

# Izrada 3-RPS manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile

---

**Benkek, Goran**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:471362>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

**IZRADA 3-RPS MANIPULATORA S POMIČNOM  
PLATFORMOM ZA MJERENJE SILE**

Završni rad br. 15/MEH/2017

Goran Benkek

Bjelovar, prosinac 2017.

VELEUČILIŠTE U BJELOVARU  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

**IZRADA 3-RPS MANIPULATORA S POMIČNOM  
PLATFORMOM ZA MJERENJE SILE**

Završni rad br. 15/MEH/2017

Goran Benkek

Bjelovar, prosinac 2017.



**Visoka tehnička škola u Bjelovaru**

**Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar**

## 1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Benkek Goran**

Datum: 14.06.2017.

Matični broj: 001139

JMBAG: 0314011102

Kolegij: **MIKRORAČUNALA**

Naslov rada (tema): **Izrada 3-RPS manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Temeljne tehničke znanosti**

Grana: **Automatika**

Mentor: **Zoran Vrhovski, mag.ing.el.techn.inf.**

zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za završni rad:

1. dr.sc. Alan Mutka, predsjednik
2. Zoran Vrhovski, mag.ing.el.techn.inf., mentor
3. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., član

## 2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 15/MEH/2017

U radu je potrebno:

1. opisati 3-RPS manipulator
2. analizirati inverznu i direktnu kinematiku 3-RPS manipulatora
2. opisati platformu sa četiri senzora mase za određivanje centra mase tijela u 2D ravni
3. izraditi i opisati 3-RPS manipulator s pomičnom platformom za mjerenje mase
4. izraditi i opisati upravljanje pozicije linearnih aktuatora
5. izraditi i opisati upravljanje pozicije i nagiba pomične platforme 3-RPS manipulatora

Zadatak uručen: 14.06.2017.

Mentor: **Zoran Vrhovski, mag.ing.el.techn.inf.**



### *Zahvala*

Zahvaljujem svom mentoru Zoranu Vrhovskom mag.ing.el.techn.inf. na ukazanom povjerenju te savjetima tijekom izrade završnog rada, ali i tijekom cijelog studiranja kao i svim zaposlenicima Veleučilišta u Bjelovaru. Također zahvaljujem na potpori svojoj obitelji te djevojci Mariji.

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2. 3-RPS MANIPULATOR</b> .....	<b>2</b>
2.1 Inverznakinematika 3-RPS manipulatora .....	3
2.2 Direktna kinematika 3-RPS manipulatora.....	5
<b>3. PLATFORMA ZA MJERENJE SILE</b> .....	<b>7</b>
<b>4. IZRADA CAD MODELA 3-RPS MANIPULATORA</b> .....	<b>9</b>
<b>5. IZRADA 3-RPS MANIPULATORA I PLATFORME ZA MJERENJE SILE</b> .....	<b>14</b>
5.1 Izrada konstrukcijskih dijelova od lima.....	14
5.2 Izrada nosača enkodera i odstojnika .....	15
5.3 Izrada dijelova tokarenjem .....	16
5.4 Spajanje osovine motora s osovinomenkodera .....	17
5.4.1 Proračun prijenosnog omjera linearnog aktuatora.....	19
5.5 Sastavljanje 3-RPS manipulatora.....	20
<b>6. IZRADA UPRAVLJAČKE PLOČICE 3-RPS MANIPULATORA I PLATFORME ZA MJERENJE SILE</b> .....	<b>22</b>
6.1 Izrada električne sheme .....	22
6.2 Konstruiranje tiskane pločice .....	24
6.3 Lemljenje modula i komponenata na tiskanu pločicu .....	25
6.4 Sastavljanje upravljačke elektronike u cjelinu.....	26
6.5 Korišteni moduli na upravljačkim pločicama.....	27
6.5.1 L298N modul .....	27
6.5.2 Inkrementalni enkoder.....	28
6.5.3 HX711 – Analogno-digitalni pretvornik s pojačalom .....	29
6.5.4 Linearni aktuator .....	30
<b>7. IZRADA UPRAVLJAČKOG PROGRAMA ZA 3-RPS MANIPULATOR I POMIČNU PLATFORMU ZA MJERENJE SILE</b> .....	<b>32</b>
7.1 Univerzalna asinkrona serijska komunikacija.....	32
7.2 Two wire Interface.....	33
7.2.1 TWI karakteristike .....	33
7.2.2 Općenito o TWI.....	34
7.2.3 Adresni paket TWI komunikacije .....	34
7.2.4 Podatkovni paket TWI komunikacije.....	35
7.2.5 Kombiniranje adresnog i podatkovnog paketa u prijenos .....	36
7.2.6 Pregled TWI modula .....	37
7.3 Vanjski prekidi.....	38
7.4 Pulsnoširinska modulacija.....	39
<b>8. TESTIRANJE IZRAĐENIH 3-RPS MANIPULATORA S POMIČNOM PLATFORMOM ZA MJERENJE SILE</b> .....	<b>41</b>
8.1 Testiranje pozicioniranja.....	41
8.2 Testiranje CoP-a.....	42

8.3	<i>Testiranje cijelog sustava</i> .....	44
9.	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	46
10.	<b>LITERATURA</b> .....	47
11.	<b>OZNAKE I KRATICE</b> .....	49
12.	<b>SAŽETAK</b> .....	50
13.	<b>ABSTRACT</b> .....	51

## 1. Uvod

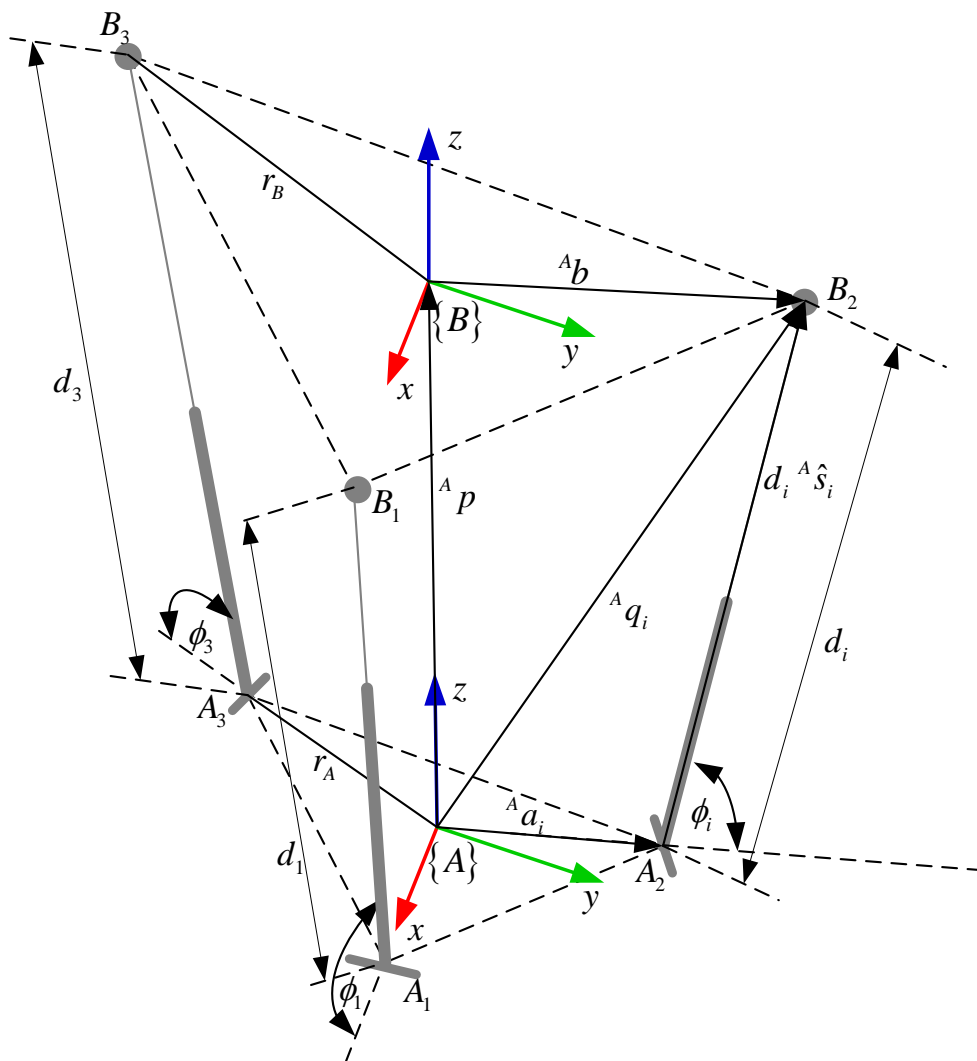
Zadatak završnog rada je izrada dva prototipa 3-RPS paralelnih manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile. Paralelni manipulatori su predviđeni za dinamičku evaluaciju držanja ljudskog tijela. Razlog upotrebe paralelnih manipulatora u svrhu evaluacije držanja ljudskog tijela jest njihova velika snaga na relativnom malom prostoru. Dizajn paralelnih manipulatora preuzet je iz završnog rada „Prototip mehaničkog sklopa za dinamičku evaluaciju držanja ljudskog tijela“. Preuzeti CAD model je doraden i dan je na strojnu izradu. Manipulatori mogu mijenjati visinu i nagib pomične platforme za mjerenje sile pomoću linearnih aktuatora. Senzori sile montirani su u uglovima pomične platforme, a njima će se određivati centar pritiska ljudskog stopala. Upravljanje linearnih aktuatora izvedeno je pomoću decentraliziranog sustava upravljanja pomoću mikrokontrolera ATmega328P. Raspored sila i upravljanje linearnim aktuatorima omogućeno je putem *Windows* aplikacije.

U poglavlju 2 opisana je inverzna i direktna kinematika 3-RPS manipulatora. Platforma za mjerenje sile opisana je u poglavlju 3. Dizajn CAD modela i izrada manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile opisani su u poglavljima 4 i 5. U poglavlju 6 opisana je izrada upravljačkog programa manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile. Testiranje rada manipulatora prikazano je u poglavlju 8. Kratki zaključak dan je u poglavlju 9.



## 2. 3-RPS MANIPULATOR

Geometrija 3-RPS manipulatora prikazana je na slici 2.1. 3-RPS paralelni manipulator sastoji se od nepomične platforme  $\{A\}$  i pomične platforme  $\{B\}$ . Pomična platforma ima tri sferna zgloba (S) u vrhovima jednakostraničnog trokuta  $B_1B_2B_3$ . Nepomična platforma ima tri revolucijska zgloba (R) u vrhovima jednakostraničnog trokuta  $A_1A_2A_3$ . Pomična i nepomična platforma povezane suprizmatičnim zglobovima (P). Prizmatični zglobovi linearni su aktuatori koji mogu mijenjati visinu i nagib pomične platforme [1].



Slika 2.1. Geometrija 3-RPS manipulatora[1]

## 2.1 Inverznakinematika 3-RPS manipulatora

Vrhovi jednakostraničnog trokuta  $A_1A_2A_3$  gdje su smješteni revolucijski zglobovi na nepomičnoj platformi u koordinatnom sustavu  $\{A\}$  su [1]:

$${}^A a_1 = \begin{bmatrix} r_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^A a_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}r_A \\ \frac{\sqrt{3}}{2}r_A \\ 0 \end{bmatrix}, {}^A a_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}r_A \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}r_A \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdje je  $r_A$  polumjer opisane kružnice jednakostraničnog trokuta  $A_1A_2A_3$ . Vrhovi jednakostraničnog trokuta  $B_1B_2B_3$  u koordinatnom sustavu  $\{B\}$  su[1]:

$${}^B b_1 = \begin{bmatrix} r_B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^B b_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}r_B \\ \frac{\sqrt{3}}{2}r_B \\ 0 \end{bmatrix}, {}^B b_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}r_B \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}r_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdje je  $r_B$  polumjer opisane kružnice jednakostraničnog trokuta  $B_1B_2B_3$ . Vrhovi jednakostraničnog trokuta  $B_1B_2B_3$  u koordinatnom sustavu  $\{A\}$  mogu se dobiti sljedećom jednažbom [1]:

$${}^A q_i = {}^A p + {}^A R_B {}^B b_i \quad (3)$$

gdje je  ${}^A R_B$  matrica rotacije dana izrazima (4) i (5)[1].

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & c\gamma s\alpha s\beta - c\alpha s\gamma & s\alpha s\gamma + c\alpha c\gamma s\beta \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Vektor  ${}^A p$  je pozicija centra pomične platforme u koordinatnom ustavu  $\{A\}$  [1]:

$${}^A p = [p_x \quad p_y \quad p_z]^T \quad (6)$$

Dužina linearnih aktuatora može se izračunati sljedećom jednačbom [1]:

$$d_i^2 = [{}^A q_i - {}^A a_i]^T [{}^A q_i - {}^A a_i] \quad (7)$$

Dužina pojedinih linearnih aktuatora  $d_i$  ( $i = 1,2,3$ ) može se izračunati sljedećim jednačbama [1]:

$$d_1^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - 2p_x r_A + 2u_x p_x r_B + 2u_y p_y r_B + 2u_z p_z r_B + r_A^2 - 2u_x r_A r_B + r_B^2 \quad (8)$$

$$d_2^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + p_x r_A - 2p_y \left( \frac{r_B u_y}{2} - \frac{\sqrt{3} r_B v_y}{2} \right) - 2p_z \left( \frac{r_B u_z}{2} - \frac{\sqrt{3} r_B v_z}{2} \right) - \frac{r_A (r_B u_x - \sqrt{3} r_B v_x)}{2} - \sqrt{3} p_y r_A - 2p_x \left( \frac{r_B u_x}{2} - \frac{\sqrt{3} r_B v_x}{2} \right) + r_A^2 + r_B^2 + \frac{\sqrt{3} r_A (r_B u_y - \sqrt{3} r_B v_y)}{2} \quad (9)$$

$$d_3^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + p_x r_A - 2p_y \left( \frac{r_B u_y}{2} + \frac{\sqrt{3} r_B v_y}{2} \right) - 2p_z \left( \frac{r_B u_z}{2} + \frac{\sqrt{3} r_B v_z}{2} \right) - \frac{r_A (r_B u_x + \sqrt{3} r_B v_x)}{2} + \sqrt{3} p_y r_A - 2p_x \left( \frac{r_B u_x}{2} + \frac{\sqrt{3} r_B v_x}{2} \right) + r_A^2 + r_B^2 - \frac{\sqrt{3} r_A (r_B u_y + \sqrt{3} r_B v_y)}{2} \quad (10)$$

Gibanje pomične platforme 3-RPS paralelnog manipulatora je ograničeno. Jednačbe ograničenja 3-RPS manipulatora su [1]:

$$\begin{aligned} p_y &= -r_B \cos(\beta) \sin(\gamma) \\ \gamma &= a \tan 2(\sin(\alpha) \sin(\beta), \cos(\alpha) + \cos(\beta)) \\ p_x &= \frac{1}{2} r_B \cos(\beta) \cos(\gamma) - \frac{1}{2} r_B (\cos(\alpha) \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma)) \end{aligned} \quad (11)$$

Jednačbe (8) – (11) predstavljaju rješenje inverznogkinematičkog problema 3-RPS paralelnog manipulatora [1].

## 2.2 Direktna kinematika 3-RPS manipulatora

Pozicija sfernih zglobova u koordinatnom sustavu  $\{A\}$  može se izračunati pomoću jednadžbe (3) na sljedeći način [1]:

$$\begin{aligned} {}^A q_1 &= [r_A + d_1 \cos \phi_1 \quad 0 \quad d_1 \sin \phi_1]^T \\ {}^A q_2 &= \left[ -\frac{r_A}{2} - \frac{d_2 \cos \phi_2}{2} \quad \frac{\sqrt{3}(r_A + d_2 \cos \phi_2)}{2} \quad d_2 \sin \phi_2 \right]^T \\ {}^A q_3 &= \left[ -\frac{r_A}{2} - \frac{d_3 \cos \phi_3}{2} \quad -\frac{\sqrt{3}(r_A + d_3 \cos \phi_3)}{2} \quad d_3 \sin \phi_3 \right]^T \end{aligned} \quad (12)$$

Udaljenost između pojedinih vrhova jednakostraničnog trokuta  $B_1 B_2 B_3$  (sfernih zglobova) iznosi [1]:

$$\begin{aligned} |B_1 B_2| &= \sqrt{3} r_A \Rightarrow |{}^A q_1 - {}^A q_2| = \sqrt{3} r_B \\ |B_2 B_3| &= \sqrt{3} r_A \Rightarrow |{}^A q_2 - {}^A q_3| = \sqrt{3} r_B \\ |B_3 B_1| &= \sqrt{3} r_A \Rightarrow |{}^A q_3 - {}^A q_1| = \sqrt{3} r_B \end{aligned} \quad (13)$$

Jednadžbu (13) potrebno je kvadrirati i zapisati u implicitnom obliku [1]:

$$\begin{aligned} f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3) &= ({}^A q_1 - {}^A q_2)^T ({}^A q_1 - {}^A q_2) - 3r_B^2 = 0 \\ f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3) &= ({}^A q_2 - {}^A q_3)^T ({}^A q_2 - {}^A q_3) - 3r_B^2 = 0 \\ f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3) &= ({}^A q_3 - {}^A q_1)^T ({}^A q_3 - {}^A q_1) - 3r_B^2 = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Kada se u jednadžbu (14) supstituira jednadžba (12) dobit će se [1]:

$$f_1 = \left( \frac{3r_A}{2} + d_1 \cos \phi_1 + \frac{d_2 \cos \phi_2}{2} \right)^2 + \frac{3(r_A + d_2 \cos \phi_2)^2}{4} - 3r_B^2 + (d_1 \sin \phi_1 - \sin \phi_2)^2 \quad (15)$$

$$f_2 = \left( \frac{d_2 \cos \phi_2}{2} - \frac{d_3 \cos \phi_3}{2} \right)^2 - 3r_B^2 + (d_2 \sin \phi_2 - d_3 \sin \phi_3)^2 + \left( \frac{\sqrt{3}(r_A + d_2 \cos \phi_2)}{2} + \frac{\sqrt{3}(r_A + d_3 \cos \phi_3)}{2} \right)^2 \quad (16)$$

$$f_3 = \left( \frac{3r_A}{2} + d_1 \cos \phi_1 + \frac{d_3 \cos \phi_3}{2} \right)^2 + \frac{3(r_A + d_3 \cos \phi_3)^2}{4} - 3r_B^2 + (d_1 \sin \phi_1 - d_3 \sin \phi_3)^2 \quad (17)$$

Jednadžbe (15) – (17) su tri nelinearne jednadžbe s tri nepoznanice  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ . Sustav jednadžbi može se riješiti metodom nelinearne optimizacije Newton–Kantorovich. Npr: za duljine linearnih aktuatora  $d_1 = 360$  mm,  $d_2 = 250$  mm i  $d_3 = 290$  mm, dobiveni su kutovi

$\Phi_1 = 91.4048^\circ$ ,  $\Phi_2 = 87.0292^\circ$  i  $\Phi_3 = 80.4506^\circ$ . Vektor pozicije centra pomične platforme  ${}^A p$  u koordinatnom sustavu  $\{A\}$  nakon supstitucije kutova  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  i  $\Phi_3$  u jednadžbu (12) dobit će se jednadžbom [1]:

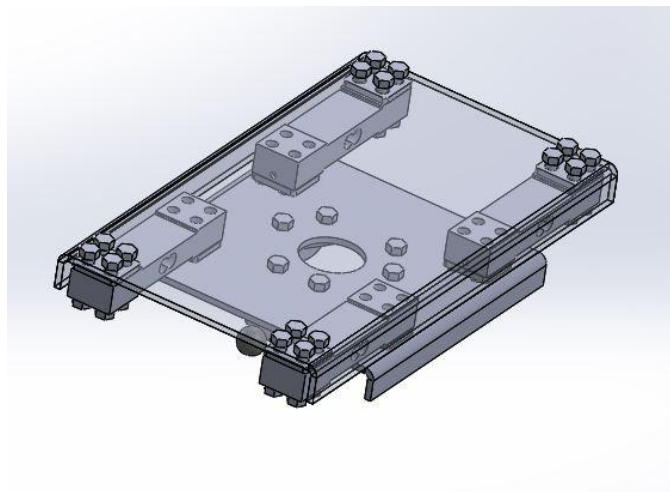
$${}^A p = ({}^A q_1 + {}^A q_2 + {}^A q_3) / 3 \quad (18)$$

Eulerovi kutovi mogu se izračunati pomoću matrice rotacije (5) [1]:

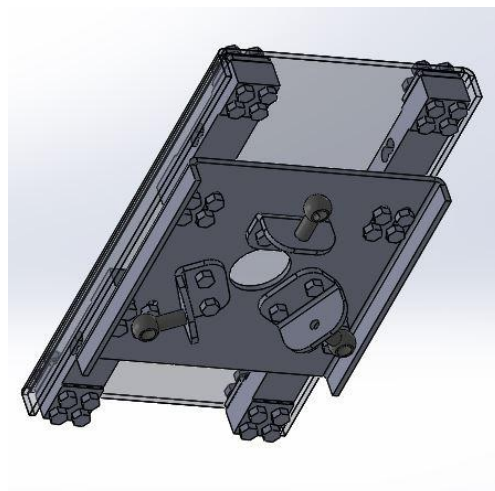
$$\begin{aligned} \alpha &= a \tan 2(v_z / \cos \beta, w_z / \cos \beta) \\ \beta &= \sin^{-1}(-u_z) \\ \gamma &= a \tan 2(u_y / \cos \beta, u_x / \cos \beta) \end{aligned} \quad (19)$$

### 3. PLATFORMA ZA MJERENJE SILE

Na slici 3.1 i 3.2 prikazana je pomična platforma za mjerenje sile. Najvažniji dio platforme su senzori sile (senzori mase). Raspoređeni su u uglove platforme kako bi se mjerila sila u četiri točke. Potrebno je dobiti informaciju o raspodjeli mase na površini platforme kako bi bilo moguće odrediti centar pritiska ljudskog stopala. Platforma za mjerenje sile sastoji se još od konstrukcijskih limova debljine 5mm te kutnih profila na kojima su pričvršćenisferni zglobovi manipulatora.



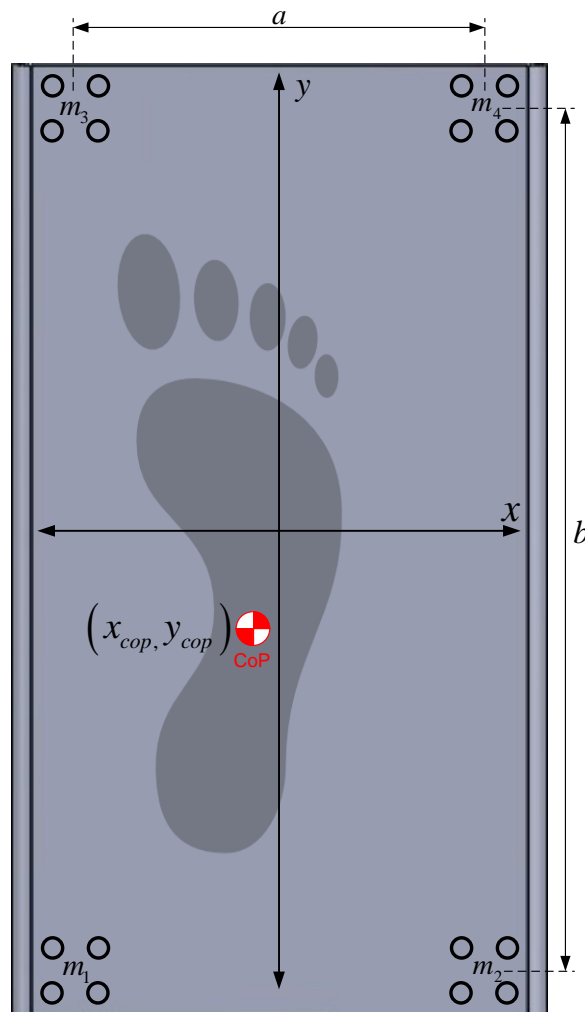
Slika 3.1. CAD model platforme za mjerenje sile (1)



Slika 3.2. CAD model platforme za mjerenje sile (2)

Na slici 3.3 prikazana je platforma za mjerenje sile s lokalnim koordinatnim sustavom  $xy$ . U koordinatnom sustavu smještene su točke mjerenja mase  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  i  $m_4$ . Duljine  $a$  i  $b$

su duljine između točaka u kojima se mjeri sila, odnosno masa. Te duljine su potrebne kako bi se mogao odrediti CoP (eng. Center of Pressure). Koordinate CoP-a se računaju prema relacijama (3.1) i (3.2).



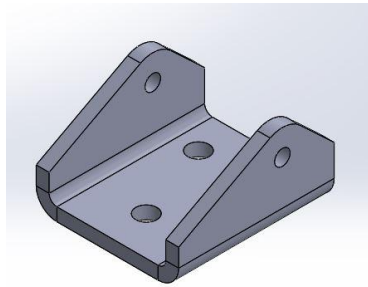
Slika 3.3. Određivanje centra pritiska na platformi za mjerenje sile

$$x_{cop} = \frac{\frac{a}{2}(m_2 + m_4) - \frac{a}{2}(m_1 + m_3)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \quad (3.1)$$

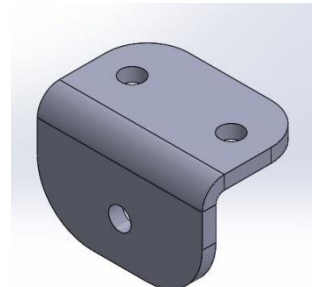
$$y_{cop} = \frac{\frac{b}{2}(m_3 + m_4) - \frac{b}{2}(m_1 + m_2)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \quad (3.2)$$

#### 4. IZRADA CAD MODELA 3-RPS MANIPULATORA

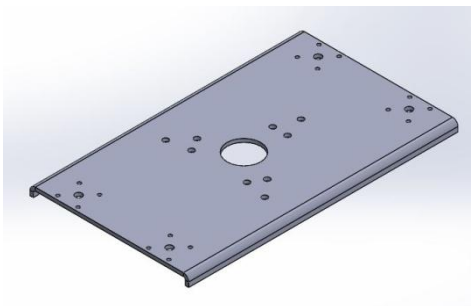
CAD model sustava za evaluaciju držanja ljudskog tijela preuzet je iz literature [2]. U preuzetom modelu utvrđena odstupanja u dimenzijama modula kao što su senzori sile te linearni aktuatori. Moduli su izmjereni te ispravno nacrtani. Potrebno je poznavati točne dimenzije modula jer se prema njima konstruiraju ostali sastavni dijelovi 3-RPS manipulatora. Nakon utvrđenih točnih mjera pristupa se korekciji preuzetog CAD modela. Ponovno su izrađeni CAD modeli revolucijskih zglobova, kutnih profila za spoj sfernih zglobova s pomičnom platformom za mjerenje sile, spojki klipnjača linearnih aktuatora sa sfernim zglobovima te nosača za enkodere. Preostali dijelovi odnosno gornja, donja i središnja ploča manje su korigirani.



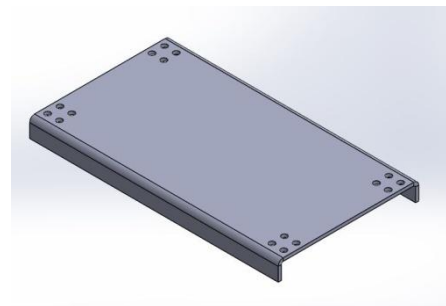
a) Revolucijski zglob



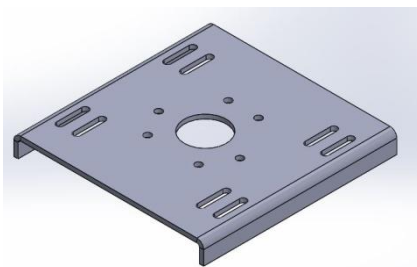
b) Kutni profil



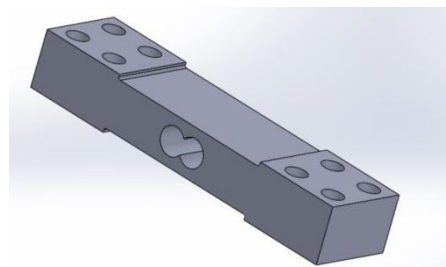
c) Donja ploča



d) Gornja ploča

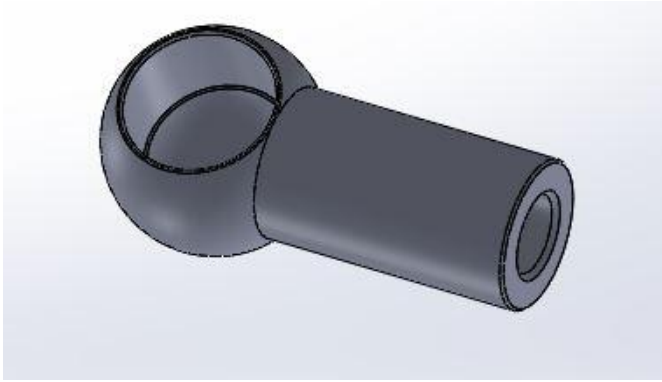


e) Srednja ploča

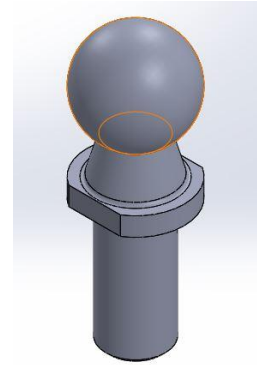


f) Senzor sile

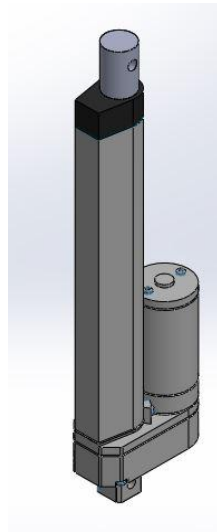




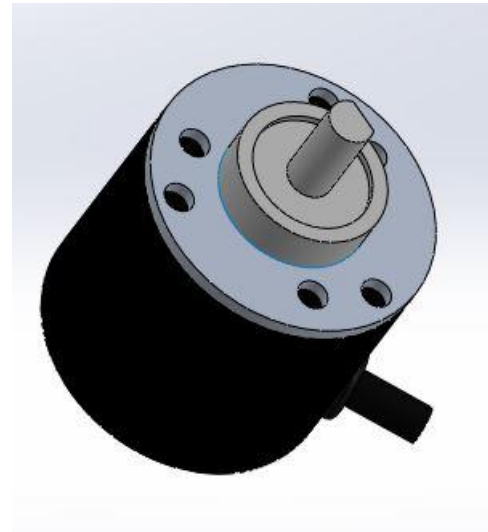
g) Sferni zglob, prvi dio



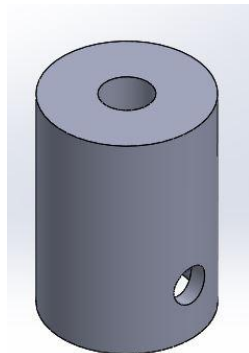
h) Sferni zglob, drugi dio



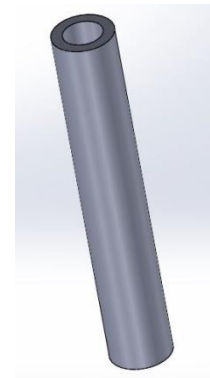
i) Linearni aktuator



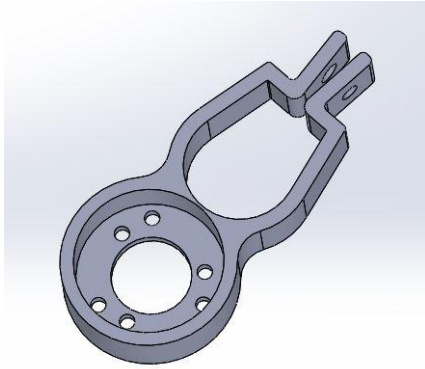
j) Inkrementalni enkoder



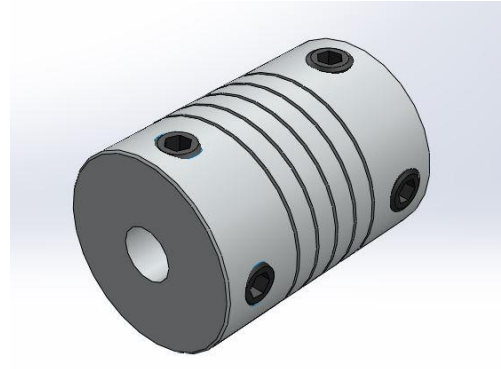
k) Spojka sfernog zgloba i aktuatora



l) Spojka osovine motora linearnog aktuatora i osovine enkodera



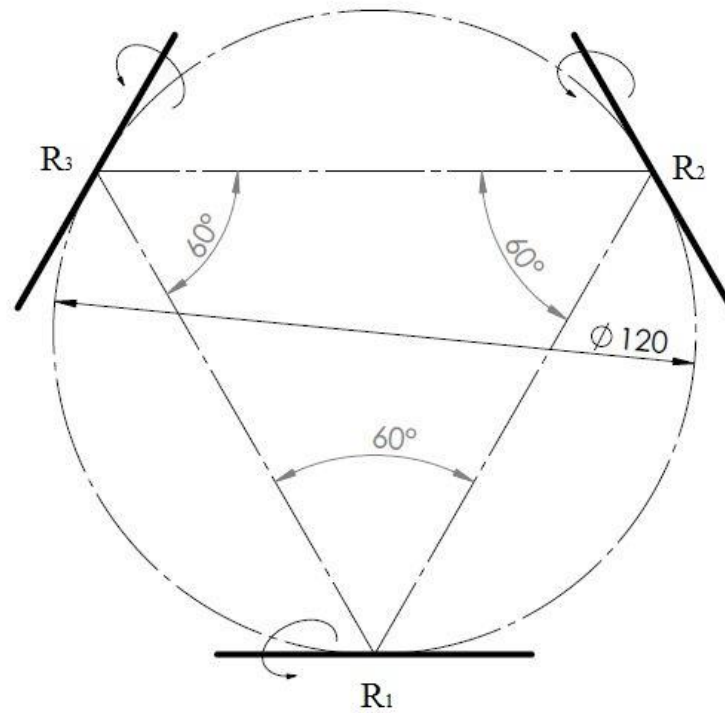
m) Nosač enkodera



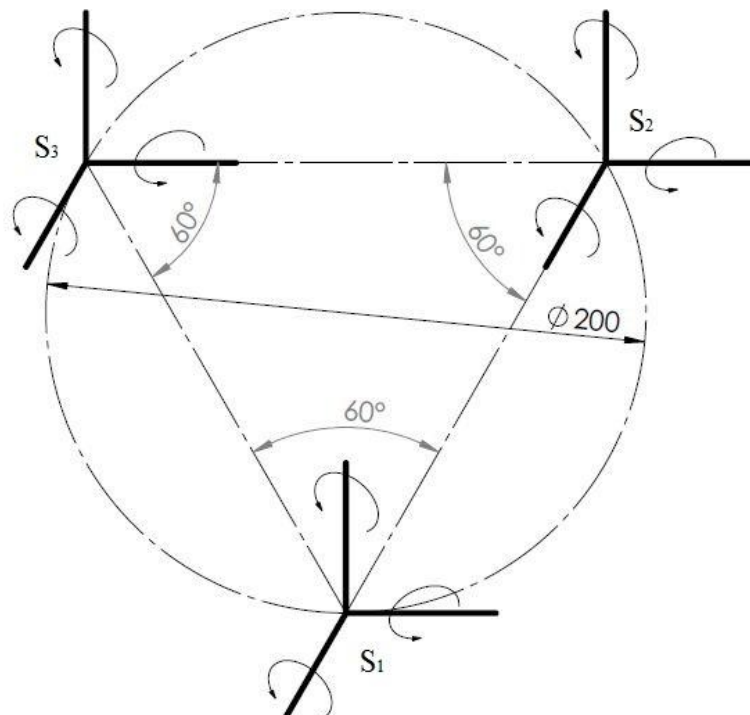
n) Spojka motora [3]

Slika 4.1. CAD modeli dijelova 3-RPS manipulatora

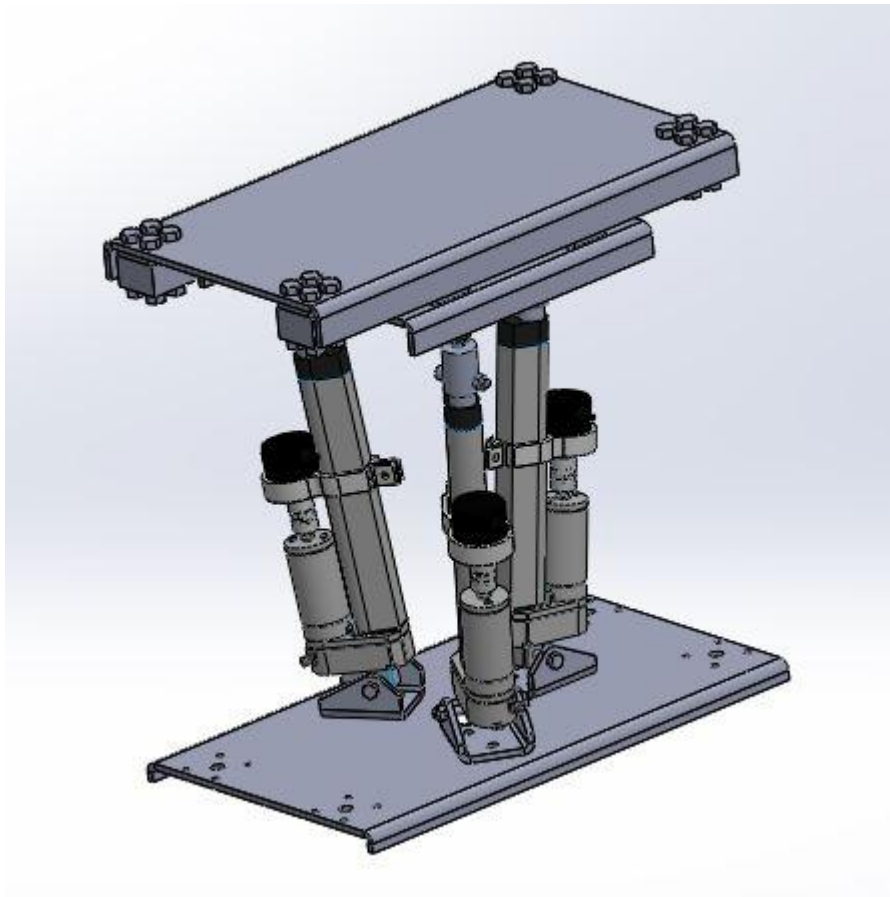
Na slici 4.1 (a) – m)) su prikazani ponovno nacrtani ili doradjeni CAD modeli dijelova 3-RPS manipulatora. Na slici 4.1 n) je preuzeti CAD model [3] spojke kojom je spojena osovina enkodera i osovina motora linearnog aktuatora. Prilikom izrade CAD modela potrebno je biti pažljiv jer je moguće izraditi modele koji bi bili vrlo skupi ili vrlo zahtjevni za izradu. Potrebno je imati na umu tehnologiju izrade kojom bi se novonastali dio izradio, kako bi se prilagodio tehnologiji, a opet ostao funkcionalan. Kako ovdje nije riječ o zahtjevnoj konstrukciji, ograničenje je jedino dimenzije revolucijskog zgloba. Ograničenje je u tome smislu kako tvrtka koja izrađuje dijelove nema manju prizmu na savijačici stoga je dio potrebno malo proširiti što ne mijenja funkcionalnost zgloba. Na slici 4.1 (f) – j)) prikazani su CAD modeli gotovih proizvoda odnosno dijelova koji se nisu izrađivali. Na slici 4.1 k) prikazana je spojka sfernog zgloba i klipnjače linearnog aktuatora. Spojka je dana na tokarsku izradu prema izrađenoj dokumentaciji. Na slici 4.1 m) je prikazan CAD model nosača enkodera. Najprije je potrebno razjasniti kinematičke veze te prema njima prilagoditi konstrukciju. Za konstrukciju je od velike važnosti raspored elemenata koji čine kinematički lanac. Na slici 4.2 prikazan je raspored revolucijskih zglobova ( $R_1, R_2$  i  $R_3$ ), a na slici 4.3 prikazan je raspored sfernih zglobova ( $S_1, S_2$  i  $S_3$ ). Na slici 4.4 prikazani je sklop svih sastavnih dijelova 3-RPS manipulatora.



Slika 4.2. Raspored revolucijskih zglobova ( $R_1, R_2$  i  $R_3$ ) 3-RPS manipulatora



Slika 4.3. Raspored sfernih zglobova ( $S_1, S_2$  i  $S_3$ ) 3-RPS manipulatora



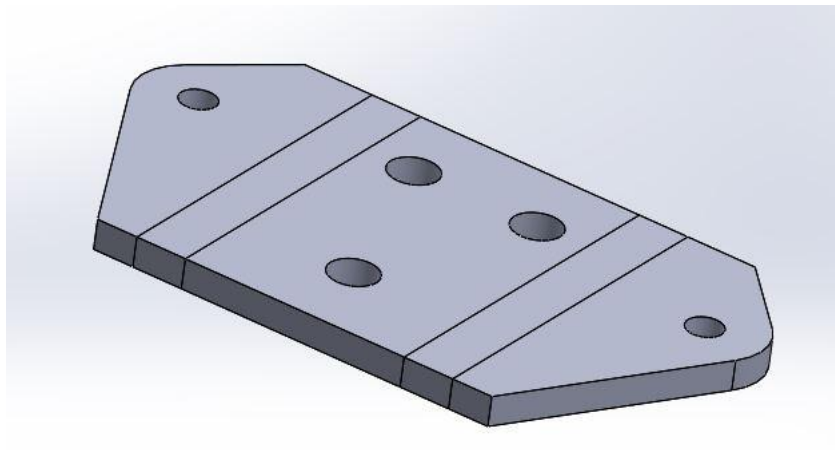
Slika 4.4 Sklop svih sastavnih dijelova 3-RPS manipulatora

## 5. IZRADA 3-RPS MANIPULATORA I PLATFORME ZA MJERENJE SILE

Na slici 4.1 (a) – e), te k) i l)) prikazani su CAD modeli prema kojima se nakon modeliranja te sastavljanja sklopa izrađuje dokumentacija za izradu dijelova. Zamišljena je izrada dijelova od lima debljine 5mm. Dijelove je izradila tvrtka Hittner d.o.o.

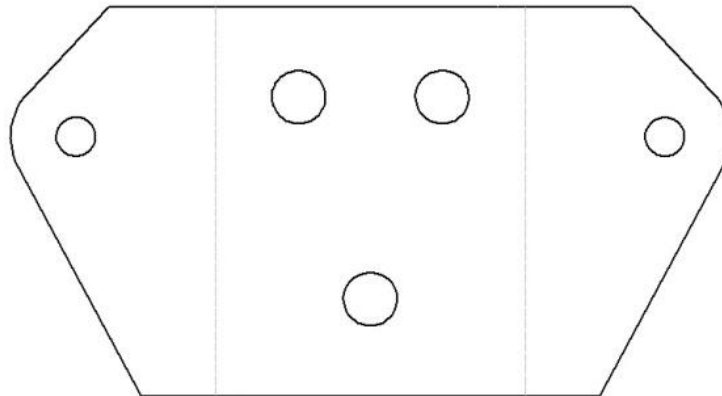
### 5.1 Izrada konstrukcijskih dijelova od lima

U programskom alatu *SolidWorks* potrebno je generirati dokumentaciju za izradu dijelova. Korištenjem alata *Sheet Metal* te naredbom *Bends* dobiju se izgled i dimenzije komada od ravnog lima prije savijanja. Rezultat ovog postupka vidljiv je na slici 5.1. Na slici je prikazan revolucijski zglob izrezan iz lima debljine 5mm prije savijanja. Na slici 4.1 a) prikazan je revolucijski zglob nakon savijanja.



Slika 5.1 CAD model revolucijskog zgloba prije savijanja

Izrađuje se dokumentacija s ekstenzijom \*.dxf. Na slici 5.2 je dan primjer dxf formata za izradu revolucijskog zgloba. Taj format pogodan je za obrađivanje materijala plazma rezačem. Nakon što se izrežu komadi te se naprave potrebni provrti prema dokumentaciji, komadi se dalje savijaju.



Slika 5.2 Crtež dxf formata za izradu revolucijskog zgloba

## 5.2 Izrada nosača enkodera i odstojnika

Nosač enkodera je printan na 3D printeru od ABS materijala. Korišten je printer marke MakerBot, model Replicator 2X. Prilikom hlađenja materijala nakon printanja dolazi do sakupljanja odnosno promjena dimenzija. Potrebno je to uzeti u obzir te korigirati dimenzije. Dimenzije su preuzete iz tehničkog opisa enkodera [4]. Nosač je nacrtan, isprintan i isproban. Nakon što je utvrđen zadovoljavajući rezultat, dodane su manje promjene u izgledu nosača te su isprintani svi nosači. Na slici 5.3 je prikazano printanje nosača enkodera.



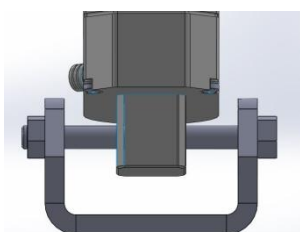
Slika 5.3. Printanje nosača enkodera

Na slici 5.4 je prikazan jeisprintan nosač enkodera. Nosač je montiran na linearni aktuator te je pričvršćen enkoder.

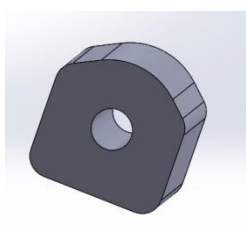


Slika 5.4. Isprintani nosačenkodera

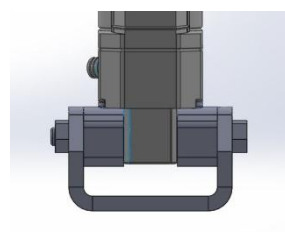
Kako je napomenuto u poglavlju 4, zbog ograničenja prilikom savijanja na savijačini je moguće savinuti revolucijske zglobove na željenu mjeru. Potrebno je isprintati odstojnike koji će popuniti veliku zračnost između prihvatila linearnog aktuatora te revolucijskog zgloba. Odstojnici se naknadno izrađuju prema potrebnim mjerama. Kako su revolucijski zglobovi izrađeni s odstupanjem od 1.5mm od zadane mjere, upravo s odstojnicima se korigira zračnost kako ne bi došlo do smanjenja krutosti sklopa zbog pomicanja aktuatora po osi koja nije predviđena za gibanje. Na slici 5.5 prikazan je postupak povećanja krutosti revolucijskog zgloba.



a) CAD model  
revolucijskog  
zglob



b) CAD model  
odstojnika



c) CAD model  
revolucijskog zglob  
a s odstojnikom



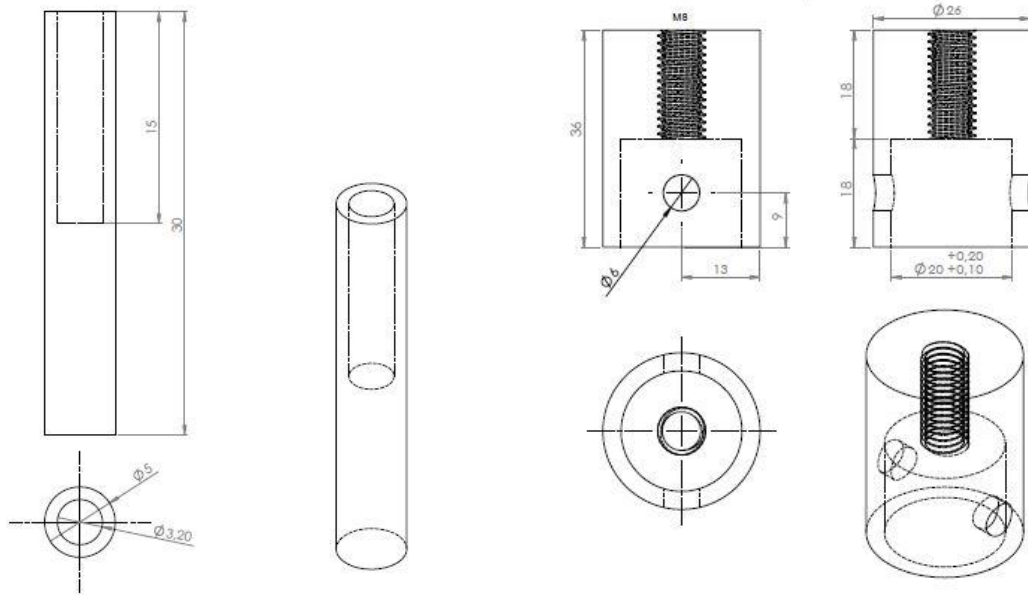
d) Fotografija  
revolucijskog zgloba  
s odstojnikom

Slika 5.5. Povećanje krutosti revolucijskog zgloba

### 5.3 Izrada dijelova tokarenjem

Postupkom tokarenja oblikovana su dva komada. Na slici 4.1 k) prikazana je spojka sfernog zgloba i klipnjače linearnog aktuatora, a na slici 4.1l) prikazana je spojka osovine motora linearnog aktuatora i osovine enkodera. Na slici 5.6 a) prikazan je nacrt

spojkemotora i enkodera prema kojem se izrađuje spojka, a na slici 5.6 b) prikazan je nacrt spojke aktuatora i sfernog zgloba.



a) Nacrt spojke osovine motora i enkodera

b) Nacrt spojke sfernog zgloba i aktuatora

Slika 5.6. Nacrti tokarenih dijelova

#### 5.4 Spajanje osovine motora s osovinomenkoderom

Osovinu rotora linearnog aktuatora potrebno je bilo produžiti izvan kućišta motora kako bi se na nju spojio enkoder. Osmišljen je način spajanjem dodatne spojke na osovinu. Na poklopcu motora nalazi se kućište ležaja rotora. Na tom mjestu ostvaren je spoj osovine motora i spojke koja prenosi vrtnju izvan kućišta. Nastao je zahtjev za izborom ležaja koji bi zadovoljio uvjete dimenzija kućišta starog ležaja kako ne bi bilo potrebe za dodatnom strojnom obradom kućišta motora. Pronađen je nestandardan, ali odgovarajući ležaj te prilikom testiranja prijenosa vrtnje spoj je dao zadovoljavajuće rezultate.





a) Rotor motora  
linearnog akuatora



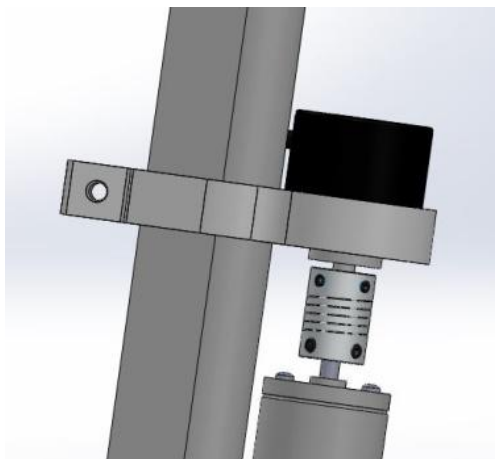
b) Stezni spoj spojke i  
osovine rotora



c) Novi ležaj na spojki

Slika 5.7. Princip spajanja osovine motora s osovinom enkodera

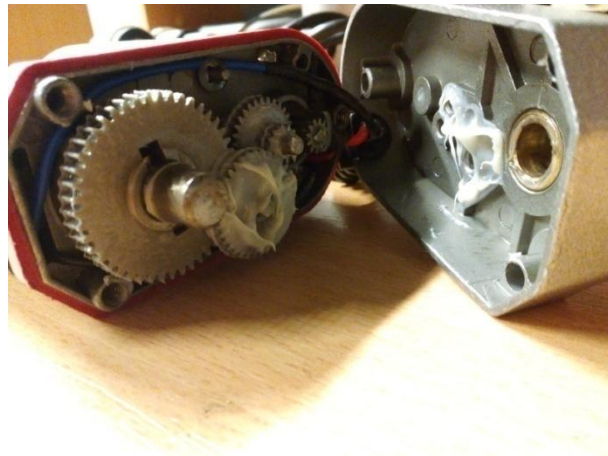
Na slici 5.7a) prikazan je rotor motora linearnog akuatora. Na donji dio osovine ispod komutatora navučenje zupčanik koji goni zupčani prijenos ispod motora. Na gornjem dijelu osovine je ležaj kako bi rotor bio uležišten. Ležaj je skinut te je ostvaren čvrsti dosjed spojke i osovine, što je vidljivo na slici 5.7 b). Na slici 5.7 c) vidljiv je novi ležaj koji je stavljen na mjesto staroga. Kroz provrt na poklopcu motora izlazi spojka izvan kućišta. Spoj između spojke koja povezuje rotor motora s osovinom enkodera pomoću elastične spojke prikazan je na slici 5.8.



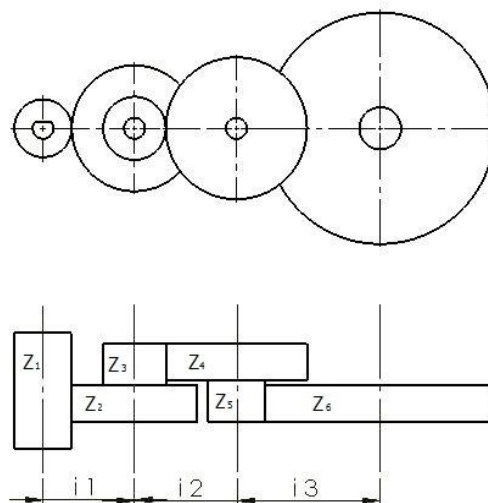
Slika 5.8. Spoj enkodera i motora

#### 5.4.1 Proračun prijenosnog omjera linearnog aktuatora

Zupčanici su mehanički elementi koji prenose okretno gibanje odnosno okretni moment s jednog vratila na drugo. Prijenos se ostvaruje zahvatom zuba odnosno pomoću veze oblikom. Kod korištenog aktuatora prijenosnik je ostvaren s nekoliko čeonih zupčanika s ravnim zubima te nekoliko usporednih vratila. Zbog upravljanja pozicijom aktuatora potrebno je izračunati prijenosni omjer. Inkrementalni enkoder daje informaciju o broju okretaja motora. Kada se zna broj okretaja može se izračunati odnos okretaja i linearnog pomaka klipnjače aktuatora. Najprije je potrebno rastaviti aktuator i utvrditi princip prijenosa prijenosnika. Prijenosnik je prikazan na slici 5.9, a skica prijenosnika prikazana je na slici 5.10.



Slika 5.9. Zupčani prijenos linearnog aktuatora



Slika 5.10 Skica zupčanog prijenosa linearnog aktuatora

Za proračun je potrebno utvrditi broj zuba svakog pojedinog zupčanika u prijenosniku [5]. Osim te metode može se izmjeriti promjer odnosno polumjer, ali postoji mogućnost mjerne pogreške. Metodom brojanja zubaca dobije se najprecizniji izračun prijenosnog omjera. Prijenosni omjer računa se prema relaciji (6.1).

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (6.1)$$

gdje je:

- $i$  – prijenosni omjer,
- $Z_2$  – broj zuba gonjenog zupčanika,
- $Z_1$  – broj zuba gonjenog zupčanika.

Potrebno je izračunati prijenosni omjer između svaka dva usporedna vratila. Ukupni prijenosni omjer je umnožak svih pojedinih prijenosnih omjera prema relaciji (6.2). Svaki pojedini prijenosni omjer moguće je izračunati prema relacijama (6.3). Kada se svaki prijenosni omjer  $i$  supstituira pripadajućom relacijom dobije se relacija (6.4).

$$i = i_1 * i_2 * i_3 \quad (6.2)$$

$$i_1 = \frac{Z_2}{Z_1}, i_2 = \frac{Z_4}{Z_3}, i_3 = \frac{Z_6}{Z_5} \quad (6.3)$$

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} * \frac{Z_4}{Z_3} * \frac{Z_6}{Z_5} \quad (6.4)$$

## 5.5 Sastavljanje 3-RPS manipulatora

Nakon što se izrade i nabave svi potrebni dijelovi potrebno je sastaviti 3-RPS manipulare. Prije samog sastavljanja prethodi antikorozivna zaštita. Nakon bojanja limova, može se prionuti na sastavljanje. Sastavljanje se vrši prema CAD modelu. Svi dijelovi spojeni su vijcima i maticama. Za spajanje konstrukcije 3-RPS manipulatora korišteni su M8 vijci koji zadovoljavaju svojim svojstvima na naprezanje. Također su spojeni rastavljivim spojevima i revolucijski zglobovi s linearnim aktuatorom te klipnjača aktuatora sa spojkom sfernog zgloba. Tu su korišteni M6 vijci i matice zbog predefiniраниh zahtjeva odnosno promjer provrta na aktuatorima su 6.4mm. Nosač enkodera i

enkoderspojeni su vijcima M3, a nosač je pritegnut oko aktuatora sa M4 vijkom, što je prikazano na slici 5.8. Na slici 5.11 prikazani su sastavljeni 3-RPS manipulatori.



Slika 5.11 3-RPS manipulatori

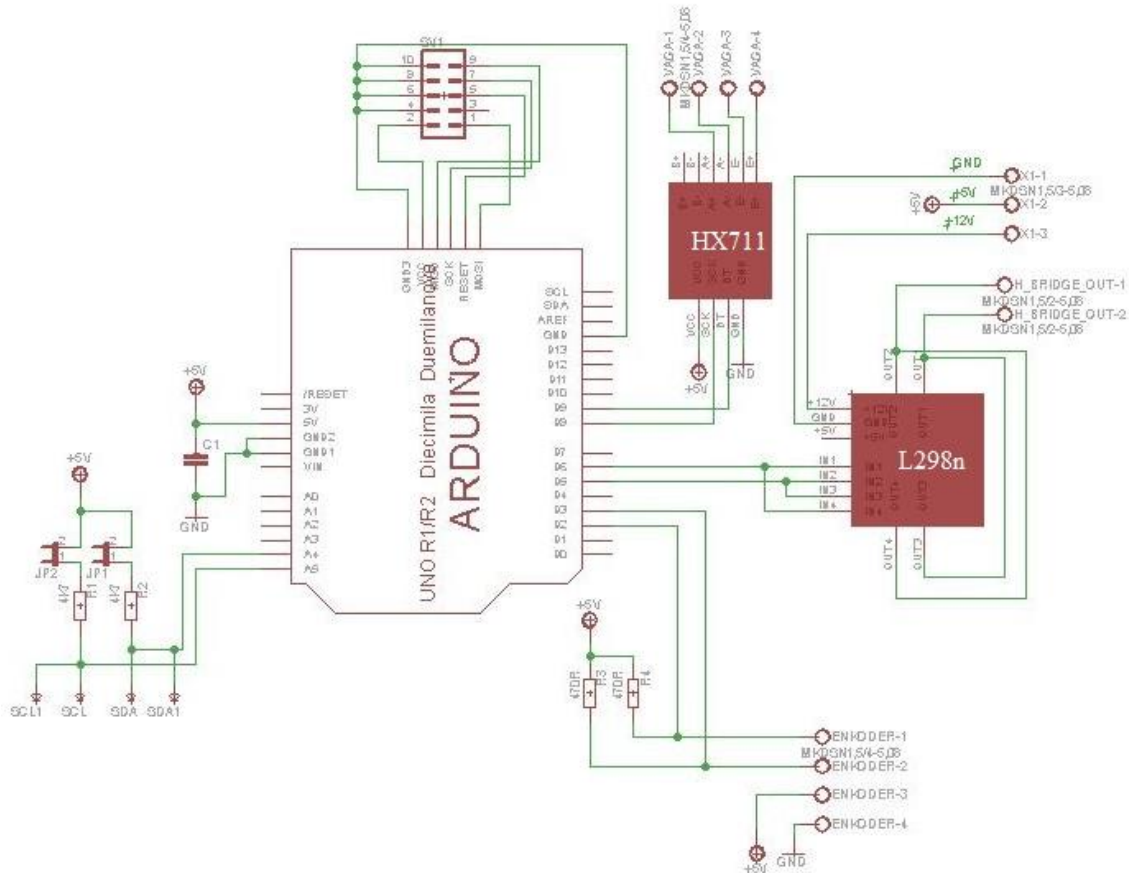
## **6. IZRADA UPRAVLJAČKE PLOČICE 3-RPS MANIPULATORA I PLATFORME ZA MJERENJE SILE**

U ovom poglavlju opisana je izrada upravljačke pločice 3-RPS manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile. Sustav upravljanja izveden je decentralizirano, odnosno s više modularnih pločica. Korištene su Arduino pločice zbog mogućnosti pristupa programiranju iz više aspekata. Mikrokontroleri na pločicama su programirani u programskome alatu Atmel Studio 6.2 u C jeziku, a osim toga mogu se programirati i u Arduinu. Nakon izrađene električne sheme pristupa se konstruiranju tiskane pločice. Nakon što se pločice konstruiraju izrađeni su gerberi odnosno datoteke za strojnu izradu pločica. Pločice su dane na izradu u tvrtku Markovac d.o.o. Na izrađene tiskane pločice montiraju se Arduino UNO pločice te L298n i HX711 moduli te konektori i elektroničke komponente.

### **6.1 Izrada električne sheme**

Svaka tiskana pločica sadrži Arduino UNO pločicu smikrokontrolerom ATmega328p. Osim toga, na pločici se nalazi HX711 analogno digitalni pretvornik s pojačalom te L298n H-most. Na pločicu je dodan keramički kondenzator 100nF. On se naziva blokadni jer blokira strujne "šiljke" koji se javljaju prilikom mijenjanja logičkih stanja mikrokontrolera. Trebao bi se postavljati što bliže komponenti koju štiti kako bi se smanjio parazitniinduktivitet tiskanih vodova. Enkoder je tipa otvorenog kolektora te su potrebni pritezni otpornici. Dodani su pritezni otpornici na podatkovne vodove enkodera vrijednosti 470 Ohma. Izbor te vrijednosti opisan je u poglavlju 6.3.2. Također su dodani pritezni otpornici tipične vrijednosti od 4.7 kOhma na SCL i SDA linije. To su linije za TWI komunikaciju. Pokraj otpornika dodani su kratkospojnici kako bi se na liniju mogao pritegnuti ili otpustiti pritezni otpornik. Za TWI komunikaciju potrebno je pritegnuti otpornik na samo jednoj od osam pločica. Ako se želi svaka pločica koristiti zasebno moguće je pritegnuti otpornik na podatkovnu i taktnu liniju preko kratkospojnika te nema potrebe za vanjskim spajanjem priteznog otpornika na za to potrebne pinove. Kako je TWI komunikacija podržana između više mikrokontrolerana pločicu su postavljena po dva konektora za svaku liniju. Zbog paralelne topologije povezivanja uređaja stavljen su dva konektora koja osiguraju čvorište odnosno nadovezivanje jedne pločice na drugu. Na pločicu su dodatno postavljeni 4-pinski konektori za enkoder i za senzor sile, 2-

pinskikonektor za priključak linearnog akuatora na pločicu te 3-pinski konektor koji napaja upravljačku elektroniku te senzorku s naponom iznosa 5V. Za potrebu programiranja mikrokontrolera na pločici je postavljen ISP konektor. Na slici 6.1 prikazana je električna shema pločice.



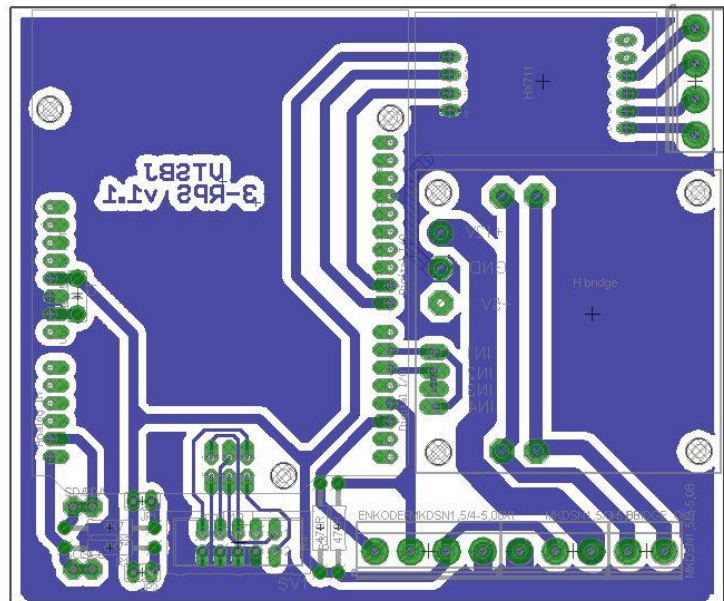
Slika 6.1. Električna shema upravljačke pločice

Mikrokontroler ima predefinirane pinove za TWI komunikaciju te pinove na kojima može generirati PWM signal. Isto tako ima pinove namijenjene za vanjske prekide. Za HX711 mogu se koristiti bilo koja dva digitalna pina. Jedino je bitno koristiti jedan određeni pin kao ulazni i jedan kao izlazni. L298n modul sastoji se od dva H-mosta. Vidljivo je na električnoj shemi ako su kratko spojeni izlazni pinovi H-mostova. Tako se može dobiti dvostruka struja (4 A) na izlazu jer svaki H-most može propustiti 2A [6], a akuatori zahtijevaju veći iznos struje. Kako programski alat Eagle 6.5.0 u svojoj biblioteci ne sadrži L298n i HX711 modul te Arduino UNO pločicu potrebno je stvoriti biblioteke. Eagle datoteka od Arduino UNO pločice preuzeta je sa službene stranice Arduina te je prema njoj stvoren Arduino UNO kao komponenta. Na simbolu nije ništa mijenjano, ali

konstrukcija pločice je izmijenjena kako bi bilo moguće jednostavno uklopiti Arduino pločicu u ovaj projekt. Preostala dva modula su iznova nacrtani.

## 6.2 Konstruiranje tiskane pločice

Tiskana pločica izrađena je u programskom alatu Eagle-u 6.5.0. Prilikom konstrukcije pločica potrebno je najprije utvrditi vrstu željene pločice. Moguće je izraditi dvoslojnu i jednoslojnu pločicu. U ovom slučaju, uzevši u obzir ne prevelik broj tiskanih vodova i cjenovnu razliku logično je izabrati jednoslojnu pločicu. Radi smanjenja cijene potrebno je svesti dimenzije pločice na minimum. Tome doprinosi pomno odabran raspored komponenata i modula na pločici. Osim toga, potrebno je voditi računa gdje se koja komponenta nalazi. U ovom slučaju briga se vodi oko položaja L298n modula jer na njegove ulazne pinove mikrokontroler generira PWM signal. Svi visokofrekventni signali bi trebali imati što kraće vodove zbog smetnji te parazitnog induktiviteta koji raste dužinom voda. Isto tako modul je smješten kako bi se hladnjak nalazio s vanjske strane pločice. Korišteni enkoder generira 360 impulsa po jednom okretu osovine te zbog relativno velike brzine vrtnje motora aktuatora generira se veliki broj impulsa u jedinici vremena. Signal kojeg generira enkoder je visokofrekventni. Također vodovi trebaju biti što kraći kako bi se smanjio rizik utjecaja smetnji na očitavanje pozicije. Najzahtjevniji vodovi su oni od HX711 modula. Na modul dolazi analogni signal sa senzora sile. Poznato je kako treba masom odvojiti analogne signale kako visokofrekventni digitalni signali ne bi unijeli smetnje na analogne signale. Također visokofrekventni signali su oni komunikacijski. TWI komunikacija je podešena na brzinu od 400 kHz. Nakon razmještenih modula na tiskanoj pločici razmještaju se komponente i konektori. Prema električnoj shemi konstruiraju se vodovi. Potrebno je imati na umu vrstu i snagu signala koji prolazi određenim vodom. Potrebno je energetske vodove dimenzionirati prema jakosti struje koja prolazi njima. Povećani su promjeri otočića konektora kako bi se ostvario što čvršći mehanički spoj konektora i pločice. Na slici 6.2 prikazana je konstruirana tiskana pločica.

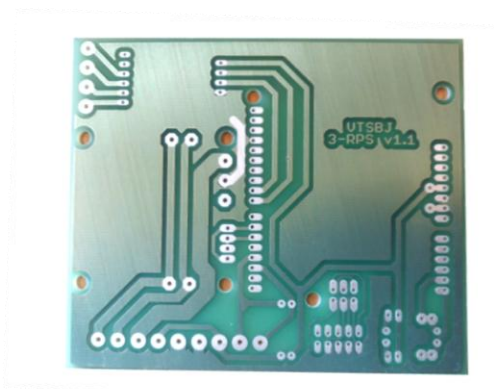


Slika 6.2. Konstruirana tiskana pločica

Nakon što se pločica iskonstruira pristupa se izradi gerbera za slanje u tvrtku koja će izraditi pločicu. Gerberi su datoteke s određenim *ekstenzijama* za izradu pločice. Potrebno je izraditi datoteke za rezanje rubova pločice, bušenje provrta, jetkanje nepotrebnog sloja bakra i stavljanje stop laka.

### 6.3 Lemljenje modula i komponenata na tiskanu pločicu

Nakon što se izrade tiskane pločice ili PCB (*eng. Printed Circuit Board*) leme se moduli i komponente na pločice. Na slici 6.3 prikazana je izrađena pločica.

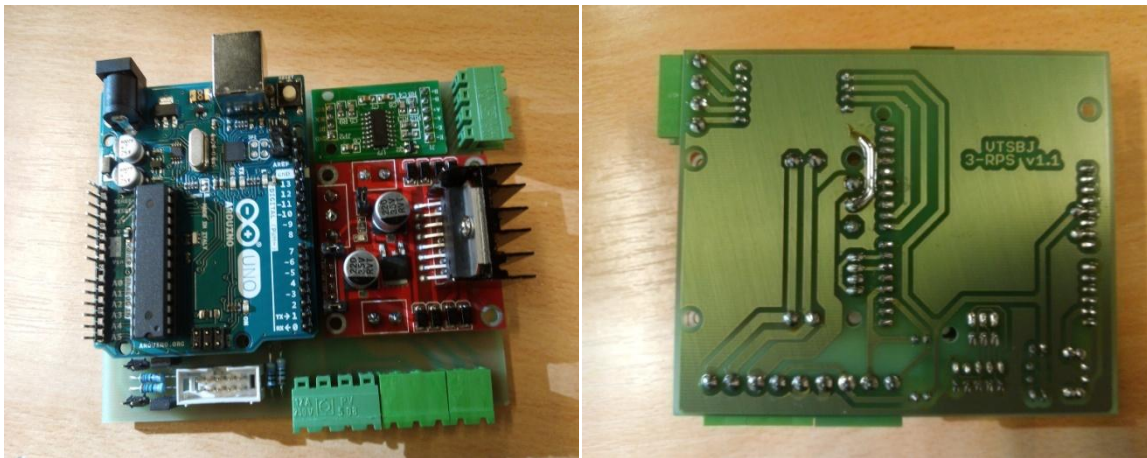


Slika 6.3. Izrađena tiskana pločica

Najprije se leme komponente na pločicu i to redom od najnižih prema višim komponentama. Kada se poleme otpornici i kondenzatori, slijede pinovi za Arduino pločica te HX711 modula. Sljedeći modul je L298n. Na samome kraju lemljeni su



konektori jer se nalaze uz rub pločice te im je pristup moguć i nakon svih zalemljenih komponenteata. Na slici 6.4 a) prikazana je gornja strana tiskane pločice, a na slici b) prikazana je donja strana.



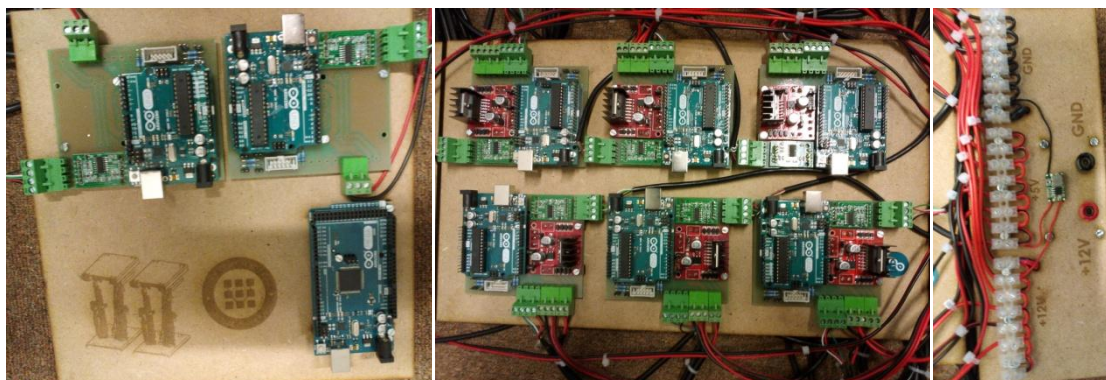
a) Gornja strana tiskane pločice

b) Donja strana tiskane pločice

Slika 6.4. Izgled polemljene tiskane pločice

#### 6.4 Sastavljanje upravljačke elektronike u cjelinu

Nakon što su sve pločice izrađene, spojene su vijcima na drvene pločice. Drvene pločice izrezane su laserskim rezačem. Tri su izrezane ploče. Prva pločica prikazana je na slici 6.5a). Na ovoj pločici nalazi se *master* mikrokontroler i dva *slave* mikrokontrolera koji samo očitavaju masu. Na slici b) prikazana je pločica sa šest *slave* mikrokontrolera, a na slici c) nalazi se pločica koja napaja upravljačke pločice s naponom napajanja iznosa 5 i 12 V. Kako bi se sve pločice povezale u jednu cjelinu korištena je TWI komunikacija.



a) Ploča sa  
*master* mikrokontrolerom  
i dva  
*slave* mikrokontrolera

b) Ploča sa  
šest *slave* mikrokontrolera

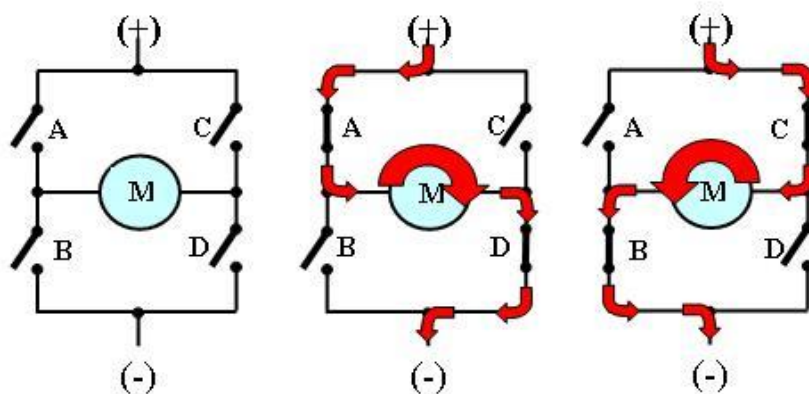
c) Energetska  
pločica

Slika 6.5. Upravljačka elektronika

## 6.5 Korišteni moduli na upravljačkim pločicama

### 6.5.1 L298N modul

Zbog male izlazne struje mikrokontrolera korišten je modul za pogon linearnih aktuatora. Korišteni su moduli L298n koji se sastoje od L298 čipa i perifernih komponenta za stabilizaciju napona i slično. L298 sastoji se od 2 H-mosta pomoću kojih se može upravljati koračnim motorom ili s 2 istosmjerna motora [6]. Svaki motor se upravlja zasebno (brzina vrtnje i smjer). Maksimalna struja koju čip može propustiti je iznosa 2A. Ovisno o opterećenju, aktuatori mogu „povući“ i veću struju od 2A, stoga su izlazi H-mostova spojeni u paralelu kako bi pri istome naponu mogli dati dvostruko veću struju odnosno 4A. Modul sadrži 4 ulazna pina (upravljački pinovi), 4 izlazna pina te pinove za napajanje naponom iznosa +12V, +5V i GND. Ovisno o kombinaciji logičkih stanja na ulaznim pinovima možemo pogoniti jedan ili oba izlaza. Ovisno o frekvenciji visokog i niskog stanja na ulazu možemo regulirati postotak ispunjenosti izlaznog signala, a samim time i brzinu vrtnje motora.

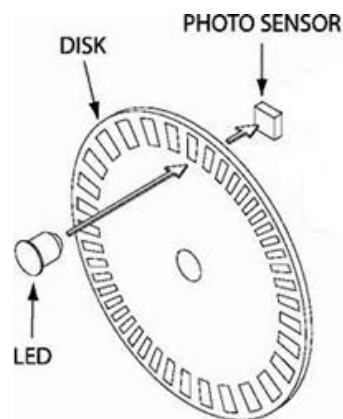


Slika 6.6. Princip rada H mosta [7]

Na slici 6.6 se jasno vidi princip rada H mosta. Kada su sve sklopke otvorene, motor je u praznom hodu. Ovisno o kombinaciji A i D ili C i B, mijenja se polaritet napona na stezaljkama motora. Važno je uočiti kako kombinacija otvorenih sklopki mora biti dijagonalna. Primjerice, ako bi bile otvorene sklopke A i C, a zatvorene sklopke B i D, kratko bi bile spojene stezaljke motora. Taj režim se naziva motorsko kočenje. Kada bi primjerice bile otvorene samo sklopke A i B, izvor napajanja bi bio kratko spojen. Uz neznatan otpor ovisno o vrijednosti napona potekla bi maksimalna struja. Također je jasno kako se upravlja koračnim motorom pomoću H mosta. Ovisno o frekvenciji propuštanja impulsa i sekvenci reguliramo brzinu i smjer.

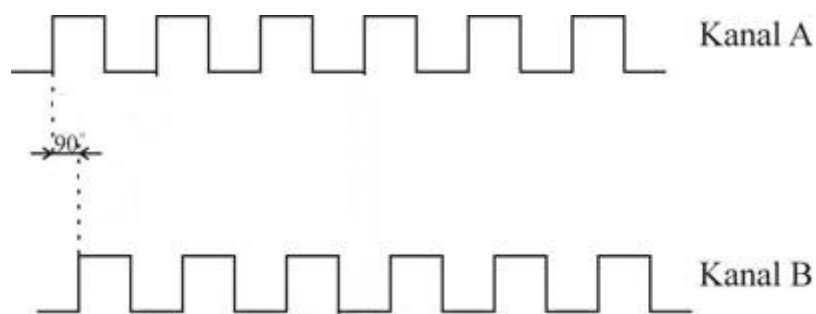
### 6.5.2 Inkrementalni enkoder

Postoje dvije vrste enkodera. To su apsolutni i inkrementalni enkoderi. Apsolutni enkoder na svom izlazu daje trenutnu poziciju. Izvedba apsolutnog enkodera je nešto kompliciranija od inkrementalnog. Prilikom gubitka napajanja inkrementalni enkoder gubi podatak o trenutnoj poziciju. U tom slučaju apsolutni enkoder ne gubi informaciju o trenutnom položaju zbog svoje izvedbe. Kod njega se javlja problem prilikom prelaska stanja za vrlo precizne sustave. Taj problem riješen je uvođenjem Grayovog koda kod kojeg se trenutno stanje od prethodnog ili sljedećeg razlikuje za samo jedan bit [8]. To dodatno zahtjeva mehanizam za pretvorbu Grayovog koda u binarni. U ovom radu korišten je inkrementalni enkoder. On daje poziciju u odnosu na početno stanje prilikom početka napajanja. Sastoji se od dva para foto izvora i foto detektora te rotirajućeg diska koji sadrži zareze po obodu. Prilikom rotacije diska naizmjenice ne propušta i propušta izvor svjetlost [9]. Na slici 6.7 prikazan je princip rada inkrementalnog enkodera.



Slika 6.7. Princip rada inkrementalnog enkodera

Te promjene prima foto detektor. Enkoder sadrži dodatno sklopovlje koje pretvara signal s detektora u pravokutni signal. Zbog dva photo para dobiva se informacija o smjeru jer su fizički razmaknuti kako signali s njih ne bi bili u fazi. Razmaknuti su za  $90^\circ$  te se svaki signal šalje po svome zasebnom kanalu. Na slici 6.8 prikazan je izgled impulsa inkrementalnog enkodera.



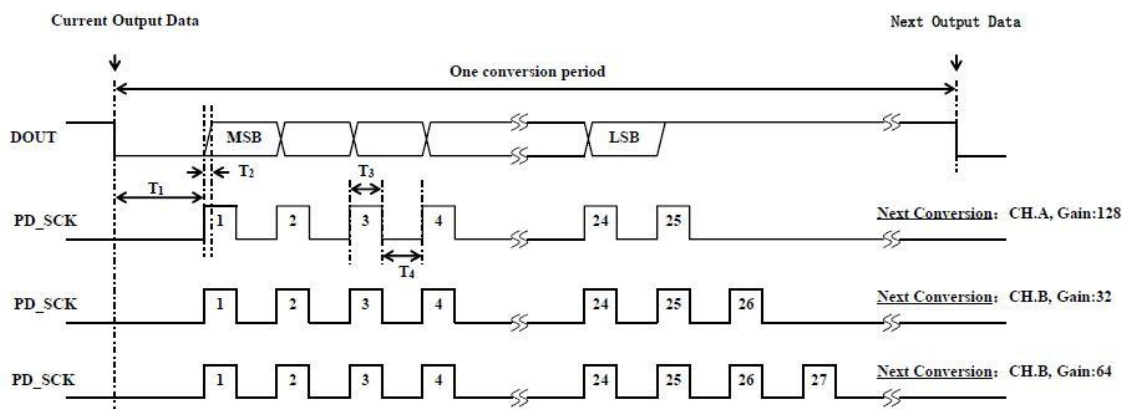
Slika 6.8. Izgled impulsa inkrementalnog enkodera

Enkoder se spaja na pin namijenjen za vanjske prekide. Brojanje impulsa izvodi se u prekidnim rutinama, a kao rezultat se dobije pozicija linearnog aktuatora. Pošto je korišteni enkoders izlazom tipa otvorenog kolektora potreban je pritezni otpornik kako bi mikrokontroler jasno razabrao visoko i nisko stanje. Izabrana vrijednost priteznog otpornika je 470 Ohm.

### 6.5.3 HX711 – Analogno-digitalni pretvornik s pojačalom

HX711 je precizni 24-bitni analogno-digitalni pretvornik namijenjen za senzore sile korištene u sustavima automatizacije. Senzori sile sadrže mjerne mostove koji se dovode u neravnotežu prilikom opterećenja modula. Na HX711 modulu korišten je diferencijalni kanal A koji ima razlučivost  $\pm 20\text{mV}$ . Kako je izlazni signal s mjernog mosta vrlo mali, čip sadrži pojačalo te nakon pojačanja signala izvršava ADC pretvorbu. Modul s mikrokontrolerom komunicira putem dva pina. PD\_SCL je pin na kojem HX711 dobiva takt koji mikrokontroler generira. Drugi korišteni pin je DOUT. Preko njega HX711 šalje mjerni rezultat mikrokontroleru. Komunikacija kojom modul komunicira ne spada ni u jedan standard [10].

Na slici 6.9 prikazan je princip komuniciranja s mikrokontrolerom te su u tablici 4.1 zadana vremena određenih akcija.

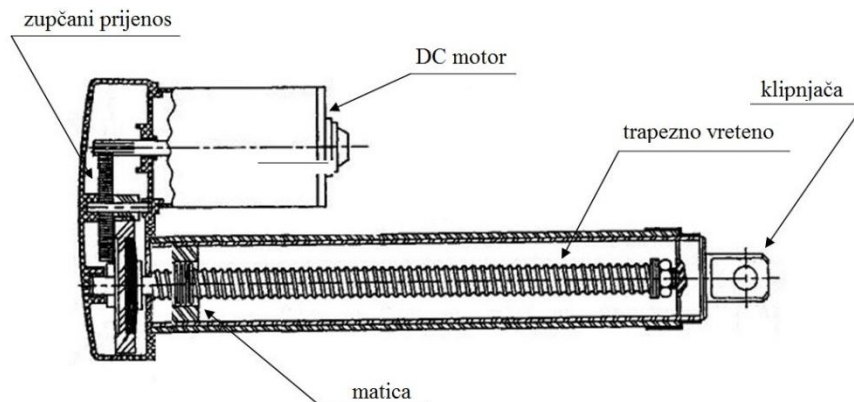


Slika 6.9. Izgled komunikacije između HX711 modula i mikrokontrolera [10]

Kada izlazni podatak nije spreman, DOUT je u visokom stanju, a PD\_SCK u niskom te nakon što DOUT padne u nisko stanje podatak je spreman za slanje odnosno HX711 je očitao vrijednost s mjernog mosta, pojačao je i pretvorio signal u digitalan zapis koji prosljeđuje mikrokontroleru. Kada je podatak spreman za slanje, mikrokontroler generira od 25 do 27 impulsa na PD\_SCK pin. Na svaki generirani impuls, pin HX711 odgovara na DOUT sabirnici. Čitanje toga podatka se temelji na prepoznavanju visokog ili niskog stanja na DOUT sabirnici prilikom svakog taktnog impulsa na PD\_SCK sabirnici. Svaki takt mikrokontroler upiše vrijednost DOUT u svoju memoriju te pomakne memorijsku adresu upisa bita u određenoj varijabli.

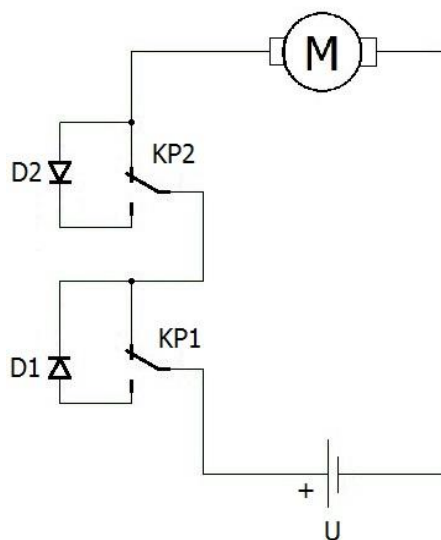
#### 6.5.4 *Linearni aktuator*

Linearni aktuator je elektro-mehanički uređaj koji pretvara električnu energiju u mehaničku. Naziv linearni je dobio jer svojom mehaničkom vezom pretvara rotaciju elektromotora u linearan pomak klipnjače. Korišteni aktuator napaja se istosmjernim naponom iznosa 12V. Aktuator može gurati silom 1500N odnosno vući silom 1200N. Maksimalna brzina linearnog pomaka je svega 5.7mm/s. Radni hod linearnog aktuatora je 150mm. Sastoji se od istosmjernog motora s četkicama, zupčane redukcije te trapeznog navojnog vretena. Na slici 6.10 prikazana je skica linearnog aktuatora.



Slika 6.10. Skica linearnog aktuatora

Kao osiguranje od zaleta klipnjače u konstrukciju aktuatora korišten je spoj s diodama paralelno spojenim s krajnjim prekidačima. Kada klipnjača aktuatora ide prema gore i dođe do kraja aktivira se krajnji prekidač KP2. On je normalno zatvorenog tipa. Kada se prekidač aktivira prekine strujni krug kako ne bi došlo do oštećenja aktuatora. Poredna dioda D2, koja je paralelno spojena, omogućuje reverzni tok energije odnosno spuštanje klipnjače. Isti princip zaštite je i na donjoj strani aktuatora. Električna shema prikazana je na slici 6.11.



Slika 6.11. Električna shema osiguranja linearnog aktuatora od oštećenja

## 7. IZRADA UPRAVLJAČKOG PROGRAMA ZA 3-RPS MANIPULATOR I POMIČNU PLATFORMU ZA MJERENJE SILE

Program za upravljanje 3-RPS manipulatorom napisan je u programskom jeziku C. Korišten je programski alat *Atmel Studio* 6.2. Pomoću programa *eXtreme Burner*, program je snimljen na mikrokontrolere. U sljedećim potpoglavljima opisani su korišteni resursi mikrokontrolera. Kako je korišteno više mikrokontrolera, sustava se svodi na glavni upravljački mikrokontroler i izvršne mikrokontrolere. Odnosno topologija sustava jest jedan *master* mikrokontroler i osam *slave* mikrokontrolera. *Master* mikrokontroler je ATmega2560, a osam *slave* mikrokontrolera su ATmega328p. Ideja je imati *master* mikrokontroler koji prikuplja podatke serijskom komunikacijom sa računala te ih prosljeđuje ostalim mikrokontrolerima preko TWI komunikacije. *Slave* mikrokontroler dobiva podatak o željenoj poziciji linearnog aktuatora kojim upravlja te vraća preko iste komunikacije podatak o trenutnoj poziciji. *Master* mikrokontroler prikuplja informacije o poziciji te ponovno preko serijske komunikacije prosljeđuje informaciju računalu. Osim pozicije, *master* mikrokontroler sa *slave* mikrokontrolera prikuplja podatke sa senzora sile. Najvažnije stavke kod izbora mikrokontrolera za ovaj projekt jesu radna frekvencija, broj ulazno-izlaznih pinova, podržana komunikacija, broj PWM izlaza te broj vanjskih prekida i veličina *flash* memorije.

### 7.1 Univerzalna asinkrona serijska komunikacija

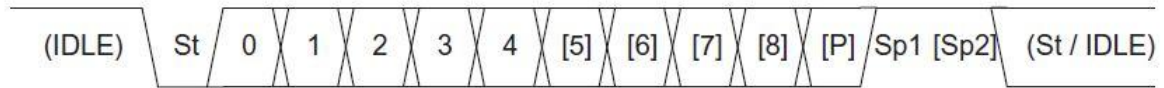
UART (eng. *Universal Asynchronous serial Receiver and Transmitter*) je hardverski sustav ugrađen u mikroračunalo [11]. Zahvaljujući tom protokolu moguće je ostvariti komunikaciju između dvaju TTL ili CMOS sklopova odnosno:

- mikroračunalo ⇔ mikroračunalo,
- mikroračunalo ⇔ TTL i
- mikroračunalo ⇔ PC računalo.

UART karakterizira [11].:

- *Full Duplex* način,
- generator brzine visoke razlučivosti,
- mogućí 5, 6, 7, 8 ili 9-bitni podatkovni prijenos,
- 1 ili 2 stop bita,

- prepoznavanje početka komunikacije preko unutarnjeg prekida,
- sadrži mehanizam za otklanjanje šumova te digitalni niskopropusni filter i sklopovlje za kontrolu pariteta te u slučaju pogreške setira poseban *flag*.



Slika 7.1.Podatkovni okvir UART komunikacije [13]

Na slici 7.1. prikazan je podatkovni okvir gdje su:

- **IDLE** logički visoko stanje sabirnice,
- **St** start bit,
- **0 – 8** podatkovni bitovi,
- **P** paritetni bit,
- **Sp1 i Sp2** stop bitovi.

Logičko nisko stanje označava početak komunikacije. Nakon početnog bita slijedi MSB (eng. *Most Significant Bit*) te preostali podatkovni bitovi sve do LSB (eng. *Last Significant Bit*). Slijedi paritetni bit ako je uključen te ovisno o danim postavkama 1 ili 2 stop bita [11]. Nakon toga je sabirnica ponovno u visokom stanju sve do ponovnog start bita. U programu su korištene biblioteke za UART komunikaciju. U krajnjoj verziji projekta UART komunikacija koristi se na *master* mikrokontroleru, a na *slave* mikrokontrolerima se koristila komunikacija prilikom provjeravanja programskog koda i otklanjanja grešaka. Korištena je brzina prijenosa 19200 b/s, 8 podatkovnih bitova te 1 stop bit.

## 7.2 Two wire Interface

TWI komunikacija koristi se za razmijenu podataka između *mastera* i *slaveova*. Upravo ta komunikacija zahtjeva tu topologiju sustava.

### 7.2.1 TWI karakteristike

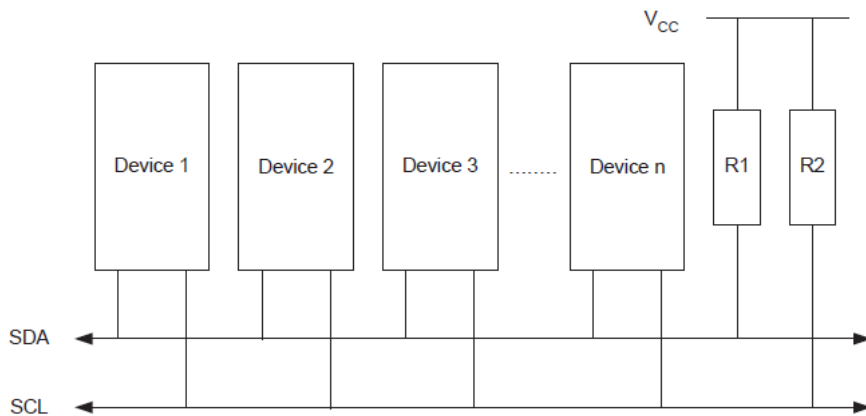
- Jednostavno, moćno i fleksibilno komunikacijsko sučelje,
- potrebno su samo dvije sabirnice,
- podržava uređaje definirane kao *Master* ili *Slave*,
- uređaj može raditi kao odašiljač ili prijemnik podataka,



- 7-bitni adresni prostor omogućuje do 128 različitih slave adresa,
- brzina prijenosa podataka do 400 kHz,
- sadrži mehanizme za suzbijanje smetnji na sabirnicama i
- moguće pokretanje mikrokontrolera iz stanja mirovanja.

### 7.2.2 *Općenito o TWI*

TWI komunikacija je kompatibilna s *Philips* I2C protokolom [11]. Omogućuje jednostavnu, robusnu i efektivnu komunikaciju između integriranih krugova u elektronici. Moguće je spojiti do 128 Slave uređaja na mrežu te više *Master* uređaja. U većini mikrokontrolera porodice *Atmel* uključeno je fizičko sklopovlje za TWI komunikaciju. Obično se koriste dva načina rada koja se razlikuju po brzini prijenosa podataka. Standardni (100 kbps) i brzi način rada (400 kbps). Sadrži dvije sabirnice. Sabirnica za takt (SCL) i podatkovna sabirnica (SDA). Jedino vanjsko sklopovlje potrebno za komunikaciju su pritezni otpornici na sabirnicama. Na slici 7.2 prikazana je topologija TWI komunikacije.

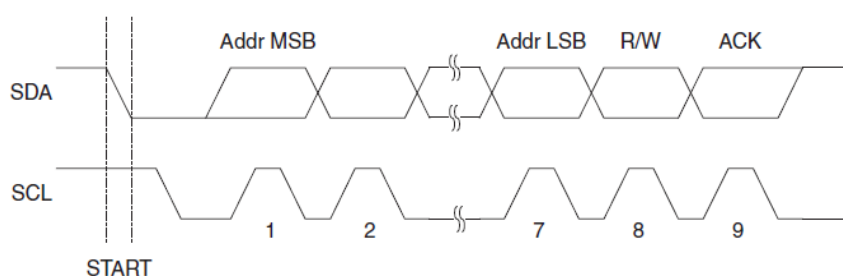


Slika 7.2. Topologija TWI komunikacije [14]

### 7.2.3 *Adresni paket TWI komunikacije*

Svi adresni paketi koji se prenose preko TWI komunikacije dugi su devet bita, a sastoje se od sedam adresnih bitova, jednog *READ / WRITE* upravljačkog bita i *ACK* odnosno *NACK* bita. Ako je *READ / WRITE* bit setiran, *Master* uređaj nakon poslane adrese, prima podatke, a ako je isključen onda šalje podatke. Kada *Slave* uređaj prepozna svoju adresu te primi ili pošalje podatak, priteže SDA sabirnicu u nisko stanje (*ACK*) u devetom SCL taktu. Ako je adresirani *Slave* mikrokontroler zauzet, ili iz nekog drugog razloga ne može

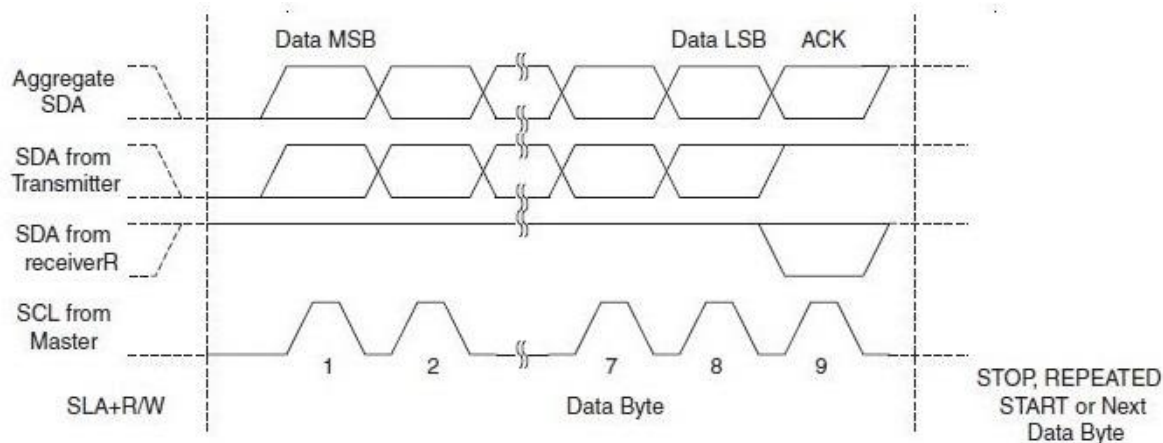
odraditi zahtjev *Master* mikrokontrolera, SDA linija treba ostati u visokom stanju u devetom SCL ciklusu odnosno u ACK ciklusu. *Master* mikrokontroler tada može objaviti stop stanje ili ponovljeno start stanje za pokretanje novog prijenosa. Adresni paket koji se sastoji od *Slave* adrese i *READ* ili *WRITE* bita naziva se *SLA + R* (eng. *Slave adress + Read*) odnosno *SLA + W* (eng. *Slave adress + Write*). *Slave* adrese se mogu slobodno dodijeliti, ali adresa 0000 000<sub>(b)</sub> rezervirana je za generalni poziv. Kad se objavi generalni poziv, svi *Slave* uređaji trebali bi odgovoriti povlačenjem SDA sabirnice u nisko stanje u ACK ciklus. Generalni poziv se koristi kada *Master* treba prenijeti istu poruku svim *Slave* uređajna TWI mreži [13]. Na slici 7.3 prikazan je izgled slanja adresnog paketa.



Slika 7.3. Izgled slanja adresnog paketa TWI komunikacije [14]

#### 7.2.4 **Podatkovni paket TWI komunikacije**

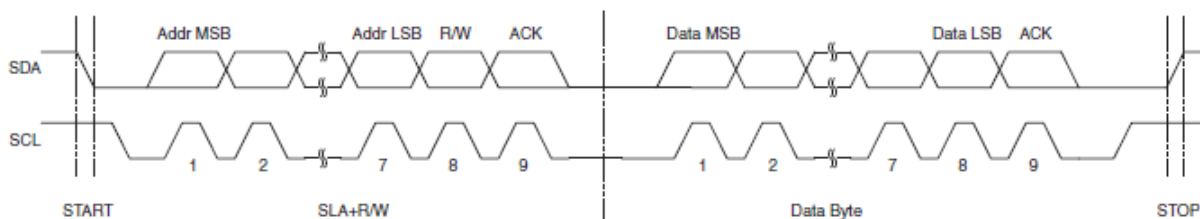
Svi paketi podataka koji se šalju TWI komunikacijom dugi su devet bita. Odnosno sastoje se od jednog podatkovnog bajta i ACK ili NACK bita. Na slici 7.4 prikazan je izgled podatkovnog paketa. *Master* uređaj objavljuje takt na SCL sabirnici, START i STOP stanje. Nakon što se prenese jedan bajt podatka, prijammnik signalizira odašiljaču uspješno ili neuspješno slanje podatka postavljajući SCL u devetom ciklusu u visoko ili nisko stanje. Odnosno aktiviranjem ACK bita, SDA sabirnica padne u nisko stanje [14].



Slika 7.4. Izgled slanja podatkovnog paketa TWI komunikacije [14]

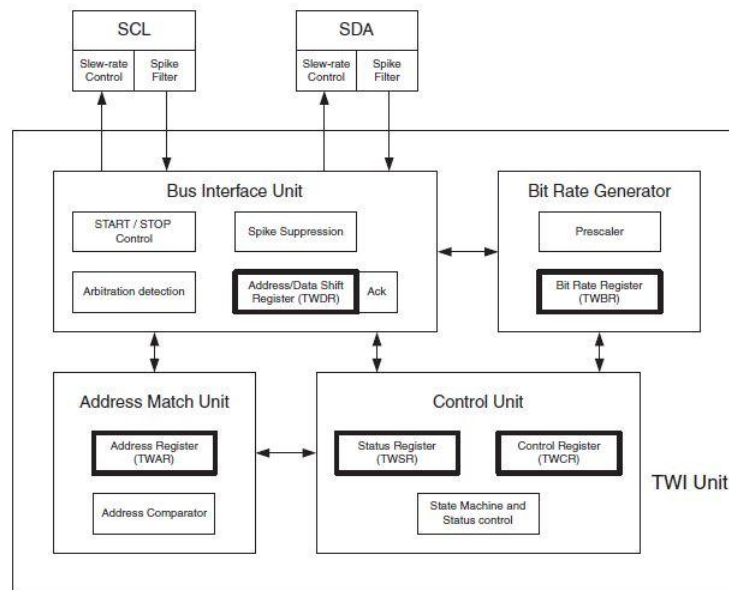
### 7.2.5 *Kombiniranje adresnog i podatkovnog paketa u prijenos*

Prijenos se u osnovi sastoji od stanja START, SLA + R / W, jednog ili više paketa podataka (bajtova) i STOP stanja. Prazna poruka, koja se sastoji od START, nakon čega slijedi STOP stanje je zabranjeno. Moguće je poslati START stanje, SLA + R, ponovljeno START stanje odnosno REPEATED START, SLA + W te STOP. *Master* uređaj može primiti podatak i odmah poslati podatak ili više njih prije STOP stanja. Jednako je i za primanje podataka [14]. Na slici 7.5 prikazano je slanje ili primanja podataka preko TWI komunikacije.



Slika 7.5. Princip slanja ili primanja podataka preko TWI komunikacije [14]

## 7.2.6 Pregled TWI modula



Slika 7.6 Pregled TWI modula [13]

SCL i SDA su ulazno-izlazni pinovi koji se koriste kod TWI komunikacija. Sadrže mehanizam za suzbijanje šiljaka odnosno smetnji kraćih od 50ns. Pinovi posjeduju kontrolu brzine protoka podataka što omogućuje komunikaciju na različitim brzinama prijenosa podataka. Pinovima je moguće uključiti unutarnje pritezne otpornike i u nekim slučajevima izbjeći potrebu za vanjskim priteznim otpornicima [15]. Kontrolira se takt na SCL sabirnici po postavkama u TWBR registru (*TWI Bit Rate Register*) i bitovima djelitelja frekvencije u TWSR registru (*TWI Status Register*). *Master* mikrokontroler generira takt na SCL sabirnici, a *Slave* mikrokontroler ne ovisi o *Bit Rate* ili *Prescaler* postavkama, ali frekvencija *Slave* uređaja mora biti najmanje 16 puta veća od SCL frekvencije. Moguće je zadati SCL frekvenciju pomoću relacije (7.1) ili preko tablice dane u literaturi [14]. Registri su postavljeni prema tablici odnosno kod radnog takta 8 MHz mikrokontrolera vrijednost u TWBR registru je 2, a u TWPS je nula kako bi SCL frekvencija bila 400 kHz.

$$SCL\ frequency = \frac{CPU\ Clock\ frequency}{16 + 2(TWBR) - 4^{TWPS}} \quad (7.1)$$

Adresna jedinica provjerava poklapa li se adresa *Slave* uređaja upisana u TWAR registar (*TWI Adress Register*) s primljenom 7-bitnom adresom. Ako je setiran bit TWGCE u

TWAR registru, adresna jedinica uspoređuje primljenu adresu sa *Slave* adresom i s adresom 0000 0000<sub>(b)</sub>. Ta adresa je adresa generalnog poziva odnosno TWGCE bitom omogućuje se primanje generalnog poziva. Generalni poziv mogu prepoznati *Slave* uređaji odjednom. Ako se podudara primljena adresa s adresom upisanom u TWAR registar, TWI nastavlja s daljnjom akcijom ovisno o osmom bitu, odnosno o *READ/WRITE* bitu. Adresna jedinica uspoređuje adrese i kada je mikrokontroler u stanju mirovanja. Ako je mikrokontroler u stanju mirovanja, adresiranjem se može prebaciti u stanje rada [15].

Upravljačka jedinica nadgleda TWI sabirnicu i generira odgovore ovisno o postavkama u TWCR registru (*TWI ControlRegister*). Kada aplikacija zahtjeva neki događaj setira se zastavica (eng. *Flag*) odnosno TWINT (*TWIInterrupt*) bit u TWCR registru. U sljedećem SCL taktu TWSR registar (*TWI Status Register*) se osvježi novim stanjem. TWSR sadrži statusne kodove koji ukazuju na trenutno stanje na TWI mreži [15]. TWINT bit je postavljen u sljedećim situacijama:

- nakon što TWI pošalje START/REPEATED START stanje,
- nakon što TWI pošalje SLA+R/W,
- nakon što TWI pošalje adresni bajt,
- nakon što TWI izgubi vezu,
- nakon što je TWI *Slave* adresiran ili je zaprimljen generalni poziv,
- nakon što TWI primi podatkovni bajt,
- nakon što je STOP ili REPEATED START stanje primljeno kada je još *Slave* adresiran i
- kada je došlo do pogreške zbog nedopuštenog START ili STOP stanja.

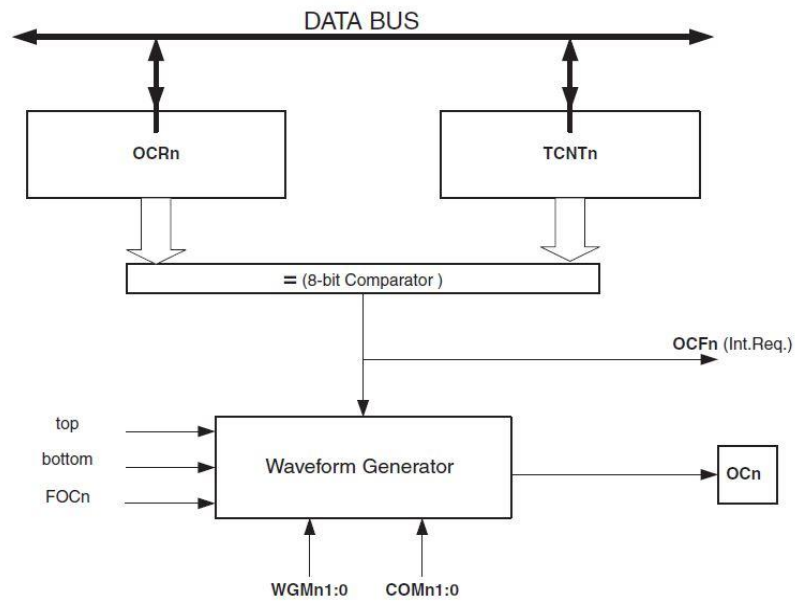
### **7.3 Vanjski prekidi**

Osim unutarnjih prekidnih rutina mikrokontroler sadrži i vanjske prekide. To su prekidi koji se događaju na rastući, padajući ili oba brida signala. Mikrokontroler ima točno određene pinove koji su namijenjeni za vanjske prekide te se na njih spajaju senzori (u ovom slučaju inkrementalni enkoder) [16]. Vanjski prekidi imaju velik značaj kada se koriste za detekciju krajnje pozicije. Prekid se događa neovisno o glavnom programu mikrokontrolera te kada se izvrši programski kod prekida, nastavlja se glavni program tamo gdje se stao izvoditi. Neovisno o glavnome programu, mikrokontroler stalno mora imati podatak o poziciji aktuatora. Taj podatak se dobiva pomoću enkodera. Enkoder ima dva kanala te su potrebna dva pina namijenjena za vanjske prekide kako bi se mogao

detektirati smjer vrtnje te pozicija. Oba prekida su podešena kako bi generirali zahtjev za prekidom na rastući brid signala.

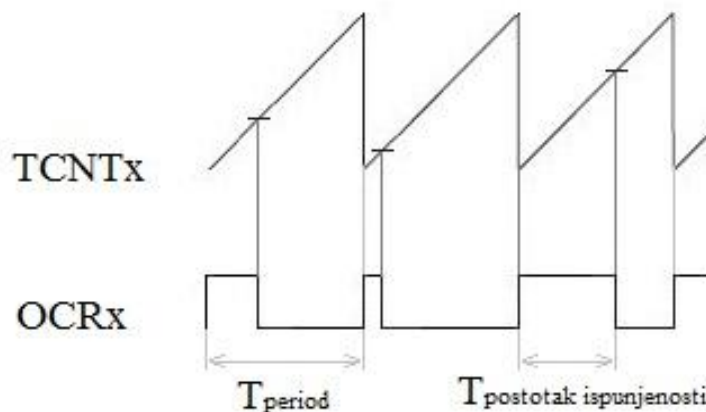
#### **7.4 Pulsnoširinska modulacija**

Pulsnoširinska modulacija ili skraćeno PWM (eng. *Pulse Width Modulation*) je tehnika kojom se regulira izlazni signal. Ima široku primjenu kod pretvarača, izmjenjivača, upravljanja električnim strojevima, regulacije intenziteta svjetlosti i slično [16]. Mikrokontroler može generirati PWM signal. To je signal kvadratnog oblika amplitude 5V (kod mikrokontrolera) kojem se može mijenjati period i postotak ispunjenosti perioda visokim odnosno niskim stanjem [12]. Tako se može regulirati efektivna vrijednost generiranog napona. PWM je korišten za upravljanje linearnim aktuatorima. Zbog relativno male izlazne struje mikrokontrolera korišten je driver za istosmjerni motor. Za driver se može koristiti samo nisko i visoko stanje, ali tada ne postoji nikakva regulacija brzine vrtnje motora. Prilikom zaustavljanja aktuatora u određenoj poziciji smanjuje se efektivna vrijednost napona te se tako uspori pogonski element aktuatora odnosno istosmjerni električni motor. Sustav je relativno trom, ali nije na odmet “gladak“ ulaz u zadanu poziciju. Time dobivamo na stabilnosti i preciznosti jer prilikom niskog stanja na motoru odnosno iskapčanja napajanja motor ne staje trenutno nego uslijed momenta vrtnje, osovinu motora se nastavlja rotirati sve dok otpor gibanju ne savlada sav moment. Ako taj moment prije iskapčanja smanjimo, bit će potrebno manje energije rotacije prenijet na otpor toj istoj rotaciji i time ćemo dobiti zaustavljanje motora u što bližoj točki tražene pozicije. Za upotrebu PWM-a na korištenim mikrokontrolerima bitna su dva registra. TCNTx (*Timer/Counter*) i OCRx (*Output Compare Register*). Jedinica mikrokontrolera koji služi za regulaciju PWM signala naziva se *Output Compare Unit*. Na slici 7.7 prikazan je blok diagram *Output Compare Unit-a*. *Output Compare Unit* sadrži 8-bitni komparator koji kontinuirano uspoređuje vrijednost TCNTx registra s vrijednosti upisanom u OCRx registar. Kada je TCNTx vrijednost jednaka vrijednosti OCRx registra, komparator signalizira poklapanje te u slijedećem taktom ciklusu postavi OCF zastavicu (*Output Compare Flag*). Ako su prekidi globalno omogućeni OCF zastavica se automatski briše kada se prekid izvede. To omogućuje novi prekid u zadanom trenutku. [12]



Slika 7.7. Blok diagram *Output Compare Unit*-a [12]

Generator valnog oblika koristi poklapanje vrijednosti TCNTx i vrijednosti upisane u OCRx registar za generiranje izlaznog signala što je prikazano na slici 7.8.



Slika 7.8. Utjecaj vrijednosti OCRx registra na postotak ispunjenosti PWM signla

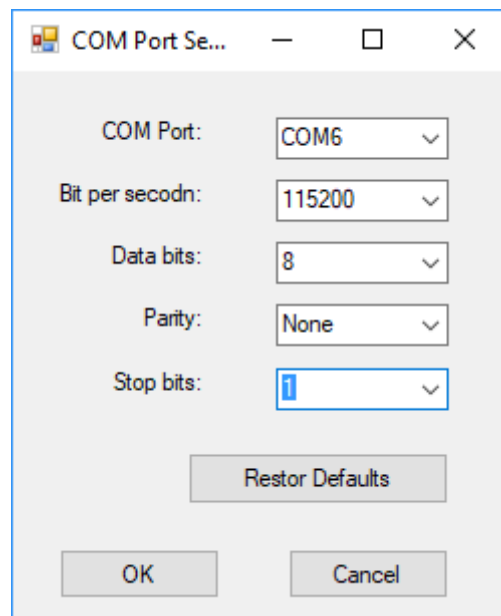
Korišten je normalan mod vremenskih brojača 0 i 1. Brojači su 8-bitni te broje od TCNTx vrijednosti koja je nula ako se ne podesi na drugu vrijednost pa do 255. Kada vremenski brojač izbroji do 255 ponovno pada u nulu. Korišten je *Fast PWM* način rada na oba PWM kanala te neinvertirajući oblik PWM signala. Korišten je dijelitelj frekvencije 1 odnosno frekvencija odgovara frekvenciji takta mikrokontrolera.

## 8. TESTIRANJE IZRAĐENIH 3-RPS MANIPULATORA S POMIČNOM PLATFORMOM ZA MJERENJE SILE

Nakon izrade 3-RPS manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile pristupa se testiranju. Potrebno je utvrditi točne pozicije svakog pojedinog aktuatora kako bi testirala točnost pozicioniranja. Također potrebno je testirati određivanja centra pritiska ljudskog stopala.

### 8.1 Testiranje pozicioniranja

Pozicioniranje je ostvareno u toleranciji  $\pm 2$  desetinke milimetra. Nakon što aktuator dođe u zadanu poziciju pomičnim mjerilom kontrolira se pozicija. Nakon utvrđenih zadovoljavajućih rezultata izrađena je aplikacija za ručno upravljanje aktuatorima. Aplikacija je nazvana *3-RPS manipulator control*. Kako *Master* mikrokontroler komunicira s računalom UART komunikacijom u aplikaciji je potrebno definirati postavke komunikacije. Na slici 8.1 prikazan je prozor za izbor parametara komuniciranja.

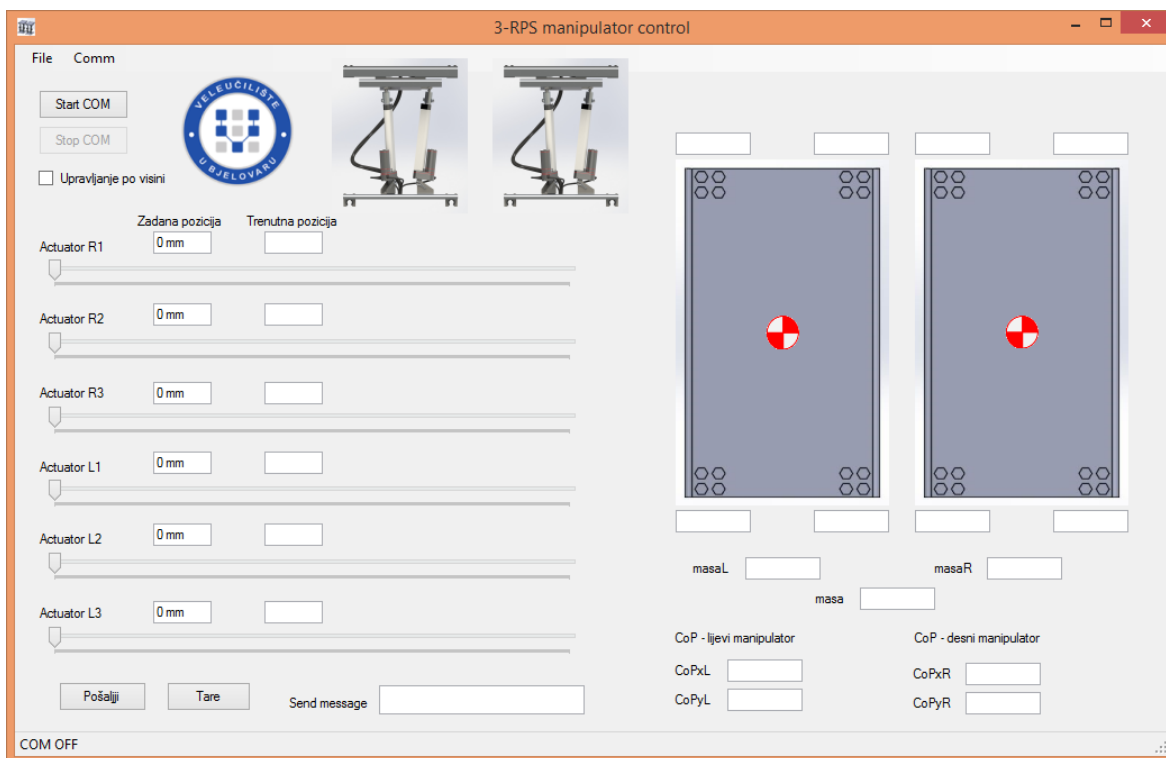


Slika 8.1. Izbor parametara UART komunikacije

Na slici je vidljivo korištenje porta 6 za komunikaciju. Brzina prijenosa podataka je 115200 bit/s. Šalje se jedan bajt, odnosno 8 bitova bez paritetnog bita te s jednim stop bitom. Na slici 8.2 prikazano je korisničko sučelje aplikacije. Aplikacija posjeduje klizače ograničene vrijednosti kako bi se na što lakši i intuitivniji način upravljalo svakim pojedinim aktuatorom. Pozicija svakog pojedinog aktuatora odabire se posebno kako bi



bilo moguće mijenjati kut pomične platforme. Kada se označi „Upravljanje po visini“ tada prvim klizačem upravljamo visinom ploče, ali tako da je ploča u horizontalnom položaju odnosno nije pod kutem. Kako bi se izmjerio centar mase ljudskog tijela upravo je potreban takav način pozicioniranja aktuatora.

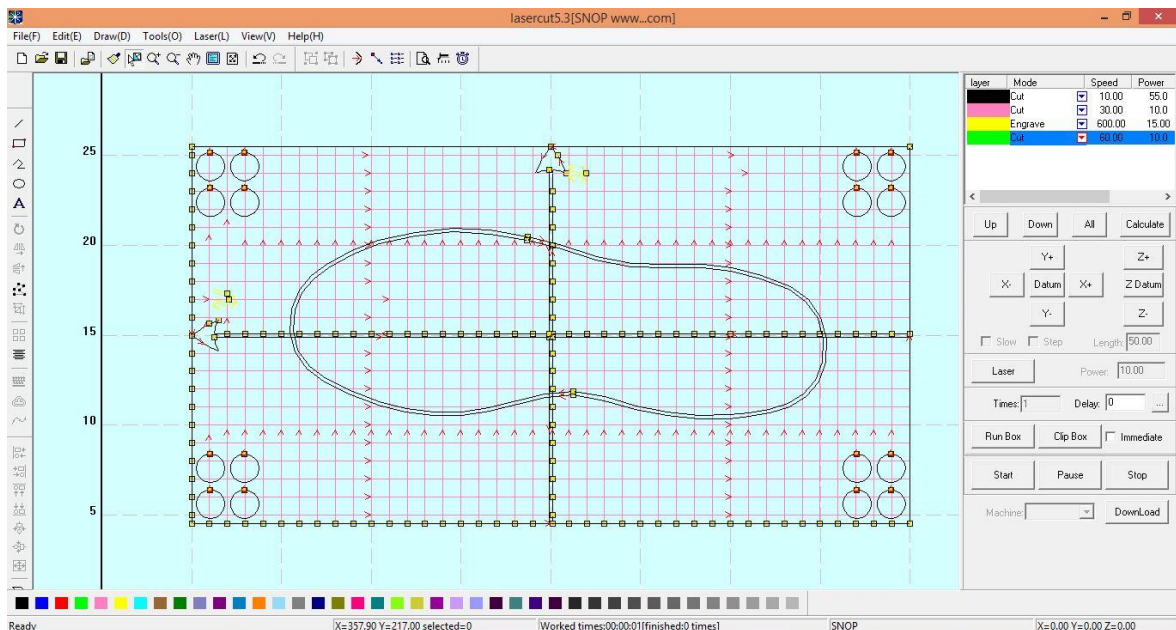


Slika 8.2. Korisničko sučelje *3-RPS manipulator control* aplikacije

## 8.2 Testiranje CoP-a

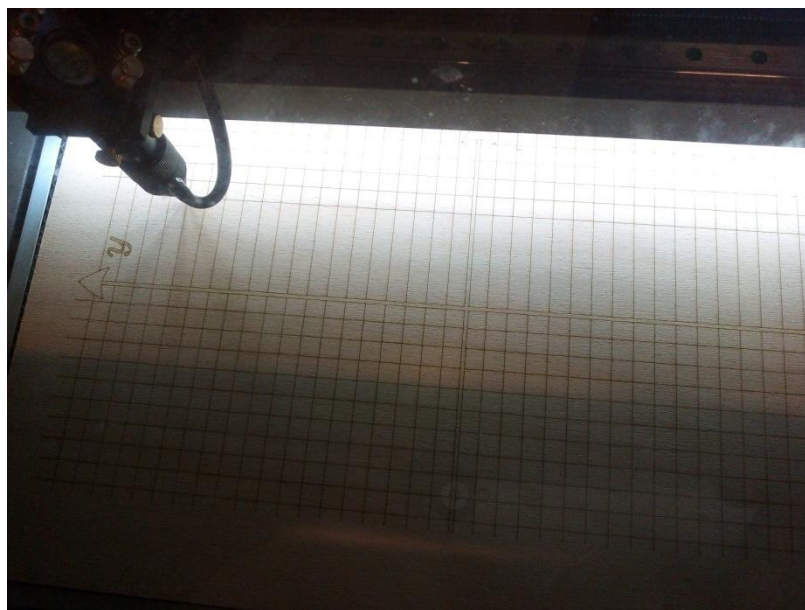
Na desnoj polovici aplikacije prikazane na slici 8.2 vidljiv je dio za određivanje CoP-a. Za određivanje je potrebno poznavanje mase u četiri točke. Kako se mjerenje izvršava u uglovima pomičnih platforma tako je i u aplikaciji određeno prikazivanje. U svakom tekstualnom okviru uz ugao platforme prikazuje se trenutno opterećenje senzora. MasaL i masaR je zbroj mase sa sva četiri senzora na svakoj platformi. Masa označuje ukupnu masu čovjeka koji se evaluira na 3-RPS manipulatorima. CoPx i CoPy za lijevu i desnu nogu računaju se prema relacijama (3.1) i (3.2). Testiranje CoP-a provedeno je pomoću pomoćnih ploča koje se nataknu na pomičnu platformu. Pomoćne ploče sadrže koordinatni sustav te je lako utvrditi ispravnost programskog određivanja CoP-a. Na slici 8.3 prikazani je crtež pomoćnih ploča za testiranje. Crtež je izrađen u programskom alatu AutoCAD te spremljen u dxf formatu. Nadalje crtež je učitao u program LaserCut čije je sučelje

prikazano na slici 8.3. Pomoćna ploča je oblikovana laserskom obradom. Crtež je potrebno nacrtati u nekoliko slojeva (eng. *layera*). U alatu LaserCut moguće je svakome sloju odrediti brzinu i snagu te način rada. Odnosno određuje se želimo li rezati ili gravirati. Kako bi mogli dobiti svjetlije i tamnije linije razdvojene su u slojeve te se prema želji povećava ili smanjuje snaga graviranja.



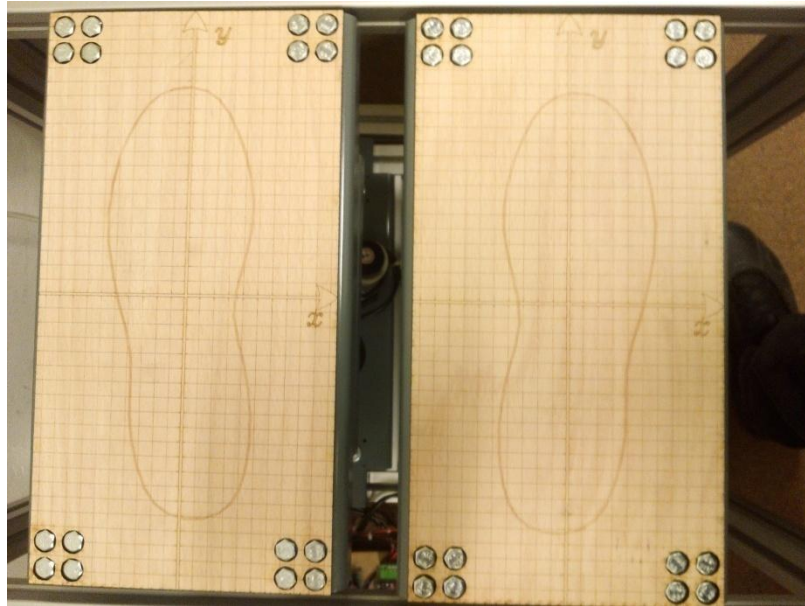
Slika 8.3. Crtež pomoćne ploče za testiranje programskog određivanja CoP-a

Iz šperploče debljine 4mm izrezan je oblik te provrta pomoćne ploče. Nakon rezanja slijedi graviranje koordinatnog sustava. Na slici 8.4 prikazan je postupak laserskog obrađivanja materijala.



Slika 8.4. Postupak laserskog obrađivanja materijala

Na slici 8.5 prikazane su izrađene ploče za testiranje CoP-a. Nakon testiranja utvrđeni su zadovoljavajući rezultati.

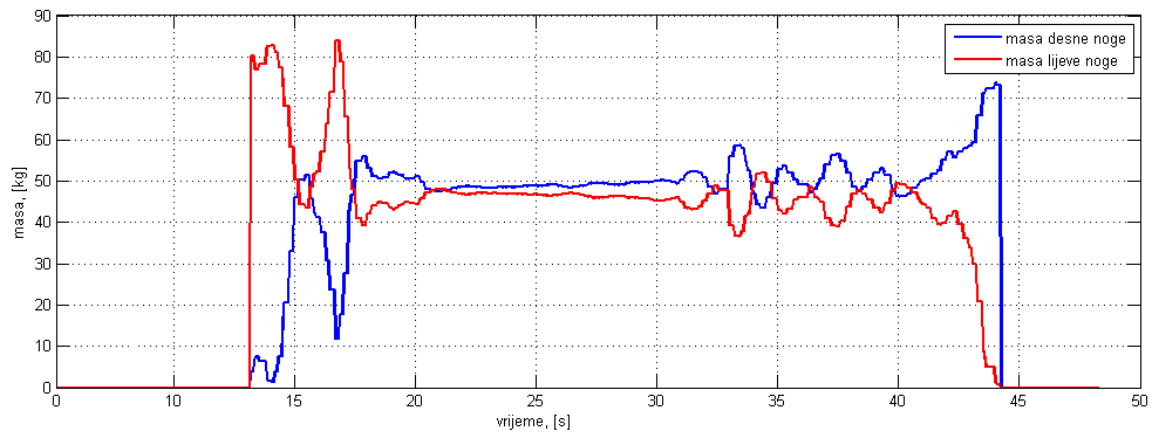


Slika 8.5. Pomoćne ploče za određivanje CoP-a

### 8.3 Testiranje cijelog sustava

Nakon što se testira pozicioniranje te mjerenje sile odnosno određivanje CoP-a ispituje se cijeli sustav. Zadnji korak izrade 3-RPS manipulatora i pomične platforme za mjerenje sile je testiranje cijelog sustava. Testirano je pozicioniranje te utvrđivanje CoP-a sa čovjekom. Zanimljivi je utjecaj pozicioniranja aktuatora te istovremenomjerenje mase odnosno sile. Kako senzori ne mjere masu nego silu opterećenja prilikom pozicioniranja dolazi do mjerne pogreške rezultata. Kako senzor mjeri silu odnosno težinu nezaobilazan utjecaj je utjecaj gravitacije. Prilikom pokretanja te zaustavljanja aktuatori imaju ubrzanje odnosno usporenje. Prilikom ubrzavanja aktuatora smanjuje se utjecaj gravitacijskog ubrzanja te obrnuto prilikom usporavanja. Kako bi rezultat bio vjerodostojan i prilikom pozicioniranja preostaje još izračunati ubrzavanje i usporavanje aktuatora te uvesti korekcijski faktor u računanje mase.

Na slici 8.6 prikazan je graf koji prikazuje opterećenje obje pomične platforme.



Slika 8.6. Graf opterećenja pomičnih platforma za mjerenje sile

Na grafu je vidljivo opterećenje tj. masa na svakoj pojedinoj platformi u nekom određenom vremenu. Crvenom linijom iscrtano je opterećenje lijeve noge, a plavom linijom vidljivo je opterećenje desne noge. Oko trinaeste sekunde od početka mjerenja čovjek je stao prvo lijevom nogom, a zatim desnom. Vidljivo je veće opterećenje na desnoj platformi prilikom stajanja na istu. Nakon stabilizacije tijela čovjeka u 21. sekundi pa do 33. sekunde čovjek je mirno stajao. Može se uočiti kako je masa na lijevoj platformi veća od mase na desnoj. Prema ovima rezultatima može se zaključiti kako čovjek koji je evaluiran ima pomaknut centar mase. Od 33. sekunde nadalje ispitanik je radio kružne pokrete bokovima kako bi se vidio taj utjecaj na pomičnoj ploči za mjerenje sile. Rezultat je očekivan zbog kružnih pokreta u kojima se položaj centra mase neprestano mijenja. Nakon toga evaluirani čovjek je sišao s platforme. Vidljivo je kako podigavši lijevu nogu prilikom silaska, sva masa se registrirala na platformi na kojoj je još uvijek s jednom nogom stao.

## 9. ZAKLJUČAK

Izrađena su dva 3-RPS manipulatora sa pomičnim platformama za mjerenje sile. Manipulatori se koriste za evaluaciju držanja ljudskog tijela. Najveća evaluirana masa je 130 kg. Teoretski moguće je i veću masu evaluirati zbog čvrstoće konstrukcije, mjernog opsega senzora sile te snage linearnih aktuatora. Najveću dopuštenu masu jedino ograničava konstrukcijsko rješenje linearnih aktuatora. Ukručeni su maksimalno revolucijski zglobovi kako ne bi došlo do pomicanja aktuatora, ali dolazi do savijanja konstrukcije aktuatora. To rezultira rotacijom pomične platforme oko z osi 3-RPS manipulatora. Postignuto je upravljanje aktuatorima u preciznosti od dvije desetinke milimetra. Radni hod aktuatora je 150mm što je i više nego dovoljno za evaluaciju držanja ljudskog tijela. Obje pomične platforme za mjerenje sile mjere masu u četiri točke. Ostvareno je mjerenje u preciznosti od 10 grama. Upravljačka aplikacija omogućuje ručno upravljanje sustavom i logiranje mase koju mjeri pojedini senzor.

## 10. LITERATURA

- [1] Vrhovski Z., Markov M., Pavlic T., Obrovac K., Mutka A., Nižetić J. Design of a Mechanical Assembly for the Dynamic Evaluation of Human Body Posture. Zadar: 16th International Scientific Conference on Production Engineering – CIM2017. 2017.: 237-242.
- [2] Markov M. Prototip mehaničkog sklopa za dinamičku evaluaciju držanja ljudskog tijela. Završni rad. Veleučilište u Bjelovaru; 2017
- [3] Stepper Motor Shaft Coupling [Online]. Dostupno na: <https://grabcad.com/library/stepper-motor-shaft-coupling-coupler-8-mm-to-6-35mm-1-4-acoplamiento-1> (12.09.2017.)
- [4] Rotary encoder 360 P/R Stepper [Online]. Dostupno na: <http://www.sah.co.rs/dhc40m6-360.html>
- [5] Golubić S. Elementi precizne mehanike, Zupčani prijenos [Online]. Dostupno na: [http://vtsbj.hr/images/uploads/1363/el.\\_pr.\\_meh.-13.predavanjevj.pdf](http://vtsbj.hr/images/uploads/1363/el._pr._meh.-13.predavanjevj.pdf) (15.07.2017.)
- [6] L298 Dual H-Bridge Motor Driver, User's Guide [Online]. Dostupno na: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298\\_H\\_Bridge.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf) (05.09.2017.)
- [7] L298 Dual H-Bridge Motor Driver, User's Guide [Online]. Dostupno na: <https://cdn.instructables.com/ORIG/FCN/YABW/IHNTEND4/FCNYABWIHNTEND4.pdf> (05.09.2017.)
- [8] Malarić R, Jurčević M. Mjerenja u tehnološkim procesima [Online]. Dostupno na: [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/MUTP\\_5\\_Mjerenje\\_pomaka\\_2016.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/MUTP_5_Mjerenje_pomaka_2016.pdf) (15.08.2017.)
- [9] Golubić S, Mutka A. Senzori, Mjerenje duljine, pomaka, razine, pozicije, prisutnosti... [Online]. Dostupno na: [http://vtsbj.hr/images/uploads/1324/p\\_12\\_-\\_senzori\\_2016.-2017..pdf](http://vtsbj.hr/images/uploads/1324/p_12_-_senzori_2016.-2017..pdf) (09.08.2017.)
- [10] 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales [Online]. Dostupno na: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf) (28.06.2017.)
- [11] Vrhovski Z. Mikroracunala, USART komunikacija [Online]. Dostupno na: <http://vtsbj.hr/strucni-studij-mehatronika/studiji/druga-godina-mehatronika/#materijalimikroracunala> (15.08.2017.)
- [12] ATmega328p [Online]. Dostupno na: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf) (11.10.2017.)

- [13] ATmega2560 [Online]. Dostupno na: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf) (11.10.2017.)
- [14] Using the TWI Module as I2C Slave [Online]. Dostupno na: [http://www.atmel.com/images/atmel-2565-using-the-twi-module-as-i2c-slave\\_applicationnote\\_avr311.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-2565-using-the-twi-module-as-i2c-slave_applicationnote_avr311.pdf) (11.07.2017.)
- [15] Using the TWI Module as I2C Master [Online]. Dostupno na: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-2564-Using-the-TWI-Module-as-I2C-Master\\_ApplicationNote\\_AVR315.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-2564-Using-the-TWI-Module-as-I2C-Master_ApplicationNote_AVR315.pdf) (11.07.2017.)
- [16] Vrhovski Z, Miletić M. Mikroročunala, Programiranje mikrokontrolera porodice Atmel u programskom okruženju Atmel Studio 6. 1. izd. Bjelovar: Visoka tehnička škola u Bjelovaru; 2014.

## 11. OZNAKE I KRATICE

ABS – Akrlonitril butadien stiren

ACK – Acknowledgement (Potvrđeno stanje)

CAD – Computer Aided Design (Dizajn potpomognut računalom)

CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor (Dodani metalni oksidni poluvodič)

CoP – Center of Pressure (centar pritiska)

I<sup>2</sup>C - Inter Integrated Circuit (Unutarnjiintegrirani krug)

INT – Interrupt (Prekid)

LSB – Last Significant Bit (Zadnji bit po važnosti)

MSB - Most Significant Bit (Prvi bit po važnosti)

NACK – Not Acknowledgement (Nepotvrđeno stanje)

OCF – Output Compare Flag (Zastavica izlazne usporedbe)

OCRx – Output Compare Register (Registar izlazne usporedbe)

PCB – Printed Circuit Board (tiskana pločica)

PWM – Pulse Width Modulation (pulsnoširinska modulacija)

RPS – Revolute-Prismatic-Spherical (Struktura manipulatora)

SLA+R – Slave adress + Read (Adresa Slave + primanje podataka)

SLA+W - Slave adress + Write (Adresa Slave + slanje podataka)

TCCR – Timer Control Register (Kontrolni registar vremenskog brojača)

TWI – Two Wire Interface (Komunikacijsko sučelje s dvije žice)

TWINT – Two Wire Interface Interrupt (Prekid komunikacijskog sučelje s dvije žice)

TWSR – Two Wire Interface Status Register (Statusni registar komunikacijskog sučelje s dvije žice)

UART – Universal Asynhronousserial Receiver and Transmitter (Univerzalna asinkrona serijska komunikacija)



## 12. SAŽETAK

Izrada 3-RPS manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile

Izrađena su dva prototipa 3-RPS paralelnih manipulatora s pomičnom platformom za mjerenje sile. 3D model mehaničkog sklopa izrađen je u *CAD* program *SolidWorks*. Upravljanje manipulatorima izvedeno je pomoću decentraliziranog sustava upravljanja pomoću mikrokontrolera. Paralelni manipulatori su predviđeni za dinamičku evaluaciju držanja ljudskog tijela. Opisan je inverzni i direktni dinamički problem 3-RPS manipulatora u svrhu određivanja visine i nagiba 3-RPS paralelnog manipulatora. Visina i nagib pomične platforme određuje se na temelju mjerenja centra mase ljudskog tijela.

**Ključne riječi:** 3-RPS manipulator, pomična platforma za mjerenje sile, CoP, evaluacija držanja ljudskog tijela.

### 13. ABSTRACT


Creation of a 3-RPS manipulator with a displacement platform for force measurement

Two prototypes of 3-RPS parallel manipulators were created with a displacement platform for force measurement. The 3D model of the mechanical assembly was created in the SolidWorks CAD program. Handling of manipulators is accomplished by means of a decentralized control system using microcontrollers. Parallel manipulators are designed to dynamically evaluate the holding of the human body. An inverse and direct dynamic problem of the 3-RPS manipulator is described for the purpose of determining the height and inclination of a 3-RPS parallel manipulator. The height and slope of the moving platform is determined by measuring the center of mass of the human body.

**Keywords:** 3-RPS manipulator, movable platform for force measurement, CoP, evaluation of the human body.

## IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>12.12.2017.</u>	Goran Benkek	

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

Goran Benkek

---

*ime i prezime studenta/ice*

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 12.12.2017.



---

*potpis studenta/ice*