



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Југославија
Деканат: 021 350-413; 021 450-810; Централа: 021 350-122
Рачуноводство: 021 58-220; Студентска служба: 021 350-763
Телефакс: 021 58-133; e-mail: ftndean@uns.ns.ac.yu



Сертификован
систем
квалитета



PROJEKAT IZ PRIMENE SENZORA I AKTUATORA

NAZIV PROJEKTA:

Robotski Manipulator

TEKST ZADATKA:

MENTOR PROJEKTA:

Nađ dr Laslo

Ljiljana dr Živanov

PROJEKAT IZRADILI:

Branislav Vajagić MH5/2013

Boris Stanković MH48/2013

DATUM ODBRANE PROJEKTA:

Sadržaj

PROJEKAT IZ PRIMENE SENZORA I AKTUATORA	1
1. Uvod.....	3
2. Analiza problema	4
3. Proračuni i simulacioni rezultati	5
3.1. Inverzna kinematika	5
3.2. Proračun momenata	7
3.3. Elektronika.....	8
4. Opis realizovanog predmeta projekta	9
4.1. Detaljan opis svih elemenata uređaja	9
4.2. Slika uređaja u krajnjem stadijumu izrade	14
5. Rezultati testiranja	14
6. Zaključak.....	15
7. Literatura.....	16
Dodatak A – Elektronika.....	17
Dodatak B – Inverzni kinematski problem – Dokaz	18

1. Uvod

U industriji postoji jako puno procesa koji su repetativni i koji zahtevaju da jedna te ista radnja bude izvršavana jako veliki broj puta. Pomenute procese, u velikom broju slučajeva, obavlja čovek sa vrlo malom efikasnošću i velikim nezadovoljstvom datim radnim mestom. Napretkom mikroprocesorske tehnike, pojeftinjenjem izrade različitih vrsta aktuatora i senzora, omogućeno je da se na vrlo pristupačan i jednostavan način automatizuju ovakvi procesi. Ovo je moguće uraditi robotskim manipulatorima koji su projektovani sa idejom da izvršavaju više različitih zadataka bez potrebe da se ceo proces formira oko njih. Baš zbog toga, izrada ovakvog sistema nije nimalo jednostavna. Potrebno je dobro poznavati ograničenja i sposobnosti manipulatora kako bi na dovoljno efikasan način moglo da se upravlja procesom.

Robotski manipulatori danas postoje i glavni proizvođači ovih sistema su ABB (slika 1) i KUKA (slika 2). Iako su ti roboti revolucionarni, svi imaju jednu zajedničku manu, a to je visoka cena, nepristupačnost i potreba za inženjerom koji sistem postavlja u rad. Poprilično su komplikovani za rukovanje i neintuitivni osobama koje nemaju akademsko znanje iz ove oblasti. Nabrojane stvari su mane iz razloga što postoji vrlo velik broj malih preduzentika i preduzeća kojima bi robotski manipulator omogućio lakše i kvalitetnije poslovanje, ali robotski manipulatori koji danas postoje na tržištu, svojom cenom su daleko van njihovog domašaja.

Ovaj projekat ima za zadatak da istraži ovaj proces i usavrši ga, pritom trudeći se da ovu tehnologiju učini pristupačnijom. Projekat se bavi obradom osnovne antropomorfne konfiguracije robotskog manipulatora. Ovo podrazumeva da se manipulator sastoji od 3 rotaciona zglobova i 3 segmenta proizvoljne dužine koji povezuju zglobove. U njemu se obrađuje pozicioniranje vrha robota u proizvoljnu tačku radnog prostora sa odgovarajućom tačnošću i ponovljivošću.

Ideja za sam projekat je nastala kao želja da se do sada stečeno znanje iz oblasti mehanike, elektronike, programiranja, materijala, automatizacije, procesa upravljanja i optimizacije primeni u praktičnom smislu.



Slika 1

ABB Robotski Manipulator antropomorfne konfiguracije sa 6 zglobova. [10]



Slika 2

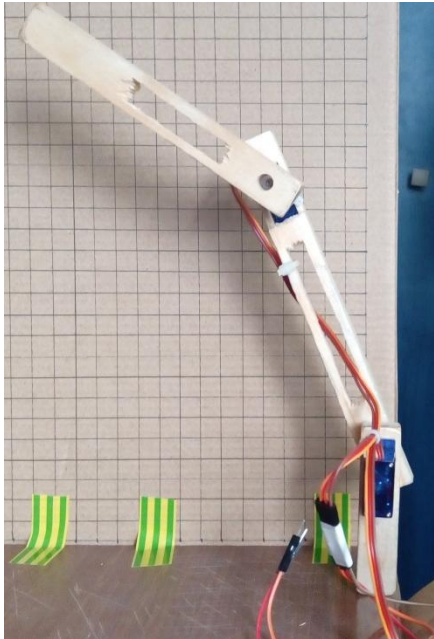
KUKA Robotski Manipulator antropomorfne konfiguracije sa 6 zglobova. [9]

Kratak opis o obrađenim poglavljima, koji se nalaze u nastavku:

2. Problemi koji se obrađuju i rešavaju u ovom projektu kao i faze razvoja prototipa.
3. Razvijanje matematičkih modela koji omogućavaju realizaciju pozicioniranja i dimenzionisanje manipulatora, kako prototipa tako i manipulatora više cene.
4. Detaljan opis prototipa u krajnjoj fazi projekta, njegove mane, prednosti i kako da je moguće usavršiti.
5. Rezultati koji su postignuti za vreme realizacije projekta.
6. Zaključci koji su doneti nakon obrade problema kojim se bavi ovaj projekat. Koje su njegove prednosti, da li ima svoje mesto na tržištu, zašto je loš, a zašto dobar i na koji način može da unapredi industriju.

2. Analiza problema

Ovaj projekat će se baviti analizom i obradom pozicioniranja robotskog manipulatora antropomorfne konfiguracije u prostoru. Kako ovaj sistem ima tri stepena slobode, potrebno je da se na njemu nalaze tri aktuatora koji omogućuju kretanje i tri senzora koja mogu da beleže ugaoni pomeraj za svaki stepen slobode pojedinačno. Već se sada može primetiti da analiza ovakvog sistema nije nimalo naivna. Ova analiza se sastoji iz više problema koji će biti obrađeni u ovom projektu. Prvi problem jeste razvijanje matematičkog modela koji može da rešava inverzan kinematski problem u realnom vremenu (poglavljje 3.1). Sledeći problem predstavljaju opterećenja



Slika 3- Prototip, pozicioniranje u ravni.

koja se javljaju u ovom sistemu kao što su teret koji ruka treba da podigne i nosi sa sobom, težina konstrukcije, veličina sistema itd. (poglavljje 3.2). Još jedan od problema jeste hardware-ska realizacija sistema i razni metodi upravljanja. Sam način kako bi trebalo da se realizuje robotski manipulator i kako je realizovan prototip biće detaljnije opisano u nastavku projekta.

Kao što je rečeno, cilj datog projekta je da se analizira i konstruiše robotski manipulator antropomorfne konfiguracije koji može da se pozicionira u prostoru. Prvi korak u fazi realizacije prototipa je bio realizacija manipulatora koji je sposoban da se pozicionira u proizvoljnu tačku u ravni unutar domena (slika 3). Uspešna realizacija je ostvarena uz pomoć dva SERVO motora (svaki u jednom zglobu). Zbog jeftinih komponenti i neprecizno napravljenih segmentata, tačnost manipulatora je bila 20mm^2 , a ponovljivost 10mm^2 .

Nakon uspešne realizacije pozicioniranja manipulatora u ravni, sledeća faza je podrazumevala pozicioniranje u prostoru. Da bi se rešio ovaj problem bilo je neophodno uvođenje trećeg zgloba. Prvi korišćeni aktuator, bio je jednosmerni motor. Od njega se ubrzo odustalo jer se pokazalo da upravljanje jednosmernim motorm nije nimalo jednostavno. Tačnije bilo je neophodno napraviti dovoljno kvalitetan H-most, pa je zbog toga odlučeno da se koristi koračni motor. Nakon toga, kao senzor za merenje ugaonog pomeraja zgloba, korišćen je jednostavan linearan potencijometar. Ovako postavljen sistem prošao je kroz više faza u

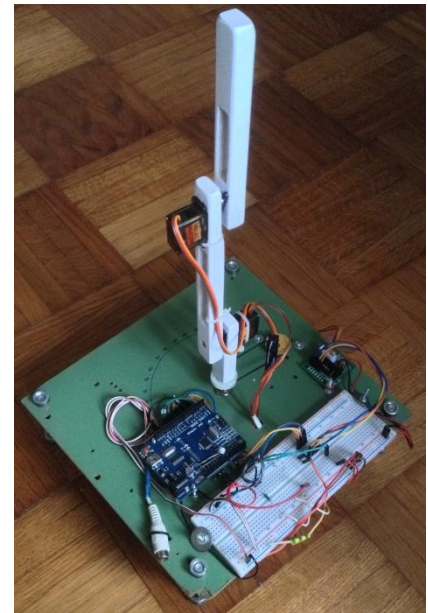
okviru kojih je usavršavan: način komunikacije između hardware-a i software-a, način interakcije sa krajnjim korisnikom, poboljšanje izrade segmenata kako bi se poboljšala tačnost, i razne druge stvari koje nisu od značaja za ovaj dokument. Ovim se došlo do krajnjeg oblika prototipa (slika 4) koji će detaljno biti obrađen u poglavlju 4.

3. Proračuni i simulacioni rezultati

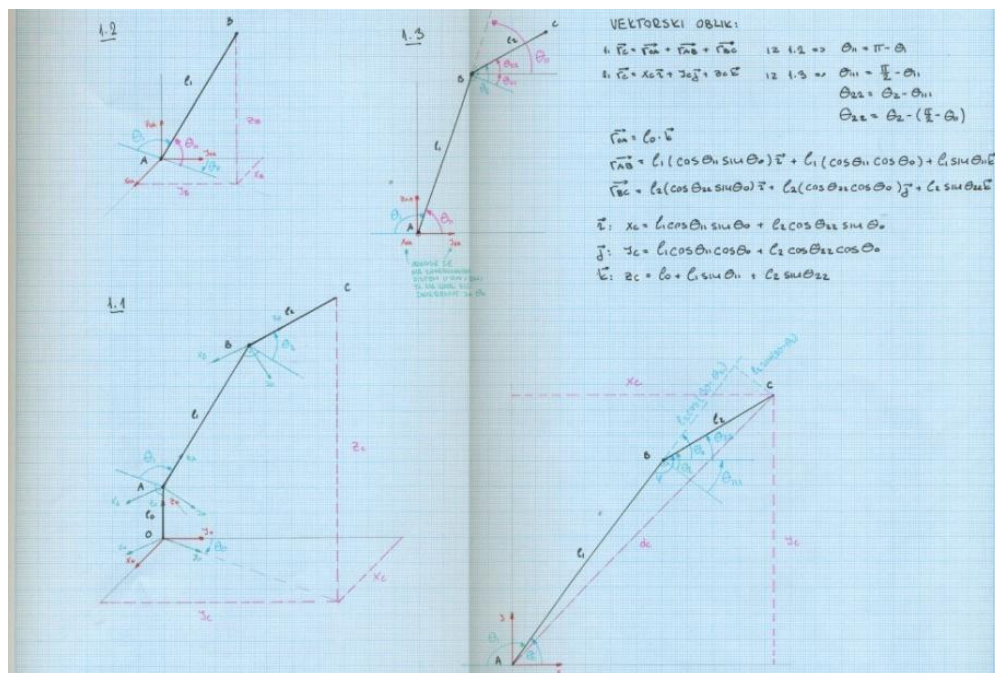
3.1. Inverzna kinematika

Kako je pozicioniranje manipulatora u prostoru stvar koja se obrađuje u ovom projektu, potrebno je razviti matematički model koji precizne rezultate može da obezbedi, a da pritom problem rešava u realnom vremenu. U industriji se za rešavanje problema direktne i inverzne kinematike koristi D-H (Denavit-Hartenberg) notacija i homogene matrice transformacija. U ovom radu se problem neće rešavati na ovaj način jer se za rešavanje matrica mora koristiti dovoljno jak mikroprocesor kako bi rezultati mogli da se dobijaju u realnom vremenu. Zbog toga će se u radu problem direktne i inverzne kinematike rešavati pomoću matematičke algebre i vektora. Na ovaj način razvije se matematički model koji je računaru lak za rešavanje pa se na taj način može postići rad u realnom vremenu robotskog manipulatora sa daleko slabijim hardware-om u odnosu na to kada bi se rešavalo problem pomoću D-H notacije i homogenih matrica transformacije.

Prvo se postavljaju uslovi i zakoni po kojima se menjaju uglovi u zglobovima i dužine segmenata, nakon čega se vektori mogu rastaviti na svoje komponente. U ovom projektu će biti pokazane samo jednačine i uslovi od značaja za dalji rad.



Slika 4 – Prototip, prvo rešenje za pozicioniranje u prostoru.



Slika 5-Postavljanje uslova za inverznu kinematiku za čije rešavanje su korišćeni [1], [2], [5] i [6]

Sa θ_0 je označena rotacija prvog zglova, sa θ_1 rotacija drugog, sa θ_2 rotacija trećeg, sa l_0 visina postolja, sa l_1 dužina prvog segmenta i sa l_2 dužina drugog segmenta. Gledano sa slike 5, pozitivan smer obrtanja motora Q1 odgovaraće promeni ugla θ_1 u negativnom matematičkom smeru; pozitivan smer obrtanja motora Q2 odgovaraće promeni ugla θ_2 u pozitivnom matematičkom smeru. Pomoću ovako postavljenog sistema i kompleksne algebre moguće je odraditi inverzni kinematski problem i napraviti matematički model koji za zadatu tačku $C(x_c, y_c, z_c)$ bilo gde unutar radnog prostora robota može da pronade vrednosti unutrašnjih uglova. Kompletan matematički model se svodi na 13 algebarskih jednačina od značaja:

$$dc_1 = \sqrt{xc^2 + yc^2}, \quad (1)$$

$$dc_2 = \sqrt{dc_1^2 + zc^2}, \quad (2)$$

$$\theta_0 = \text{atan}\left(\frac{xc}{yc}\right), \quad (3)$$

$$\text{za } \theta_0 < 0 \Rightarrow \theta_0 + \pi, \quad (4)$$

$$D = \frac{dc_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}, \quad (5)$$

$$D2 = \frac{l_1dc_2}{l_1(l_1 + l_2)}, \quad (6)$$

$$\alpha = 4\text{atan}\left(\frac{\sqrt{(1 - D2 * D2)}}{1 + D2}\right), \quad (7)$$

$$Q2 = 2\text{atan}(D1), \quad (8)$$

$$M1 = \frac{(l_2zc \cdot \cos(\theta_2) - dc_1(l_1 + l_2\sin(\theta_2)))}{(l_2\sin(\theta_2)(2l_1 + l_2\sin(\theta_2)\sin(Q2)) + l_1(l_1 + l_2\cos(\theta_2)\cos(\theta_2)))}, \quad (9)$$

$$\theta_1 = 2\text{atan}\left(\frac{\sqrt{1 - M1^2}}{1 + M1}\right), \quad (10)$$

$$\theta_{1_2} = \theta_1 + \alpha, \quad (11)$$

$$D3 = \frac{dc_1\sin(\theta_3) + l_2\cos(\theta_3)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_3)(l_1\sin(\theta_3) - zc)}{l_2}, \quad (12)$$

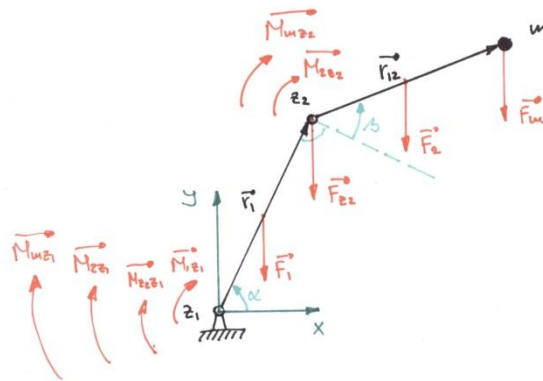
$$\theta_{2_2} = 2\text{atan}\left(\frac{\sqrt{1 - D3^2}}{1 + D3}\right). \quad (13)$$

Ovde je bitno zapaziti da postoje dve grupe rešenja za uglove θ_1 i θ_2 . Ovo se dešava zbog toga što u okviru *potpuno operativnog radnog prostora* robotskog manipulatora, za bilo koju tačku postoje dve konfiguracije manipulatora, a to su *lakat gore* i *lakat dole*. Prva grupa rešenja postavlja manipulator u konfiguraciju lakat gore, a druga u konfiguraciju lakat dole. Dokaz ovih jednačina nalazi se u Dodatku B za šta je korišćen Matlab [5].

3.2.Proračun momenata

Da bi manipulator mogao dovoljno dobro da se dimenzioniše, potrebno je znati kakva će opterećenja uticati na njega. Jedan deo opterećenja koja utiču na robota dešavaju se zbog njegove konstrukcije, a drugi deo dešava se zbog delovanje spoljašnje sredine sa kojom manipulator inteeaguje. Opterećenja koja su od značaja i koja će se obrađivati u ovom poglavlju predstavlja momente koji se stvaraju u zglobovima manipulatora u stacionarnom stanju (kinematski problem) dok će se dinamička opterećenja obraćivati nekom drugom prilikom. Ovo je bitno zbog kasnijeg odabira aktuatora i reduktora. Iako dinamička opterećenja (ubrzanje mase tereta i zaustavljanje iste) takoće utiču na odabir akruatora i ukupne momente, ona će ove biti zanemarena. Kako krajnji cilj projekta jeste da se obradi robotski manipulator sa tri stepena slobode koji ima segmente dužine 500mm i koji je sposoban da u svakom trenutku na svom kraju drži teret od maksimalno 5kg, dijagram sa slike 7 pokazuje koja će se maksimalna opterećenja javiti u zglobovima.

U ovom delu će se pronaći matematički model koji za proizvoljne konstantne parametre vraća momente u zglobovima. Sile i momenti koji se javljaju prikazani su na slici 6, a dobijene su:



Slika 6 – Momenti koji deluju na prvi i drugi zglobov manipulatora. Veća slika zrtiča se nalazi u priloženoj dokumentaciji

Prvi Zglob

$$M_{z1} = -F_m \left(l_1 \cos(\alpha) + l_2 \cos\left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \right) \mathbf{k}, \quad (14)$$

$$M_{z21} = -F_{z2} \cdot l_1 \cos(\alpha) \mathbf{k}, \quad (15)$$

$$M_{21} = -F_2 \left(l_1 \cos(\alpha) + \frac{l_2}{2} \cos\left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \right) \mathbf{k}, \quad (16)$$

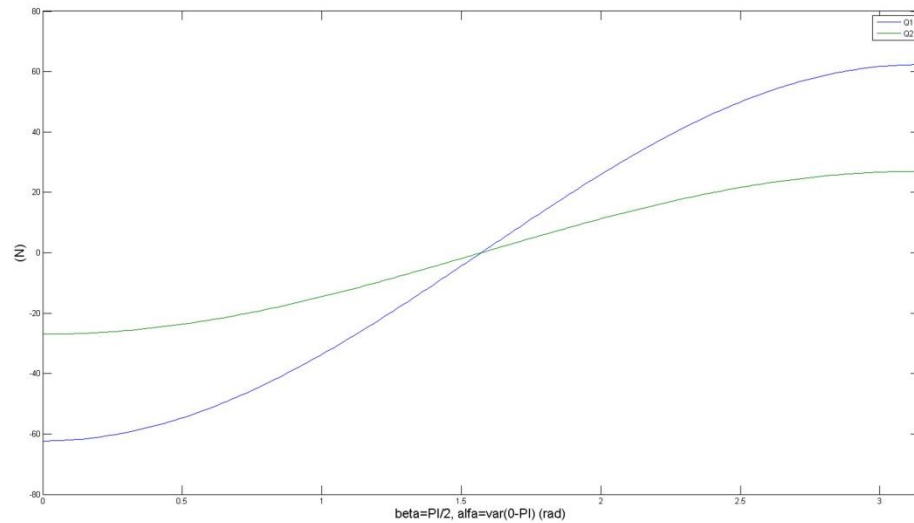
$$M_{1z1} = -F_1 \cdot \frac{l_1}{2} \cos(\alpha) \mathbf{k}, \quad (17)$$

Drugi Zglob

$$M_{z2} = -F_m \cdot l_2 \cos\left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \mathbf{k}, \quad (18)$$

$$M_{22} = -F_2 \cdot \frac{l_2}{2} \cos\left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \mathbf{k}. \quad (19)$$

Jednačine od (15) do (18) predstavljaju sve momente koji se javljaju u prvom zglobov, a jednačine (19) i (20) predstavljaju momente koji se javljaju u drugom zglobov. Ukupni moment za svaki zglobov se dobija sumiranjem svih momenata za taj zglobov. Ako se u ove jednačine ubace parametri manipulatora kao što su težine zglobova, težine segmenata i teret koji se nalazi na vrhu manipulatora, moguće je odraditi simulaciju i videti koje su ekstremne vrednosti

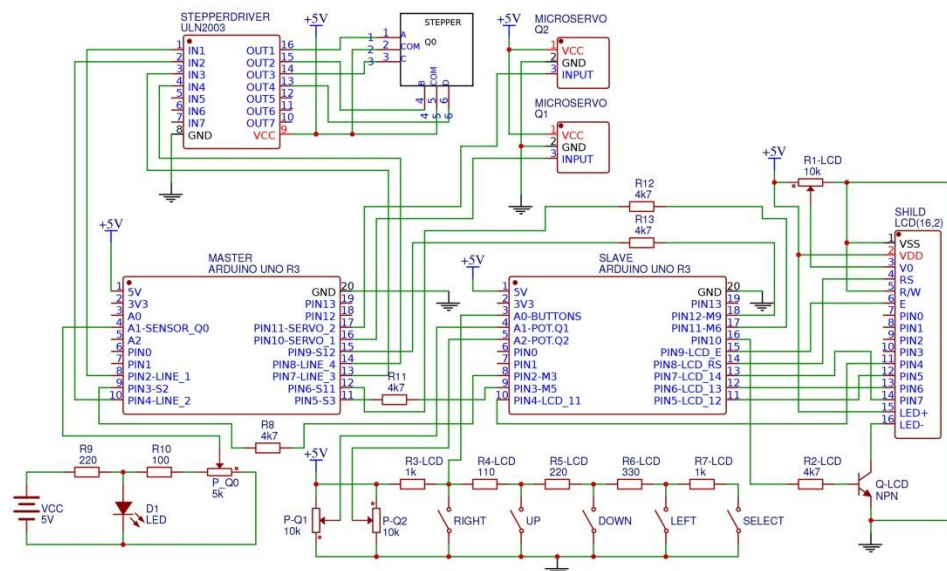


Slika 7- Dijagram momenata koji se javljaju u prvom i drugom zglobu manipulatora kada je ugao u zglobu jedan 90° , a kada se ugao u drugom zglobu menja od $0-180^\circ$. Veća slika dijagrama se nalazi u priloženoj dokumentaciji. [5]

Sa slike 7 se primećuje da je u prvom zglobu moment opterećenja daleko veći nego u drugom. Ovo se dešava zbog toga što prvi zglob podiže daleko veći teret od drugog. Na osnovu ovog možemo da znamo da je za ovako odabran i postavljen sistem ekstremna vrednost momenta $\sim 62\text{Nm}$ što znači da će biti potreban aktuator koji ovu silu može da savlada.

3.3.Elektronika

Ovaj deo je baziran na realizaciji prototipa i toga kako je elektronika rešena na njemu.



Slika 8 – Šema povezivanja elektronskih komponenti, senzora i aktuatora na konačnom prototipu. Veća slika šeme se nalazi u priloženoj dokumentaciji.

Primećuju se dva mikrokontrolera od kojih je jedan zadužen za upravljanje aktuatorima i očitavanje vrednosti senzora, a drugi se koristi za komunikaciju sa krajnjim korisnikom. Za napajanje sistema koristi se izvor jednosmerne struje napona od 5V. Pomoću promenljivog otpornika od 5k Ω meri se pozicija prvog zgloba, a njegova pozicija se menja pomoću koračnog motora (detaljnije u poglavlju 4.1). Dva servo motora Q1 i Q2 nalaze se u samim zglobovima dva i tri i pomoću njih se menja i meri ugao u tom zglobu. Sama šema je detaljno objašnjena u Dodatku A.

4. Opis realizovanog predmeta projekta

4.1. Detaljan opis svih elemenata uređaja

Manipulator koji se obrađuje sastoji se iz tri zgloba ali su samo dve zgloba od ključne važnosti (zglobovi koji nose teret). U ovom delu teksta biće obrađeni senzor i aktuator koji bi se koristili u tim zglobovima. Segmenti manipulatora su dužine $l1=500mm$ i $l2=500mm$ i smatra se da su izrađeni od materijala koji, za aplikaciju manipulatora, može da se smatra idealno krutim telom (ovo podrazumeva da pri bilo kakvom kretanju ili podizanju tereta ne može doći do defekta materijala, savijanja ili lomljenja). Segmenti imaju težinu $T1$ i $T2$. U samim zglobovima se nalaze senzor i aktuator koji omogućuju kretanje i merenje ugla. Kako su željene specifikacije manipulatora da bude sposoban da manipuliše sa teretom maksimalne težine od 5kg, a da pri tome može da se kreće maksimalnom ugaonom brzinom od 60°/s (odnosi se na prvi zglob) i da mu je pri tome rezilucija $\pm 0.05^\circ$, senzor i aktuator su odabrani na način pokazan u sledećim tačkama.

Aktuator za 1. zglob - Sa slike 7 zapaža se da je maksimalan moment koji se javlja na ovom zglobu $\sim 62Nm$. Kako bi se izbeglo korišćenje velikih teških motora, odlučeno je da se motor dimenzioniše zajedno sa reduktorom. Ovo znači da je potrebno koristiti jednosmeran motor malog gabarita i da se posle sa odgovarajućim reduktorom njegov obrtni moment poveća na odgovarajuću vrednost. Jednačine (21) i (22) predstavljaju vezu između obrtnog momenta na izlaznoj osovini i brzine obrtanja, sa momentom na vratilu motora i brzinom obrtanja vratila respektivno:

$$\tau_{out_{max}} = \tau_{mot_{max}} \cdot R_{ratio} \quad [Nm], \quad (20)$$

$$A_{out_{max}} = \frac{Ms_{max}}{60R_{ratio}} 360 \quad [^\circ/s], \quad (21)$$

gde je:

$\tau_{out_{max}}$ – maksimalan obrtni moment na izlaznoj osovini,

$\tau_{mot_{max}}$ – maksimalan obrtni moment odabranog motora,

$A_{out_{max}}$ – maksimalna ugaona brzina izlazne osovine,

Ms_{max} – maksimalan broj obrtaja motora,

R_{ratio} – prenosni odnos.

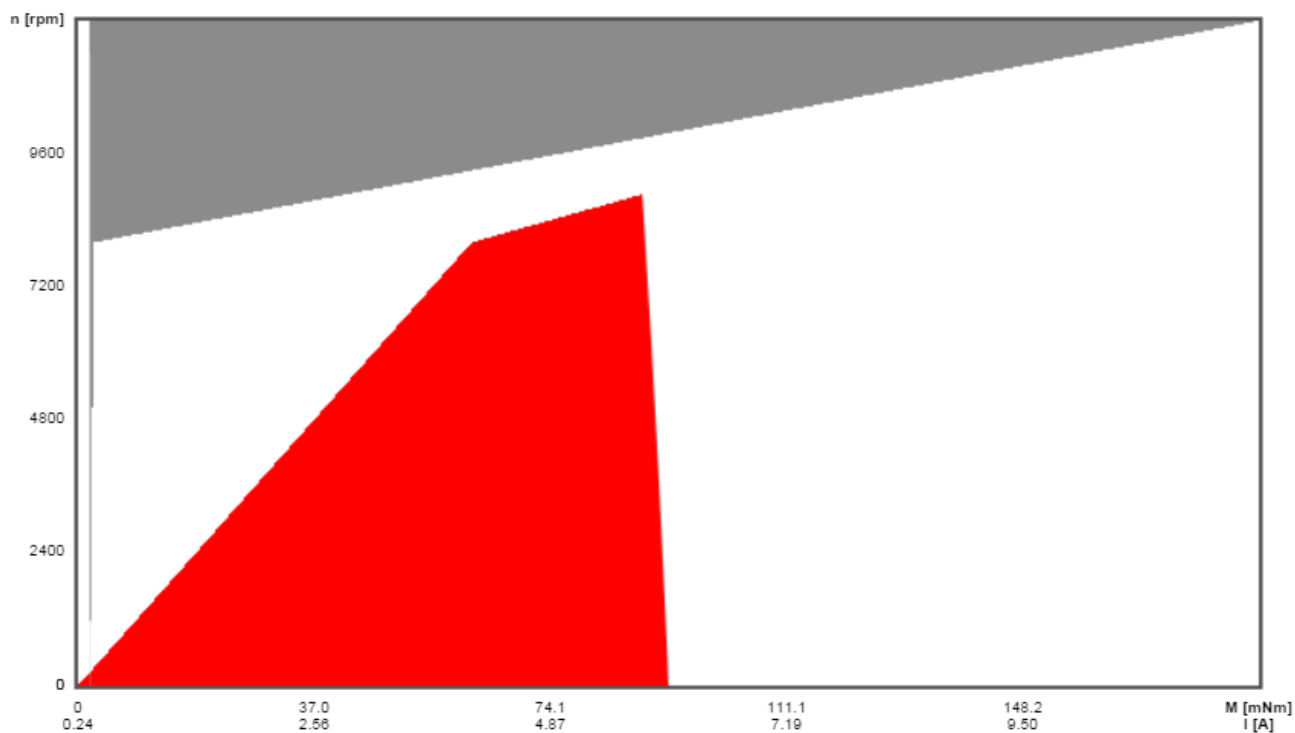
Prvobitna ideja je bila da se iskoristi motor čiji je obrtni moment 65mNm i da se iskoristi reduktor koji ima redukciju od 1000:1. Ova ideja je naišla na problem da je ostvaren odgovarajući obrtni moment, ali da je brzina obrtanja izlazne osovine bila previše spora, čime nije mogao biti ispunjen uslov zahtevane ugaone brzine. Ozbiljnim razmišljanjem i formiranjem jednačina (21)-(22), nađen je kompromis između momenta i brzine obrtanja. Odabrani aktuator je Maxon DC motor sa četkicama od 150W (broj dela 148866 [11]). Ovo je urađeno sa razlogom jer se

specifikacija ovog motora najbolje poklapala sa željenom, a to je 6500obr/min, obrtni moment između 85-100mNm, naponom od 12V i snagom ispod 100W. Iz njegove specifikacije koja je prikazana u Tabeli 1 može se primetiti da motor relativno dobro ispunjava sve uslove.

Tabela 1

Napajanje	12 V
Nominalan broj obrtaja	6380 o/min
Nominalna jačina struje	6 A
Obrtni moment	94.9 mNm
Maksimalni broj obrtaja	6920 o/min
Broj pari polova	1
Težina	480g
Maksimalno preopterećenje	1720 mNm
Struja preopterećenje	105 A
Maks.efikasnost	88 %
Inercija rotora	139 gcm ²
Terminalni otpor	0.115Ω
Terminalna induktivnost	0.024 mH

Karakteristike Motora. [11]



Slika 9 - Diajgram oblasti rada motora (Crvena oblast predstavlja opseg neprekidnog rada; Bela oblast predstavlja oblast kratkotrajnog rada). [11]

Brzina obrtanja ovog motor se mora redukovati zbog povećanja obrtnog momenta i smanjena brzine obrtanja zgloba. Redukciju je potrebo vršiti u dve faze; prva faza se odvina na samom motoru, a druga unutar zgloba. Ukupna redukcija treba da bude u odnosu oko 670:1 kako bi bili ispunjeni uslovi ostvarenja adekvatne sile i brzine obrtanja zgloba.

Aktuator za 2. zglob - Kako drugi zglob ne trpi jednako opterećenje kao i prvi, tačnije trpi daleko manje opterećenje, za njega se ne mora koristiti motor velike snage. Ovim se dobija na smanjenju težine i smanjenju cene kompletnog manipulatora. Iz dijagrama na slici 7 se vidi da je maksimalno opterećenje koje ovaj zglob trpu nešto veće od 26Nm. Zbog toga se sa dvostrukim reduktorom koeficijenta redukcije od 670:1 može koristiti slabiji, jeftiniji motor čiji je moment u granicama od 50-88mNm.

Enkoder - Kako smo rekli da je željena rezolucija zgloba $\pm 0.05^\circ$ potrebno je prvo da vidimo koji senzor ovu preciznost može da obezbedi. Najjednostavniji jeste enkoder. On radi na principu svetlosnog snopa koji se propušta ili blokira u zavisnosti od obrtanja diska koji na sebi ima zareze. Kada se snop svetlosti blokiran to se beleži kao logička nula, a kada svetlosni snop prođe kroz zarez, onda se to beleži kao logička jedinica. Ako sa jedne strane diska postoji samo jedan prijemnik onda je pomoću takvog enkodera moguće beležiti samo brzinu obrtanja i broj napravljenih koraka, dok je sa dva prijemnika moguće beležiti i smer obrtanja. Zbog ovakve logike rada, pomoću enkodera se mogu na brz i jednostavan način beležiti koraci rotiranja kao i brzina kojom se koraci smenjuju. Na osnovu jednačine (23) može da se primeti da enkoder od 10 zareza ispunjava postavljeni uslov i da svaki enkoder koji ima više od 10 zareza, ostvaruje veću preciznost. Enkoder je najbolje rešenje za sistem koji se obrađuje u ovom projektu jer omogućuje jednostavnu kontrolu i upravljanje:

$$Out_{resolution} = \frac{360}{Enc_{steps} \cdot R_{ratio}} \left[\frac{^\circ}{step} \right], \quad (22)$$

gde je:

$Out_{resolution}$ – najmanja vrednost ugla koju je moguće zabeležiti na izlaznoj osovinu,

Enc_{steps} – broj zareza na disku enkodera.

Zbog motora koji je obrađivan, najpovoljnije je koristiti enkoder istog proizvođača zbog jednostavnosti primene. Odlučeno je da se koristi Maxon enkoderski senzor (broj dela 110511 [11]) čiji se podaci nalaze u Tabeli 2.

Tabela 2

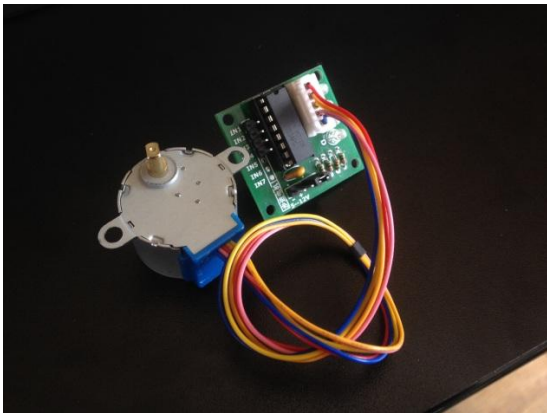
Broj zareza	500
Maksimalna brzina obrtanja diska	12000 rpm
Prečnik osovine	3 mm
Napon napajanja Vcc	5 V $\pm 10\%$
Vreme porasta signala	180 ns
Vreme pada signala	40 ns
Moment inercije diska	0.6 gcm ²

Karakteristike odabranog enkoderskog senzora. [11]

Korišćenjem jednačine (22) može se primetiti da bi se korišćenjem ovog enkodera postigla rezolucija od $\pm 0.001^\circ$ što je daleko bolje od željene rezolucije.

Ostali senzori - U samom manipulator se mogu implementirati još dva tipa senzora koji bi omogućili jednostavnije održavanje i poboljšanje efikasnosti. Jedan senzor je toplotni koji se montira unutar samog zgloba manipulatora, a drugi je vibracioni senzor. Sa senzorom temperature moglo bi se videti dali unutar zgloba dolazi do porasta iznad nominalne temperature. Do porasta temperature dolazi zbog prevelikog trenja čime se može zaključiti da nešto u zglobu nije ispravno. Senzor vibracija bi se montirao na same motore i segmente robota. Na ovaj način moguće je vršiti monitoring (posmatranje) rada motora i toga da li robot “glatko” izvršava zadatak. Do vibracija dolazi usled neizpravnog rada motora ili ako se na manipulator okači teži teret nego što je to dozvoljeno.

Prototip - Sam prototip je realizovan na malo drugačiji način od idejnog koji je obrađen u tekstu iznad. Segmenti robota su izradjeni od drveta duzina $l_0=78\text{mm}$, $l_1=124\text{mm}$ i $l_2=111\text{mm}$. U prvom zglobu robotskog manipulatora (u osnovi) nalazi se koračni motor 28BYJ-48 (slika 10), dok se u preostala dva nalaze SERVO motori. SERVO motori nisu najbolje rešenje ako se uzima u obzir preciznost i ponovljivost, koji su nama bitni, ali radi svoje pristupačnosti i cene bili su najprihvatljiviji.



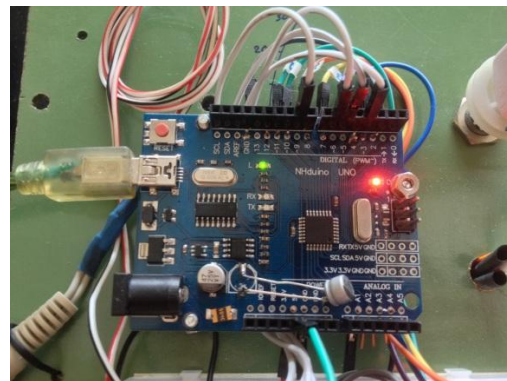
Slika 10 – Koračni motor 28BYJ-48 i ULN2003 modul. [8]



Slika 11 – Mikro servo motor.



Slika 12 – Kontroler za komunikaciju sa korisnikom.



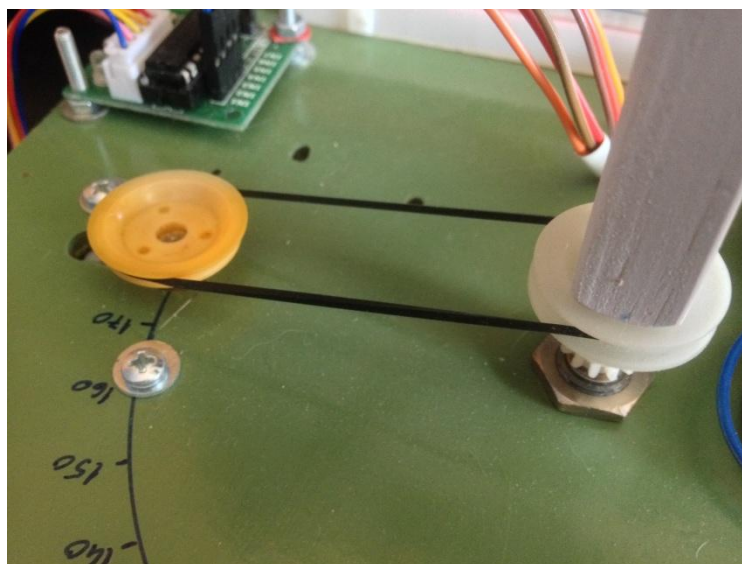
Slika 13 – Glavni kontroler.

Koračni motor je izabran umesto jednosmernog motora zbog lakšeg upravljanja. Konkretno u slučaju prototipa, za upravljanje motorom je korišćen ULN2003 modul (slika 10). Motor je izmešten 60mm van zgloba i preko gumice se vrši prenos momenta sa motora na zglob. Unutar samog zgloba

se nalazi linearni potenciometar od $5k\Omega$ koji je preko konstantnog otpornika povezan na jednosmeran izvor napajanja od 5V (slika 8). Pomoću ovog potenciometra se može beležiti ugao zakretanja zgloba sa preciznošću od $\pm 1.5^\circ$ (slika 14). Kada se zglob okreće zajedno sa njim se okreće i potenciometar gde se sa naponskog rezedelnika napon dovodi na A/D konvertor.

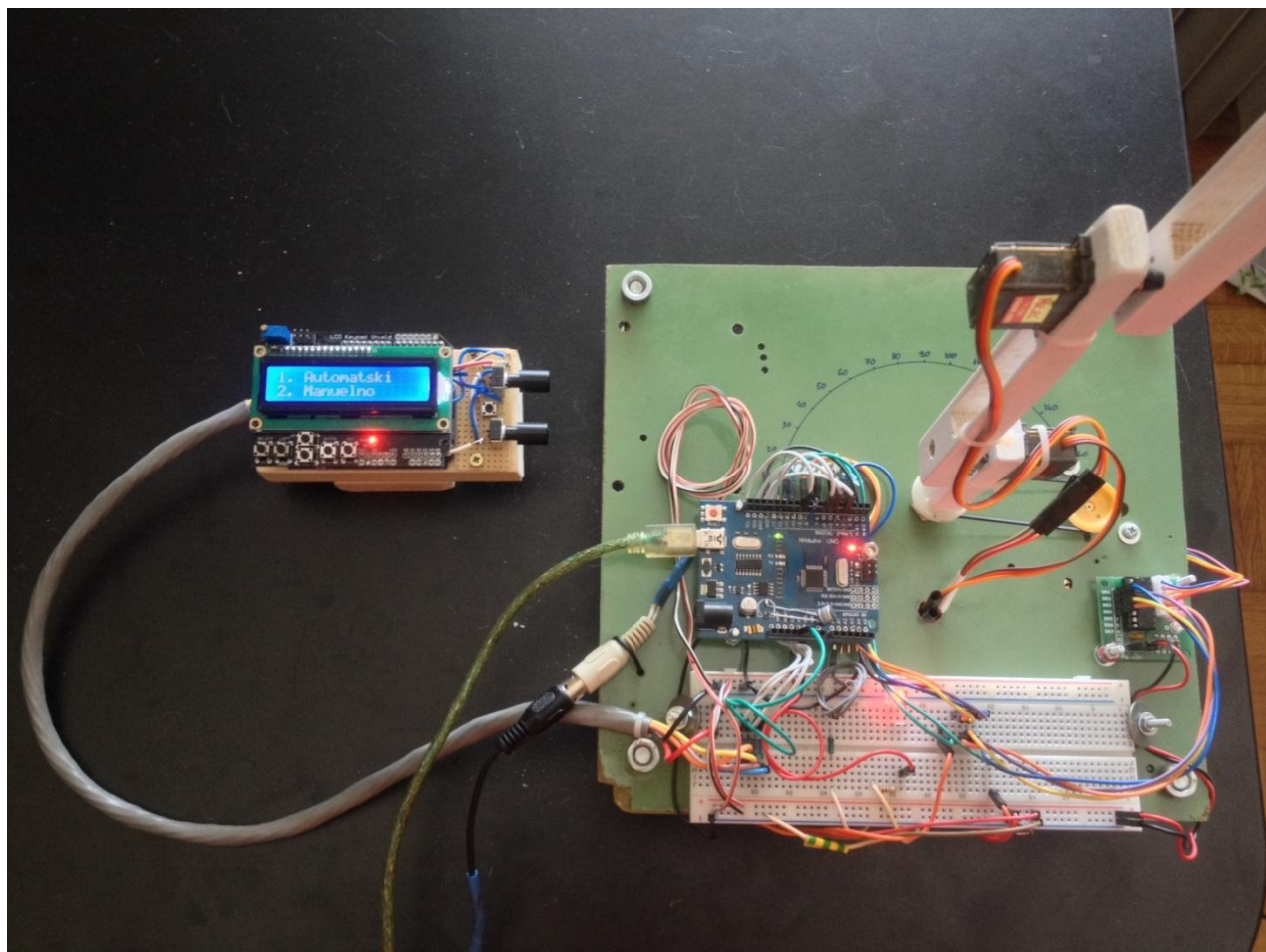
Kao što je rečeno, u druga dva zgloba se nalaze Micro SERVO motori koji su predviđeni za RC automobile čija je oznaka M-1502 (slika 11). Ovi motori unutar sebe imaju grafitni otpornik pomoću kog se beleži položaj osovine. Takođe, postoji mali jednosmerni motor koji je zajedno sa otpornikom povezan na mikrokontroler. Ovaj mikrokontroler pozicionira osovinu u željeni položaj.

Za upravljenje motorima i očitavanje vrednosti sa senzora koristi se jedan Arduino UNO R3, a za komunikaciju sa korisnikom, koristi se drugi UNO na kom se nalazi šild sa LCD displejem i tasterima (slika 12 i 13).



Slika 14 – Način prenosa momenta sa koračnog motora na prvi zglob

4.2.Slika uređaja u krajnjem stadijumu izrade



Slika 15 – Prototip u krajnjem obliku izrade

Spisak iskorišćenih komponenti na prototipu:

- | | |
|--|---|
| 1. 2x Arduino UNO R3 | 6. Linearni potenciometar $5k\Omega \pm 10\%$ |
| 2. LCD 16/2 Arduino Shield | 7. 2x Linearni potenciometar $10k\Omega$ |
| 3. 2x Micro RC Servo M-1502 | 8. 4x Otpornik od $4k7\Omega$ |
| 4. Koračni motor 28BYJ-48 | 9. Otpornik 100Ω |
| 5. Upravljačko koliko/modul bazirano na ULN2003 čipu | 10. 2x Otpornik 220Ω |
| | 11. Protobord |
| | 12. Kablovi |

5. Rezultati testiranja

Nakon što je uređaj izrađen može se pristupiti njegovom testiranju. Zbog jeftinih komponenti i neprecizno izrađenih delova rezultati nisu u potpunosti ispunili očekivanja. Jedno od očekivanja je bilo da vrh ruke može da se pozicionira u željenu tačku sa preciznošću od 10mm^3 , a testiranje je pokazalo da je tačnost u opsegu od 20mm^3 . Tačnost manipulatora se može povećati postavljanjem kvalitetnijih senzora i aktuatora (koji su obrađivani na početku poglavlja 4.1) i preciznom izradom segmenata.

Još jedna stvar koja nije u potpunost ispunila očekivanja jeste pozicioniranje prvog, tj. nultog zgloba (slika 14). Sam motor i senzor nam po specifikacijama omogućuju da vršimo pozicioniranje zgloba u koracima od 1° ali zbog načina prenosa obrtnog momenta sa motora na zglob ovo nije moguće postići. Tačnije ako se motor okreće jako polako jeste ali je onda brzina pozicioniranja previše spora. Ovaj problem se može otkloniti postavljanjem krute veze, između zgloba i motora, koja omogućava rotaciju.

Još jedna od stvari koja je naišla na problem jeste komunikacija između ova dva kontrolera. Ovaj problem je rešen i omogućava komunikaciju u realnom vremenu. Kako ovo nije tema projekta, neće se dublje zalaziti u ovaj problem.

Sa druge strane, sam prototip se pokazao kao veliki uspeh jer su sa vrlo malo novca postignuti poprilično dobri rezultati.

6. Zaključak

- Zaključak o uspešnosti i meri završenosti projekta,

Na kraju uspešno je realizovano pozicioniranje robotskog manipulatora u prostoru, što je bio prvobitni zadatak projekta. Iako je mera preciznosti pozicioniranja robotskog manipulatora par centimetra, s obzirom na kvalitet korišćenih komponenti rezultat je prihvatljiv. Ako bismo realizovali manipulator sa gore predstavljenim komponentama (poglavlje 4.1), koje iziskuju velika finansijska sredstva preciznost bi se merila u decimalama.

- Rezime projekta.

Ovaj projekat se bavi obradom robotskom manipulatora osnovne antropomorfne konfiguracije. U njemu je jednim delom obrađen manipulator kakav bi trebao da nastane kao rezultat ovog projekta, sve njegove komponente i način realizacije. Kako takav sistem iziskuje veliku količinu finansijskih sredstava za svoju realizaciju, obrađen je i prototip. Prototip je daleko ne kvalitetnije rešenje od onog što je predloženo ali sami rezultati koje je postigao su poprilično interesantni. Kao krajnji rezultat ovog projekta napravljen je prototip koji ima tačnost od 20mm3.

Jedna od glavnih ideja projekta je da pokaže da sa razumnom količinom finansijskih sredstava, moguće napraviti robota koji može da zadovolji zahteve manjih industrijskih preduzeća.

Vrlo je očigledan potencijal ovog projekta. Kako sa ovakvim manipulatorom može da se izvrši samo pozicioniranje vrha robota u bilo koju tačku radnog prostora, bez mogućnosti odabira same orijentacije, sledeći korak bi bio razvoj manipulatora sa 6 stepeni slobode. Na ovaj način bi se omogućilo pozicioniranje sa željenom orijentacijom u bilo kojoj tački potpuno operativnog radnog prostora. Ovo bi se izvelo dodavanjem Ojlerovog zgloba na kraju osnovne konfiguracije. Naravno, ovo bi značilo da se određene stvari moraju malo prilagoditi ovakvom sistemu jer bi u tom slučaju postojala još 3 segmenta i 3 zgloba, koji bi dodali dodatno opterećenje na prvi zglob manipulatora. Ovo znači da u tom slučaju robot ne bi mogao da podigne isti teret kao što je u trenutnom radu predloženo. Problem ovog tipa bi se rešio uravnotežavanjem sistema i konfiguracijom najboljom za takav sistem.

7. Literatura

- [1] Librairie Larousse, *Matematika – Opšta enciklopedija Larousse*, Vuk Karadžić, Beograd, 1973.
- [2] Dragan Spasić, *Mehanika 1 - osnove*, 2007.
- [3] dr Laslo Nađ, *Primena Senzora i Aktuatora 2. Deo*, 2016.
- [4] dr Ljiljana Živanov, *Primena Senzora i Aktuatora 1. Deo*, 2016.
- [5] Matlab, 2011.
- [6] Mupad, 2011.
- [7] Arudino Forum, <https://forum.arduino.cc/> .
- [8] Mohannad Rawashdeh, *BYJ48 Stepper Motor*,
<http://www.instructables.com/id/BYJ48-Stepper-Motor/> .
- [9] KUKA, *robotski manipulator antropomorfne konfiguracije sa 6 stepeni slobode*, <http://bit.ly/2bGljkY> , 2016.
- [10] ABB, *robotski manipulator antropomorfne konfiguracije sa 6 stepeni slobode*, <http://bit.ly/2bEhUWz> , 2016.
- [11] Maxon Motor, *Online Shop*, 2016. <http://bit.ly/2bQHsK>
- [12] EasyEDA, <https://easyeda.com/>, 2016.

Svi linkovi su provereni 28.08.2016.

Dodatak A – Elektronika

Sama šema sa slike 8 je napravljena u programu [12]. Šema na prvi pogled možda deluje komplikovano ali se u suštini može podeliti u 3 grupe:

1. Glavni upravljački deo
2. Deo za komunikaciju sa korisnikom
3. Izvršni organi

Glavni upravljački deo – sastoji se od Arduino UNO-a koji u sebi ima učitani programski kod koji upravlja izvršnim organima (aktuatorima i senzorima). Ovaj Arduino je zadužen za konverziju očitanih vrednosti sa senzora, slanje ubravljačkih signala na motore i rešavanje inverzne kinematike.

Deo za komunikaciju sa korisnikom – ovaj deo je neophodan kako bi krajnji korisnik mogao lako i jednostavno da upravlja sistemom. Ovaj deo je rešen tako da svako, bez obzira na nivo obrazovanja, može nesmetano da koristi manipulator. Grupa se sastoji od Arduino UNO-a, LCD ekrana, tastera i potencijometara za tadavanje komandi i parametara. LCD ekran je sa tasteroma sastavni deo šilda koji je napravljen za Arduino UNO. Pored ovih tastera dodata su još dva potencijometra *P-Q1* i *P-Q2* kako bi promena uglova u zglovima bila intuitivnija, jednoostavnija i brža. Unutar ovog Arduina se nalazi kod za grafičku komunikaciju i pamćenje odabranih parametara. Svi parametri se, kada je to potrebno, šalju na prvi Arduino koji posle sa njima radi potrebne akcije. Komunikacija između ova dva Arduina realizovana je pomoću četiri žice: *DATA-M/S*, *DATA-S/M*, *AF-M/S* i *AF-S/M*. Razmena podataka se vrši pomoću 11-to bitne reči preko sve DATA linije. Jedna se koristi da Master pošalje Slave-u podatke, a druga da Slave pošalje Master-u. 11-bita se koristi zbog toga što je najveća decimalna vrednost prilikom razmene podataka 1023, što je 10-bita i još jedan bit koji je potreban kako bi se znalo da li je broj pozitivan ili negativan. Druge dve AF linije se koriste za prozivku. Na ovaj način kada je bilo koji Arduino spreman da pošalje podatke drugom, on preko svoje AF linije pošalje 1-bit, čime se ostvaruje veza ova dva Arduina.

Izvršni organi – ovaj deo se sastoji od dva SERVO motora, jednog koračnog motora, upravljačkog modula za koračni motor i jednog potencijometra od 5k Ω .

Dodatak B – Inverzni kinematski problem – Dokaz

```
l0 = 78;
l1 = 123;
l2 = 111;
xc = 90;
yc = 142;
zc = 198-10;

dc1 = sqrt(xc*xc + yc*yc); %Hipotenuza trougla xc, yc
dc2 = sqrt(dc1*dc1 + zc*zc); %Hipotenuza trougla zc, dc1
Q0 = atan(xc/yc); %Vrednost ugla za Q0

if Q0 < 0
    Q0 = pi + Q0; %Pošto Q0 može da ima samo vrednost od 0-180 stepeni,
                %ako je Q0 < 0 ili Q0 > 180 primenjujemo ovaj IF
                %uslov kako bismo se vratili u I i VI kvadrant
end

p = (l1*dc2)/(l1 + l2); %p i q su delovi duzine dc2, dobijaju se iz
                        %romboida

D2 = p/l1;
a = 4*atan((sqrt(1 - D2*D2))/(1 + D2)); % (alfa) Ovaj parametar nam služi
                                         %da bismo mogli da odredimo
                                         %obe konfiguracije i on
                                         %predstavlja ugao između
                                         %konfiguracije "lakat gore" i
                                         %konfiguracije "lakat dole"

D = (dc2*dc2 - l1*l1 - l2*l2)/(2*l1*l2);
D1 = D/(1+sqrt(1-D*D));
Q2 = 2*atan(D1); %Prvo rešenje za ugao Q2
M1 = (l2*(zc)*cos(Q2) - dc1*(l1 + l2*sin(Q2))) / (l2*sin(Q2)*(2*l1 + ...
    l2*sin(Q2)*sin(Q2)) + l1*(l1 + l2*cos(Q2)*cos(Q2))); %cosQ1 = M1 i
%ovaj izraz se dobija iz vektorskih jednačina
Q1 = 2*atan((sqrt(1 - M1*M1)) / (1 + M1)); %Prvo rešenje za ugao Q1
Q3 = Q1 + a; %Drugo rešenje za ugao Q1
D3 = (dc1*sin(Q3) + l2*cos(Q3)*sin(Q3) - cos(Q3)*(l1*sin(Q3) - zc)) / (l2);
Q4 = 2*atan((sqrt(1 - D3*D3)) / (1 + D3)); %Drugo rešenje za ugao Q2

Q0 = Q0*180/3.14
%Prvi set rešenja za Q1 i Q2
Q1 = Q1*180/3.14
Q2 = Q2*180/3.14
%Drugi set rešenja za Q1 i Q2
Q3 = Q3*180/3.14
Q4 = Q4*180/3.14

REZULTATI:
Q0 = 32.3831
Q1 = 118.6030
Q2 = 33.8773
Q3 = 174.6909
Q4 = 157.5516
```