataljke koji omogućuje rotaciju poluga oko točaka A i B, na koji se može pričvrstiti aktuator i koji ima predviđeno mjesto prihvaćanja za poveznicu mehanizma dvostrukog paralelograma. Osim toga, potrebno je da nosač ima čim manju masu što znači da mora biti rešetkaste strukture. Može se vidjeti da su u modelu hvataljke iskorištene prije definirane spojnice. Sličan princip je preuzet i za stvaranje revolutivnih zglobova više dijelova. Cilindrične

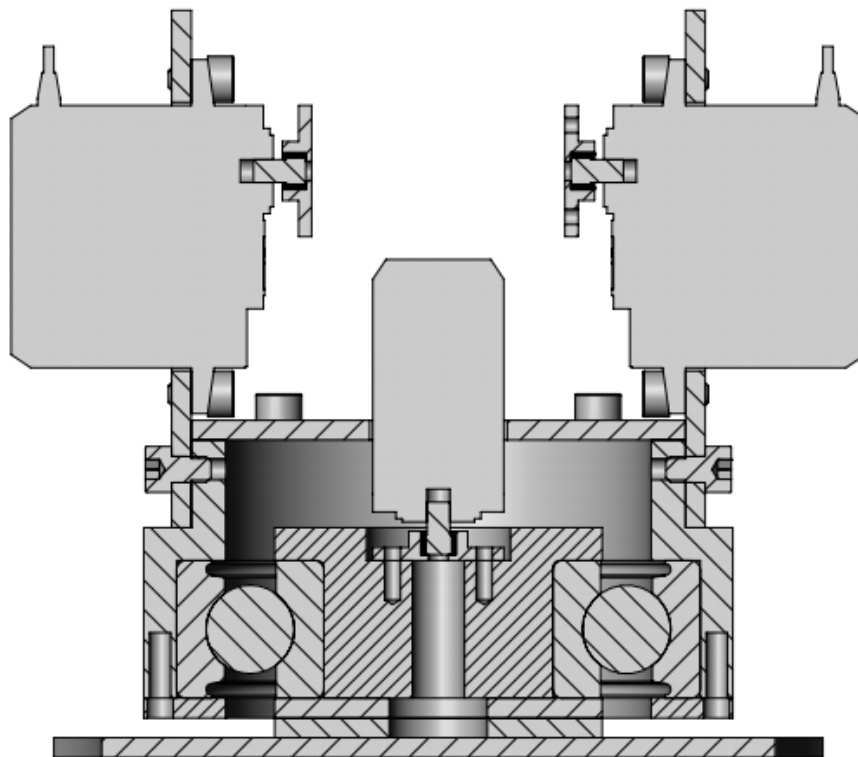
šipke s unutarnjim navojem koje drže razmak između dijelova i ujedno služe kao zglobovi za prijenos gibanja imaju sve dimenziju $\phi 8 \times M6 \times L$, gdje L označava duljinu. Kako će se svi dijelovi napravljeni od aluminijskog lima od 3 mm dati rezati laserom, nije ih potrebno dimenzijski opisivati i raditi tehničku dokumentaciju. Ipak, mogu se dati gabaritne dimenzije cijele hvataljke koje iznose 37.1 x 63 x 165 mm. Gotov model hvataljke je prikazan na slici 5.



Slika 5. Model sklopa hvataljke

U ovom dijelu je još jasnije zašto je modeliranje krenulo od hvataljke. Širina hvataljke definira širinu drugog segmenta, on definira širinu prvog segmenta koji na kraju definira glavni nosač, mjesta prihвата motora itd. Iako dimenzije širine nosača nisu odmah eksplicitno jasne, one se mogu jednostavno izračunati jer je već poznato kako će segmenti biti napravljeni i spojeni.

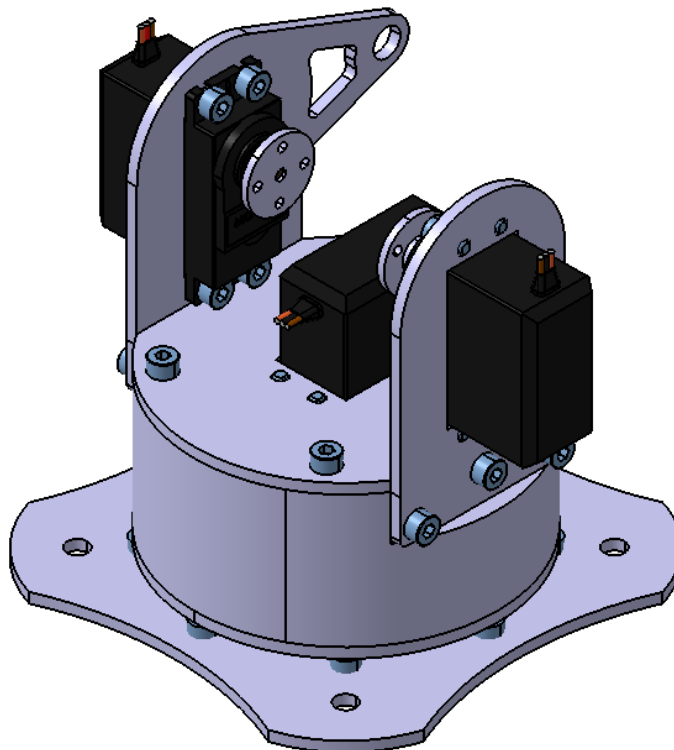
Nakon što su definirane ravnine prihвата motora, može se prikazati osmišljeni način prijenosa kružnog gibanja motora 1.



Slika 6. Prikaz načina prijenosa rotacije glavnog nosača

Kao što se tražilo, većina dijelova je predviđena da se izradi laserskim rezanjem. Ipak, za izradu vanjskog i unutarnjeg dijela nosača je neizbježna upotreba tehnologija tokarenja i glodanja. Tehnički nacrti tih dijelova su dani u prilogu.

Korišteni ležaj je SKF 6307. On ima dovoljno velik unutarnji promjer da se njegov unutarnji prsten može pričvrstiti za unutarnji dio nosača, a vanjski promjer je u skladu s načinom na koji je osmišljeno prihvaćanje nosača motora za vanjski dio nosača. Model gotovog glavnog nosača je prikazan na slici 7. Kao što se na slici može vidjeti, prihvat za poveznicu MDP-a je napravljen u produžetku jednog od nosača motora. Na taj dio će se naknadno pričvrstiti osovina oko koje će poveznica rotirati. Što se tiče visine na kojoj se nalaze motori, ona u velikom udjelu utječe na raspon kuta poluge kad je os vrtnje blizu nosača motora 1. Povećanjem visine se taj utjecaj sve više smanjuje. Pošto za primjenu robota za igranje šaha ionako nije potrebno da se hvataljka diže visoko po z osi, motori su pozicionirani uspravno, s time da dna motora 2 i 3 stoje uz sam rub nosača motora 3. Takvim pozicioniranjem se poluga može pomaknuti otprilike 55° , što je dovoljno za gotovo sve primjene.



Slika 7. Model gotovog glavnog nosača

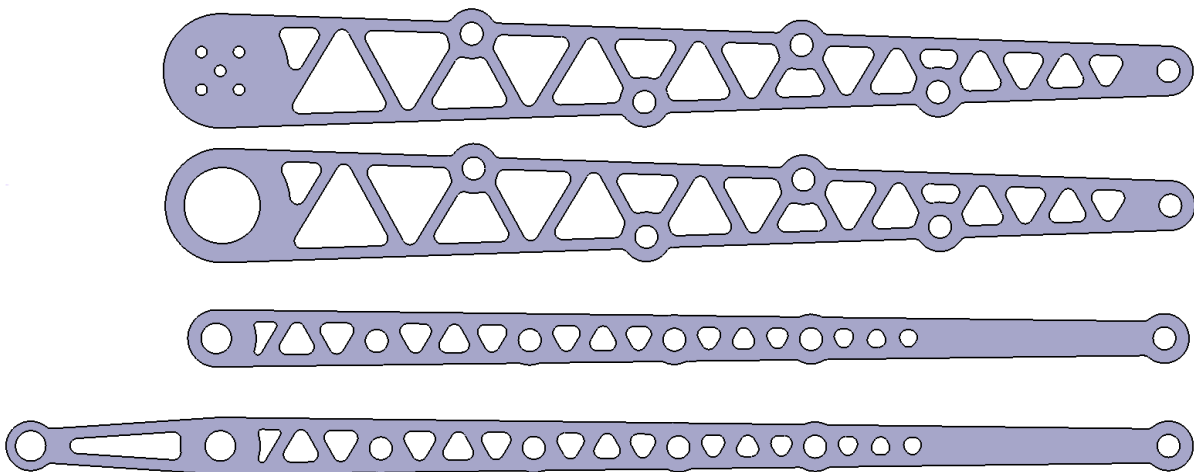
Konstruiranje segmenata i poluga

Glavna dimenzija koja definira segmente i poluge je njihova duljina, tj. udaljenost između dvije osi rotacijskih zglobova koje one povezuju. Da bi se odredile te dimenzije, potrebno je prvo poznavati visinu osi motora. Pronalaženje potrebnih dimenzija segmenata se provelo tako da se napravio model sklopa s glavnim nosačem, šahovskim poljem i hvataljkom. Hvataljka se pozicionirala na najudaljenije polje od nosača, te ne onda napravljen novi sketch koji prolazi kroz oba podsklopa. U sketchu su napravljene dvije linije jednakih duljina koje predstavljaju duljine segmenata 1 i 2. Pomicanjem tih linija se ustvrdilo da je najbolji izbor za duljinu segmenata 250 mm.

Nakon što su poznate dimenzije, konstruiranje segmenata može započeti. Segmenti su dijelovi koji najviše opterećuju motore, pa je potrebno da se olakšaju na način da se konstruiraju kao rešetkasti nosači. Širina svake te rešetke se stavlja na 3 mm, tako da će profil biti kvadratni. Za prvi nosač, odabire se takav promjer na jednom kraju nosača (prihvatu motora) da bude nešto veći od promjera prirubnice, s ciljem da glave vijaka ostaju unutar konture. Drugu dimenziju definira zglob između

segmenta 1 i 2. Pošto je taj zglob ostvaren istim vijkom koji se koristi kod spojnice, za drugi promjer segmenta 1 se uzima promjer glave tog vijka.

Dimenzije segmenta 2 se također odabiru prema promjeru vijka spojnice, s time da promjeri na segmentu 2 nisu linearno povezani da bi se smanjila masa i dobio bolji vizualni efekt. Lijevi i desni dijelovi segmenata će se dodatno međusobno spojiti da bi se dobila bolja krutost. Bočni prikazi lijevih i desnih dijelova segmenata 1 i 2 su prikazani na slici 8. Može se vidjeti da ti segmenti nisu simetrični. Razlog tome je taj što se segment 1 s jedne strane pričvršćuje za motor, dok se s druge strane mora ostaviti otvor kroz koji prolazi poluga. Segment 2 je s jedne strane ograničen zglobom, dok je s druge strane napravljen još i produžetak na koji služi za prijenos gibanja od motora 2 preko poluge i poveznice.

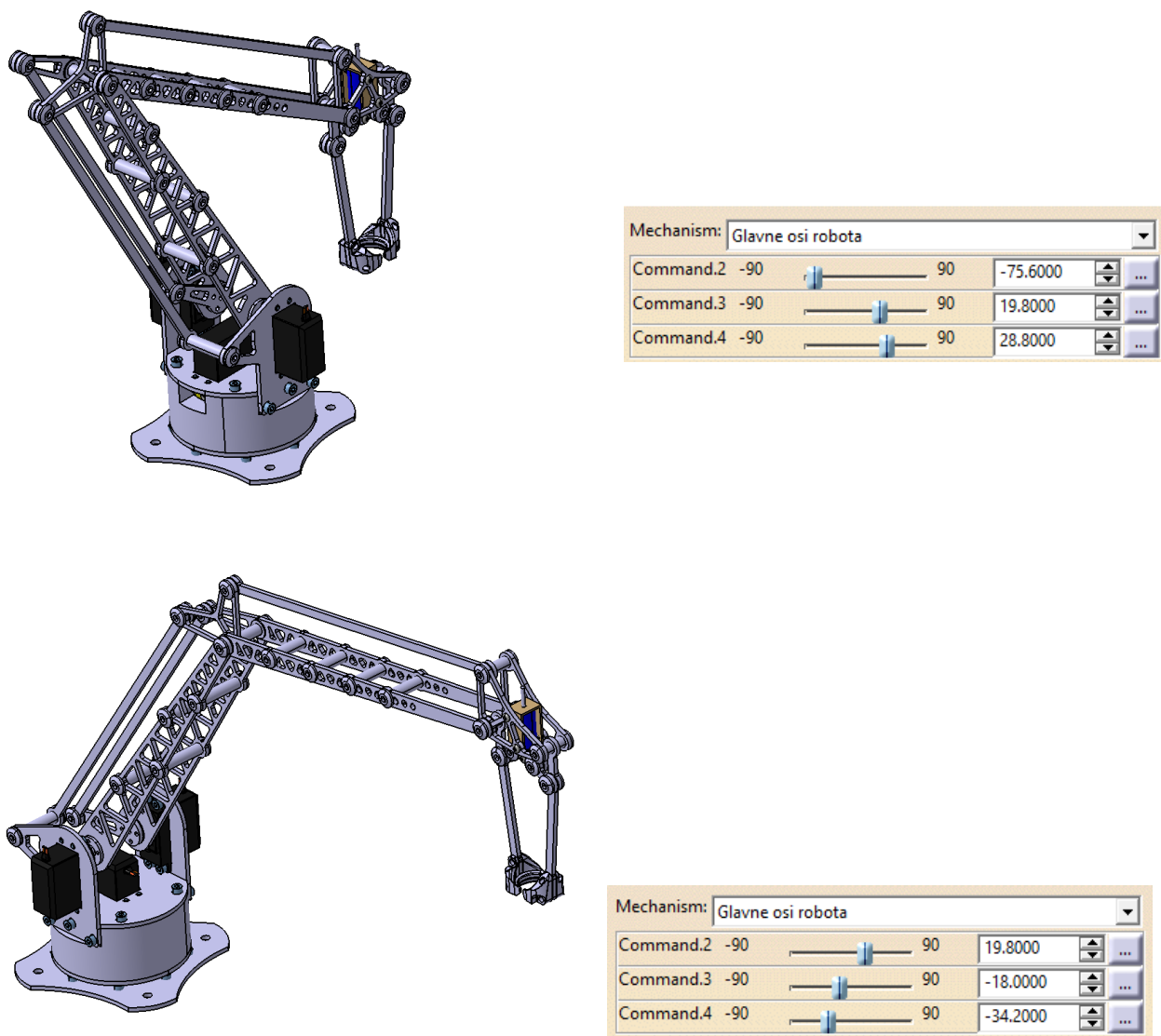


Slika 8. Bočni prikaz dijelova segmenata

Za polugu koja prenosi rotacijsko gibanje s motora na segment 2 je poznato da mora njena dimenzija biti jednaka duljini nastavka dužeg dijela segmenta 2. Isto tako, poveznica koja spaja ta dva dijela mora biti jednaka duljini segmenta 1. Na taj se način dobije paralelogram što znači da je promjena kuta između dvije stranice na jednom kraju jednaka promjeni kuta na drugom kraju.

Taj se princip iskorištava i za dimenzioniranje mehanizma dvostrukog paralelograma. U tom mehanizmu se nalazi trokut koji je jednim krajem poveznicom povezan za glavni nosač, drugom poveznicom je vezan na hvataljku, a trećim krajem je vezan za zglob segmenta 1 i 2. Zbog tog je mehanizma posrtanje trokuta jednako na cijelom području rada, pa je zato i hvataljka stalno vertikalna.

Nakon što su konstruirani svi dijelovi, izrađen je sklop cijelog robota. Koristeći DMU Kinematics unutar programskog paketa Catia u kojem je sve konstruirano, dodane su kinematičke veze na zglobove robota. Korišteni su samo Revolute, Cylindrical i Rigid zglobovi, s time da su tri revolutna zgloba definirani kao upravljivi. Osim toga, dodane su i kinematičke veze za hvataljku kojoj se upravlja translacijskim zglobom – pomakom osobine linearnog elektromagnetskog aktuatora. Dodavanjem tih kinematičkih veza se može dobiti dobar uvid u eventualne nedostatke i ograničenja konstrukcije, lako je vidljivo ako će pri pomicanju motora doći do sudara dijelova i može se bolje ustvrditi radno područje. Na slici 9. je prikazan cijeli sklop robota u dvije različite pozicije.

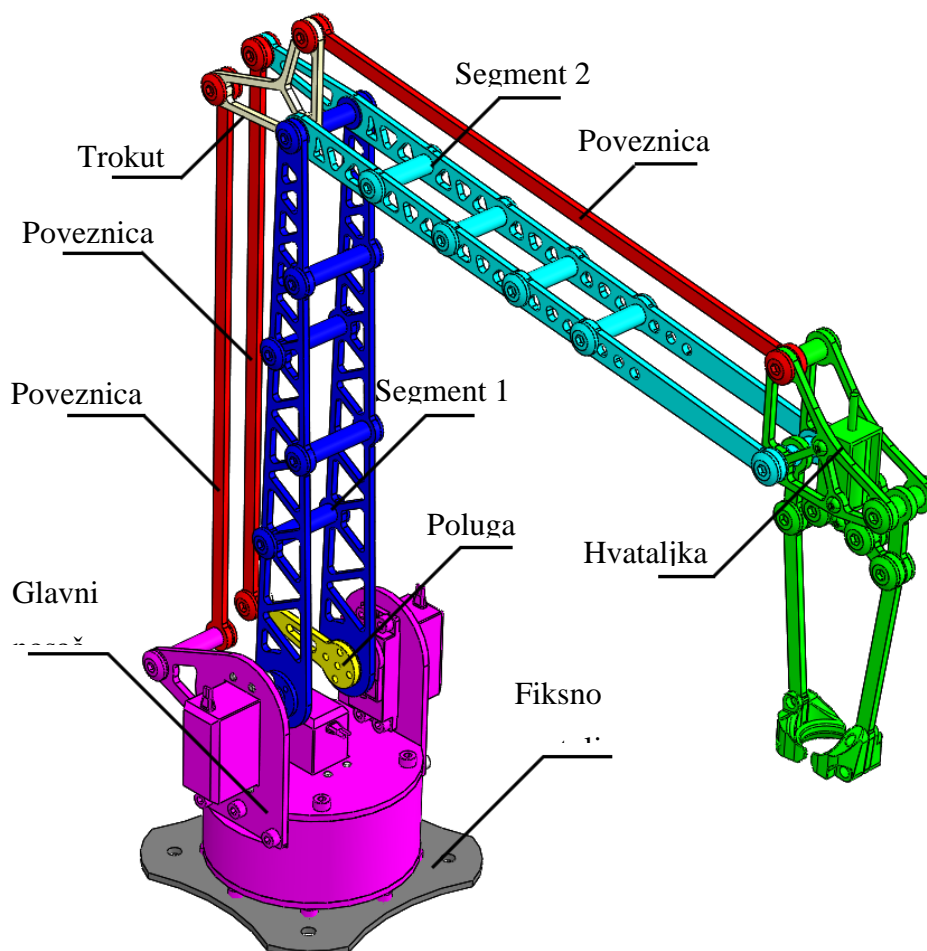


Slika 9. Prikaz gotovog modela robota u različitim položajima

2.2. Kinematički model robota

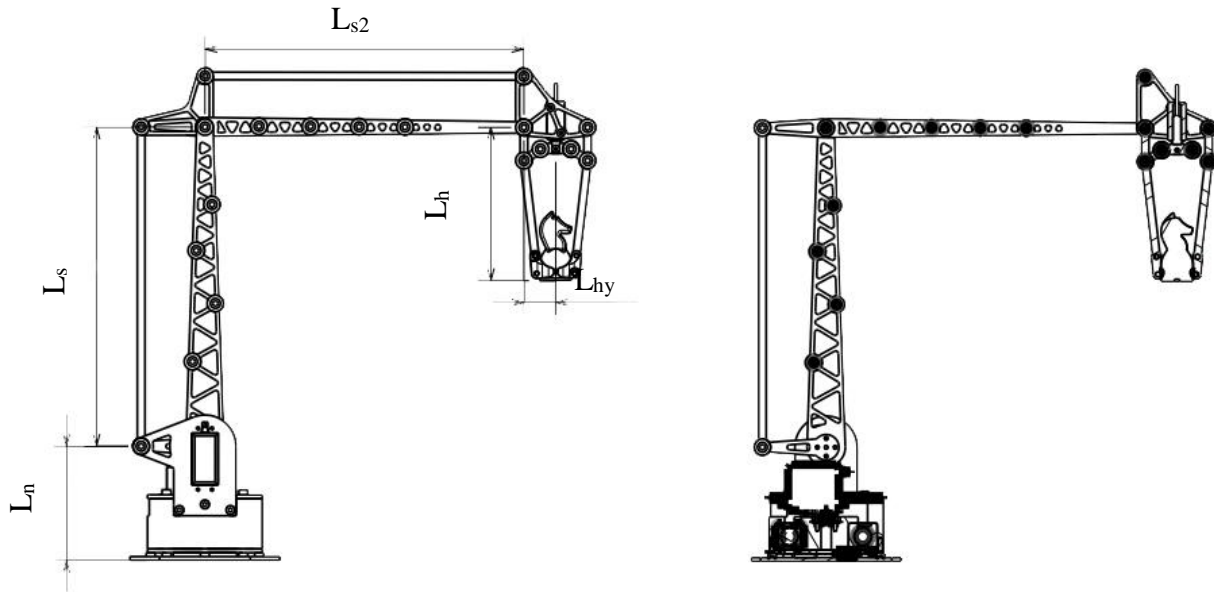
Da bi robot obavljao svoj zadatak potrebno je ispravno pozicioniranje u prostoru. To znači da u svakom trenutku treba znati svoju poziciju, često i brzinu. Ako su ulazni podaci u sustav trenutni zakreti motora, a izlaz je pozicija hvataljke (ili po želji neke druge točke robota) u prostoru, govori se o direktnoj kinematici. Ako je ulaz u sustav željena pozicija hvataljke, a traženi podatak je kut zakreta motora koji je potrebno poznavati da bi se moglo pozicionirati u prostoru, govori se o inverznom kinematičkom problemu [4, 5].

Da bi se proučile kinematičke relacije potrebno je neke dijelove sklopa solidificirati jer se one gibaju zajedno pa se mogu promatrati kao jedno tijelo. Na sljedećoj slici su jednakim bojama prikazani dijelovi koji će se promatrati kao cjelina.



Slika 10. Prikaz solidificiranih dijelova sustava

Dimenzije relevantne za kinematički proračun su prikazane na slici 11. Lijeva slika prikazuje bočni prikaz robota na kojem se vidi mehanizam dvostrukog paralelograma, a na desnoj slici se vidi polužni mehanizam koji upravlja orijentacijom segmenta 2.

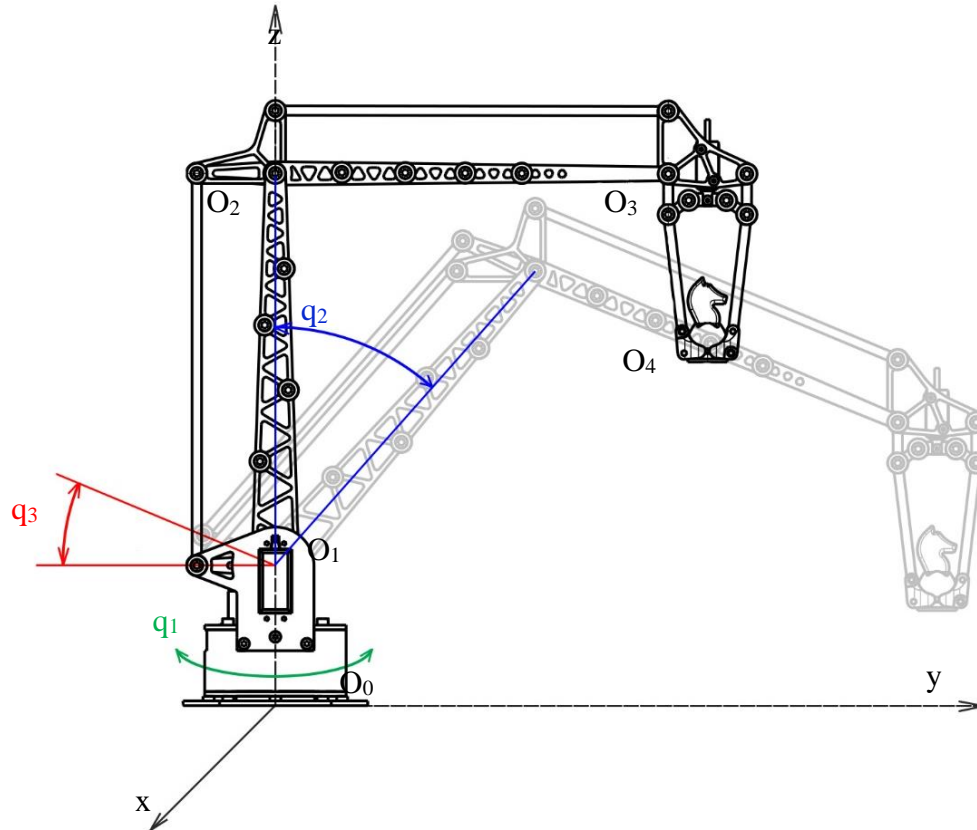


Slika 11. Bočni prikaz s glavnim dimenzijama

Proračun direktne kinematike

Proračun će se provesti korištenjem homogenih transformacija. Homogene transformacije definiraju položaj i orijentaciju jednog koordinatnog sustava u odnosu prema drugome [6, 7].

Na sljedećoj slici je prikazan robot u svom nultom položaju u usporedbi sa pomaknutim segmentima. Označeni su aktivni pomaci (q_1, q_2, q_3) i ishodišta koordinatnih sustava (O_0, O_1, O_2, O_3, O_4).



Slika 12. Prikaz upravljivih stupnjeva slobode

Matrica homogenih transformacija iz nepokretnog koordinatnog sustava (O_0) u prvi (O_1) zapisuje se kao rotacija oko z osi za iznos q_1 i translacije po z osi za vrijednost L_n .

$$A_1 = Rot(z, q_1) \cdot Tran(0, 0, L_n)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.)$$

Iz prvoga (O_1) u drugi koordinatni sustav (O_2) dolazi se rotacijom oko osi x za iznos q_2 i onda translacijom po z za vrijednost L_{s1} .

$$A_2 = Rot(x, q_2) \cdot Tran(0, 0, L_{s1})$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q_2) & -\sin(q_2) & -L_{s1} \sin(q_2) \\ 0 & \sin(q_2) & \cos(q_2) & L_{s1} \cos(q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2.)$$

Zbog toga što je orijentacija segmenta 2 neovisna o rotaciji q_2 , za transformaciju iz drugog koordinatnog sustava u treći je potrebno prvo napraviti rotaciju oko osi x za vrijednost $q_3 - q_2$, a potom translaciju po osi y za vrijednost L_{s2} .

$$\mathbf{A}_3 = \text{Rot}(x, q_3 - q_2) \cdot \text{Tran}(0, L_{s2}, 0)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q_2 - q_3) & \sin(q_2 - q_3) & L_{s2} \cos(q_2 - q_3) \\ 0 & -\sin(q_2 - q_3) & \cos(q_2 - q_3) & -L_{s2} \sin(q_2 - q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3.)$$

Konačno, potrebno je još napraviti transformaciju iz trećeg u četvrti koordinatni sustav. Kako je zbog MDP hvataljka uvijek vertikalna, tj. u smjeru koordinatnog sustava O_1 , potrebno je prvo napraviti transformaciju rotacije oko osi x za vrijednost $-q_3$, a potom translaciju $(0, L_{hy}, -L_{hz})$

$$\mathbf{A}_4 = \text{Rot}(x, -q_3) \cdot \text{Tran}(0, L_{hy}, -L_{hz}) =$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q_3) & \sin(q_3) & L_{hy} \cos(q_3) - L_{hz} \sin(q_3) \\ 0 & -\sin(q_3) & \cos(q_3) & -L_{hz} \cos(q_3) - L_{hy} \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4.)$$

Budući da se traže položaj i orijentacija robota potrebno je pronaći vezu između koordinatnih sustava O_0 i O_4 . Ta je veza matematički izražena prema jednadžbi:

$${}^m\mathbf{T}_n = \prod_{i=m+1}^n \mathbf{A}_i \quad (2.5.)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (2.1) do (2.4) u (2.5) dobije se konačni izraz za matricu transformacije referentne točke prihvatnice u odnosu na nepokretni koordinatni sustav robota.

$${}^0\mathbf{T}_4 = \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{A}_3 \cdot \mathbf{A}_4$$

$${}^0\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & -\sin(q_1)(L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & \cos(q_1)(L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) \\ 0 & 0 & 1 & L_n - L_{hz} + L_{s1} \cos(q_2) + L_{s2} \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6.)$$

Može se primijetiti da je u prva tri stupca jednadžbe koji označavaju orijentaciju ostala samo prva rotacija oko osi z. Razlog tome je upravo MDP.

Pod pojmom vanjskih koordinata podrazumijeva se položaj robota (p_x, p_y, p_z) i njegova orijentacija u prostoru određena Eulerovim kutovima (ϑ, ϕ, ψ) . Tim se veličinama definira novi vektor

$$\mathbf{r} = [p_x \ p_y \ p_z \ \vartheta \ \phi \ \psi]^T \quad (2.7.)$$

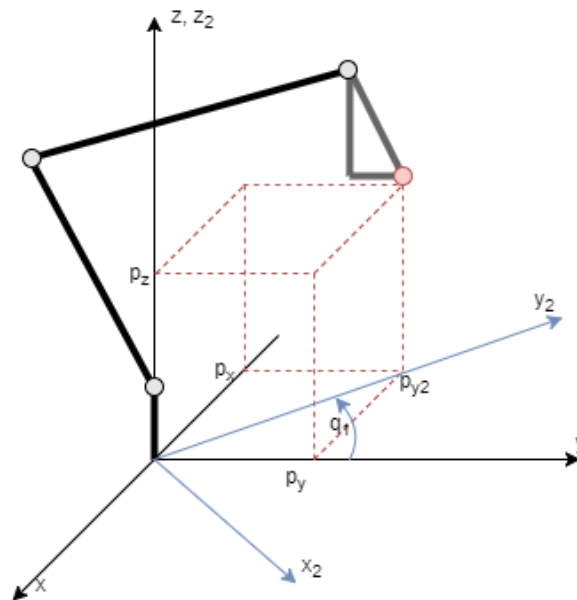
Očito je da se u ovom slučaju neće pojaviti posrtnje (ϕ) ni valjanje (ψ), a skretanje (θ) je direktno definirano preko zakreta q_1 , pa je vektor vanjskih koordinata definiran samo s položajem, bez orijentacija.

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(q_1) (L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) \\ \cos(q_1) (L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) \\ L_n - L_{hz} + L_{s1} \cos(q_2) + L_{s2} \sin(q_3) \end{bmatrix} \quad (2.8.)$$

Proračun inverzne kinematike

Da bi se robotom moglo upravljati, za zadane točke u prostoru definirane pripadajućim vektorom konfiguracije hvataljke potrebno je pronaći pripadajuće vrijednosti varijabli zglobova, koje se nalaze u vektoru zglobova \mathbf{q} .

Do rješenja inverznog kinematičkog problema moguće je doći analitički ili iterativnim numeričkim postupcima. Analitičko rješenje je složenije jer ne postoji sustavan postupak rješavanja kao kod direktnog kinematičkog problema. Ipak, do rješenja se može doći izravnim proračunom pa se ne javljaju problemi neprepoznavanja singularnih stanja robota i moguće divergencije postupka rješavanja. Zbog toga će se koristiti analitički pristup [8].

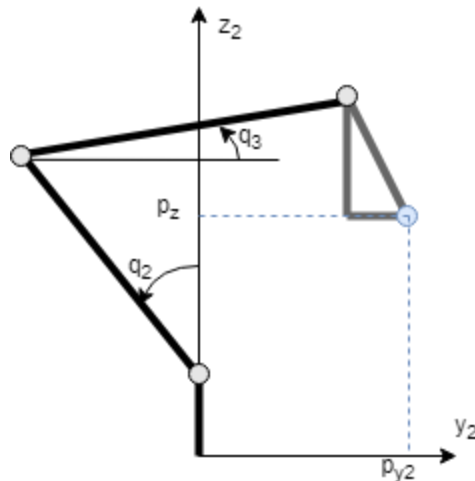


Slika 13. Shematski prikaz položaja hvataljke u prostoru

Sa slike 13 je odmah vidljivo da se vrijednost prvog zgloba q_1 može jednostavno izračunati iz ulaznih vrijednosti.

$$q_1 = -\arctan\left(\frac{p_x}{p_y}\right) \quad (2.9.)$$

Negativan predznak u izrazu (2.9) je tu zbog dosljednosti desnokretnog pravokutnog kartezijevog koordinatnog sustava. Zbog toga što se izbacivanjem prvog zakreta ostatak robota nalazi u jednoj ravni, transformacijom koordinatnog sustava se problem u nastavku može promatrati kao dvodimenzijski.

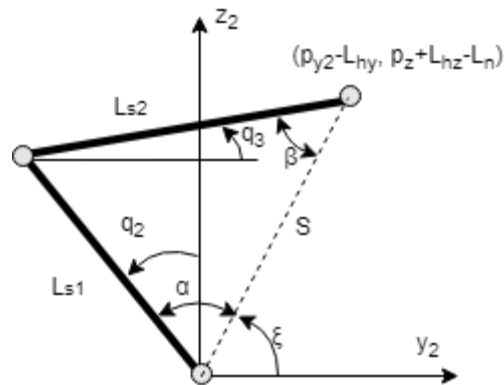


Slika 14. Planarni shematski prikaz položaja hvataljke

U tom slučaju se koordinata p_z ne mijenja, a koordinata p_{y2} se računa preko Pitagorinog poučka

$$p_{y2} = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (2.10.)$$

Zbog MDP se analiza može dodatno pojednostaviti tako da se gleda samo razlika koordinata. Tim pojednostavljenjem se dobije trokut s dvije poznate točke i dvije poznate duljine.



Slika 15. Trokut za analizu unutarnjih koordinata

Treća duljina S se također izračunava preko Pitagorinog poučka

$$S = \sqrt{(p_{y2} - L_{hy})^2 + (p_z + L_{hz} - L_n)^2} \quad (2.11.)$$

Poznavajući sve tri stranice, pomoćni kutevi α i β se izračunavaju preko kosinusovog poučka.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{L_{s2}^2 - L_{s1}^2 - S^2}{-2L_{s1}S}\right) \quad (2.12.)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{L_{s1}^2 - L_{s2}^2 - S^2}{-2L_{s2}S}\right) \quad (2.13.)$$

Za određivanje preostalih unutarnjih vrijednosti je potreban još kut ξ

$$\xi = \arctg\left(\frac{p_z + L_{hz} - L_n}{p_{y2} - L_{hy}}\right) \quad (2.14.)$$

Unutarnje vrijednosti glase

$$q_2 = \alpha + \xi - \frac{\pi}{2} \quad (2.15.)$$

$$q_3 = \xi - \beta \quad (2.16.)$$

Iz toga se može izraziti vektor unutarnjih koordinata

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\arctan\left(\frac{p_x}{p_y}\right) \\ \alpha + \xi - \frac{\pi}{2} \\ \xi - \beta \end{bmatrix} \quad (2.17.)$$

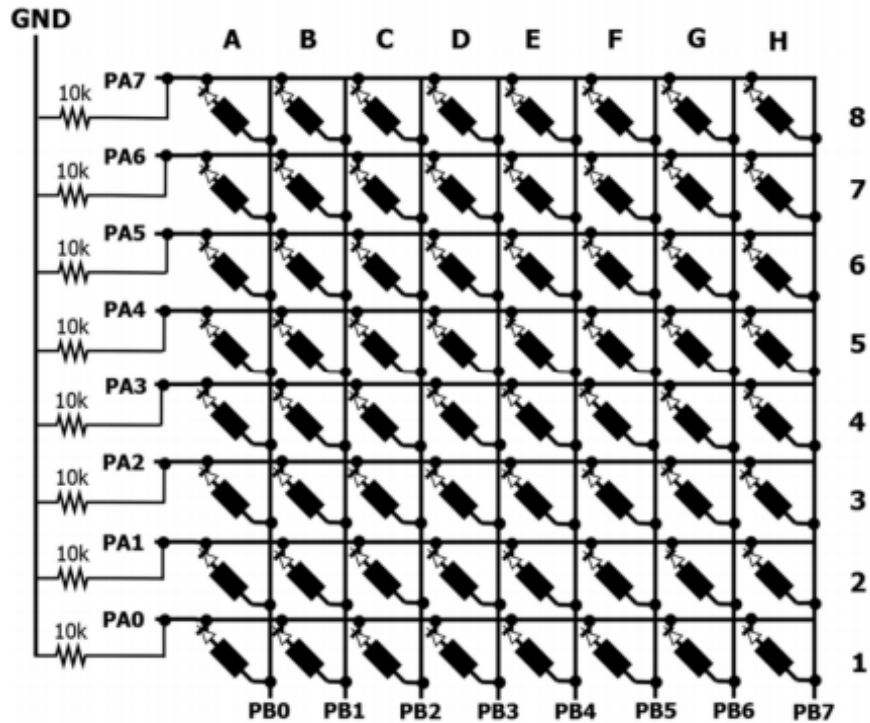
Da bi se kod implementacije izbjegli numerički problemi dijeljenja s nulom kod traženja vrijednosti funkcija, umjesto obične $\text{atan}(y/x)$ funkcije treba koristiti $\text{atan2}(y,x)$ funkciju. Ona vraća dobre rezultate za sva četiri kvadranta, kao i za točke na y osi.

2.3. Mjerni uređaji i implementacija

Potrebno je odabrati adekvatne mjerne uređaje za prepoznavanje figura. Zamišljeno je da bi se figure prepoznavale na način se senzori postave ispod polja i na taj način prepoznavanju figure. Kako šah uvijek počinje na isti način, mjerenjem promjena pozicija figura je moguće znati poziciju svake figure u svakom trenutku. U obzir je uzeto cijeli niz senzora s različitim načinom rada. Pošto se na ploči nalazi 64 polje, potrebno je postaviti i 64 senzora. To znači da je cijena svakog senzora od velike važnosti. Najjeftinija opcije je koristiti reed prekidače. Reed prekidači su električni prekidači upravljani pomoću magnetskog polja. Sastoje se od para kontakata koji su smješteni u hermetički zatvorenu staklenu epruvetu. Rade na način da se postavljanjem senzora u magnetsko polje kontakti stisnu što omogućuje protok struje. Kontakti su posrebneni da bi se smanjio otpor spoja. Ako se ispod svakog polja stavi jedan takav reed prekidač, a ispod svake figure se stoji magnet, onda će reed prekidači biti zatvoreni na svim poljima na kojima se nalaze figure. Čitanjem stanja releja se može dobiti podatak o razmještanju figura.

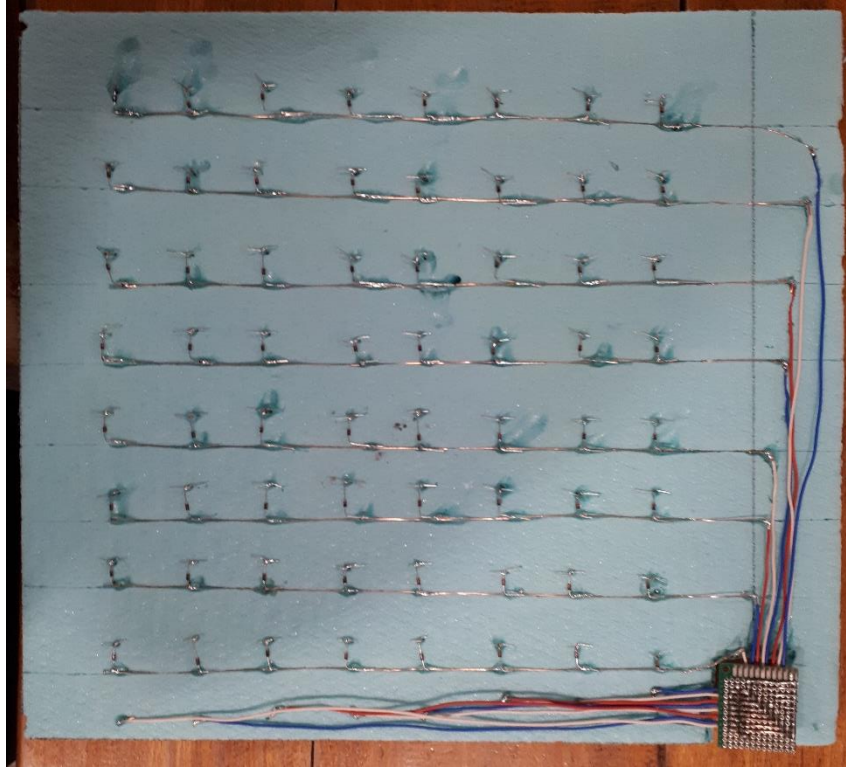
Shema spajanja komponenti

Projektiranje sustava prepoznavanja figura kreće osmišljavanjem načina na koji će se 64 senzora spojiti na upravljačku jedinicu. Dva su načina najčešće primjenjivana, a to su korištenje multipleksora i povezivanje senzora na tzv. matrični način. Drugi način zahtijeva upotrebu više pinova od kojih bi 8 bilo ulaznih, a 8 izlaznih. Pošto Raspberry Pi ima dovoljno GPIO (General Purpose Input/Output) pinova, može se iskoristiti taj način jer on ne zahtijeva korištenje dodatne komponente [9]. Da bi se napravila shema, potrebno je prvo pogledati kako funkcionira matrično povezivanje senzora. Generalna ideja je da je više senzora povezano na istu granu pod naponom, a svaki senzor vodi na jedan ulazni pin. Senzori koji su upaljeni će spojiti ulaz s granom pod naponom. Čitanjem ulaza svakog pojedinog ulaza daje podatak o tome koji prekidači su zatvoreni [10, 11]. Gotova shema koja će se koristiti za izradu ploče senzora je prikazana na slici 16.



Slika 16. Shema matričnog povezivanja senzora

Izrada je počela tako da su se prvo odabrali magneti i orijentacija reed prekidača. Na izboru su bila tri magneta različitih veličina i snage. Najmanji magnet nije uspijevaio uključiti reed prekidač na cijelom polju. Najveći magnet je bio toliko snažan da je previše privlačio figure na poljima. Srednji magnet je bio taman toliko snažan da omogućuje uključenje prekidača na cijelom polju, a da si magnetska polja međusobno ne smetaju. Najbolja orijentacija reed prekidača se pokazala ona koja je radijalno paralelna s magnetima. Zato se odlučilo da će se ti senzori montirati u pjenastu ploču koja će ih držati okomitim i na mjestu. Na istoj ploči su zalemljene i sve ostale komponente i napravljena je pločica koja sadrži headere za jednostavno povezivanje sa upravljačkom jedinicom. Gotova ploča je prikazana na slici 17.



Slika 17. Donja strana ploče sa sensorima

Signalni pinovi ploče sa sensorima se spajaju direktno na GPIO pinove upravljačke jedinice, zajedno s driverom za motore i relejom za uključivanje elektromagnetskog aktuatora hvataljke.

Nakon što je robot složen, figure izrađene i ploča sa sensorima spojena, potrebno je još napraviti igraću ploču koja objedinjuje sve elemente sustava da se dobije sustav koji je kompaktan i jednostavan za korištenje.

Ploča je napravljena prema prije definiranim dimenzijama za koje se pokazalo da su dovoljno velike da se hvataljka ne sudara s figurama i da nema interferencije među magnetima, a opet dovoljno mala da se zbog prevelikih dimenzija segmenata se stvaraju dodatni zahtjevi za momentom na motoru. Na slici 18. se može vidjeti cijeli sustav složen u funkcionalnu cjelinu.



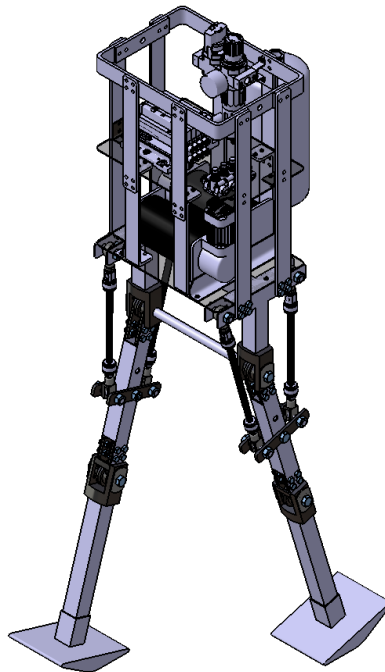
Slika 18. Gotov robotski sustav za igranje šaha

Projektiranje dinamičke konstrukcije kao što je robotska ruka zahtijeva veliku pozornost pri konstruiranju i potrebu za iterativnim pristupom konstruiranja zbog često nepredvidljivog položaja dijelova. Projekt povezuje gotovo sva područja strojarstva što zahtijeva primjenu znanja stečenog tijekom studiranja, ali i puno samostalnog učenja i rada. Dimenzioniranje ovakvog sustava kod kojeg su gotove sve veličine međusobno zavisne zahtijeva definiranje modela na način da se dimenzije mogu jednostavno promijeniti bez da to utječe na ostatak konstrukcije. Da bi se dobio gotov proizvod, potrebno je još implementirati upravljačke algoritme i logiku igranja šaha što nije obrađivano u sklopu ovog rada, ali ostvarene su sve potrebne predispozicije.

3. DVONOŽNI HODAJUĆI ROBOT

3.1. Projektiranje i izrada konstrukcije dvonožnog robota

Konstrukcija autonomnog dvonožnog robota temelji se na jednostavnosti i postizanju mehaničke stabilnosti. Pri odabiru i smještaju komponenata unutar konstrukcije pažnja je posvećena pravilnom pozicioniranju centara mase sklopa. Za što bolje postizanje stabilnosti robota u nultom položaju konstruirana su stopala s velikom površinom dodira s podlogom, a centar mase trupa sveden je u najbližu moguću točku od podloge. Konstrukcija je sastavljena od aluminijskih profila jednostavnih oblika, a sam robot pogoni se pomoću četiri pneumatska mišića. Pneumatski mišići odabrani su zbog svojstva elastičnosti što ih čini pogodnim za prigušenje udara koji nastaju prilikom hoda. Za rad pneumatskog sustava potrebi su: baterija, kompresor, spremnik, pripremna grupa, ventilski blok i prigušno-nepovratni ventili [12]. Upravljanje sustava odvija se pomoću mikrokontrolera na temelju informacija iz senzora.



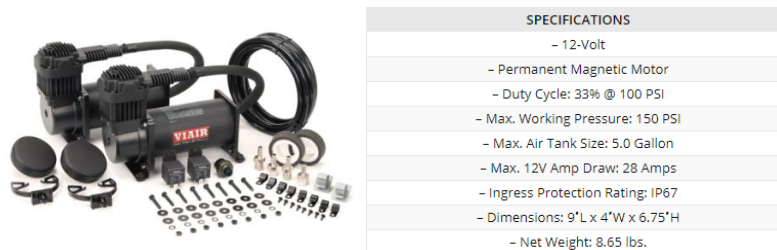
Slika 19. Konstrukcija robota

Odabir komponenata

Projektiranje robota podrazumijeva odabir komponenata i adekvatnu konstrukciju za pravilan rad sustava. U nastavku su navedene sve pneumatske i električne komponente korištene pri izradi.

Kompresor:

Autonomnost robota podrazumijeva vlastiti izvor napajanja zrakom. U tu svrhu odabran je kompresor Viair 400C. Kompresor se na izvor istosmjernog napona 12 V spaja preko odgovarajućeg releja i potrebna mu je vršna struja od 28 A. Težine je 3.9 kg i može napajati spremnik zraka maksimalnog volumena 18.9 l. Nazivni tlak kompresora je 10 bara i ostvaruje nazivni protok od 74.2 l/min.



Slika 20. Kompresor Viair 400C

Spremnik zraka:

Spremnik zraka pohranjuje stlačeni zrak koji dovodi kompresor i provodi ga do pripremljene grupe. Služi za kompenzaciju fluktuacije tlaka i može pružiti veće količine zraka ako je potrebno. Uz kompresor, težina spremnika i njegova pozicija unutar konstrukcije imaju značajan utjecaj na stabilnost robota. Odabran je spremnik zraka CRVZS-2 proizvođača Festo. Volumen mu iznosi 2 l, a radni tlak kreće se između 1 bar i 16 bar [13].



Slika 21. Spremnik zraka Festo CRVZS-2

Pripremljena grupa:

Pripremljena grupa je kombinacija filtra zraka i regulatora tlaka. Filtar služi za uklanjanje nečistoća iz pneumatskog sustava i ispušta kondenzat, dok regulator ograničava vrijednost tlaka na odabranu vrijednost. Odabrana je pripremljena grupa LFRS-1/8-D-7-MINI-A proizvođača Festo. Navedena

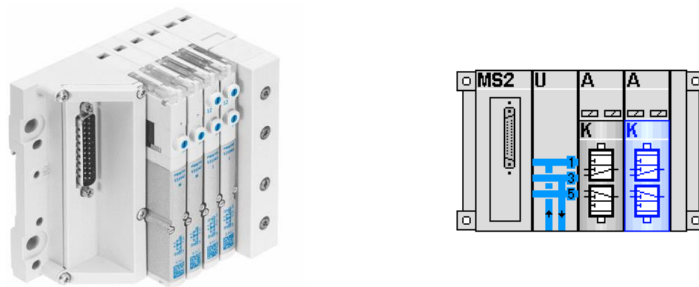
pripremna grupa ima stupanj filtracije 5 μm , automatski ispušt kondenzata i radne tlakove od 0.5 bar do 7 bar.



Slika 22. Pripremna grupa Festo LFRS-1/8-D-7-MINI-A

Ventilski blok:

Za željeni rad pneumatskih aktuatora potrebna su četiri razvodna ventila. Odabrani ventilski blok 34P-MS2-UAA-KK sastoji se od četiri elektromagnetski upravljana 3/2 on/off ventila. Spoj s mikrokontrolerom ostvaruje se 8-pinskim DB9 priključkom. Svi ventili zrak dobivaju kroz isti vod, a isto tako se i odzračivanje svih ventila provodi istim vodom.



Slika 23. Ventilski blok Festo

Prigušno-nepovratni ventili:

Prigušno-nepovratni ventil prigušuje protok u jednom smjeru, dok ga u suprotnom smjeru slobodno propušta. Time je moguće regulirati protok na ulazu u aktuator čime se postiže brži ili sporiji rad pneumatskih mišića. Odabran je prigušno-nepovratni ventil GR-QS-6 proizvođača Festo. U sustavu se nalazi četiri prigušno-nepovratna ventila čime se može nametnuti protok zraka svakom aktuatoru zasebno.



Slika 24. Prigušno-nepovratni ventil Festo GR-QS-6

Umjetni pneumatski mišići:

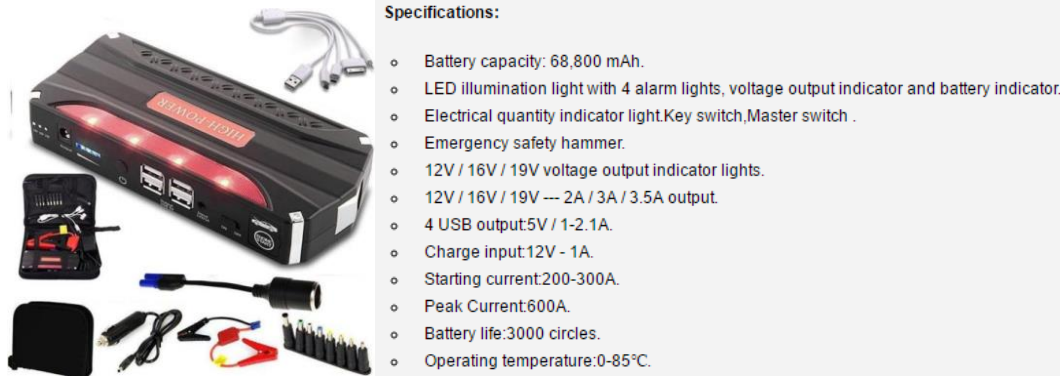
Sustav predviđa četiri aktuatora, pa su potreba četiri mišića. Odbrani su DMSP-10-180N-RM-CM pneumatski mišići proizvođača Festo. Nazivni promjer im je 10 mm, najveća promjena duljine pri skupljanju iznosi 25% nominalne duljine mišića pri maksimalnom tlaku od 8 bara, a maksimalna sila prilikom skupljanja iznosi 630 N.



Slika 25. Umjetni pneumatski mišići Festo DMSP

Baterija:

Baterija je glavni izvor napajanja sustava. Služi za napajanje kompresora, mikrokontrolera, senzora i za ostale električne komponente. Pošto se i kompresor i mikrokontroler napajaju iz 12 V istosmjernog izvora odabire se baterija istog napona. Za rad kompresora potrebna je velika potezna struja iznosa 28 A što znači da je potreba baterija s mogućnošću brzog pražnjenja. Odabrana baterija ima kapacitet 68.8 Ah, vršnu struju od 600 A, USB izlaze za povezivanje sa mikrokontrolera i 19 V izlaz za okidanje razvodnih ventila.



Slika 26. Specifikacije baterije

Mikrokontroler:

Upravljanje gibanjem robota nadzire mikrokontroler Arduino ATmega2560. Sadrži 54 digitalnih ulaza/izlaza od kojih se petnaest može koristiti kao 8-bitni PWM izlazi i šesnaest kao analogni ulazi. Procesor radi na 16 MHz . Kontroler također sadrži priključak napajanja, reset tipku i microUSB priključak koji omogućuje jednostavno povezivanje s računalom [14].



Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

Slika 27. Arduino Leonardo

Senzori:

Kut zakreta gornjeg članka noge mjeri se enkoderom. Zbog relativno skućenog prostora potreban je enkoder malih dimenzija. Kako je osovina mirujuća senzor nije moguće montirati na osovinu, već na kućište ležaja. Potrebno je odabrati dvodjelni enkoderi koji se satoji od magentskog

prstena i mjernog uređaja. Magnetski prsten montira se na kućište ležaja dok se mjerni uređaj adekvatno pozicionira u odnosu na prsten.



Slika 28. Primjer enkodera s magnetskim prstenom

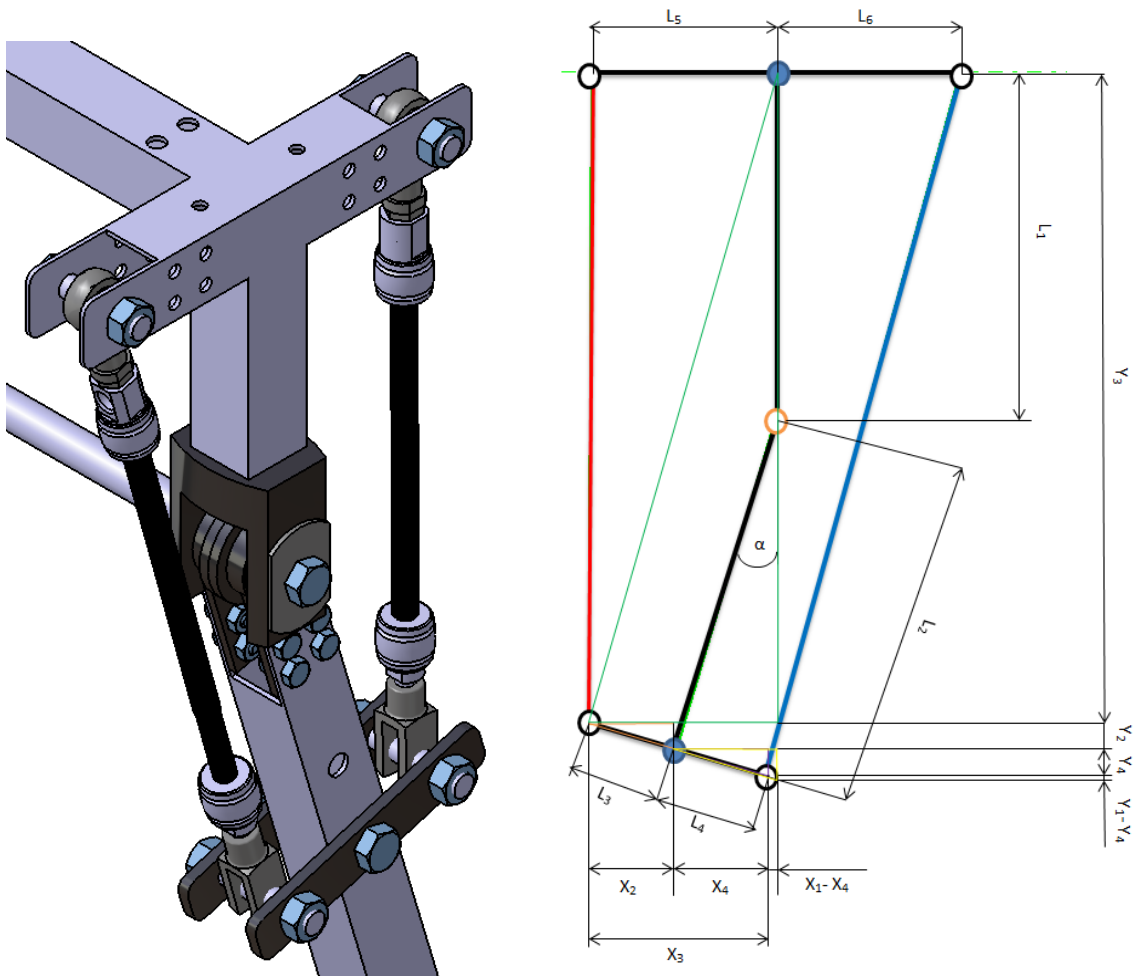
Da bi se zadržala stabilnost hoda robota potrebno je mjeriti nagib cijele konstrukcije u smjeru sve tri koordinatne osi. U tu svrhu potreban je akcelerometar. Arduino MPU-6050 akcelerometar ima osjetljivost 2G.



Slika 29. Arduino MPU-6050

Konstrukcija i izrada noge

Noge ostvaruju dodir između robota i podloge, prenose silu, određuju trajektoriju gibanja i preuzimaju težinu konstrukcije. Kako je robot humanoidne strukture noge moraju biti člankovite strukture, pa se svaka noga dijeli na dva dijela. Gornji dio povezuje nogu s postoljem robota, dok donji dio povezuje gornji članak sa stopalom. Zglob između članaka noge konstruiran je na način da funkcionira kao mehaničko koljeno čime je dozvoljena rotacija donjeg članka noge samo u jednom smjeru. Hod robota zamišljen je na način da se mišićima pogoni gornji dio noge robota, dok se donji dio giba kao posljedica gibanja gornjeg članka.



Slika 30. Geometrija noge

Na temelju predviđenih dimenzija postolja robota i noge moguće je odrediti potrebne dimenzije mišića u skraćenom stanju prema izrazima:

$$M_1 = \sqrt{(L_5 - X_3)^2 + Y_3^2} \quad (3.1.)$$

Na analogni način izračuna se nominalna duljina mišića M_2 prema izrazu:

$$M_2 = \sqrt{(L_6 - X_4 + X_1)^2 + (Y_3 + Y_2 + Y_4)^2} \quad (3.2.)$$

Duljine M_1 i M_2 u drugom krajnjem slučaju, kada je kut između postolja i noge jednak $-\alpha$, nije potrebno računati radi simetrije. Pošto duljine M_1 i M_2 predstavljaju apsolutnu udaljenost između zglobova na koje će mišić biti spojen potrebno je od njih oduzeti konstantne duljine komponenti koje služe za pričvršćivanje mišića. Na temelju navedenog izabrani su pneumatski mišići tvtk

Festo promjera 10 mm i duljine 180 mm koji su za konstrukciju spojeni pripadnim zglobnim glavama istog proizvođača.

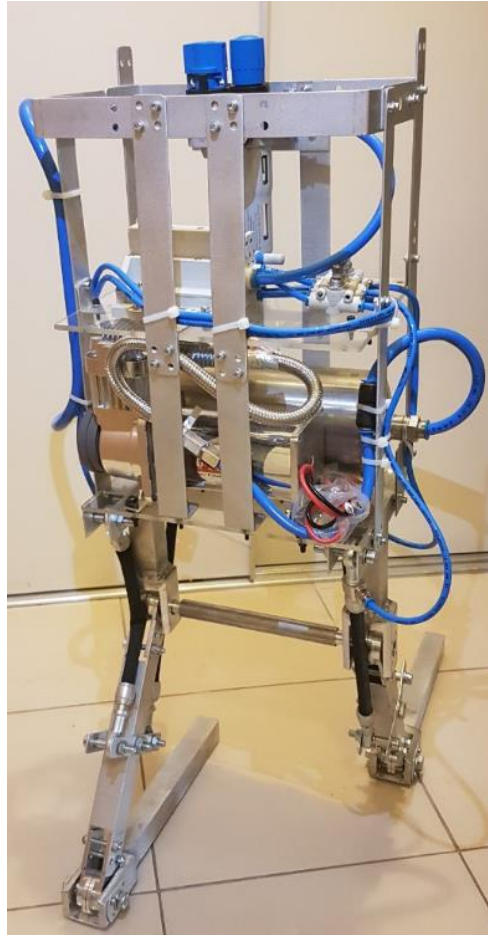


Slika 31. Gornji članak noge

Donji i gornji članak noge povezani su tako da čine rotacijski zglob oko osi ležaja. Ovaj stupanj slobode gibanja nije definiran pripadnim aktuatorom, već se slobodno giba kao posljedica gibanja gornjeg članka noge. Pretpostavlja se da će se zbog težine, inercije i zakrivljenog oblika stopala, i zbog zgloba koji djeluje kao koljeno donji članak noge u jednom smjeru gibanja ponašati sukladno gornjem članku noge, a u drugom smjeru članci će biti kolinearni. Kolinearnost članaka omogućuje prebacivanje težišta robota.

Slika 32. prikazuje izrađeni robot. Pošto je stopalo još u izradi robot se trenutno ne može postaviti u stojeći položaj, no stabilnost je vidljiva u klečećem položaju. Kako pneumatski mišići nisu pod

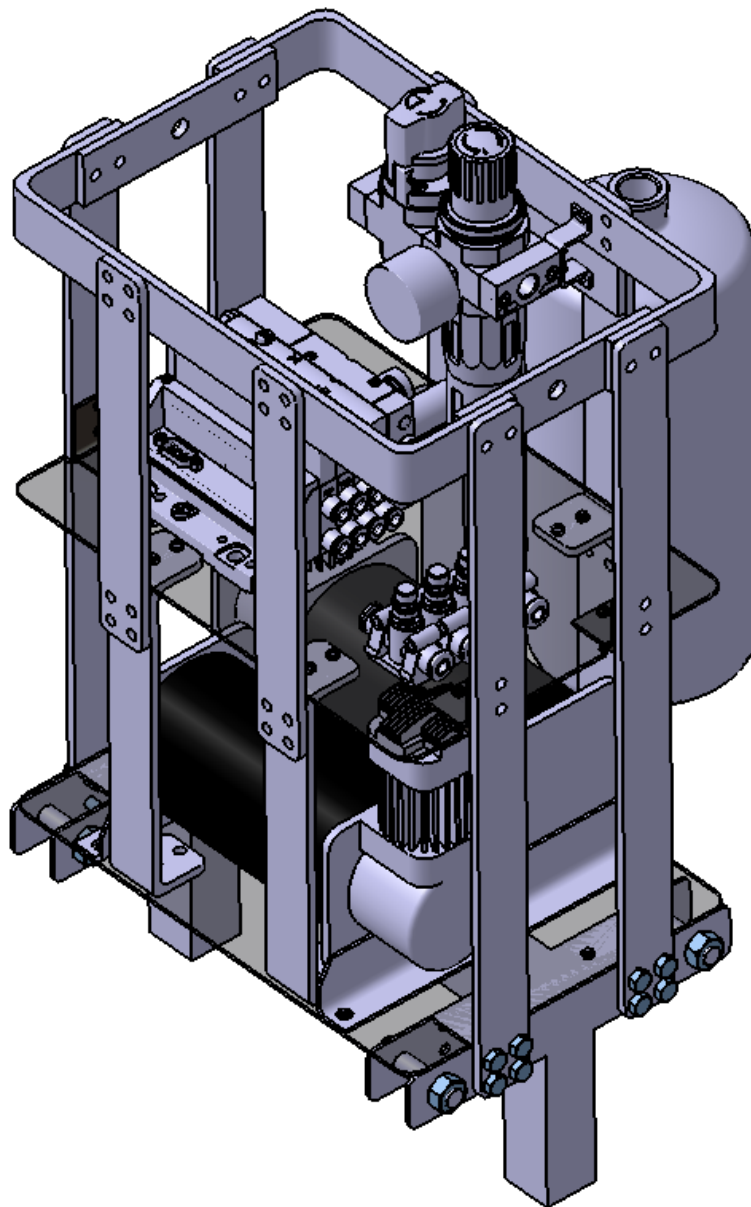
tlakom stabilnost robota u isključenom stanju postiže se samo s dva isključena aktuatora. Dovođenjem stlačenog zraka robot bi se osigurao sa četiri pneumatska mišića što znatno pridonosi čvrstoći konstrukcije u nultom položaju. Uvođenjem stopala sa velikom dodirnom površinom očekuje se stabilnost u stojećem položaju, a pravilnom regulacijom stabilan hod robota.



Slika 32. Izrađeni robot

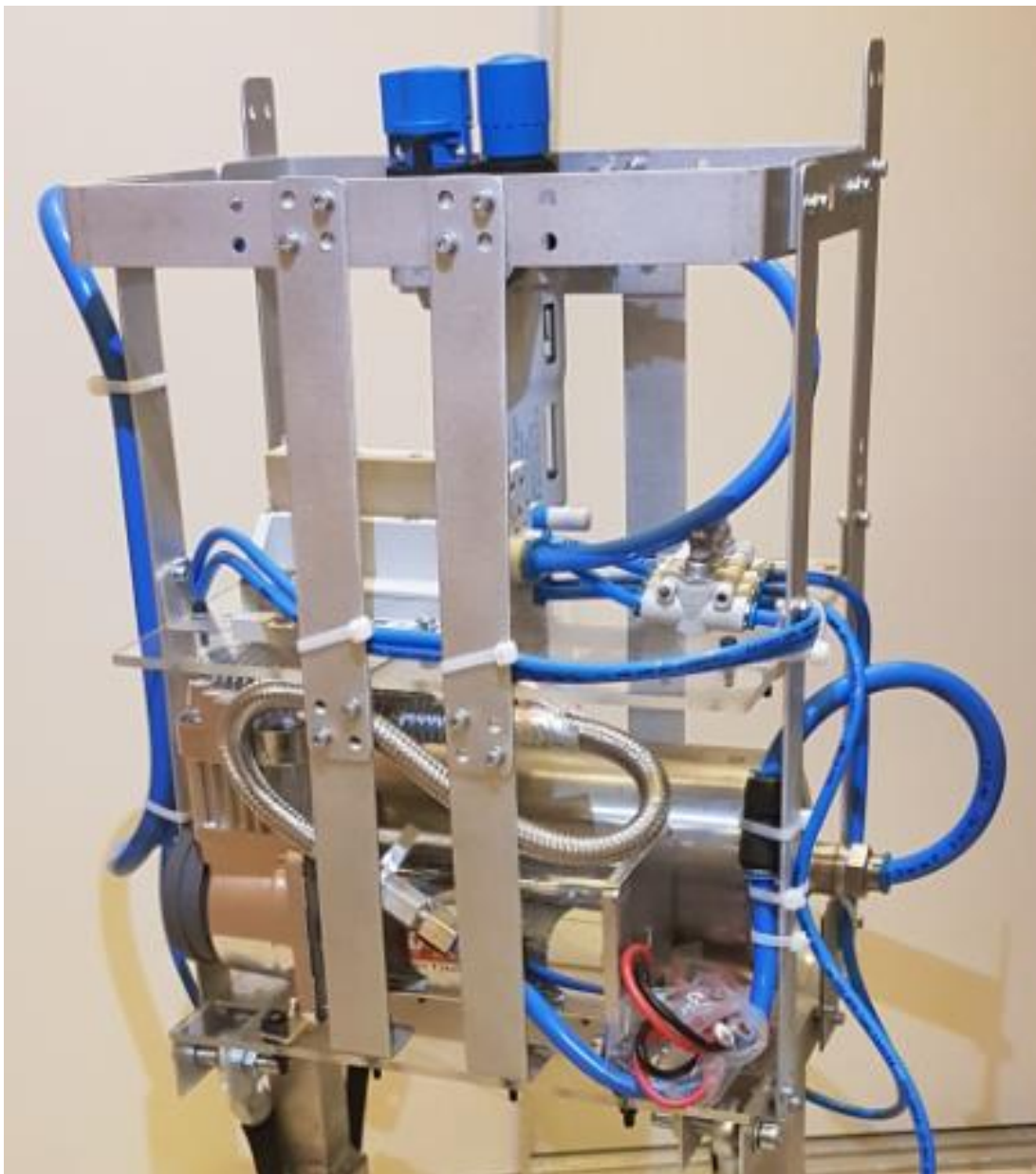
Konstrukcija i izrada trupa

Trup robota sastavljen je od aluminijskih profila i akrilnih staklenih ploča. Zbog estetskih i praktičnih razloga sve potrebne pneumatske i električne komponente smještene su unutar trupa robota. Na položaj centra mase najviše utječu spremnik, kompresor i baterija. Oni su zbog svoje težine i veličine smješteni na prvu razinu trupa s ciljem da težište bude svedeno u najnižu moguću točku. Preostale pneumatske komponente relativno su lagane i nalaze se na drugoj razini. Sve električne komponente nalaze se na trećoj razini trupa.



Slika 33. Konstrukcija trupa

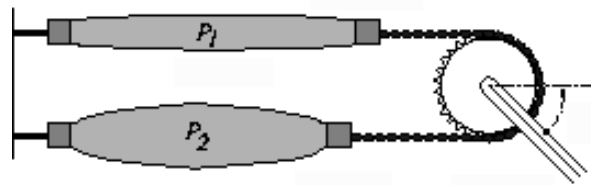
U odnosu na predviđenu konstrukciju izrađeni trup robota sadrži neke manje preinake. Umjesto dva kompresora na prvu razinu smješteni su kompresor i spremnik stlačenog zraka. Time se postiže kompaktnija konstrukcija, a spremnik se od udaraca osigurava aluminijskim profilima trupa robota. Između spremnika zraka i akrilne ploče druge razine ostavljeno je mjesta za električnu bateriju. Ostale električne komponente biti će smještene na akrilnoj ploči treće razine, iznad razvodnih ventila. Relativno su malih dimenzija i zanemarive težine, a uključuju: mikrokontroler, akcelerometar i relej za okidanje kompresora.



Slika 34. Trup robota

3.2. Pogonski sustav robota

Robot za ostvarenje gibanja koristi umjetne pneumatske mišiće, pa se pogonski sustav robota sastoji od pretežno pneumatskih komponenti. Mobilni roboti obično su pokretani električnim pogonima, no ovdje se koriste pneumatski mišići zbog svojstva elastičnosti. Umjetni pneumatski mišići su pogonske komponente kod kojih se elastična membrana rasteže i skuplja pod djelovanjem stlačenog zraka, pri čemu se ostvaruje neki pomak i vlačna sila. Elastičnost omogućuje otpornost na vibracije i udare koji nastaju prilikom hoda robota. Osim toga ponašanje koje podsjeća na biološke mišiće omogućuje prirodnu imitaciju dvonožnog hoda. Pošto je moguće postići samo vlačnu silu, za obostrano gibanje potreba su dva pneumatska mišića spregnuta u antagonistički par. Na taj način postiže se imitacija prirodnih bioloških mišića.

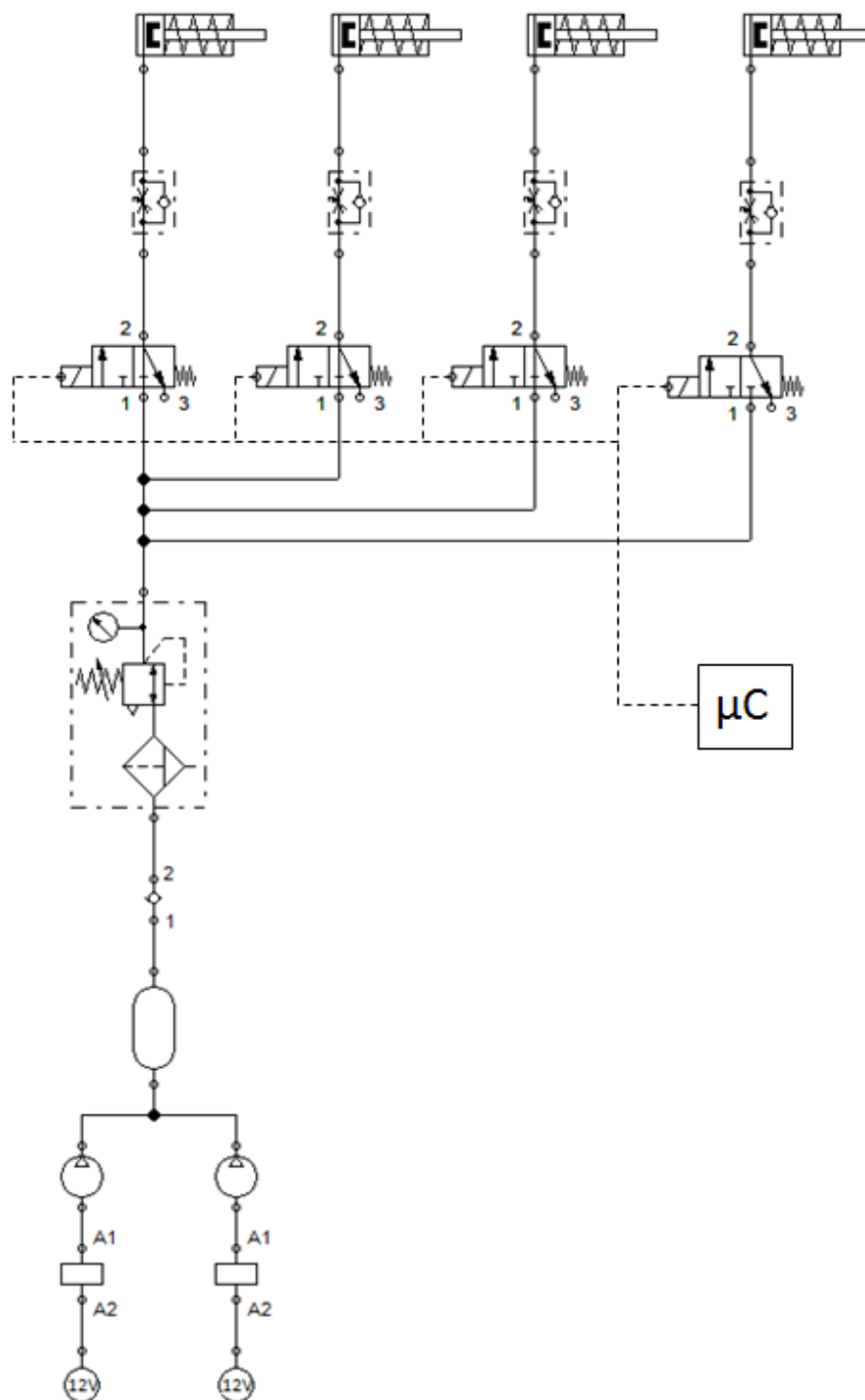


Slika 35. Spreg pneumatskih mišića

Ostvarena vlačna sila ovisi o tlaku i količini zraka koja je dovedena u mišiću. Kompresibilnost zraka također je prednost jer dopušta 'popustljivost' mišića. Sva navedena svojstva bitno utječu na elastično ponašanje čime se osigurava konstantni iznos korisne pogonske sile čak i u slučaju da se na pneumatski mišić nametne vanjska sila. Izrađeni su od gume, lateksa ili nekih drugih polimernih materijala što ih čini vrlo laganima i jednostavnim za održavanje. Još neke od prednosti su dugi vijek trajanja zbog nedostatka pokretnih dijelova, neosjetljivost na vlagu, nečistoće i vibracije [6]. Glavni nedostatak im je nelinearni matematički model što ih čini zahtjevnijim za precizno reguliranje, za razliku od klasičnih pneumatskih cilindara čiji je model linearan. Kao i kod ostalih pneumatskih aktuatora za upravljanje obično su potrebni elektromagnetski ventili i napajanje stlačenog zraka koje podrazumijeva kompresor i spremnik zraka. Pošto su i spremnik i kompresor velikih dimenzija i velike težinu u odnosu na ostale dijelove njihovo uvođenje u pogonsku strukturu sustava znatno utječe na ukupnu stabilnost.

Opis rada pneumatskog energetskog sustava

Energija se sustavu dovodi putem električne baterije koja mora napajati mikrokontroler, kompresor i senzore. Radi zaštite od strujnog udara kompresor se na bateriju spaja preko 12V releja. Kompresor napajani istosmjernim naponom tlači zrak iz okoline i provodi ga u spremnik. Spremnik služi za pohranu stlačenog zraka i može u sustav dati veće količine zraka ako je potrebno. Nakon spremnika nalazi se nepovratni ventil koji sprječava povratak zraka natrag u spremnik, a omogućuje neometan protok u suprotnom smjeru. Potom zrak putuje u pripremu grupu koja se sastoji od filtra i regulatora tlaka. Ovdje se zrak čisti od nečistoća i prigušuje na željenu vrijednost tlaka. Na izlazu regulatora tlak se održava na konstantnoj zadanoj vrijednosti. Potom slijede posredno upravljani 3/2 on/off ventili. Oni služe za raspodjelu protoka zraka kroz sustav. Pošto su ventili u normalnom stanju zatvoreni protok zraka u pneumatske mišiće ne ostvaruje se ako se ventilu ne dovede odgovarajući električni signal. Time se ostavlja mogućnost za upravljanje svakog aktuatora zasebno, pa svaki pneumatski mišić može postići željenu vlačnu silu. Radi jednostavnosti i uštede na prostoru ventili nisu odabrani zasebno, nego se nalaze unutar ventilskog bloka. Tako se upravljački signal ne dovodi svakom ventilu zasebno, nego mikrokontroler preko DS9 porta šalje signal ventilskom bloku. Također zrak se svim ventilima dovodi kroz isti vod i odvodi kroz zasebni zajednički vod. Primjena proporcionalnih ventila znatno bi olakšala regulaciju robota, no zbog visoke cijene za navedeni sustav nisu razmatrani. Ako se primjenom on/off ventila želi postići ista karakteristika potrebno je upravljanje pulsno-širinskom modulacijom. Za okidanje elektromagnetstkih ventila koriste se PWM izlazi mikrokontrolera. Kako sustav ima četiri aktuatora potrebna su i četiri upravljana PWM izlaza. Nakon ventila smješteni su prigušno-nepovratni ventili. Njihovom primjenom može se dodatno mijenjati količina zraka koja ulazi u mišiće čime se određuje brzina rada mišića. Prigušno-nepovratni ventili nemaju mogućnost električnog okidanja, već se podešavaju ručno. Na kraju pneumatskog sustava nalaze se aktuatori, tj. pneumatski mišići. Zadatak cijelog sustava je dovođenje pravilne količine stlačenog zraka aktuatorima kako bi se postigle sile potrebne za stabilizaciju hoda robota. Slika 36 simbolički spoj pneumatskih elemenata. U odnosu na realni spoj postoje neke neprimjetne razlike. Elektromagnetski 3/2 ventili nalaze se zasebno, umjesto ventilskog bloka, a pneumatski mišići zamijenjeni su cilindrima s povratnom oprugom. Također umjesto predviđenih dva kompresora u konačnu verziju robota ugrađen je samo jedan kompresor da bi se ostavilo mjesta za smještaj spremnika unutar trupa.



Slika 36. Shema pneumatskog sustava robota

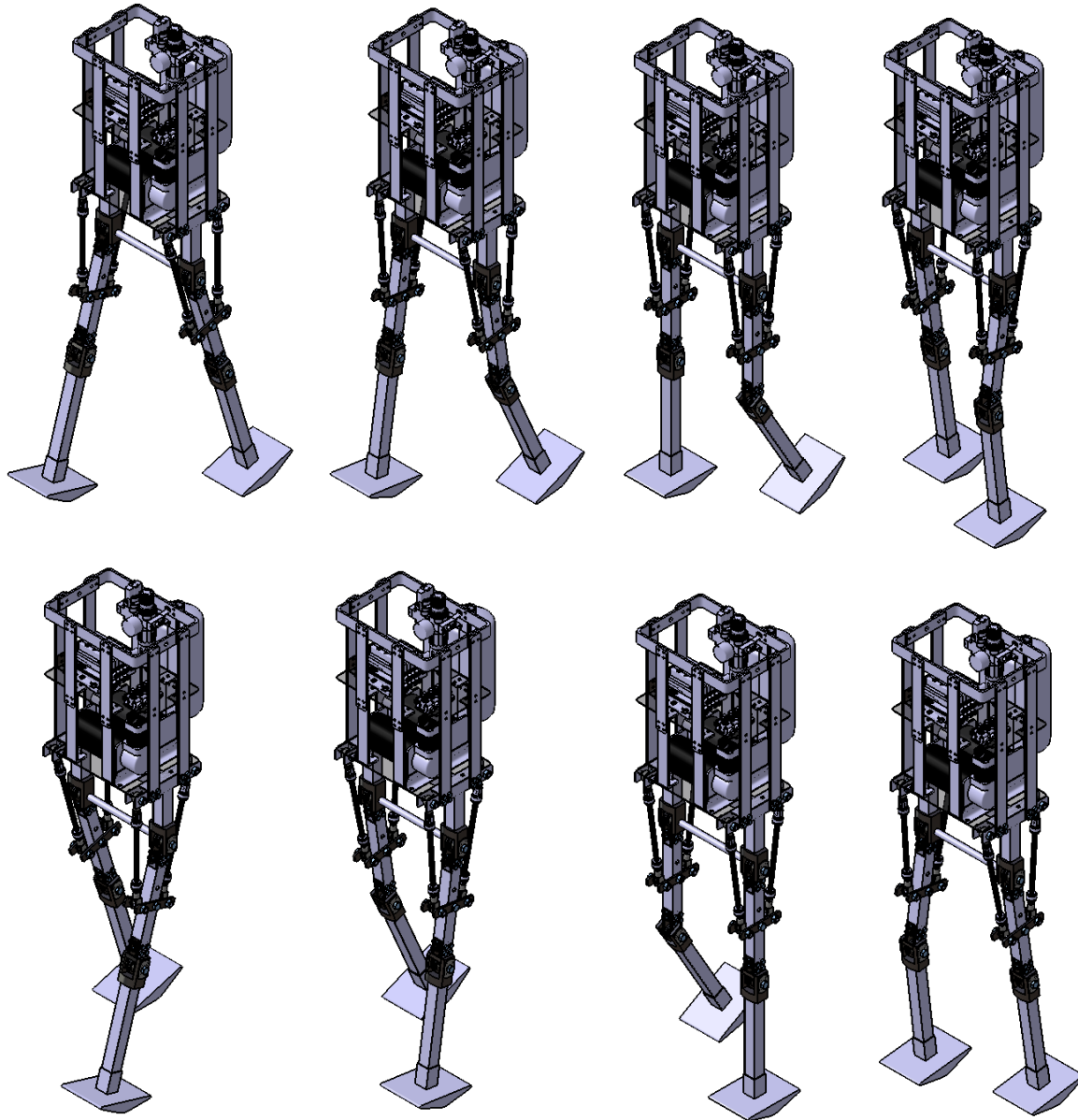
3.3. Upravljanje gibanjem sustava

Svaki složeni mehanički sustav zahtijeva upravljačke jedinice. U ovom slučaju energetski sustav sastoji se od pretežno pneumatskih komponenti, uz izuzetak baterija koje napajaju kompresore. Za pravilno funkcioniranje upravljačkog sustava potrebna je neka vrsta mjerenja unutarnjih ili vanjskih stanja robota. Na temelju mjerenja moguće je sustav regulirati za pravilno obavljanje zadanog zadatka. Kako su noge najvažniji dio hodajućeg robota logično je da se u smislu mjerenja odabiru stupnjevi slobode gibanja noge. Pošto svaka noga ima jedan upravljani stupanj slobode gibanja sveukupno su potrebna dva senzora. Odabiru se inkrementalni enkoderi malih dimenzija koji mjere kut zakreta pojedinog članka noge. Također je važno da robot registrira kada mu je noga dotakla tlo. U tu svrhu na dnu stopala smještena su tipkala, pa kada noga dotakne tlo tipkalo se aktivira. Da bi sve komponente upravljačkog sustava objedinili potreban je mikrokontroler koji sadrži algoritam upravljanja robotom. Mikrokontroler je glavni dio upravljačkog sustava. Unutar njega sadržan je kod koji diktira način rada robota. Informacije o unutarnjim stanjima robota, tj. o kutovima zakreta zglobova sustav prima preko inkrementalnih enkodera, a informacije vanjskih stanja (posrtanje robota) preko žiroskopa. Na temelju promjena varijabli senzora mikrokontroler šalje potrebne signale ventilskom bloku za pravilan rad pneumatskih mišića. Njihovom ispravnom kontrolom dobiva se željena kretanja uz zadržavanje stabilnosti robota. Pošto su ventili on/off tipa njihova regulacija zahtijeva PWM upravljanje.

Opis kretanja robota

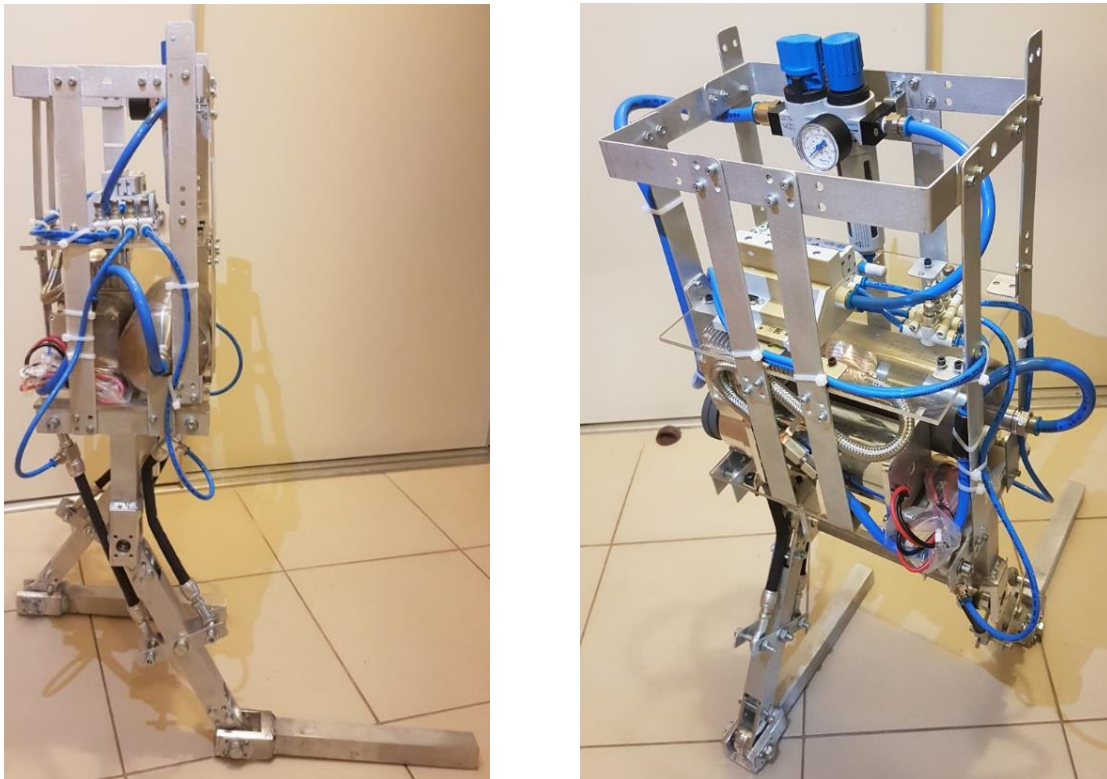
Očekuje se stabilnost robota u nominalnom položaju. U idealnom slučaju željeni kut između nogu trebao bi iznositi 33.2° čime bi se postigao maksimalni raskorak od 355 mm. Zbog velike površine dodira stopala i podloge, i zbog relativno velikog raskoraka očekuje se stabilnost robota u smjeru dvije koordinatne osi. Ukoliko bi se narušila stabilnost robota u bočnom smjeru, prevrtanje bi se spriječilo nametanjem sila svakom mišiću zasebno. Na taj način sustav regulacije sveo bi se na balansiranje ploče primjenom četiri aktuatora (slično sustavu kuglice na ploči). Problemi se javljaju prilikom kretanja robota. Svaka noga ima dva stupanja slobode gibanja što znači da sustav sveukupno ima četiri stupanja slobode gibanja. Iako robot za svoje kretanje koristi četiri aktuatora, po dva pneumatska mišića spojeni su u antagonistički par. To znači da je samo jedan stupanj slobode gibanja svake noge upravljan, a drugi ovisi o inerciji noge i načinu upravljanja

pneumatskim mišićima. Dalo bi se zaključiti da se donji članci noge gibaju ovisno o gornjim člancima. Da bi uklonili još jedan stupanj slobode konstruirano je mehaničko koljeno. Njegovom primjenom osigurava se kolinearnost članaka nogu u jednom smjeru. Kada noga krene iz prednjeg krajnjeg položaja u zadnji, koljeno osigurava pomicanje donjeg članka samo na način da uvijek bude kolinearne s gornjim člankom. Na taj način samo jedan stupanj slobode gibanja robota nije potpuno određen.



Slika 37. Prikaz hoda robota

Slika 37. prikazuje željeni način hoda robota. U početnom položaju svakoj nozi pridružena su dva aktuatora tako da se jedan pneumatski mišić nalazi u nominalnom, a drugi u skraćenom stanju. Kao što je već navedeno pneumatski mišići mogu se pod utjecajem zraka samo skupljati čime se postiže određena vlačna sila. Kada robot krene iz početnog položaja u zadnji mišić lijeve noge dovodi se stlačeni zrak čime se on počinje skupljati. Istovremeno se prednji mišić iste noge rasteže. Kako koljeno omogućava kolinearnost članaka noge postiže se prebacivanje težišta robota oko dodirne točke stopala navedene noge i podloge. Pravilnim slanjem PWM signala ventilskom bloku mogu se postići željene sile u oba aktuatora pripadne noge. Istovremeno se prednji pneumatski mišić desne noge počinje skupljati pod utjecajem zraka, a zadnji rastezati. Brzim pokretom gornjeg članka ove noge očekuje se prebacivanje donjeg članka noge prema naprijed. Također pravilnim upravljanjem mišića mogu se postići željene sile za ostvarivanje stabilnost hoda.



Slika 38. Robot u nultom položaju

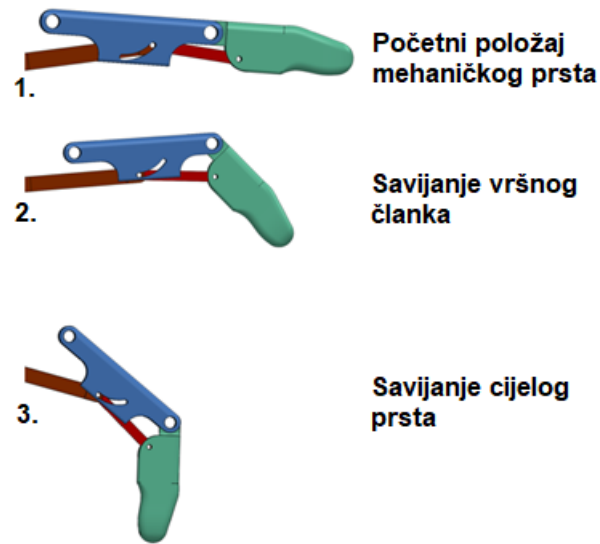
4. BIONIČKA ŠAKA

U sklopu projekta pod nazivom bionička šaka izrađene su dvije verzije. Prva verzija šake koja je izrađena pokretana je umjetnim pneumatskim mišićima. Za razliku od prve verzije, druga verzija konstruirana je tako da uz pomoć električnih aktuatora, odnosno servomotora, obavlja gibanje. Servomotori svojim zakretanjem povlače sajle koje imaju ulogu tetiva. Obje verzije bioničkih ruku upravljaju se elektromiografskim senzorom čije se elektrode spajaju izravno na površinu kože. Bionička ruka je u stanju oponašati ljudske pokrete te bi se kao takva mogla primijeniti u industriji za upravljanje strojevima na daljinu ili primjerice u medicini kao bionička proteza, ali naravno postoje i mnoge druge primjene. Kroz poglavlje 4.1. bit će opisano projektiranje prve i druge verzije bioničke ruke. U poglavlju 4.2. bit će nešto riječi o elektroničkim komponentnima koje su implementirane u samu ruku. Kroz poglavlje 4.3. govorit će se o samim algoritmima upravljanja ovakvog sustava.

4.1. Projektiranje i izrada bioničke šake

Kako bi se dobila ideja kako će mehanizam bioničke ruke funkcionirati, potrebno je pažljivo promotriti način na koji mičemo prstima. Zbog načina rada korištenih aktuatora, pneumatskih mišića, dovoljno je kopirati sustav koji se sastoji od mišića (pneumatski mišić), tetive (žica i štap) i kostiju (plastična konstrukcija šake) [15].

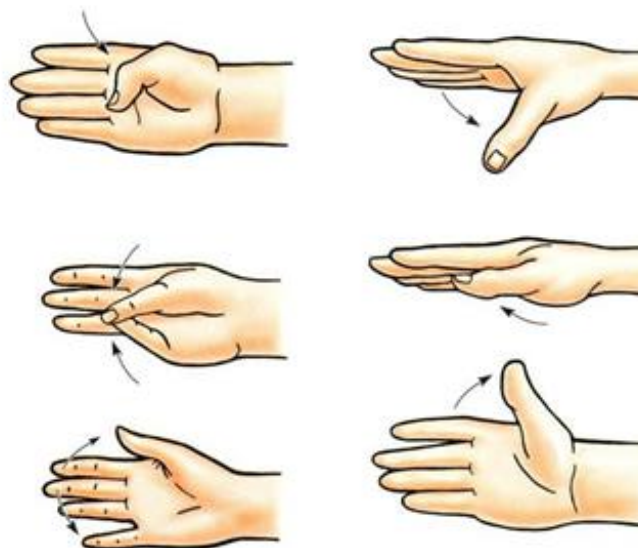
U ljudskoj šaci mišići agonisti podraženi živčanim signalom sužavaju se u duljinu i povlače kosti pomoću tetiva. Način na koji se kosti u prstu pomiču je taj da se prvo savija drugi zglob, treći, pa tek onda prvi, što je rezultat oblika kostiju ruke. Najjednostavniji zglob koji može povezati dva članka mehaničkog prsta se sastoji od osovine i provrta. Takvi mehanički zglobovi ne omogućuju postepeno savijanje prsta, tako da se u konačnoj konstrukciji mehaničkog prsta nalaze samo dva članka, povezanih sa posebnim zglobom koji zakrivljenom vodicom osigurava pravilno savijanje prsta, slika 39.



Slika 39. Rješenje savijanja mehaničkog prsta

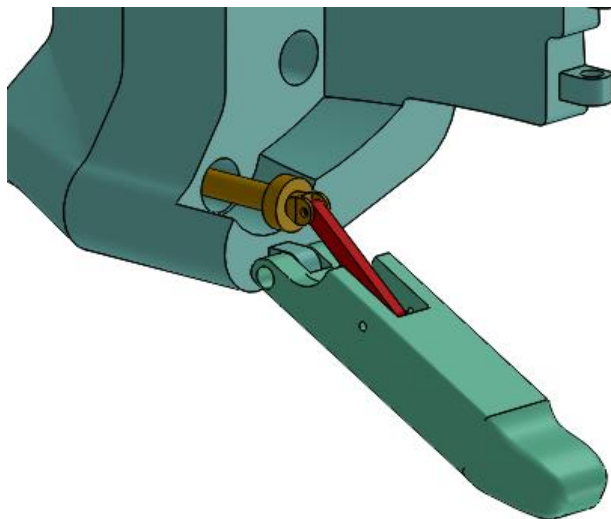
Zadnja dva članka ljudskog prsta su u ovom slučaju zamijenjena jednim, a zglob je ostvaren preko zakrivljenog provrta koji omogućuje postepeno savijanje mehaničkog prsta. Na slici 39. vidljivo je da se prvo savija vršni članak prsta, a tek onda i drugi.

Palac u ljudskoj ruci predstavlja poseban mehanizam jer se savija zajedno s dijelom dlana. Upravo zato i je najvažniji dio ljudske šake jer nam savijanjem okomito na ostale prste, omogućuje hvatanje predmeta.



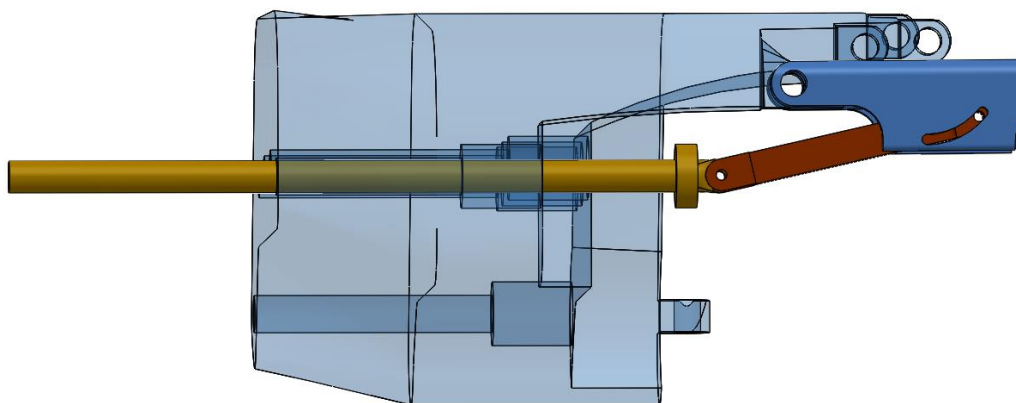
Slika 40. Pokreti ljudskog palca

No takav mehanizam zahtjeva kompleksniju izvedbu animatroničke šake. Zbog jednostavnosti, dlan animatroničke šake oblikovan je iz jednog dijela, bez dodatnog zgloba za palac, koji je također oblikovan iz jednog dijela, slika 41.



Slika 41. Mehanički palac

Prenošenje translacijskog pomaka umjetnog pneumatskog mišića na prste animatroničke šake izvedeno je pomoću sustava tankih štapova. Najduži štap je spojen na pneumatski mišić i obavlja zajedno s njim translacijsko gibanje, osigurano oblikom cilindričnog provrta u dlanu šake. Na drugom kraju je ostvaren zglob sa međuštapom koji se spaja na zglob prikazan na slici 42.

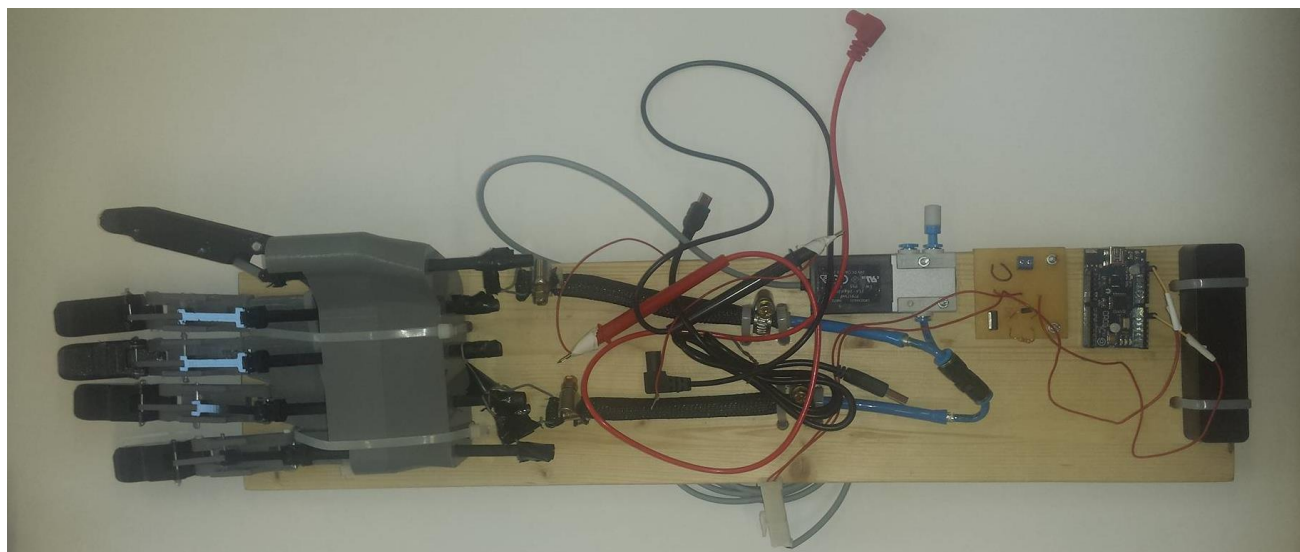


Slika 42. Sustav štapova za prenošenje snage s pneumatskih mišića na prste šake

Na slici 4. vidi se zadebljanje prije zgloba na dugom žuto obojenom štapu. To zadebljanje, kao i prošireni provrt u dlanu, dizajnirani su da omogućue ugrađivanje tlačnih opruga. Opruge bi

osigurale povrat prstiju u početni (rašireni) položaj, nakon prestanka djelovanja pneumatskih mišića.

Mehanički dijelovi sustava su izrađeni na uređaju za brzu izradu prototipova, odnosno 3D printeru. Materijal je PLA plastika. Na slici 43. vidljiva je prva verzija bioničke šake.



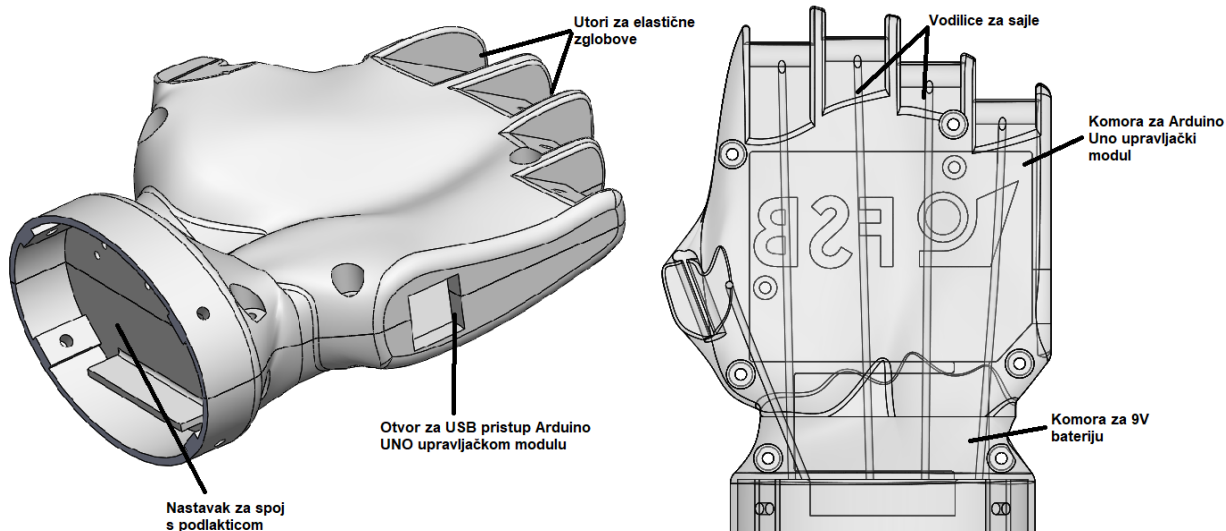
Slika 43. Prva verzija bioničke ruke

Vezano uz prvu verziju bioničke ruke moguće je iznijeti sljedeći zaključak. Upravljanje elektromagnetskim ventilom uz pomoć EMG senzora pokazalo se iznimno uspješno, no problem je fina regulacija stiska šake zbog aktuatora. Pneumatski mišići su se pokazali nepovoljni kao aktuatori za bioničku šaku. Iako mogu ostvariti veliku silu, ne mogu se dobro pozicionirati niti precizno upravljati.

Zbog navedenih razloga prva verzija zamijenjena je drugom verzijom bioničke ruke koja je značajno unaprijeđena. Kao aktuatori korišteni su servomotori koji se mogu vrlo precizno pozicionirati, a zglobovi su izrađeni od elastoplastomera kako bi se što vjernije oponašali pokreti ljudske šake te ujedno dobilo više pasivnih stupnjeva slobode.

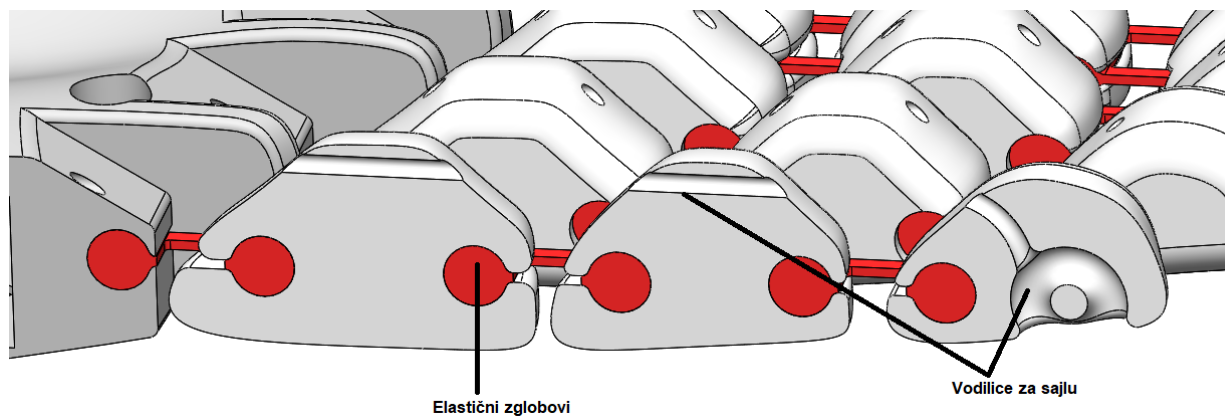
Nova verzija bioničke ruke projektirana je uz pomoć programskog paketa *Solidworks*. Zbog uštede prostora u samu šaku su ugrađene komore za upravljački modul *Arduino Uno* kao i za 9 V bateriju za napajanje modula. Dizajnirani su i uski kanali koji služe kao vodilice za plastične sajle koje prolaze od vrhova prstiju do vratila servo motora te imaju ulogu tetiva i povlače prste. Spajanje

polovica dlana i svih ostalih komponenti je ostvareno vijcima s metričkim navojem s pripadnim maticama. Na slici 44. prikazan je dlan nove verzije bioničke ruke.



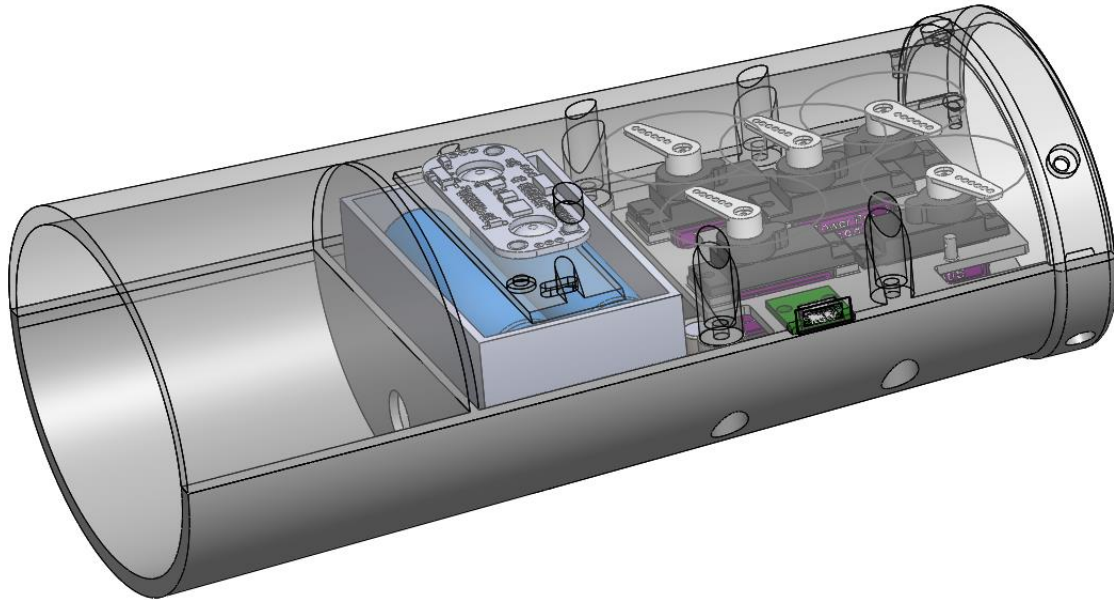
Slika 44. Dlan nove verzije bioničke ruke

Za razliku od prethodne verzije, prsti su dizajnirani tako da više nalikuju ljudskim prstima. Svaki prst ima tri zgloba, a pomicanje se ostvaruje pomoću servomotora koji povlače plastičnu saju zavezanu za vrh prsta. Na taj način se prst postepeno savija, slika 45.



Slika 45. Presjek prsta

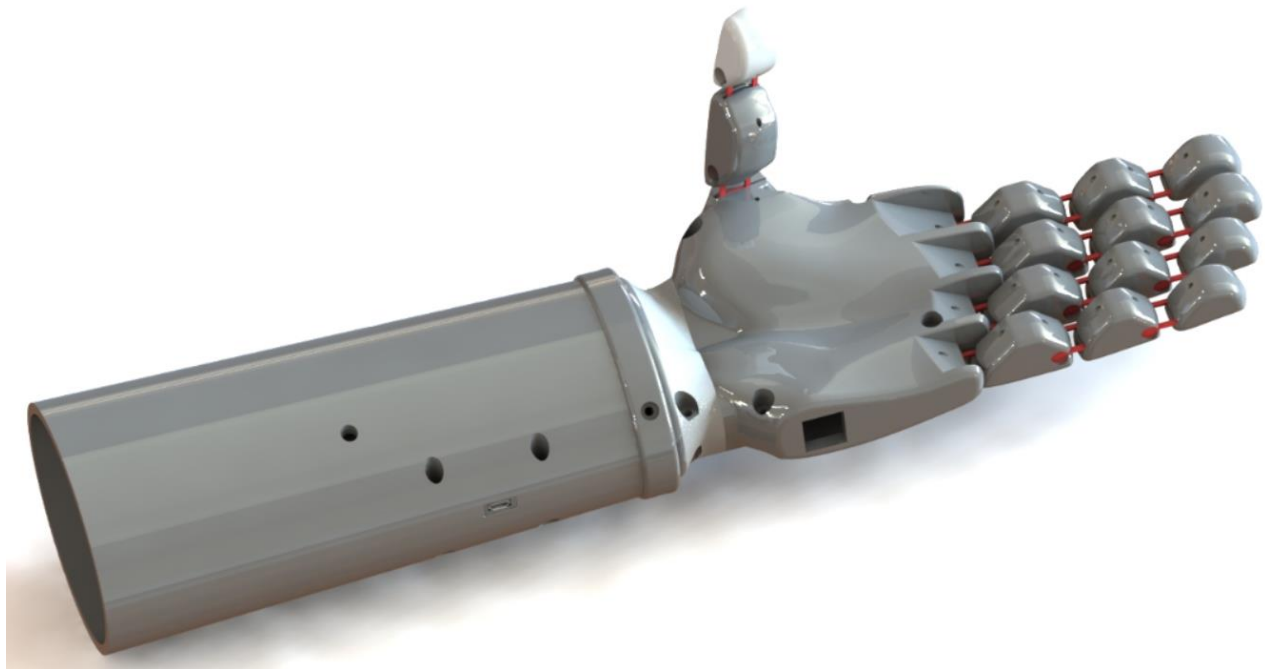
Nakon projektiranja samog dlana, odnosno šake, potrebno je dizajnirati podlakticu. Podlaktica je konstruirana prema elektroničkim komponentama koje su implementirane u samu ruku. Na slici 46. prikazana je podlaktica sa pripadnim elektroničkim komponentama.



Slika 46. Podlaktica s pripadnim elektroničkim komponentama

Za kraj poglavlja 4.1. zgodno je prikazati cijeli model bioničke ruke koji obuhvaća prste, dlan i podlakticu. Na kraju poglavlja 4. bit će dane slike stvarne fizičke izvedbe bioničke ruke te će na taj način biti vidljiva usporedba CAD modela i stvarne izvedbe.

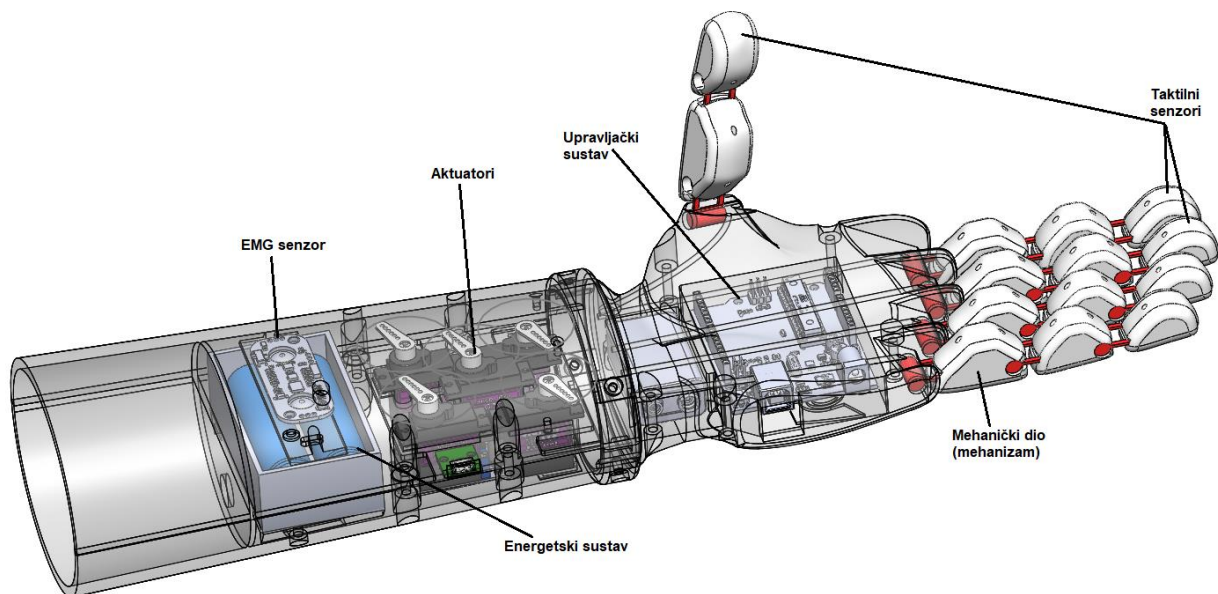
Na slici 47. prikazan je CAD model cijele bioničke ruke.



Slika 47. CAD model druge verzije bioničke ruke

4.2. Elektronički sustav bioničke ruke

U sklopu poglavlja 4.2. bit će objašnjene elektroničke komponente druge verzije bioničke ruke. Dijelovi cijelog sustava bioničke ruke su: senzori, energetski sustav, aktuatori, upravljački sustav i mehanički sustav. Pod elektroničkim sustav se podrazumijeva sve od navedenog izuzev mehaničkog sustava koji je prethodno kroz tekst opisan. Dijelovi sustava prikazani su na slici 48.



Slika 48. Dijelovi sustava bioničke ruke

Senzori

EMG (elektromiografija) je elektrodijagnostička metoda za ispitivanje funkcije perifernog živčanog sustava (perifernih živaca i mišića) u stanju mirovanja i pokreta. Njome se može brzo potvrditi, postaviti dijagnoza bolesti ili povrede perifernog živčanog sustava, disfunkcija mišića ili problemi s prijenosom signala od živca do mišića.

Motorni neuroni prenose električne signale koji uzrokuju mišićnu kontrakciju. EMG provodi te signale u grafove (numeričke vrijednosti) koje tumači liječnik specijalist. Električni potencijal mišića iznosi oko 20 mV. Mjereni signali se osim pojačalima dodatno obrađuju analognim i digitalnim filterima kako bi se isključile komponente šuma i ostalih smetnji.

Upravo takvi signali koji se u medicini koriste za postavljanje dijagnoza mogu se u robotici iskoristiti za upravljanje aktuatorima. Stoga su se iz tog razloga razvili EMG senzori. Slika 49.

prikazuje EMG senzor. Da bi se signali mišića mogli detektirati potrebne su elektrode koje se dodatno premazuju gelom radi boljih svojstava.



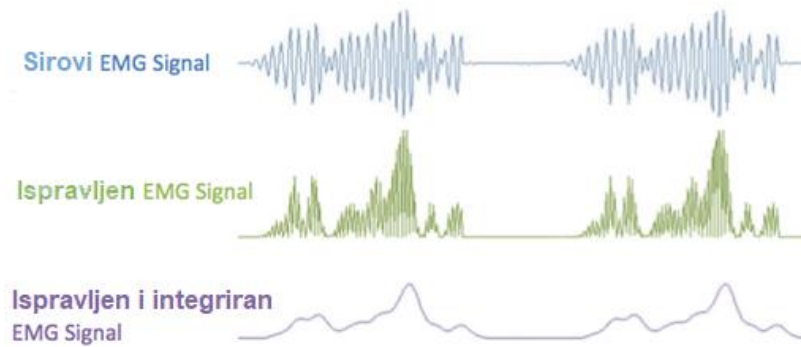
Slika 49. EMG senzor

Površinske elektrode lijepe se na kožu. Zatim se mišići kontrahiraju te se takav signal putem elektroda prenosi na senzor koji zatim pojačava i ispravlja signal. Na slici 50. prikazan je princip rada EMG senzora.



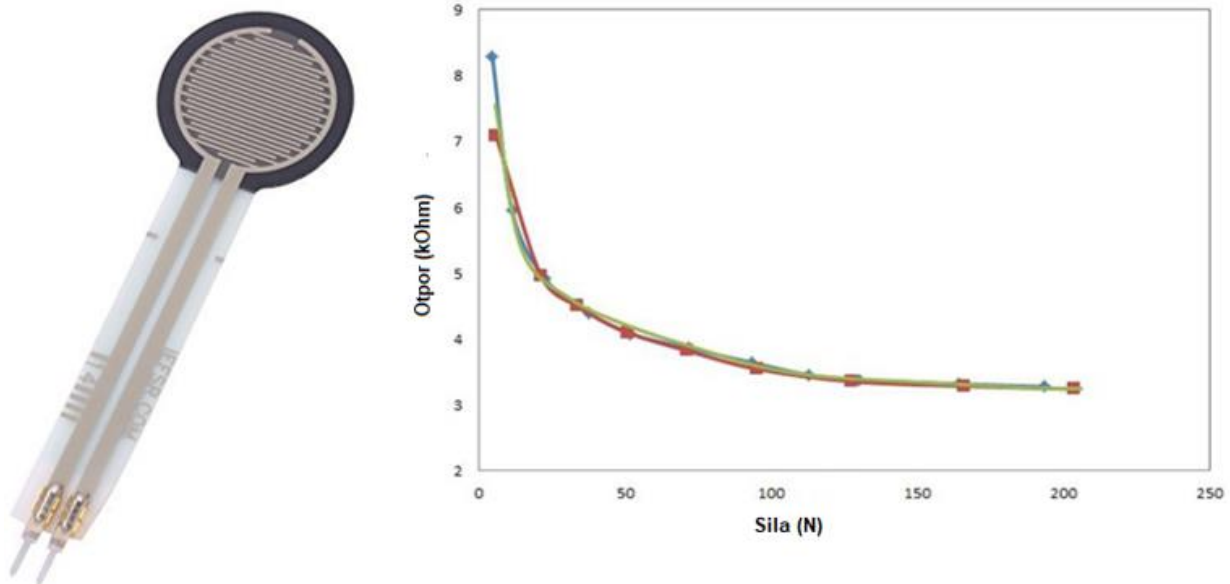
Slika 50. Princip rada EMG senzora

U senzoru je integrirana elektronika koja signal mišića pretvara u analogni signal koji se zatim pojačava i ispravlja u nekoliko faza te se kao takav može upotrijebiti za upravljanje aktuatora. Na slici 51. prikazan je sirov, ispravljen te sirov i ispravljen signal *MyoWare* EMG senzora.



Slika 51. Signali EMG MyoWare senzora

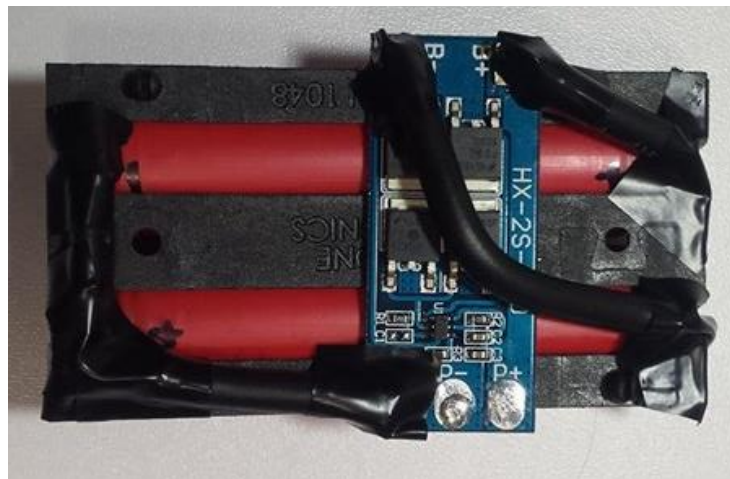
Nakon EMG senzora koji služe za upravljanje sljedeća vrsta senzora koji su integrirani na bioničku ruku su tzv. taktilni senzori, odnosno senzori sile. Ovakvi senzori su izvedeni u obliku tanke folije i pripadaju skupini FSR (eng. Force sensing resistor). Folija se lijepi na vrh prsta te je kao takva gotovo nevidljiva. Dakle, ovakvi senzori mijenjaju svoj izlazni otpor proporcionalno pritisku na foliju. Ovakva vrsta senzora omogućuje ostvarenje povratne veze s aktuatorima što će biti objašnjeno u poglavlju 4.3. Senzor, kao i ovisnost otpora o sili apliciranoj na senzor prikazani su na slici 52.



Slika 52. FSR senzor s pripadnom karakteristikom

Energetski sustav

Svaki aktuator, senzor i upravljački modul moraju od nekuda vući energiju kako bi funkcionirali. Iz tog razloga u sustav je potrebno dodati baterije koje mogu bioničku ruku opskrbljivati energijom kroz određeni vremenski period. Korištene baterije su litij-ionske punjive baterije u kućištu tipa 18650. Uz baterije je dodana zaštitna pločica koja baterije štiti od nepovoljnih stanja kao što su prenizak napon, previsok napon, balansira napunjenost pojedinih ćelija, itd... Serijski su spojene dvije litij-ionske baterije što rezultira naponom od 7,6 V. Slika 53. prikazuje serijski spoj dvije baterije s pripadnim BMS-om.



Slika 53. Serijski spoj litij-ionskih baterija

Tablica 1. prikazuje neke od karakteristika korištenih litij-ionskih baterija.

Kapacitet baterija iznosi 2200 mAh. Glavno trošilo u sustavu su aktuatori, odnosno servomotori. Njihova struja pri punom opterećenju iznosi približno 1 A što su pokazala mjerenja. Iz tih podataka moguće je izračunati teorijski period trajanja baterija do ponovnog punjenja.

$$t_b = \frac{\text{kapacitet baterije}}{5 \cdot I_m} = \frac{2200}{5 \cdot 1000} = 0,44 \text{ h} = 26,4 \text{ min} \quad (4.1.)$$

Tablica 1. Karakteristike korištene litij-ionske baterije

Litij-ionska baterija LAM 18650	
Kapacitet	2200 mAh
Nazivni napon	3.6 V (4.2 V kada su baterije pune)
Minimalni napon na koji se smije isprazniti	2.5 V
Maksimalna struja pražnjenja	10 A
Optimalna struja punjenja	1.6 A
Unutarnji otpor	38 mΩ
Vijek trajanja	300 ciklusa
Težina	49.5 g
Radna temperatura	-20°C - 60°C

Treba imati na umu da je dobiveni period slučaj kada bi svih 5 motora radilo pod punim opterećenjem kroz svih 26,4 minuta. Naravno da u radu ruke to nije realna situacija tako da je taj period u stvarnosti mnogo duži.

Ovdje još valja spomenuti kako se u bioničkoj ruci nalazi još jedna 9 V olovna baterija za napajanje upravljačkog modula *Arduino Uno*.

Aktuatori

U uvodu u poglavlje 4. već su spomenuti korišteni aktuatori servomotori. Ovdje će biti dane osnovne karakteristike korištenih servomotora. Korišteni servomotori su MG90S prikazani na slici 53.



Slika 54. MG90S servomotor

Tablica 2. prikazuje karakteristike korištenog servomotora.

Tablica 2. Karakteristike MG90S servomotora

MG90S servomotor	
Masa	13,4 g
Dimenzije	22,5×12×35,5mm
Moment	0,18 Nm (4,8V); 0,21 Nm (6V)
Brzina zakreta	0,1 s/60stupnjeva (4,8V); 0,08 s/60stupnjeva (6,0V)
Nazivni napon	4,8 ~ 6,6V
Materijal zupčanika	Metal
Struja opterećenog servomotora	1000mA

Upravljački modul

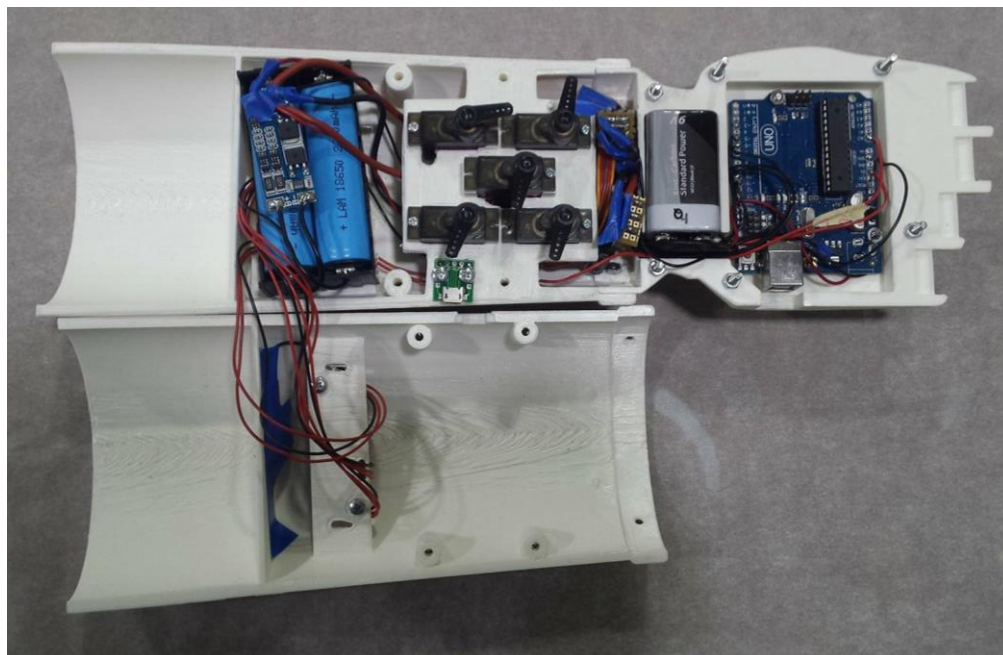
Kao upravljački modul koristi se *Arduino Uno* koji je prikazan na slici 54.



Slika 55. Upravljački modul Arduino Uno

Arduino Uno je modul koji se temelji na ATmega328P mikrokontroleru. Ima 14 digitalnih ulazno-izlaznih priključaka, 6 analognih ulazno-izlaznih priključaka, 16 MHz kvarcni kristal, USB vezu, priključak za napajanje, ICSP programator i reset tipkalo. Osim modula, upravljački sustav čini upravljački program (eng. *Software*).

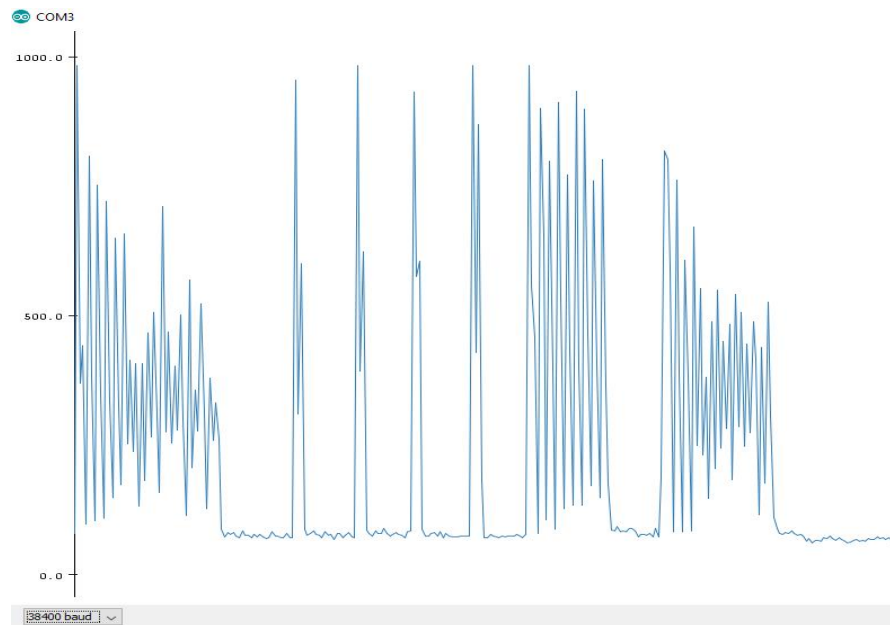
Slika 56. prikazuje elektronički sustav montiran u bioničku ruku. Vidljivo je kako se CAD model prikazan na slici 47. savršeno poklapa sa stvarnom fizičkom izvedbom.



Slika 56. Elektronička konfiguracija bioničke ruke

4.3. Upravljanje bioničkom rukom

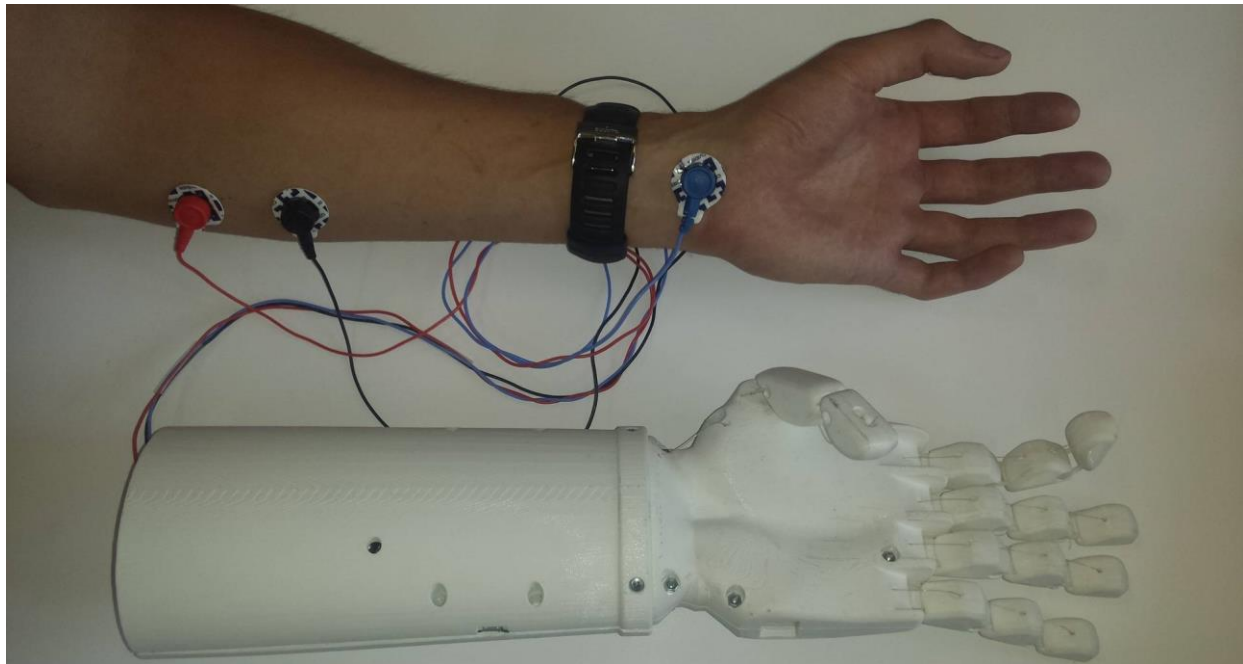
U sklopu ovog projekta razrađena su dva principa upravljanja bioničkom rukom. Prvi princip razrađen je na prvoj verziji bioničke ruke koja kao aktuator koristi umjetne pneumatske mišiće. Za početak promotrimo sliku 59. koja prikazuje snimljeni analogni signal EMG senzora.



Slika 57. Snimljeni signal EMG senzora

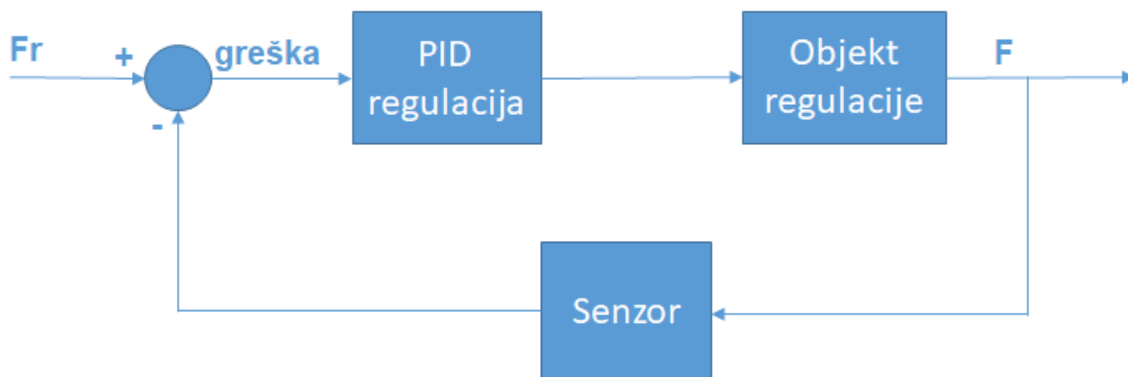
Ako postavimo donju i gornju granicu aktivacije aktuatora tada možemo s lakoćom programirati aktivaciju aktuatora kada signal prijeđe gornju granicu i isto tako deaktivaciju aktuatora kada signal EMG senzora padne ispod donje granice. Upravo takav princip je razrađen na prvoj verziji bioničke ruke. No međutim, takvo rješenje nije praktično za prihvaćanje krhkih predmeta koji se mogu vrlo lako zdrobiti. Iz tog razloga je na drugoj verziji bioničke ruke implementirana PID regulacija. PID regulacija koristi se za regulaciju pozicije prstiju, odnosno regulaciju sile pritiska predmeta. Slika 20. prikazuje spojene elektrode na ruku. Proporcionalno jačini kontrakcije mišića podlaktice, dobiva se veća vrijednost signala. Uzmimo za primjer da je vrijednost signala od 1000 ekvivalent sili od 10 N. Senzori pritiska na vrhovima prstiju mjerit će silu koja će u prvom krugu petlje biti nešto manja ili nešto veća od željenje odnosno referentne sile. PID regulacija otklanja pogrešku te na taj način regulira silu.

Ovakvim načinom upravljanja postiže se jednostavnije upravljanje prstima te mogućnost kontrole pritiska za razliku od upravljanja koje je bilo implementirano u prvu verziju bioničke ruke.



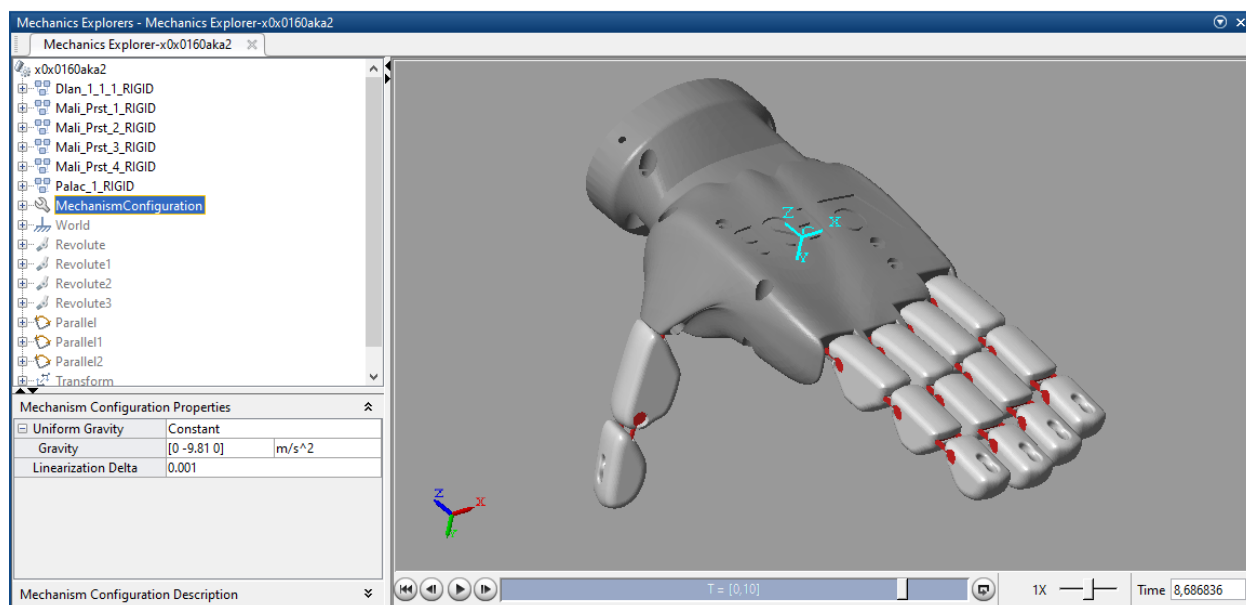
Slika 58. Spajanje elektroda EMG senzora na površinu kože

Shematski prikaz regulacijskog kruga prikazan je na slici 59.



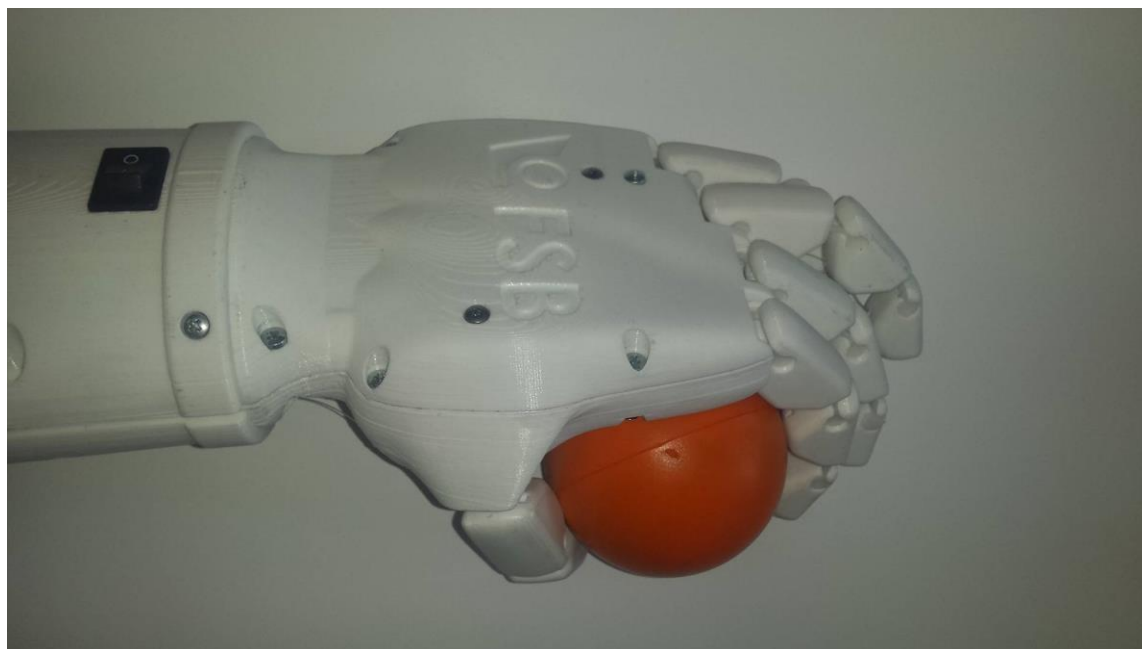
Slika 59. PID regulacija

U svrhu simulacije, odnosno eksperimentalnog određivanja parametara regulatora korišten je programski paket *Matlab* kao i dodatak pod nazivom *Simscape Multibody Link*. Na taj način moguće je model iz *Solidworks-a* povezati sa *Matlab-om* i izvršiti simulaciju. Isječak simulacije iz *Matlab-a* prikazan je na slici 60.



Slika 60. Simulacija PID regulacije

Za kraj poglavlja 4. prikazana je bionička šaka za vrijeme hvatanja predmeta.



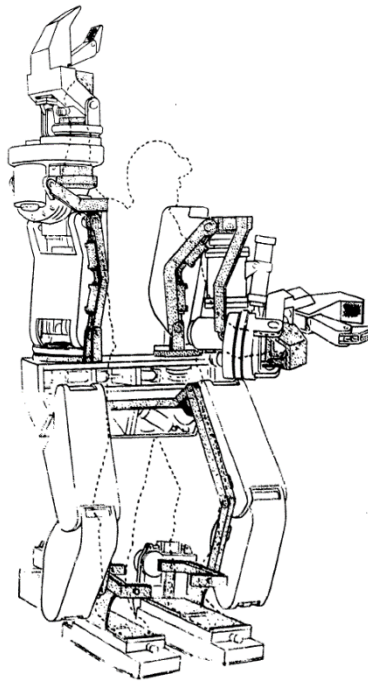
Slika 61. Hvatanje predmeta

5. EGZOSKELETONSKA RUKA

U ovom dijelu rada je opisano projektiranje, izrada i upravljanje egzoskeletonske ruke pokretane umjetnim pneumatskim mišićima. Egzoskeletonski sustav je mobilni stroj integriran sa ljudskim pokretima u svrhu rehabilitacije ili ojačanja određenih radnji.

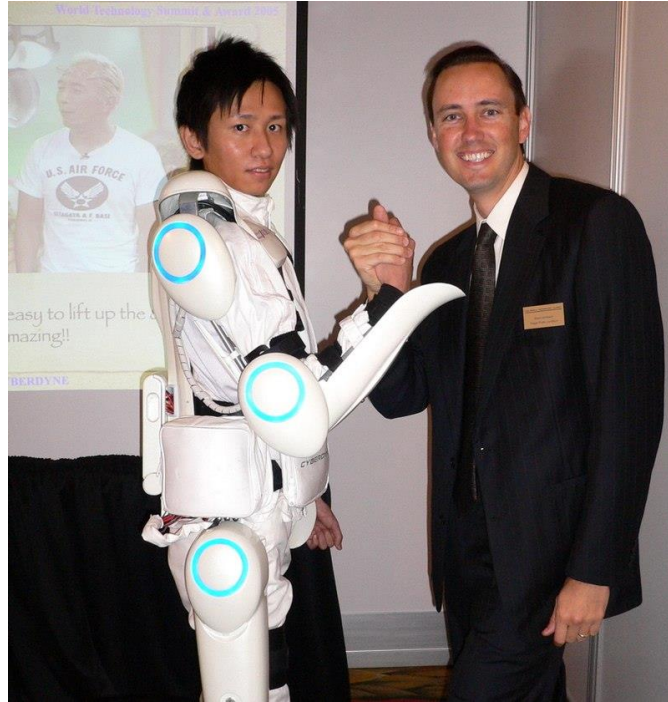
Prvo je opisano projektiranje konstrukcije egzoskeletonske proteze pomoću CAD alata, a zatim izrada konstrukcije i energetskog dijela (pneumatskih mišića). Zatim se opisuje sklapanje mehaničkog i energetskog sustava u cjelinu povezujući ih sa upravljačkim sustavom preko mikrokontrolera.

Egzoskeleton je stroj pogonjen električnim motorima, pneumatikom ili hidraulikom s glavnim ciljem da ojača tj. potpomogne korisnika da se kreće, radi pod većim opterećenjem s većom snagom i izdržljivošću [16].



Slika 62. Mobilni stroj Hardiman

Osim u vojne svrhe egzoskeletoni nalaze primjenu u medicini, poboljšavajući kvalitetu života ljudima bez udova, za poboljšanje motorike zbog ozljede itd.

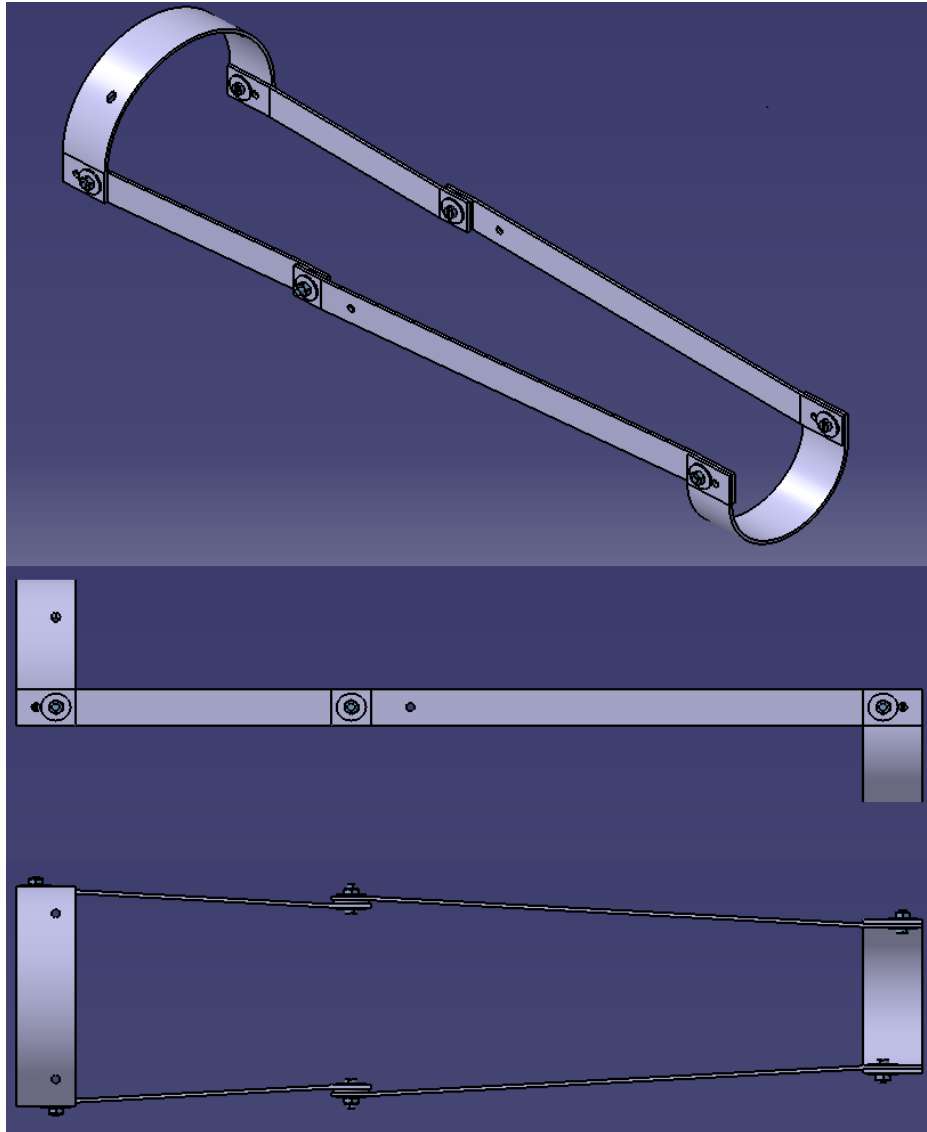


Slika 63. Prototip robota HAL

Sustav je izveden od aluminijske konstrukcije koja predstavlja egzoskeleton, tj. ortožu koja se pričvršćuje na ruku, energetskog dijela (pogona) koji se sastoji od para pneumatskih mišića te upravljačkog sustava, tj. on/off razvodnika (ventila) koji se upravlja mikrokontrolerom Arduino Nano preko PWM signala da se dobije efekt rada proporcionalnog ventila koji bi omogućio glatke, a ne nagle pomake ortože.

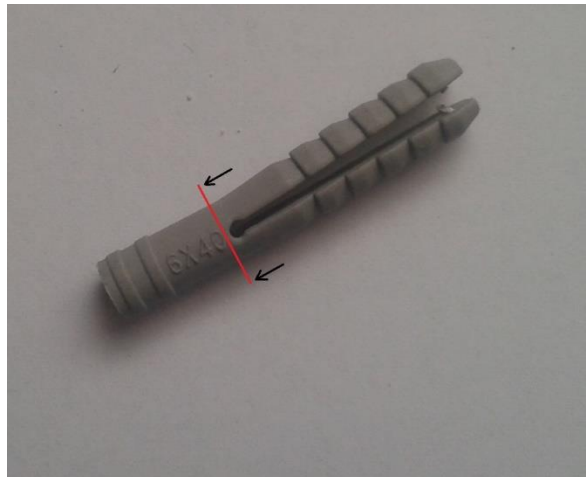
5.1. Projektiranje i izrada konstrukcije egzoskeletonske ruke

Konstrukcija je napravljena od aluminijske ploče (AlMg3), debljine 2 mm. Nosači su spojeni vijčano. Svaki spoj osiguran je maticama s gumom radi osiguranja od odvrtnja, te podloškom s obje strane.



Slika 64. Konstrukcija ortoze

Zglob je ostvaren tako da je plastična „tipla“ poslužila kao ležaj. Odrezana je kao što je označeno na slici 64 i stavljena kroz gornji i donji nosač te deblju podlošku kroz koju onda prolazi vijak i osigurava se maticom s gumom na vrhu (ponaša se kao dupla matica). To je načinjeno zbog osiguranja od odvrtnja kao što je prikazano na slici 65, a iste matice koriste se i za ostale spojeve.



Slika 65. Plastična tipla



Slika 66. Matica s gumicom

5.2. Energetski sustav ruke

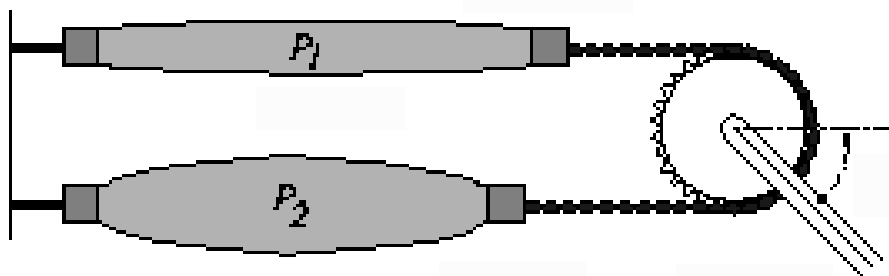
Umjetni pneumatski mišići su pogonske komponente kod kojih se elastična membrana rasteže i skuplja pod djelovanjem stlačenog zraka, pri čemu se ostvaruje pomak i vlačna sila. Svojom djelovanjem imitiraju rad prirodnih mišića. Pneumatski mišići vrlo su lagani jer im je glavni dio tanka membrana izrađena od gume, lateksa i drugih polimernih materijala. Važna prednost u odnosu na ostale tipove aktuatora je njihovo elastično ponašanje. Ako se na pneumatski mišić narine sila on toj sila 'popušta' bez promjene korisne pogonske sile. Sila mišića nije ovisna samo o tlaku, već i o količini zraka koja je puštena u mišić. Zbog toga je matematički model pneumatskog mišića izrazito nelinearan što ga čini zahtjevnijim za precizno reguliranje u

usporedbi s klasičnim cilindrima. Kompresibilnost zraka također je prednost jer dopušta 'popustljivost' mišića. Kao i kod ostalih pneumatskih aktuatora za upravljanje obično su potrebni elektromagnetski ventili i spremnik stlačenog zraka. Još neke od prednosti pneumatskih mišića su lako održavanje, dugi vijek trajanja jer nemaju pokretnih dijelova, neosjetljivost na vlagu, nečistoće i vibracije [18].

Postoji više izvedbi umjetnih pneumatskih mišića, ali sve rade na sličan način. Drugačije su uglavnom po materijalu, promjeru, obliku, iznosu kontrakcije (u %) i radnom taktu. Najčešće se koriste u paru da se postigne što bolja imitacija bioloških mišića, no u ovom radu će djelovati samo u jednom smjeru (pozitivnom) dok će se otpuštati u negativnom smjeru pod opterećenjem spuštanja ruke. Poznatiji tip umjetnog mišića je McKibbenov pneumatski mišić, prikazan na slici 67. na temelju kojeg su konstruirani mišići za ovaj rad.



Slika 67. McKibbenov pneumatski mišić



Slika 68. Antagonistički par pneumatskih mišića

Komponente pneumatskog sustava

Kompresor

Kompresor je izvor napajanja robota zrakom, stlačeni zrak se iz kompresora dovodi u spremnik i provodi dalje do pripremljene grupe. U ovom slučaju koristi se mali kompresor zraka (pumpa) koja zbog dimenzija može biti nošena na korisniku i nije joj potrebna pripremljena grupa ili spremnik zraka. Napaja se zasebno na 12V.



Slika 69. Mini kompresor

Ventil (razvodnik): Festo MHE2-MS1H-3/2G-QS-4-K

Upravljački dijelovi (ventili) upravljaju tokovima energije i informacija (signala). Upravljanje može biti u potpunosti pneumatsko, a najčešće se izvodi u kombinaciji s drugim medijem i elementima (električno). Pneumatski ventili su upravljački elementi koji služe za regulaciju i usmjeravanje radnog medija (stlačeni zrak).

Razvodnici su ventili koji otvaraju, zatvaraju i usmjeravaju fluid („razvode“ ga). Razvodnici (engl. directional control valve, njem. Wegeventil) se prvenstveno označavaju brojem priključaka i brojem razvodnih položaja. Na primjer, 3/2 razvodnik ima 3 priključka i 2 razvodna položaja. U

simbolu razvodnika jedan razvodni položaj označen je jednim kvadratom u kojem su strjelicama nacrtani mogući smjerovi gibanja fluida prema priključcima.

Za ovaj sustav odabran je elektromagnetski on/off ventil koji će se regulirati pomoću PWM-a da se dobije efekt proporcionalnog ventila, jer bi se inače ostvario nagli pomak iz početne pozicije u krajnju što nije poželjno.



Slika 70. Ventil MHE2-MS1H-3/2G-QS-4-K

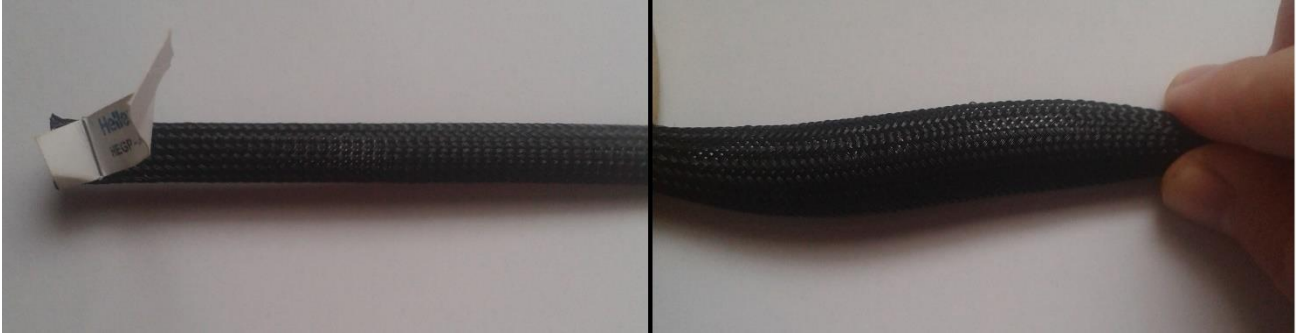
Izrada pneumatskog mišića

Za izradu je korištena rastezljiva lateks cjevčica sa slike 71, „Flexo“ pletivo koje se inače koristi kao zaštita za kablove i koji oblikom osigurava kontrakciju mišića sa slike 72, te pneumatske cjevčice i obujmice za pričvršćivanje krajeva kako bi se ostvarila prisnost i zatvorio izlaz.



Slika 71. Lateks cjevčica

Lateks cjevčica duljine 15.5 mm nategnuta je na rubove pletiva duljine 17 mm, kroz jedan kraj je provučena pneumatska cjevčica 2.5 mm u lateks cjevčicu i kraj je zategnut obujmicom.



Slika 72. Flexo pletivo u opuštenom i skupljenom stanju

Drugi kraj je preklopljen preko prstena s kojim će se mišić montirati na ruku i time se istovremeno zatvorio. To se vidi na slici 74.



Slika 73. Ulazni kraj mišića



Slika 74. Zatvoreni kraj mišića

5.3. Upravljački sustav ruke

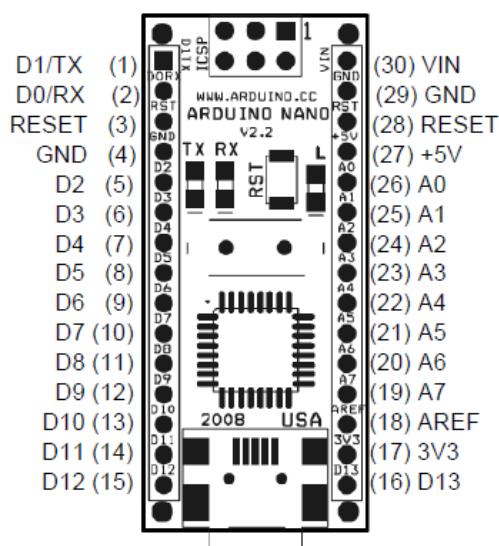
Osim baterije koja se koristi i za energetski sustav (kompresori), potrebna je i upravljačka jedinica. Mikrokontroler radi na 5 V, a odabrani ventil na 24 V, zato se ventil ne može direktno upravljati preko upravljačke jedinice pa nam je potreban dodatan sklop. Arduino je mala platforma za razvijanje mikroprocesorskih sustava bazirana na Atmega328P mikroprocesoru. Odabran je Arduino Nano jer je malih dimenzije i više nego dovoljnih mogućnosti za potrebe ovog projekta.

Tablica 3. Specifikacije razvojne platforme Arduino Nano

Mikrokontroler:	Atmega 328P
Radni napon:	5 V
Ulazni napon (preporučeno):	7 V
Ulazni napon (granice):	6-20 V
Digitalni I/O pinovi:	14 (od kojih 6 podržava PWM izlaz)
Analogni pinovi:	8
DC struja po I/O pinu:	40mA
Flash memorija:	32KB
SRAM:	2KB

EEPROM:	1 KB
Brzina procesora:	16 MHz
Dimenzije :	1.8542 x 4.318 cm
Duljina:	43cm
Širina	1.8cm
Masa:	5 g

Na slici 75. je prikazan opis pinova na platformi Arduino Nano.



Slika 75. Oznake pinova mikrokontrolera Arduino Nano

U tablici 4. su prikazane dodijeljene funkcije pinovima Arduinoa.

Tablica 4. Tablica pinova za Arduino Nano

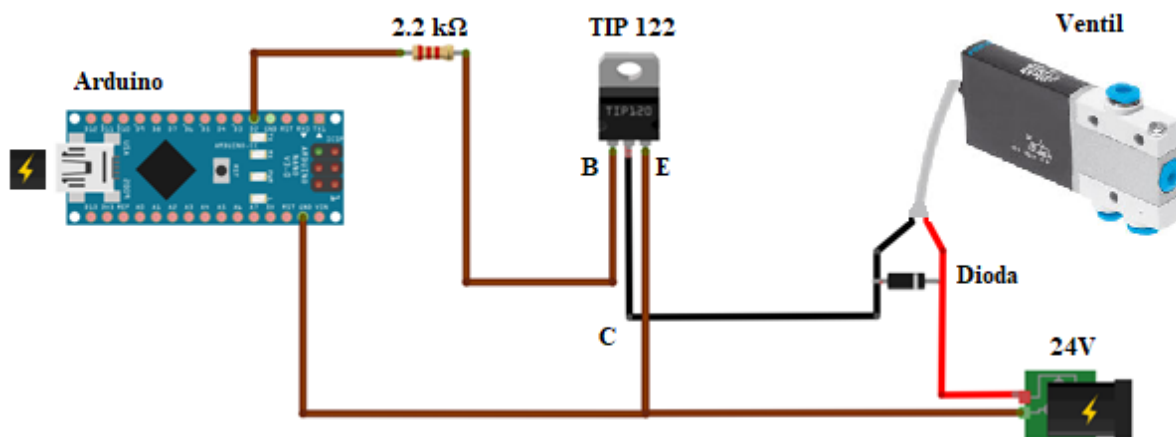
Broj pina	Ime	Tip	Opis
1-2, 5-16	D0-D13	I/O	Digitalni ulaz/izlaz port 0 do 13
3, 28	RESET	Input	Reset
4, 29	GND	PWR	Uzemljenje
17	3V3	Izlaz	+3.V izlaz
18	AREF	Ulaz	ADC referenca
19-26	A7-A0	Ulaz	Analogni ulaz od 0 do 7
27	+5V	Izlaz ili ulaz	+5V izlaz(sa regulatora pločice) ili +5V ulaz (sa vanjskog izvora)
30	VIN	PWR	Napon

Sklop za upravljanje ventilom

Upravljanje ventila Arduinoom je u principu postavljanje pina u stanje HIGH/LOW (ON/OFF) u određenim vremenskim razmacima tj. određenom frekvencijom (PWM). Pojavila se poteškoća što ventil i Arduino rade na različitim naponima (24/5), pa je zbog toga napravljen sklop koji koristi NPN tranzistor kao međusučelje između mikrokontrolera i ventila.

Mali iznos napona sa Arduina dovedena na bazu tranzistora (TIP 122), zatvara krug između kolektora i emitera a time zatvara strujni krug ventila na 24 V (svojevrсна sklopka), te se posredno upravlja ventilom.

Za sklop nam je još potreban otpornik ($2.2\text{ k}\Omega$) za limitiranje struje na ulaz u bazu tranzistora i jedna dioda paralelno spojena na pinove ventila. Svaki put kad se koristi element sa zavojnicom (u ovom slučaju elektromagnetski ventil) dioda je potrebna, jer kada se sklop isključi, inducirani napon u zavojnici bi mogao uništiti tranzistor. Zbog toga se stavlja dioda da blokira tok struje u tom smjeru, tako da ju je potrebno okrenuti naopako. Sklop je napravljen na eksperimentalnoj pločici.



Slika 76. Shema sklopa za upravljanje

Kao ulaz sustav koriste se EMG senzori (senzori za mjerenje mišićne aktivnosti preko električnog potencijala), pojavom manjih mikrokontrolera i integriranih krugova, EMG senzori su sve više koriste u robotici. U ovom slučaju se koristi MyoWare mišićni senzor.



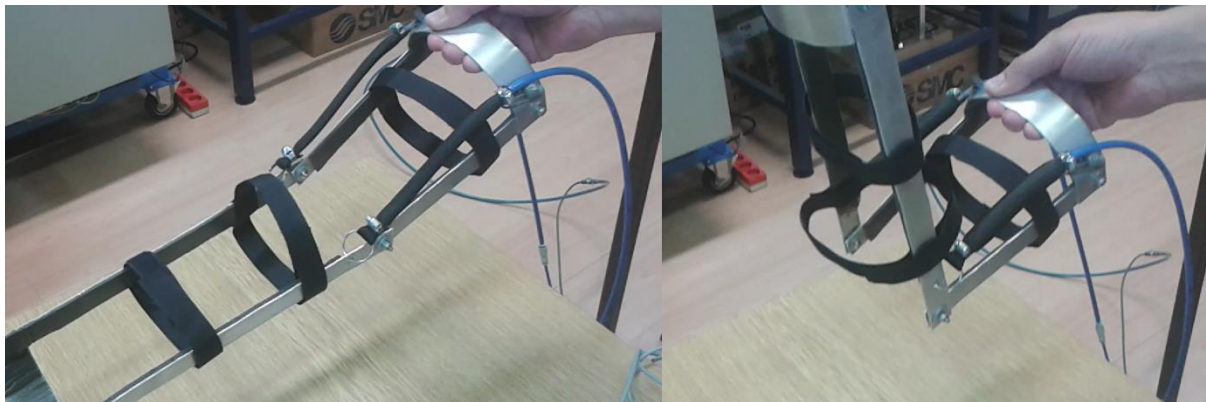
Slika 77. MyoWare EMG senzor

Električni potencijal mišića očitava se pomoću tri elektrode, od koje se dvije stavljaju uzduž tijela mišića, a treća je referentna i stavlja se na mjesto sa malo ili bez mišićne aktivnosti, po mogućnosti blizu kosti (GND).

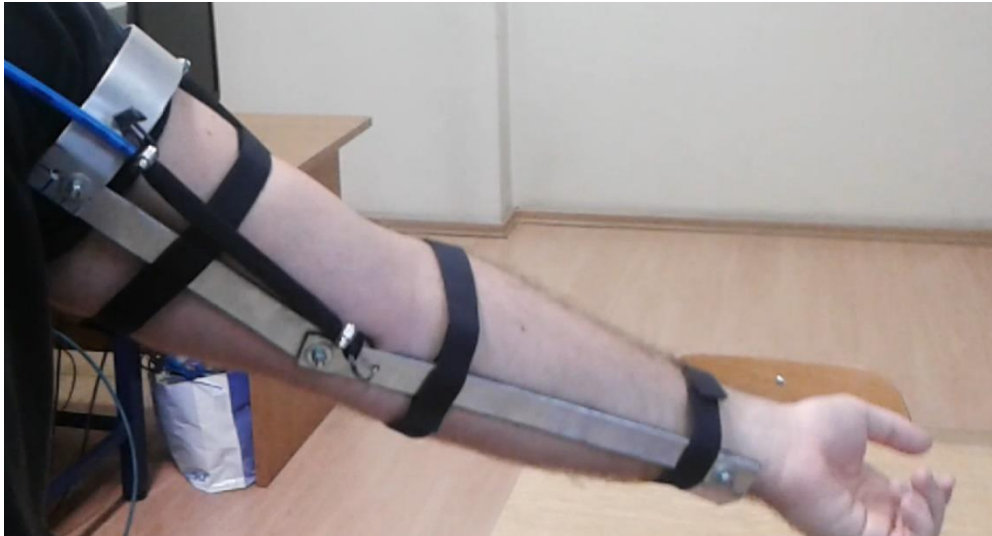
Senzor ima tri izlaza, to su nula (GND), napajanje (5V) i analogni signal koji se spaja na mikrokontroler, kod programiranja vrijednosti signala EMG senzora se gledaju u dvije granice, postavljaju se dvije vrijednosti kao granične za aktivaciju ili deaktivaciju ventila.

U ovom slučaju dvije elektrode se postavje na biceps a treća na lakat i korisnik aktivacijom svojih mišića aktivira ventil koji mu pomaže u pokretu.

Na slici 77. se vidi početna i krajnja pozicija ortoze, odnosno stegnutih ili opuštenih pneumatskih mišića.



Slika 78. Simulacija rada



Slika 79. Ortoza na ruci

Prilikom izrade konstrukcije i cijelog sustava egzoskeletona ruke posebno se pazilo na jednostavnosti izrade i cijenu. Osim ventila i mikrokontrolera, svi dijelovi su napravljeni uz minimalne troškove. Za testiranja rada sustava i simulacije, korištena je opreme na fakultetu. Zbog dostupnosti i cijene odabrani su Arduino Nano i elektromagnetski ventil. Proporcionalni ventil bio bi mnogo bolji, ali također i mnogo skuplji izbor, zbog jednostavnijeg upravljanja.

Za poboljšanje sustava trebali bi se ugraditi senzori položaja čime bi ostvarili povratnu vezu i dobili mogućnost regulacije a ne samo upravljanje sustavom. Također bi bilo dobro ugraditi EMG elektrode spojene na mišiće ruke koji bi omogućili kontrolu sustava vlastitim mišićima.

6. ZAKLJUČAK

Trenutno u svijetu postoji trend naglog razvoja robotike i bionike, kako u industriji, tako i u brojnim sveučilištima i istraživačkim institutima. Da bi se približili tom trendu, potrebno je da i sami razvijamo slične sustave, po mogućnosti koristeći drugačija, inovativna rješenja. Međutim, razvoj takvih sustava nije jeftin i nedovoljno ulaganje u znanstveno-istraživačke radove i eksperimentalne postave u Hrvatskoj je problem za sve one koji se žele baviti napretkom u svom području interesa, ali i za opći napredak države u smislu industrijalizacije. Ono što se može zaključiti iz ovdje opisanih razvijenih bioničkih sustava je da se tek fizičkom izradom sustava mogu uvidjeti neke greške i brojna poboljšanja koja su se eventualno mogla napraviti. Logičan sljedeći korak bi bio uzeti u obzir sva ta poboljšanja, napraviti potrebne prilagodbe i krenuti s razvojem sljedeće verzije ovih radova, sa čime se već krenulo.

Zahvala

Zahvaljujemo se prof. dr. sc. Željku Šitumu na potpori tijekom izrade ovih sustava, korisnim savjetima te financiranju i pomoći kod nabave dijelova bez kojih praktična realizacija ovih bioničkih sustava ne bi bila moguća.

Literatura

- [1] <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=7790> , 25.01. 2018.
- [2] <https://learn.adafruit.com/adafruit-16-channel-pwm-servo-hat-for-raspberry-pi/overview>
- [3] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, H. Schunk: Robot grippers, Wiley-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004
- [4] T. Šurina, M. Crneković: Industrijski roboti, Školska knjiga Zagreb, 1990
- [5] Z. Kovačić, S. Bogdan, V. Krajči: Osnove robotike, Graphis Zagreb, 2002
- [6] F. Matejiček: Kinetika sa zbirkom zadataka, 3. popravljeno izdanje, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2014
- [7] K. Wang, T. K. Lien: The structure design and kinematics of a robot manipulator, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 5, No. 2/3, pp. 153-158, 1989
- [8] P. E. Sandrin: Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated, McGraw-Hill, 2003
- [9] <https://www.raspberrypi.org/> , 20.02.2018.
- [10] Brian, James: Automatic Chessboard ESE 350: Final Project, Spring 2011
- [11] <http://blog.komar.be/how-to-make-a-keyboard-the-matrix/>, 20.02.2018.
- [12] Nikolić, G.: Pneumatika i hidraulika, I. dio: Pneumatika, Školske novine, Zagreb, 1994.
- [13] Festo proizvodi, https://www.festo.com/cat/hr_hr/products,03.09.2017.
- [14] <https://www.arduino.cc/>
- [15] Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G., Manesis, S.: A survey on applications of Pneumatic Artificial Muscles, 19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis Corfu Holiday Palace, Corfu, Greece, June 20-23, 2011
- [16] Powered exoskeleton, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Powered_exoskeleton,03.09.2017.
- [17] Pneumatic artificial muscle, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatic_artificial_muscles,28.01.2017.

Sažetak

Robotski bionički sustavi su dinamičke konstrukcije gdje je puno parametara međusobno zavisno što dodatno komplicira projektiranje zbog potrebe za iterativnim pristupom. Zbog kombinacije klasičnog strojarstva s elektrotehnikom, optimalnom regulacijom i programiranjem, izrada ovakvih sustava zahtijeva široki opseg znanja stečenog na fakultetu, te puno samostalnog rada, proučavanja i testiranja. Bionički sustavi s pneumatskim i električnim pogonom koji su opisani u ovom radu su sljedeći:

Robot za igranje šaha kojeg je izradio Leon Malnar obuhvaća projektiranje, izradu i upravljanje troosne robotske ruke s hvataljkom za šahovske figure koja je u stanju igrati šah protiv čovjeka, s mogućnošću da samostalno fizički pomiče figure. Raspoznavanje figura je ostvareno tako da je u dno svake figure umetnut magnet, a ispod svakog polja se nalazi reed prekidač koji se upali kad je u prisustvu magnetskog polja. Svi dijelovi su spojeni na upravljačku jedinicu Raspberry Pi, za predviđanje poteza je korišten bazični softver Stockfish, a program za upravljanje je pisan u Pythonu.

Dvonožni hodajući robot kojeg su izradili Andrija Gložinić i Ivan Fanjek autonomni dvonožni robot koji se temeljen na jednostavnosti i postizanju mehaničke stabilnosti. Posebna je pažnja posvećena pozicioniranju centra mase sklopa, što uz stopala s velikom površinom dodira s podlogom bitno utječe na stabilnost u nultom položaju. Konstrukcija je sastavljena od aluminijskih profila, a pogonjen je pomoću četiri pneumatska mišića koji su odabrani zbog svojstva elastičnosti što ih čine pogodnima za prigušenje udara koji nastaju tijekom hoda. Upravljanje se odvija na temelju pomoću mikrokontrolera na temelju podataka koje daju senzori.

Bionička šaka je antropomorfní sustav kojeg su izradili Davor Širinić i Luka Mišković. Postoje dvije verzije bioničke šake, od kojih je prva pogonjena s pneumatskim mišićima, a druga sa servo elektromotorima. Bionička šaka je u stanju oponašati ljudske pokrete te bi se kao takva mogla primijeniti u industriji za upravljanje strojevima na daljinu ili primjerice u medicini kao bionička proteza, ali naravno postoje i mnoge druge primjene. Informacija o stanju mišića se dobiva iz elektromiografskog senzora koji se spaja direktno na površinu kože.

Egzoskeletonska ruka je mobilni stroj kojeg je izradio Tomislav Kosor, a integriran je sa ljudskim pokretima u svrhu rehabilitacije ili ojačanja određenih radnji. Cijeli sustav je konstruiran u programskom alatu Catia, a potom je mehanički i energetski dio sustava sklopljen u cjelinu koju povezuje upravljački sustav preko mikrokontrolera. Konstrukcija je napravljena od aluminija, a pogonjena je pneumatskim mišićima.

Ključne riječi: robotski šah, dvonožni hodajući robot, bionička šaka, egzoskeletonska ruka

Summary

Robotic bionic systems are dynamic constructions where a lot of parameters are mutually codependent which makes the design more complex and requires iterative approach. Combining mechanical engineering with electronics, optimal control and programming makes creates a requirement for a broad knowledge acquired in college, as well as a lot of independent work, studying and testing. Bionic systems with pneumatic and electrical drive that are described in this paper are following:

Chess playing robot arm created by Leon Malnar includes design, production and control of a 3-axis chess playing robot arm with a gripper for chess figures that's capable of playing chess against the opponent, with the ability to physically move figures on the chessboard. Figure recognition is solved by using magnets under every figure and reed switches under every field that closes contacts in a magnetic field. The whole system is controlled by Raspberry Pi, and is programmed in Python using Stockfish as a chess engine.

Two-legged walking robot created by Andrija Gložinić and Ivan Fanjek is an autonomous robot based on simplicity and achieving mechanical stability. Special attention is paid on positioning the center of mass, which, along with a large foot surface significantly affects the stability near it's zero position. The system is made of aluminum profiles, and driven by four pneumatic muscles chosen because of their elastic properties suitable for dampening shocks made while walking. The whole system is controlled by a microcontroller based on the sensor data.

Bionic hand is an anthropomorphic system created by Davor Širinić and Luka Mišković. There are two available versions of bionic hand, first of which is driven by pneumatic muscles, and the other one driven by servo electromotors. Bionic hand is capable of mimicking human movements, and as such, it's usable in production industry as remotely controlled arm, in medicine as bionic prosthesis, and other applications. Information about muscle state is received from an electromyographic sensor which is connected directly on the skin surface.

Exoskeleton arm is a mobile machine created by Tomislav Kosor that has integrated human movements in purpose of rehabilitation and reinforcement of certain actions. The whole system is designed in a leading CAD software Catia, and the mechanical and driving parts are assembled in a whole connected by a control system using microcontroller. All mechanical parts are made of aluminum, and they're driven by mechanical muscles.

Keywords: robotic chess, two-legged walking robot, bionic hand, exoskeleton arm

Životopis

Leon Malnar rođen je 27.01.1996. u Postojni. Tijekom pohađanja srednje škole Vladimir Nazor u Čabru je sudjelovao u brojnim natjecanjima iz informatike, matematike i fizike za što je primio priznanje najboljeg učenika grada. Nakon završene srednje škole 2014. godine upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, te na drugoj godini bira smjer Mehatronika i robotika. Nakon završetka preddiplomskog dijela studija, prima diplomu sveučilišnog prvostupnika i upisuje se na diplomski studij na kojem je trenutno. Od 2016. godine je član FSB Racing Teama u sklopu hrvatske studentske asocijacije strojarskih fakulteta i trenutno sudjeluje na razvoju električne formule.

Tomislav Kosor rođen je 29. 09. 1992. u Zagrebu, nakon završetka Osnovne škole Nikola Hribar u Velikoj Gorici, upisuje Zrakoplovnu tehničku školu Rudolf Perešin gdje je sudjelovao na nekoliko županijskih natjecanja iz matematike, fizike i informatike i stječe zvanje zrakoplovni tehničar IRE. Nakon zrakoplovne srednje škole, upisuje preddiplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te bira smjer Mehatronika i robotika. Trenutno je na zadnjoj godini diplomskog studija istog smjera i radi na nekoliko projekata izvan nastave.

Davor Širinić rođen je 30.1.1996. u Splitu. U Sinju pohađa osnovnu školu Marka Marulića, te nakon toga opću gimnaziju Dinka Šimunovića. Sudjeluje na natjecanjima iz matematike, fizike i biologije gdje se zainteresirao za prirodoslovna i tehnička područja. 2014. upisuje strojarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, te 2015. smjer Mehatronika i robotika. Za završni rad projektira i izrađuje animatroničku šaku pogonjenu pneumatskim mišićima i uspješno ga obranjuje 2018. , dobivajući prvostupničku diplomu. Kroz osnovnu i srednju školu je bio član Vaterpolo kluba Sinj, a sad se u slobodno vrijeme bavi glazbom i planinarenjem.

Luka Mišković rođen je 22.12.1995. u Zagrebu, a odrastao je u Velikoj Gorici. Nakon završetka osnovne škole Eugena Kvaternika, upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića gdje tijekom školovanja sudjeluje u razvijanju mehatroničkih sustava kao što su alarmi, semafori i pneumatski

sustavi. Stećeno iskustvo dodatno ga motivira za upis Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2014. godine. Na drugoj godini odabire smjer Mehatronika i robotika. U sklopu završnog rada izrađuje četveronožnog robota pogonjenog električnim aktuatorima. Zajedno sa svojim mentorom sudjeluje u pisanju znanstvenog rada za međunarodnu DAAAM konferenciju. Nakon redovno završenog preddiplomskog studija, u ožujku 2018. godine, prima diplomu sveučilišnog prvostupnika te upisuje diplomski studij Mehatronike i robotike. Brojni projekti zainteresirali su Njemačku firmu German Bionic Systems te se trenutno priprema na šestomjesečnu praksu u istoj firmi. Član je udruge mehatroničara te volontira na fakultetu kao mentor za studente na razmjeni. Slobodno vrijeme koristi za putovanja, čitanje i sport.

Andrija Gložinić rođen je 17.02.1993. u Varaždinu. Osnovnoškolsko obrazovanje stječe u Osnovnoj školi Ludbreg. Nakon završetka osnovne škole upisuje se u Elektrostrojarsku školu Varaždin, smjer elektrotehničar. Tijekom srednje škole sudjeluje u natjecanjima iz elektrotehnike, a na stručnoj praksi prvi puta se upoznaje sa strojarskim poslovima. Završava srednju školu 2011. godine i redovito se upisuje na Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, smjer strojarstvo. Na drugoj godini upisuje smjer mehatronika i robotika koji završava u ožujku 2017. godine i prima diplomu sveučilišnog prvostupnika. Iste godine upisuje diplomski studij Mehatronike i robotike. U slobodno vrijeme amaterski se bavi glazbom.

Ivan Fanjek rođen je 11.07.1993. u Zagrebu. Pohađao je Osnovnu školu Dragutina Domjanića, gdje po njenom završetku upisuje zagrebačku X. gimnaziju tijekom koje ide na razna natjecanja iz matematike i fizike, gdje stječe zainteresiranost za tehnički fakultet. Srednju školu završava 2012. godine. Iste godine upisuje fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, te na drugoj godini izabire smjer mehatronika i robotika.