

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Ana Žavbi

Risalnik na osnovi CNC krmiljenja

DIPLOMSKO DELO
NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

Mentor: prof. dr. Dušan Kodek

Ljubljana, 2012

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil $\text{\LaTeX}$.



Št. naloge: 01817/2012

Datum: 15.03.2012

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **ANA ŽAVBI**

Naslov: **RISALNIK NA OSNOVI CNC KRMILJENJA
PLOTTER WITH CNC BASED CONTROL**

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija

Tematika naloge:

Risalnik je računalniško vodena naprava, ki omogoča risanje neprekinjenih črt. Eden od možnih pristopov k izdelavi risalnika je, da si ga zamislimo kot numerično krmiljen (CNC) stroj s tremi krmilnimi osmi. To omogoča, da za krmiljenje risalnika lahko uporabimo programe, ki so namenjeni za numerično krmiljene stroje. Razvijte in izdelajte risalnik, ki naj bo prirejen za krmiljenje z Mach3 CNC programom. Izberite ustrezne mehanske, električne in računalniške komponente ter izdelajte risalnik kot samostojno napravo. Naredite program, ki iz opisa slike v DXF formatu tvori G kodo za Mach3 program. G kodo optimizirajte tako, da bo risanje kar najhitrejše brez nepotrebnih premikov. Pravilnost delovanja preverite na primernih risbah in podajte možne načine za izboljšave.

Mentor:

prof. dr. Dušan Kodek



Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic

IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisani/-a Ana Žavbi,

z vpisno številko 63040185,

sem avtor/-ica diplomskega dela z naslovom:

Risalnik na osnovi CNC krmiljenja

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom prof. dr. Dušana Kodeka
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, dne 05.06.2012

Podpis avtorja/-ice:

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Dušanu Kodeku za vse napotke, odgovore in strokovno pomoč. Zahvala gre tudi staršem za pomoč in potrpežljivost ter ostalim članom družine za podporo in zaupanje. Zahvalila bi se tudi prijateljem, ki so mi nesebično priskočili na pomoč in za vse zabavne trenutke, ki smo jih preživeli v času študija.

Kazalo

Povzetek	1
Abstract	2
1 Splošno o sistemu	3
1.1 Risalnik	3
1.2 CNC stroj	3
1.2.1 Struktura CNC sistema	4
1.2.2 Načini krmiljenja	4
1.3 Opis risalnika	5
2 Krmilni program - Mach3	7
2.1 Splošno	7
2.2 Funkcije Mach3	8
2.3 Krmilni signali	9
2.4 Umerjanje osi	11
2.5 CNC program	13
2.5.1 Načini programiranja	14
2.5.2 Program	14
3 Program za generiranje G kode	17
3.1 Splošno	17
3.2 Datotečni format DXF	18
3.3 Generator G kode	20
4 Risalnik	24
4.1 Mehanski del	24
4.1.1 Koračni motorji	24
4.1.2 Risalnik	27
4.2 Krmilno vezje	28

4.2.1	Splošno	28
4.2.2	Opto-spojnik	28
4.2.3	Mikrokrmilnik	29
4.2.4	Gonilnik	30
4.3	Nadzorno vezje	32
4.3.1	Splošno	32
4.3.2	Senzorji	33
4.3.3	EStop	35
4.3.4	Ročno krmiljenje	36
5	Sklepne ugotovitve	39
A	Slike risalnika	41
B	Shema krmilnega vezja	46
C	Shema nadzornega vezja	48
D	Izdelava vezja	50
E	Test programa	53
	Seznam slik	54
	Seznam tabel	56
	Literatura	57

Seznam uporabljenih kratic in simbolov

ADC	ang. Analog-to-Digital Converter - Analogno-digitalni pretvornik
CAD/CAM	ang. Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing - Računalniško podprto konstruiranje/Računalniško podprta proizvodnja
CNC	ang. Computer Numerical Control - Računalniško numerično krmiljenje
CCW	ang. CounterClockWise - Nasprotna smer urinega kazalca
CW	ang. ClockWise - Smer urinega kazala
DXF	ang. Drawing Interchange Format - Izmenjevalni datotečni format za risbe
HMI	ang. Human Machine Interface - Vesnik človek-stroj
LED	ang. Light-Emitting Diode - Svetleča dioda
LPT	ang. Line Print Terminal or Local Print Terminal - Paralelna vrata
MDI	ang. Manual Data Input - Ročni vnos podatkov
MPG	ang. Manual Pulse Generator - Ročno krmiljenje
NC	ang. Numerical Control - Numerično krmiljenje
TSP	ang. Travelling Salesman Problem - Problem trgovskega potnika

Povzetek

Namen diplomske naloge je bil izdelati risalnik. To je naprava, ki omogoča izrisovanje vektorskih slik na papir. Risalnik je računalniško voden s programom Mach3. To je program, ki je namenjen krmiljenju CNC (ang. Computer Numerical Control) strojev.

Risalnik sestoji iz strojnega in programskega dela. Programski del sestavljata krmilni program Mach3 in program za generiranje G kode. Mach3 je program, ki je namenjen CNC strojem in ima presežek funkcij katere pa niso uporabne za risalnik. To je tudi razlog, da je krmilni program opisan precej na kratko, saj so me zanimali predvsem vidiki programa, ki vplivajo na delovanje risalnika. Mach3 sprejme kot vhod program zapisan v G kodi. Zato je bilo potrebno izdelati program, ki omogoča pretvorbo vektorskih slik v programsko G kodo.

S strojnega vidika pa je zanimivo načrtovanje in sama fizična izdelava risalnika ter izdelava vezij, ki so vezni člen med računalnikom in risalnikom. Poudarek je na krmiljenju bipolarnih koračnih motorjev, ki so ključni sestavni del naprave. Podrobneje so opisani krmilni signali ter vezje, ki te signale sprejema in jih pretvori v močnostne signale za krmiljenje motorjev. Podani so tudi načrti risalnika in opisani mehanizmi, ki omogočajo premikanje po oseh.

Ključne besede:

CNC, risalnik, G koda, datoteka DXF, koračni motor

Abstract

The purpose of this thesis was to build a plotter for printing vector graphics on paper. The plotter is computer controlled by a Mach3 program. Mach3 is a control software for CNC (Computer Numerical Control) machines.

The components of the plotter software are Mach3 and a G code generating program. Mach3 has a large amount of functions because it is intended for CNC machines. However many of these functions are not needed for the plotter. Thus I have only focused on these aspects of control software which affect the plotter. The input of Mach3 is a G code program. That is why I made a program which transforms vector graphics into a G code.

The thesis covers the hardware and software aspect of the plotter. It provides descriptions of designing and building the plotter and making electronic circuits, which are a link between the computer and the device. The focus is on the bipolar stepper motors which are the key part of this device. The electronic circuits transforms input signals into high current signals for driving motors. The plotter design and descriptions of axes mechanisms are also given in the thesis.

Key words:

CNC, plotter, G code, DXF file, stepper motor

Poglavje 1

Splošno o sistemu

1.1 Risalnik

Risalnik (ang. plotter) je vrsta tiskalnika. Uporabljajo se za risanje načrtov, risb, tlorisov, skic delov, mehanizmov, ... na raznih področjih kot so znanstvena, inženirska dela, v arhitekturi. Rišejo z mehanskim premikanjem peresa ali druge risalne naprave po papirju. Obstajajo koordinatni in valjasti risalniki. Pri prvih papir miruje, pero pa se premika v dveh različnih smereh po papirju, to sta koordinati x in y , katerih osi sta pravokotni ena na drugo. Pri valjastih pa se v smeri ene koordinatne osi premika papir, v smeri druge osi pa se premika risalna naprava. Risalniki se od tiskalnikov razlikujejo po tem, da rišejo neprekinjene črte, medtem, ko je pri tiskalnikih izris rasterski. Risalnik omogoča mnogo natančnejši izris kot tiskalnik.

1.2 CNC stroj

Razvoj računalniško vodenih obdelovalnih strojev sega v začetek petdesetih let v Združenih državah Amerike (1952 - MIT prvi NC-stroj s servokrmilnikom [1]). NC stroji so predhodniki CNC strojev. Kratici NC in CNC izhajata iz angleščine in pomenita NC - numerično krmiljenje (ang. Numerical Control) in CNC računalniško numerično krmiljenje (ang. Computer Numerical Control) [1]. Razvoj elektrotehnike in elektronike sta omogočila razvoj visoko avtomatiziranih NC strojev. Posebej velik preskok pa je bila uvedba CNC strojev, ki vsebujejo tudi računalnik. Z uvajanjem takšnih strojev v proizvodnjo se zmanjšajo stroški in čas izdelave izdelkov, poveča pa se tudi kvaliteta in natančnost. Prednosti CNC strojev so tudi v večji produktivnosti in iz-

koriščenosti stroja. Omogočajo vnos shranjenega programa v stroj, enostavno je tudi popravljanje že shranjenega programa. Numerično krmiljeni obdelovalni stroji se uporabljajo za več vrst obdelave materialov (les, kovina): rezkanje, vrtanje in žaganje. Običajno imajo tri obdelovalne osi in več različnih obdelovalnih orodij.

1.2.1 Struktura CNC sistema

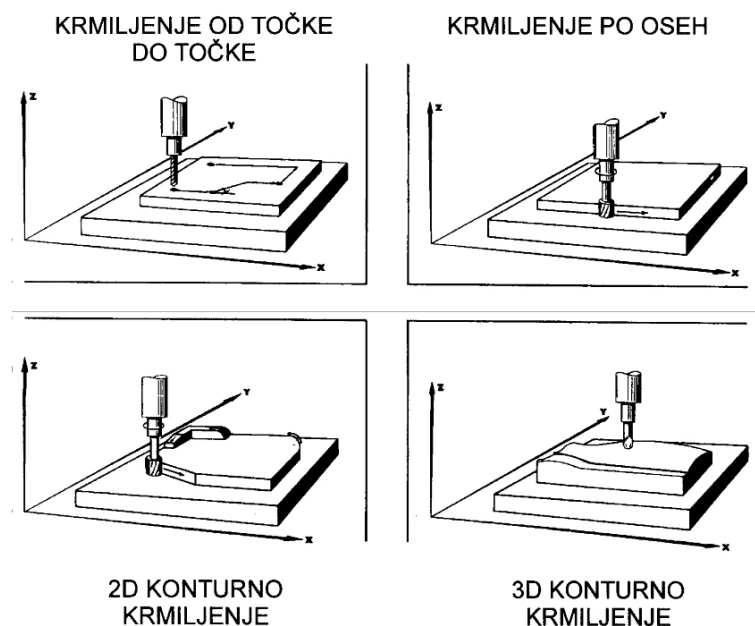
Komponente CNC sistema:

- CAD/CAM (ang. Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) program. Načrtovalec ga uporabi, da z njim generira program izdelka (ang. part program). Ta program je navadno zapisan v programskem jeziku G in opisuje korake, ki so potrebni za izdelavo nekega izdelka.
- Krmilnik stroja. To je računalnik na katerem teče krmilni program. Ta program izvaja posamezne ukaze programa izdelka in generira potrebne signale. Te signale posreduje krmilnemu vezju.
- Krmilno vezje sprejema signale iz računalnika in jih pretvori v signale, ki lahko poganjajo motorje.
- Stroj. S pomočjo zobate letve, zobatih jermenov ali navojnih vreten motorji premikajo osi stroja.

1.2.2 Načini krmiljenja

CNC stroj krmili računalnik, ki dela na podlagi programa. Osnovne vrste krmiljenja so (Slika 1.1) [1]:

- Krmiljenje od točke do točke: gibanje iz začetne v končno točko se lahko izvede pod poljubnim kotom.
- Krmiljenje po ravnih linijah: običajno je možno gibanje vzporedno s koordinatnimi osmi ali pa pod kotom 45° .
- Konturno krmiljenje: možno je gibanje oz. krmiljenje v dveh ali treh oseh. Pri tem načinu se gibanje med orodjem in obdelovancem neprestano menjava po smeri in velikosti.



Slika 1.1: Načini krmiljenja CNC stroja.

1.3 Opis risalnika

Namen risalnika je izrisovanje vektorskih slik na papir. Risalnik je računalniško vodena naprava, ki jo v grobem sestavljajo trije deli: računalnik, krmilno vezje in ohišje z mehanizmi (Slika 1.2).

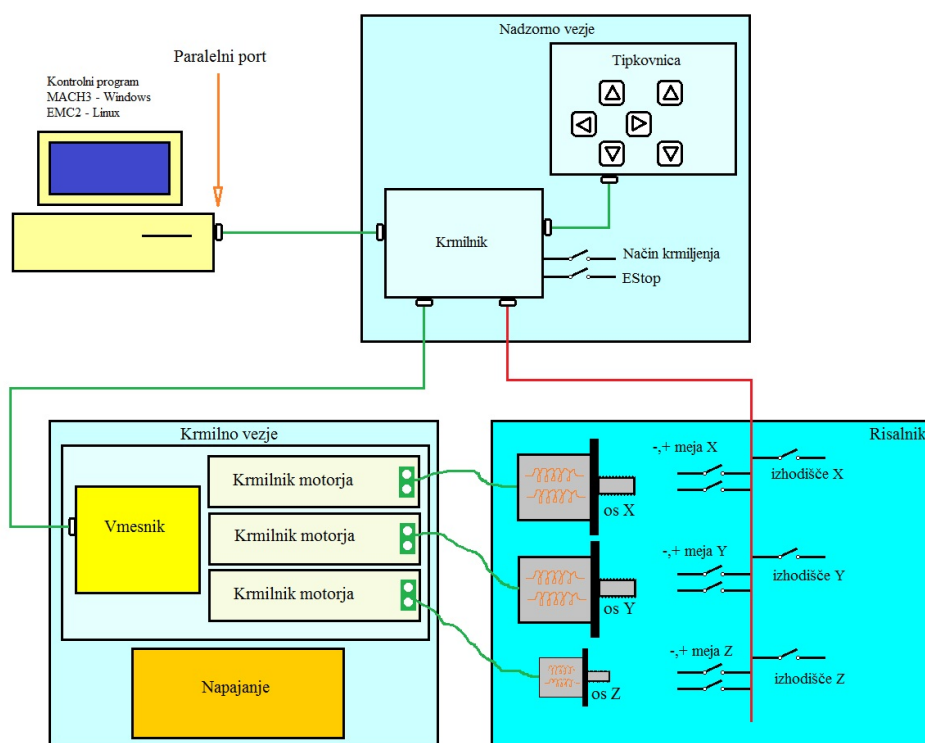
Na računalniku teče program Mach3, ki se uporablja za krmiljenje CNC strojev. Ta program omogoča programsko ali ročno krmiljenje risalnika, umerjanje mehanizmov, ter druge funkcije. Program Generator G kode pretvori vektorsko sliko v G programsko kodo. Mach3 nato uporabi G kodo za generiranje krmilnih signalov, ki jih pošlje na izhod računalnika - paralelna vrata. Signali določajo smeri (signal 'Dir') in korak (signal 'Step') za posamezen koračni motor. Risalnik ima tri osi X, Y in Z. Za vsako potrebujemo en motor, torej za vsako en par krmilnih signalov. Osi so pravokotne ena na drugo in skupaj sestavljajo kartezični koordinatni sistem. (X,Y,Z) je koordinata točke v prostoru.

Na paralelna vrata je priključeno vezje risalnika. Vezje je sestavljeno iz dveh delov, krmilnega in nadzornega. Nadzorno vezje predstavlja razširitev krmilnega vezja in risalniku doda dodatne funkcionalnosti. Preko nadzornega vezja poteka izbira med ročnim in računalniškim krmiljenjem, omogoča ročno

krmiljenje in zaustavitev delovanja naprave v sili. Nadzorno vezje je vezni člen med računalnikom in krmilnim vezjem. Delovanje risalnika je mogoče tudi brez nadzornega vezja, torej samo s krmilnim vezjem. Krmilno vezje poskrbi za pretvorbo krmilnih signalov v močnostne signale za krmiljenje motorjev. Vezje sestavljajo opto-spojniki, mikrokrmilnik Microchip PIC16F877 in čipi L293. Vhodi krmilnika so 'Step' in 'Dir' signali za posamezen motor, na izhode pa vežemo motorje za tri osi. Opto-spojniki so uporabljeni za zaščito paralelnih vrat računalnika. S pomočjo mikrokrmilnika pretvorimo vhodne signale vezja v vhodne signale za čipe L293, ki potem krmilijo motorje.

Risalnik ima vgrajena tudi senzorja izhodiščne pozicije, ki s pomočjo krmilnega programa delujeta tudi kot senzorja mejnih pozicij.

Strojni del risalnika predstavlja ohišje, kamor so vpeti mehanizmi in omogoča premikanje v treh smereh.



Slika 1.2: Skica sistema.

Poglavje 2

Krmilni program - Mach3

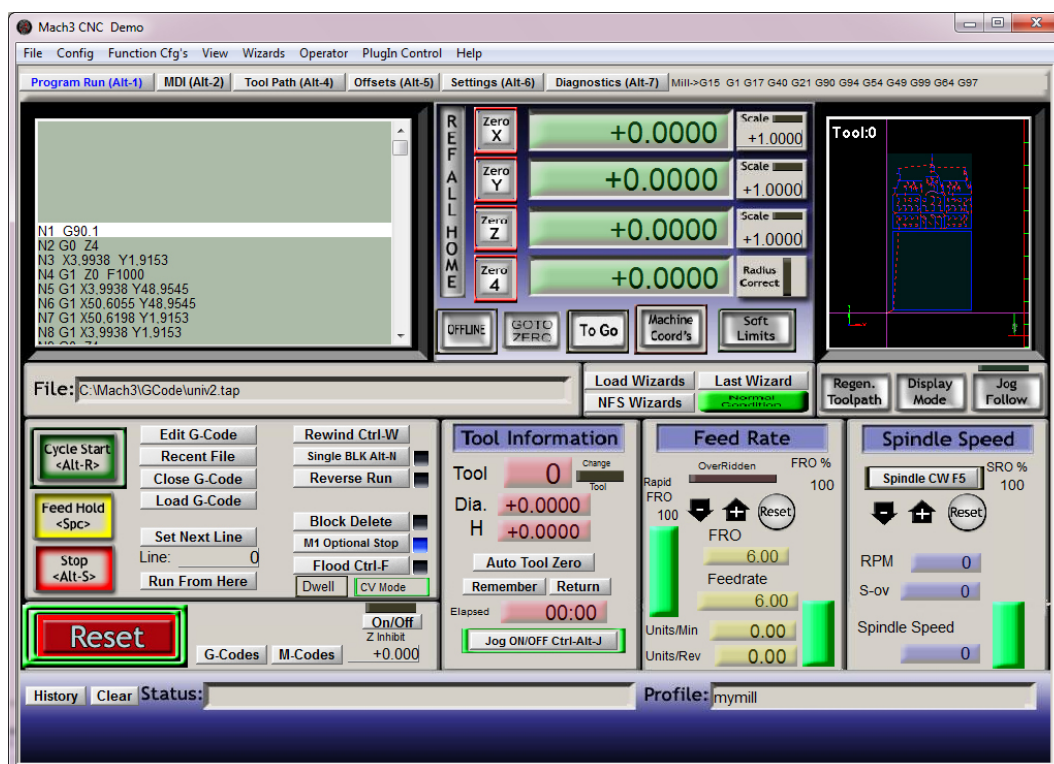
2.1 Splošno

Mach3 je kontrolni program za CNC stroje ki je namenjen za osebne računalnike na katerih teče operacijski sistem Windows. Opravlja naloge HMI (ang. Human Machine Interface), torej poskrbi za komunikacijo med operaterjem in strojem ter za generiranje kontrolnih signalov. Preko paralelnih vrat poteka komunikacija s strojem. Mach3 prevede program v G kodi v zaporedje impulzov za korak motorja in signalov za smer motorja ('Step' in 'Dir' signala). Te signale preko vrat pošlje krmilnemu vezju stroja.

Risalnik mora zadoščati določenim zahtevam krmilnega programa Mach3. Vsaka CNC naprava bi morala imeti EStop gumb (zaustavitev v sili; ang. emergency stop). Ob pritisku gumba mora stroj prenehati z delovanjem. Ta zahteva izhaja iz dejstva, da je Mach3 namenjen za stroje, ki bi lahko fizično ogrožali okolico. EStop je realiziran v okviru nadzornega vezja. V primeru, ko nadzorno vezje ni povezano, torej je izhod računalnika povezan direktno na krmilno vezje, je potrebno signal emulirati programsko, sicer Mach3 ne dovoli upravljanja z risalnikom. Naprava, ki jo krmili Mach3, mora imeti dve ali tri osi za premikanje. Običajno so te osi pravokotne ena na drugo. Naprava mora imeti tudi orodje, s katerim obdelujemo nek material. V primeru risalnika je to kar pisalo. Opcijsko pa ima naprava lahko tudi razna stikala s katerimi je mogoče detektirati kdaj se orodje nahaja v izhodiščni ali v mejnih pozicijah in še druge funkcije.

2.2 Funkcije Mach3

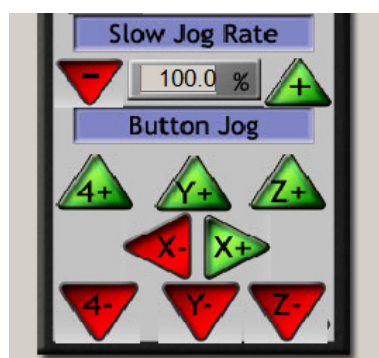
Ob kliku na 'Program Run' se pokaže glavno pogovorno okno programa Mach3 (Slika 2.1). Okno vsebuje razne objekte, ki omogočajo upravljanje z risalnikom. Ima okno za prikaz G kode, ki kaže trenutno naložen program in katera vrstica kode se trenutno izvaja. Prikazuje izpis trenutnih pozicij posameznih osi. Izrisuje pot orodja, kot jo določa G koda, skupaj s prikazom trenutnega položaja osi X, Y in Z. Za risalnik je zanimiv še del, ki prikazuje in omogoča upravljanje z delovno hitrostjo (ang. feed rate). Dela 'Spindle Speed' in 'Tool Information' pa sta uporabna za stroje, ki imajo programsko vodena orodja in tako za risalnik nista relevantna. Vsebuje še različne gumbe s katerimi je mogoče pognati, ustaviti izvajanje programa, pozicionirati osi na izhodiščno pozicijo, določiti izhodiščno pozicijo in druge.



Slika 2.1: Glavno pogovorno okno programa Mach3.

Mach3 omogoča tudi ročno upravljanje z risalnikom s pomočjo okna MPG (ang. Manual Pulse Generator) (Slika 2.2). Ta meni je mogoče priklicati s pritiskom tipke 'tab' na tipkovnici. Preko okna je omogočeno upravljanje z

vsako posamezno osjo, možna je tudi nastavitev hitrosti premikanja pri ročnem upravljanju. Osi je mogoče ročno upravljati tudi s smernimi tipkami na tipkovnici.



Slika 2.2: Ročno upravljanje z napravo.

Pogovorno okno MDI (ang. Manual Data Input) ima vnosno polje (Slika 2.3) za vnos G koda. Ob pritisku tipke Enter program izvrši vnešeno kodo. Mach3 lahko pomni zaporedje vnešenih ukazov in jih zapiše v datoteko (gumba 'Start Teach' in 'Stop Teach'). To datoteko je mogoče kasneje ponovno pognati.

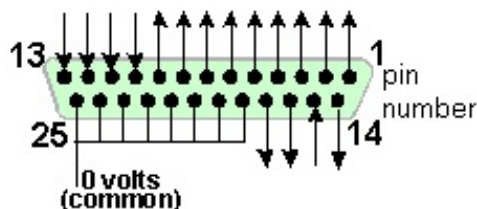


Slika 2.3: Vnosno polje za G kodo.

2.3 Krmilni signali

Mach3 komunicira z risalnikom (CNC stroj) preko paralelnih vrat. Konektor paralelnih vrat na računalniku je ženski konektor s 25 kontakti. Na Sliki 2.4 so prikazana paralelna vrata s strani računalnika. Tudi smeri signalov so prikazane relativno na računalnik.

V tabeli 2.1 je prikazana vezava signalov na paralelna vrata. Št je zaporedna številka priključka. Oznaka NC pa pomeni da na priključek ni povezan noben signal.

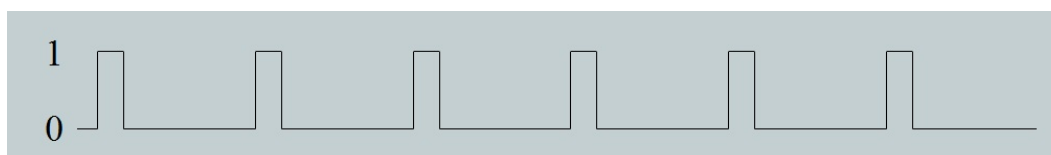


Slika 2.4: Paralelna vrata.

Št	Signal	Št	Signal	Št	Signal	Št	Signal	Št	Signal
1	NC	6	Dir X	11	Estop	16	NC	21	Gnd
2	Step X	7	Dir Y	12	Home X	17	NC	22	Gnd
3	Step Y	8	Dir Z	13	Home Y	18	Gnd	23	Gnd
4	Step Z	9	NC	14	NC	19	Gnd	24	Gnd
5	NC	10	NC	15	NC	20	Gnd	25	Gnd

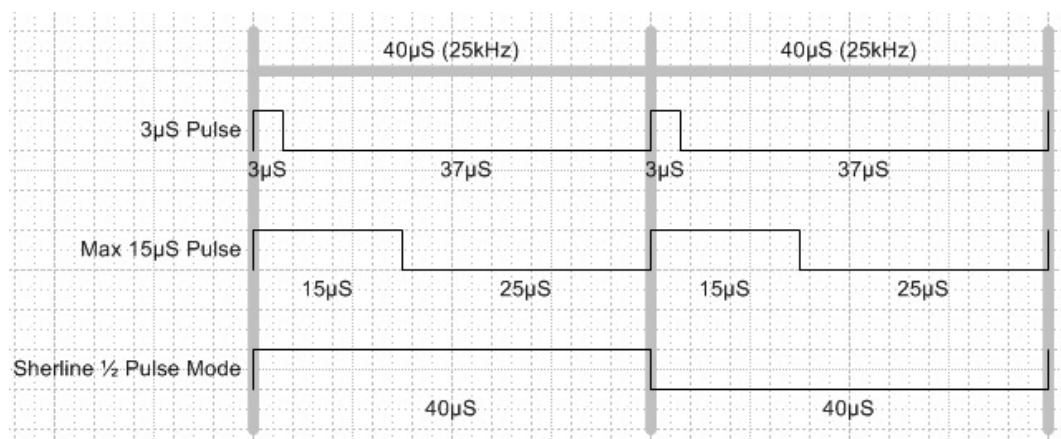
Tabela 2.1: Vezava signalov na paralelna vrata.

Mach3 krmili motorje s signaloma 'Step' in 'Dir'. En impulz (prehod iz nizkega stanja v visoko in nazaj v nizko stanje (Slika 2.5)) signala 'Step' pomeni en korak motorja. Signal za smer motorja 'Dir', je nastavljen preden se na izhodu pojavi impulz signala 'Step'. Čas, ko je signal 'Step' v nizkem stanju je odvisen od hitrosti motorjev. Čas signala v visokem stanju pa je nastavljen v programu. Jedro (ang. kernel) programa Mach3 lahko deluje na frekvencah od 25kHz do 100kHz. V enem ciklu lahko jedro na izhod pošlje največ en impulz. Največja frekvenca impulzov je s tem omejena z največjo frekvenco jedra. Maksimalna hitrost pri koračnih motorjih je 1000 obratov na minuto [2], kar v načinu krmiljenja s polnim korakom in 200 korakih na obrat motorja (veliko splošno dostopnih koračnih motorjev ima 200 korakov na obrat motorja [2]) pomeni približno 200000 korakov na minuto, oziroma približno 3333 korakov



Slika 2.5: Signal 'Step'.

na sekundo. Tej zahtevi zadošča že najnižja možna frekvenca jedra Mach3 (25kHz). Potrebna je še določitev dolžine signala 'Step'. Mach3 ponuja meje za dolžino impulza med 1 in $5\mu s$, vendar jih je dejansko mogoče nastaviti na maksimalno $15\mu s$. Ta dolžina se mi je zdela precej kratka, saj impulze zaznava mikrokrmilnik PIC, ki pri zunanji uri 4MHz lahko izvede en ukaz v eni mikrosekundi. Mach3 ponuja še opcijo 'Sherline 1/2 Pulse Mode', pri kateri je trajanje impulza enako eni periodi jedra, to je pri frekvenci jedra 25kHz enako $40\mu s$ (Slika 2.6). Pri tej opciji dobimo največjo možno frekvenco impulzov 12500 Hz, kar je še vedno dovolj za koračne motorje. S tem je določena širina signala 'Step' na $40\mu s$.



Slika 2.6: Dolžina signala 'Step'.

2.4 Umerjanje osi

Potrebno je določiti osnovne delovne enote stroja. Mach3 ponuja izbiro med metričnimi merskimi enotami - mm in anglosaškim merskim sistemom - palci. Izbira enot je pomembna v nadaljevanju za umerjanje motorjev. V Sloveniji so v uporabi enote mednarodnega sistema enot SI (Système international d'unités), zato sem izbrala mm. Umerjanje posamezne osi zahteva izračun števila korakov motorja na enoto, določitev maksimalne hitrosti motorja in določitev pospeševanja/upočasnjevanja motorja.

Motor osi Z: Debelina navoja je 5 mm (Slika 2.7). En obrat motorja usteza enemu obratu navojnega vretena. Motor osi Z porabi za en obrat 24

korakov.

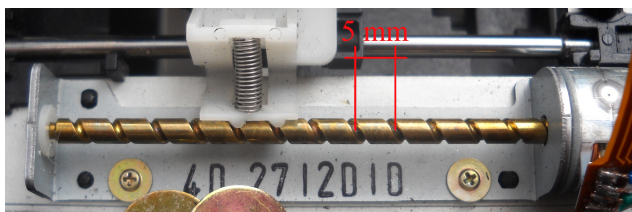
$$Obrati_motorja_na_enoto = 1obr/5mm = 0,2obr/mm \quad (2.1)$$

$$St._korakov_motorja_na_enoto = 24kor/obr * 0,2obr/mm = 4,8kor/mm \quad (2.2)$$

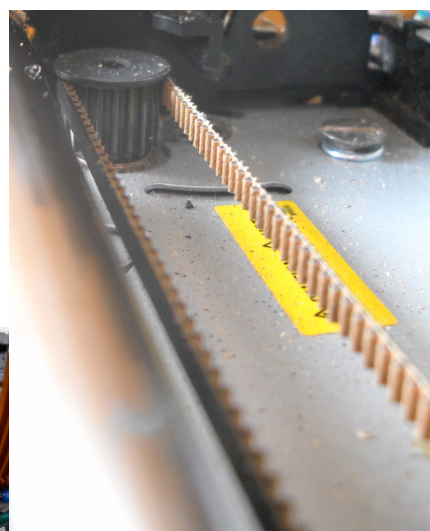
Motor osi X: Zobnik, ki je vpet na motor ima 20 zob. 20 zob na zobatem jermenu te osi ustreza dolžini 4 cm (Slika 2.8). Motor osi X porabi za en obrat 200 korakov.

$$Obrati_motorja_na_enoto = 1obr/40mm = 0,025obr/mm \quad (2.3)$$

$$St._korakov_motorja_na_enoto = 200kor/obr * 0,025obr/mm = 5kor/mm \quad (2.4)$$



Slika 2.7: Mehanizem osi Z.



Slika 2.8: Mehanizem osi X.

Motor osi Y: Zobnik, ki je vpet na motor ima 21 zob. 21 zob na zobatem jermenu te osi ustreza dolžini 4 cm. Motor osi Y porabi za en obrat 100 korakov.

$$Obrati_motorja_na_enoto = 1obr/40mm = 0,025obr/mm \quad (2.5)$$

$$St._korakov_motorja_na_enoto = 100kor/obr * 0,025obr/mm = 2,5kor/mm \quad (2.6)$$

Za natančen izračun števila korakov motorja na enoto bi potrebovali natančne specifikacije mehanizmov, do katerih samo z meritvami ne moremo

priti. Zato Mach3 omogoča tudi programsko umerjanje osi. V oknu 'Settings' se nahaja gumb 'Set Steps per Unit'. Ob kliku nanj se odpre okno, ki ponuja izbiro osi za umerjanje. Ob izbiri osi se odpre novo okno, ki ima vnosno polje v katerega je potrebo vpisati željen premik osi. Mach3 nato izvede premik in odpre se novo okno, kamor moramo vpisati, kakšen je bil dejanski premik osi. Mach3 nato avtomatično izračuna število potrebnih korakov motorja na enoto.

V nadaljevanju so podane umerjene vrednosti za posamezne osi.

Os X:

Število korakov motorja na enoto: 4,731986742

Hitrost v mm/min: 903

Pospeševanje v mm/s^2 : max (brez postopnega pospeševanja)

Os Y:

Število korakov motorja na enoto: 2,259490832

Hitrost v mm/min: 1279,2

Pospeševanje v mm/s^2 : 159,87434

Os Z:

Število korakov motorja na enoto: 4,901960784

Hitrost v mm/min: 612

Pospeševanje v mm/s^2 : max (brez postopnega pospeševanja)

Na Sliki 2.9 je prikazano pogovorno okno, preko katerega je mogoča nastavitve posameznih vrednosti za posamezne osi.

Risalnik sicer riše zvezne linije, vendar v diskretnih korakih, ki so posledica koračnih motorjev. Ločljivost risanja je določena s premikom osi v enem koraku motorja. Risalnik riše na papir, to je dvodimenzionalna operacija, zato je ločljivost odvisna le od osi X in Y.

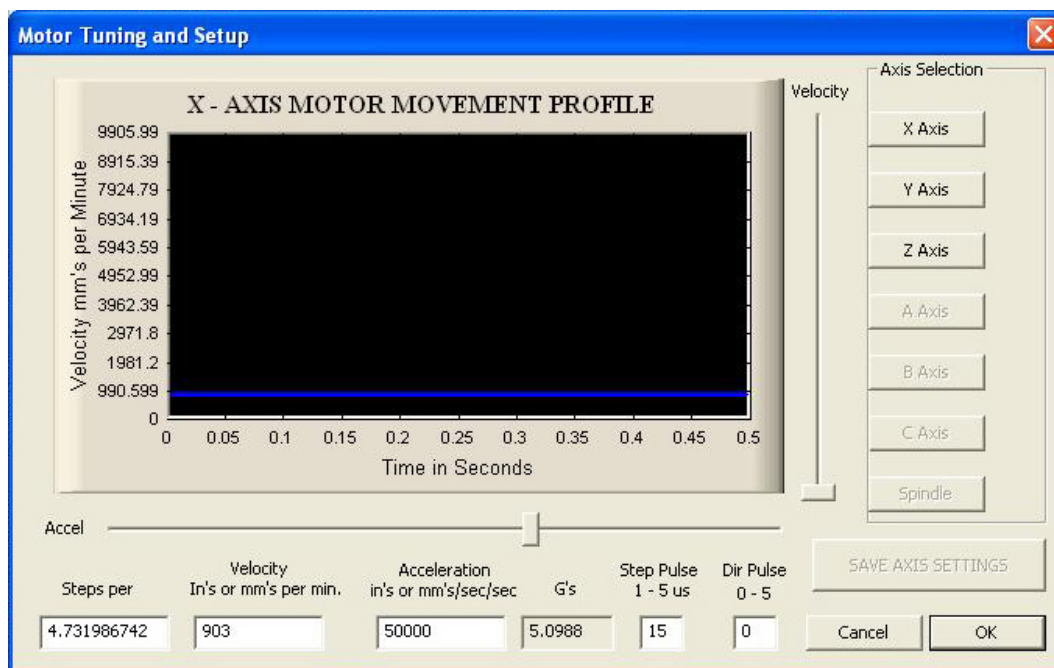
$$Ločljivost_{osi_X} = 1/st._korakov_na_enoto \quad (2.7)$$

$$= 1/4,732mm^{-1} = 0,211mm \quad (2.8)$$

$$Ločljivost_{osi_Y} = 1/2,259mm^{-1} = 0,443mm \quad (2.9)$$

2.5 CNC program

CNC program je zaporedje ukazov, ki stroju določa zaporedje operacij potrebnih za izdelavo nekega izdelka. Ukazi se delijo na geometrijske, ki opisujejo premike posameznih osi, tehnološke, ki določajo delovno in pozicijsko hitrost in pomožne funkcije za nadzor raznih orodij ali hlajenja.



Slika 2.9: Umerjanje motorja osi X.

2.5.1 Načini programiranja

Poznamo več načinov programiranja CNC strojev [3].

- Ročno programiranje: Programer na podlagi načrta napiše program. Vse izračune mora narediti sam.
- Ročno programiranje direktno na stroju: Krmilniki stroja vsebujejo programsko opremo, ki omogoča lažje programiranje. To so razni meniji in opcije, možna je tudi simulacija programa.
- Programiranje s pomočjo računalnika: Programer s pomočjo CAD/CAM sistema ustvari model izdelka in ga pretvori v CNC program.

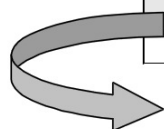
2.5.2 Program

S pomočjo programa je mogoče sliko v formatu DXF (ang. Drawing Interchange Format) pretvoriti v G programsko kodo. DXF je format za vektorsko predstavitev 2D ali 3D CAD modelov. Datoteka hrani informacije o sliki za izris na risalniku. DXF format je še posebej primeren za ta namen, saj je slika

sesatvljena iz osnovnih gradnikov, za katere je pretvorba v G kodo trivialna. Podrobnejši opis DXF formata je podan v poglavju 3.2.

Program je sestavljen iz posameznih programskih stavkov, ki opisujejo določeno operacijo ali gibanje na stroju. Programski stavki so sestavljeni iz določenih informacij, ki so opisane z *besedami* (Slika 2.10). Besedo sestavlja *naslov* in pripadajoča številka z ustreznim predznakom (*vrednost*) [3]. Naslov so črke, ki predstavljajo določeno funkcijo in se vedno nahajajo na začetku besede. Vrstni red besed v programskem stavku je običajno tudi predpisan.

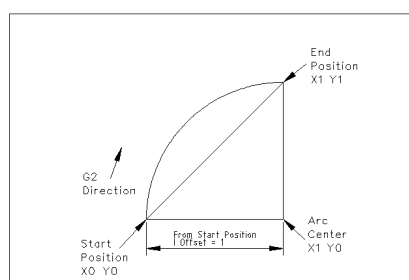
NASLOV	VREDNOST	NASLOV	VREDNOST	NASLOV	VREDNOST	NASLOV	VREDNOST
G	01	X	800	Y	360	F	3
BESEDA		BESEDA		BESEDA		BESEDA	

 **PROGRAMSKI STAVEK**

Slika 2.10: Programski stavek G kode.

Pomen oznak v programu:

- N - zaporedna številka programskega stavka
- G - glavne programske funkcije, ki določajo vrsto in način gibanja
- X - pomik osi X
- Y - pomik osi Y
- Z - pomik osi Z
- I, J, K - osi pomožnega koordinatnega sistema pri krožni interpolaciji
- F - delovna hitrost
- M - pomožne programske funkcije



Slika 2.11: Krožna interpolacija.

V tabeli 2.2 so opisani ukazi, ki se pojavljajo v programih risalnika.

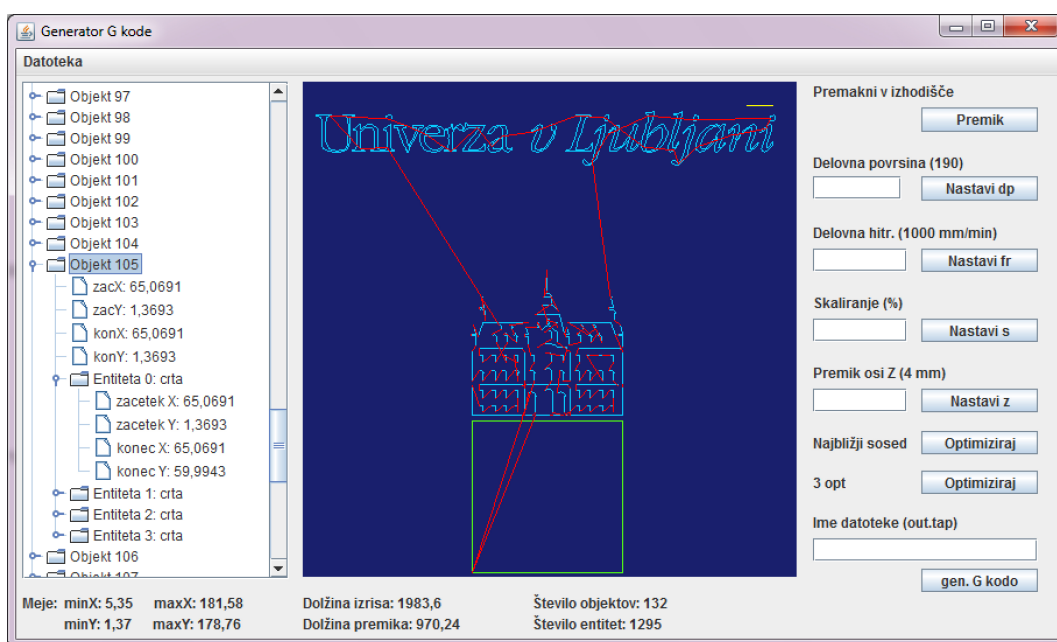
G koda	Razlaga
G0	Hitri gib orodja, mize Hitri linearni premik G0 - opcijski, če je že v načinu premikanja G0 X, Y, Z - Koordinate končne točke, opcijski
G1	Delovni gib orodja, mize Linearni premik z delovno hitrostjo (ang. feed rate) X, Y, Z - Koordinate končne točke, opcijski
G2,G3	Krožna interpolacija Krožna interpolacija v smeri urinega kazalca - G2 ali v nasprotni smeri urinega kazalca - G3 X, Y, Z - Koordinate končne točke, opcijski I, J - Koordinate srednje točke, opcijski Na Sliki 2.11 je primer, kjer so koordinate začetne točke X0 Y0, koordinate končne točke X1 Y1 in koordinate srednje točke X1 Y0. Ukaz: G2 X1 Y1 I1 J0
G90.1	Absolutne vrednosti za I,J (in K v 3D sistemu)
G91.1	Relativne vrednosti za I,J (in K v 3D sistemu)
F	Nastavitev delovne hitrosti
M30	Konec programa

Tabela 2.2: G kode in razlaga.

Poglavje 3

Program za generiranje G kode

3.1 Splošno



Slika 3.1: Program za generiranje G kode.

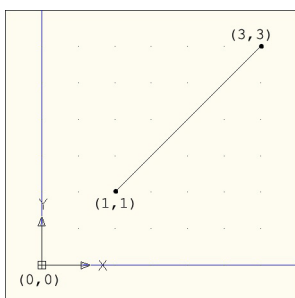
V okviru diplomske naloge sem razvila program za generiranje G kode. Program je izdelan v programskem jeziku Java. Uporabljeno je bilo razvojno okolje Eclipse. Program omogoča pretvorbo datoteke DXF v G kodo, ki jo potrebuje Mach3 za krmiljenje risalnika. Datoteka DXF vsebuje informacijo o

sliki oziroma načrtu, ki jo uporabnik želi izrisati. Preko uporabniškega vmesnika je mogoča nastavitve vseh parametrov, ki so potrebni za generiranje G kode.

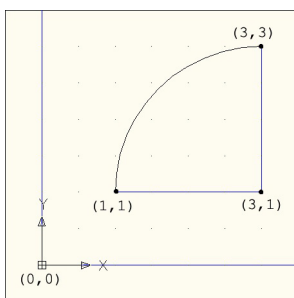
- Prikaz slike (izpis in prikaz posameznih entitet in objektov).
- Nastavitve delovne hitrosti.
- Nastavitve višine odmika osi Z.
- Spreminjanje merila slike.
- Algoritem za optimizacijo izrisa (minimizacija hitrih gibov - G0).

3.2 Datotečni format DXF

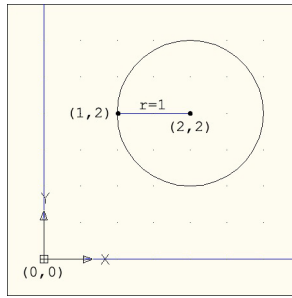
DXF datoteka hrani informacijo o vektorski sliki za izris na risalniku. Te slike so dvodimenzionalne, sicer pa lahko DXF datoteka hrani tudi informacijo o trodimenzionalnih objektih. DXF datoteka se lahko tvori s pomočjo CAD/CAM programov npr. AutoCAD ali s pomočjo grafičnih programov kot npr. Adobe Illustrator in CorelDRAW. DXF je datotečni format za predstavitev informacije, ki jo vsebuje AutoCAD DWG ('drawing') datoteka s pomočjo označenih podatkov (ang. tagged data). To pomeni, da je vsak podatek, ki se nahaja v datoteki DXF, predhodno označen s celim številom - ta se imenuje grupna koda (ang. group code). Grupna koda označuje tip in pomen podatka, ki ji sledi [13].



Slika 3.2: Črta.



Slika 3.3: Lok.



Slika 3.4: Krog.

Datoteka DXF je razdeljena na več podatkovnih blokov (ang. section): 'HEADER', 'CLASSES', 'TABLES', 'BLOCKS', 'ENTITIES', 'OBJECTS' in

'THUMBNAILIMAGE'. Entitete se nahajajo v blokih 'BLOCKS' in 'ENTITIES'. Predstavitev entitet je v obeh blokih identična. Konec podatkov posamezne entitete označuje grupna koda 0 in hkrati označuje začetek naslednje entitete oziroma konec podatkovnega bloka. Datoteka DXF vsebuje množico podatkov, od katerih je veliko neuporabnih za generiranje G kode za risalnik. Prazna datoteka DXF, naprimer, vsebuje 8700 vrstic. To so predvsem podatki, ki opisujejo delovno okolje CAM programa.

Zaradi same narave G kode, torej nabora ukazov, je nabor osnovnih gradnikov slike omejen na črto, lok in krog. Osnovni gradniki so prikazani na slikah 3.2, 3.3 in 3.4. Pripadajoče predstavitve v formatu DXF pa so podane v tabeli 3.1. Črta je predstavljena z začetno in končno točko. Krog je podan s točko središča in polmerom. Lok pa je izpeljan iz kroga, podan je s točko središča in polmerom, ter omejen z začetnim in končnim kotom.

0 LINE 5 A7C4 330 1F 100 AcDbEntity 8 0 62 0 100 AcDbLine 10 1.0 20 1.0 30 0.0 11 3.0 21 3.0 31 0.0 0 .	0 ARC 5 A7C5 330 1F 100 AcDbEntity 8 0 62 0 100 AcDbCircle 10 3.0 20 1.0 30 0.0 40 2.0 100 AcDbArc 50 90.0 51 180.0 0 .	0 CIRCLE 5 A7C1 330 1F 100 AcDbEntity 8 0 62 0 100 AcDbCircle 10 2.0 20 2.0 30 0.0 40 1.0 0 .
--	--	--

Tabela 3.1: Zapis slik 3.2, 3.3 in 3.4 v datoteki DXF.

V tabeli 3.2 so opisane pomembnejše grupne kode, ki nastopajo v zapisu DXF osnovnih gradnikov slike/načrta.

Grupna koda	Tip podatka	Pomen podatka
0	Znakovni niz	Tip entitete
5	Znakovni niz	Oznaka entitete
8	Znakovni niz	Ime risalne plasti lista
62	16 bitno celo število	Barva
10	Število s plavajočo vejico (dvojna natančnost)	X vrednost začetne točke
20,30	Število s plavajočo vejico (dvojna natančnost)	Y in Z vrednosti začetne točke
40	Število s plavajočo vejico (dvojna natančnost)	Polmer
50	Število s plavajočo vejico (dvojna natančnost)	Začetni kot
51	Število s plavajočo vejico (dvojna natančnost)	Končni kot
11	Število s plavajočo vejico (dvojna natančnost)	X vrednost končne točke
21,31	Število s plavajočo vejico (dvojna natančnost)	Y in Z vrednosti končne točke
100	Znakovni niz	Oznaka podrazreda

Tabela 3.2: Grupne kode.

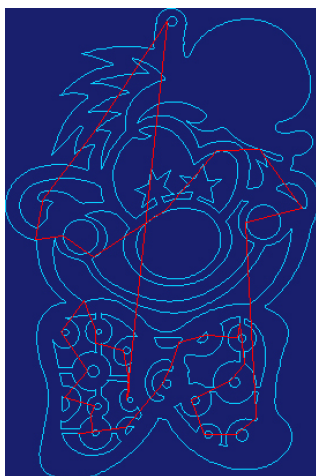
3.3 Generator G kode

Generator G kode omogoča pretvorbo DXF datoteke v G kodo. Vhod programa je datoteka DXF. To je vektorska slika, ki sestavljena je iz osnovnih gradnikov, kateri so bili predstavljeni v prejšnjem poglavju. Osnovne gradnike v nadaljevanju imenujem entitete. Program iz vhodne datoteke prebere podatke o posameznih entitetah in s pomočjo teh podatkov tvori G kodo. Izhod programa je datoteka, ki vsebuje program v G kodi.

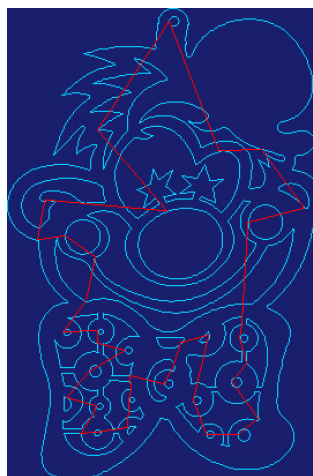
Uporabniški vmesnik programa sestavljajo različni elementi, ki uporabniku omogočajo vpogled v samo sliko in nastavitve raznih parametrov slike, delovne površine in G kode (Slika 3.1). Na sredini se nahaja prikaz delovne površine, ki



Slika 3.5: Neopt.



Slika 3.6: NSopt.

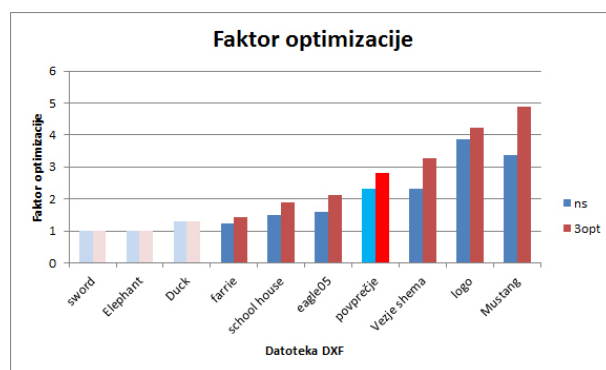


Slika 3.7: Opt3.

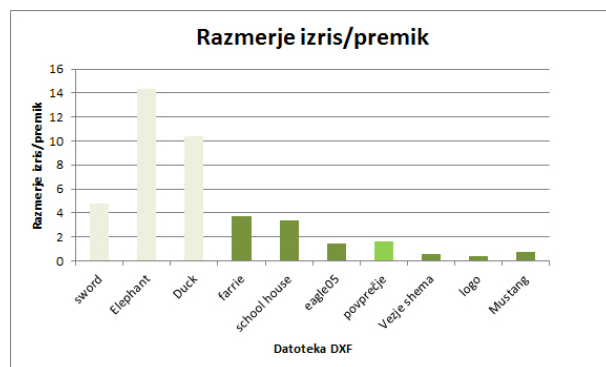
je obarvana modro. Velikost delovne površine je predhodno nastavljena na velikost širina = dolžina = 190mm, kar ustreza velikosti delovne površine risalnika. V zgornjem desnem kotu se nahaja indikator velikosti - to je rumena črtica, ki predstavlja velikost 10mm. Po potrebi je mogoče velikost delovne površine tudi prilagoditi. Ob odprtju datoteke se na delovni površini izriše slika. Entitete, ki sestavljajo sliko, se izrišejo z modro barvo, premiki med entitetami pa z rdečo barvo. Na levi strani uporabniškega vmesnika se generira drevesna struktura objektov in entitet. Ob kliku na posamezen objekt ali entiteto se le ta na prikazu obarva zeleno. Drevesna struktura vsebuje tudi osnovne podatke o posameznih entitetah in objektih. Sliko je mogoče premakniti v izhodišče in skalirati.

Za hitrejše in učinkovitejše delovanje risalnika je potrebno minimizirati G kodo. Potrebno je odstraniti nepotrebne premike in minimizirati dolžino ostalih. Kot premik je mišljeno zaporedje operacij, pri katerem se pisalo dvigne nad delovno površino, torej nima stika s podlago in se premakne na drugo točko v ravnini. Ta operacija je potrebna pri nepovezanih entitetah oziroma objektih. Ob odprtju datoteke program združi entitete, ki so med seboj povezane v posamezne objekte. Z generiranjem objektov se precej zmanjša optimizacijski problem. Faktor, za katerega se zmanjša, je precej odvisen od narave same slike. V primeru 'sword.dxf' so vse entitete povezane, torej se generira le en objekt in nadaljne optimizacije niso več mogoče (Tabela E.1). V drugih primerih, ko je število generiranih objektov večje, pa se je optimiziran problem v povprečju zmanjšal za 17,3-krat. Minimizacija premikov predstavlja problem

trgovskega potnika - TSP (ang. Travelling Salesman Problem). Za optimizacijo sem uporabila dva hevristična algoritma: metodo najbližjega soseda in 3-opt, ki izboljša rezultat prve metode.



Slika 3.8: Graf faktor optimizacije.



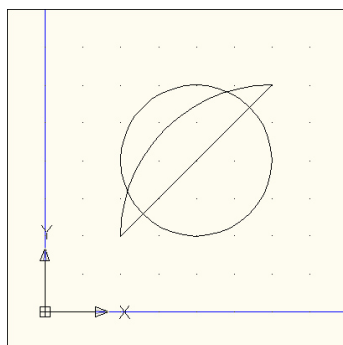
Slika 3.9: Graf razmerja izris/premik.

Metoda najbližjega soseda [17] vzame eno začetno točko in v skupno pot v vsakem koraku algoritma doda objekt, ki se nahaja najbližje trenutnemu. Program deluje tako, da za vsak posamezen objekt generira svojo pot. Na koncu pa izmed vseh poti izbere najkrajšo. Časovna zahtevnost algoritma je $O(n^2)$. Na sliki 3.5 so prikazani neoptimizirani premiki, na sliki 3.6 pa premiki po optimizaciji z metodo najbližjega soseda. Na sliki 3.7 je prikazan rezultat po optimizaciji s 3opt. 3opt [17] deluje tako, da vzame tri različne povezave med objekti in preveri, če je z menjavo povezav možno skrajšati skupno dolžino premikov. V primeru, da je to mogoče, izvede menjavo povezav. To ponovi

za vse možne povezave vmed objekti. Časovna zahtevnost algoritma 3opt je $O(n^3)$.

Grafa 3.8 in 3.9 prikazujeta rezultate optimizacijskih algoritmov. Faktor optimizacije je določen kot razmerje med dolžino neoptimiziranih premikov in dolžino premikov po optimizaciji. Razmerje izris/premik pa vsebuje informacijo o naravi slike pred samo optimizacijo. Na levi strani grafov so prikazane tri datoteke, pri katerih so slike že same po sebi takšne, da ne potrebujejo optimizacijskega algoritma. Pri teh slikah je število objektov majhno. Datoteke z majhnim številom objektov niso bile vključene v izračun povprečja. Faktor optimizacije je precej odvisen od same narave slike. Manjši faktor optimizacije zato ne pomeni nujno tudi slabše optimizirane poti premikov. Rezultati testiranja programa za posamezne datoteke se nahajajo v tabeli E.1.

Na sliki 3.10 je prikazan primer vektorske slike za izris na risalniku. Slika je sestavljena iz osnovnih gradnikov, opisanih v prejšnjem poglavju slike 3.2, 3.3 in 3.4 ter tabeli 3.1. V nadaljevanju je podana pripadajoča G koda, ki sem jo generirala s pomočjo programa.



Slika 3.10: Primer predloge DXF.

Primer programa v G kodi:

N1 G90.1	—Absolutne vrednosti za I,J
N2 G0 Z4.0000	—Premik osi Z
N3 G0 X1.0000 Y2.0000	—Premik na začetek kroga
N4 G1 Z0 F1000	—Nastavitev delovne hitrosti
N5 G2 X1.0000 Y2.0000 I2.0000 J2.0000	—Izris kroga
N6 G0 Z4.0000	
N7 G0 X3.0000 Y3.0000	—Premik na začetek loka
N8 G0 Z0.0000	
N9 G3 X1.0000 Y1.0000 I3.0000 J1.0000	—Izris loka
N10 G1 X3.0000 Y3.0000	—Izris črte
N11 G0 Z4.0000	
N12 M30	—Konec programa

Poglavje 4

Risalnik

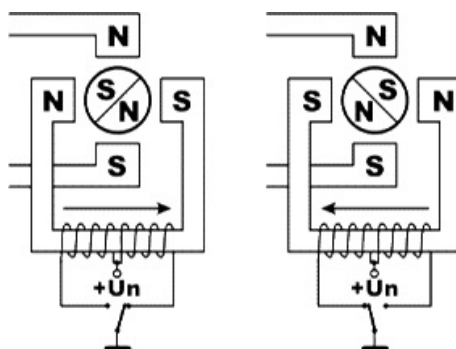
4.1 Mehanski del

4.1.1 Koračni motorji

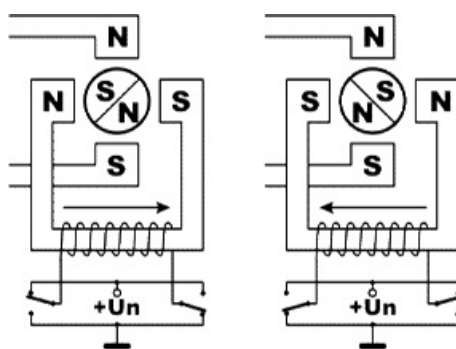
Rotor koračnega motorja se premika v diskretnih korakih za določen kot. S tem omogoča nadzorovano premikanje in zato so koračni motorji še posebej uporabni v aplikacijah, ki zahtevajo natančno pozicioniranje.

Menjava smeri toka v tuljavi povzroči spremembo magnetnega polja na statorskih polih, kar posledično povzroči koračenje motorja. Obstajata dve skupini koračnih motorjev: unipolarni in bipolarni. Razlikujeta se po načinu krmiljenja. Unipolarni imajo dvoje navitij na en par statorskih polov. Navitji imata skupaj sredinski odcep, ki je priključen na enega od priključkov napajalnega izvora, ostala konca navitij pa sta preko preklopnega stikala priključena na drugi potencial napajalnega izvora. Unipolarni motor se krmili s pomočjo enega preklopnega stikala na en par polov. Preklop povzroči menjavo smeri toka med obema koncema navitja in s tem menjavo magnetnih polov statorja (Slika 4.1). Bipolarni imajo po eno navitje na en par statorskih polov. Sprememba napetostnih potencialov na obeh straneh navitja povzroči menjavo smeri toka. Bipolarni koračni motor potrebuje dve stikali, ki izmenično preklapljata napajalno napetost (Slika 4.2).

Unipolarni motorji imajo skupaj štiri navitja, bipolarni pa dva. Pri isti velikosti motorja to pomeni, da mora biti pri unipolarnih motorjih žica navitja tanjša kot pri bipolarnih. Posledica tanjše žice, je da je upornost navitja veliko večja. Navor koračnega motorja se poveča z večanjem števila ovojev ali s povečanjem toka skozi navitje (poveča gostoto magnetnega pretoka v statorski tuljavi). Povečevanje navora je omejeno z dvigom temperature, ki se pojavi



Slika 4.1: Unipolarni koračni motor.



Slika 4.2: Bipolarni koračni motor.

zaradi izgub v navitjih. Bipolarni imajo zato lahko precej večji navor [4], saj je pri isti velikosti motorja žica navitja lahko dvakrat debelejša.

Premikanje motorjev se doseže z zaporedjem impulzov (prikazani v tabelah 4.1 do 4.3), ki krmilijo stikala. Premikanje v smeri urinega kazalca (CW, ang. ClockWise) z zaporedjem po naraščajočih korakih, premikanje v nasprotni smeri (CCW, ang. CounterClockWise) pa z zaporedjem po padajočih korakih. Metode vzbujaanja koračnih motorjev (AB sta signala za en par polov, CD pa za drug par polov):

- Vzbujaanje s polnim korakom (ang. full-step oz. normal drive mode) (Tabela 4.1)

Motor krmilimo z dvema fazno zamaknjenima signaloma.

- Vzbujaanje s polovičnim korakom (ang. half-step mode) (Tabela 4.2)

Ob vsakem urinem impulzu se premakne le za pol koraka. Pri tem načinu ima motor dvakratno število korakov na obrat. Navor motorja je pri-

bljižno za polovico manjši od navora v polnokoračnem načinu vzbujanja [12].

- Valovno vzbujanje (ang. wave drive mode)(Tabela 4.3)

Pri tem načinu vzbujanja je v določeni fazi napajano le eno navitje, zato se držalni in delovni moment zmanjšata za 30% [11] Posledica je manjša natančnost koraka. Prednost tega načina pa je v boljšem izkoristku.

	Korak 1	Korak 2	Korak 3	Korak 4
A	1	0	0	1
B	0	1	1	0
C	1	1	0	0
D	0	0	1	1

Tabela 4.1: Vzbujanje s polnim korakom.

	K. 1	K. 2	K. 3	K. 4	K. 5	K. 6	K. 7	K. 8
A	1	0	0	0	0	0	1	1
B	0	0	1	1	1	0	0	0
C	1	1	1	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	1	1	1	0

Tabela 4.2: Vzbujanje s polovičnim korakom.

	Korak 1	Korak 2	Korak 3	Korak 4
A	0	0	0	1
B	0	1	0	0
C	1	0	0	0
D	0	0	1	0

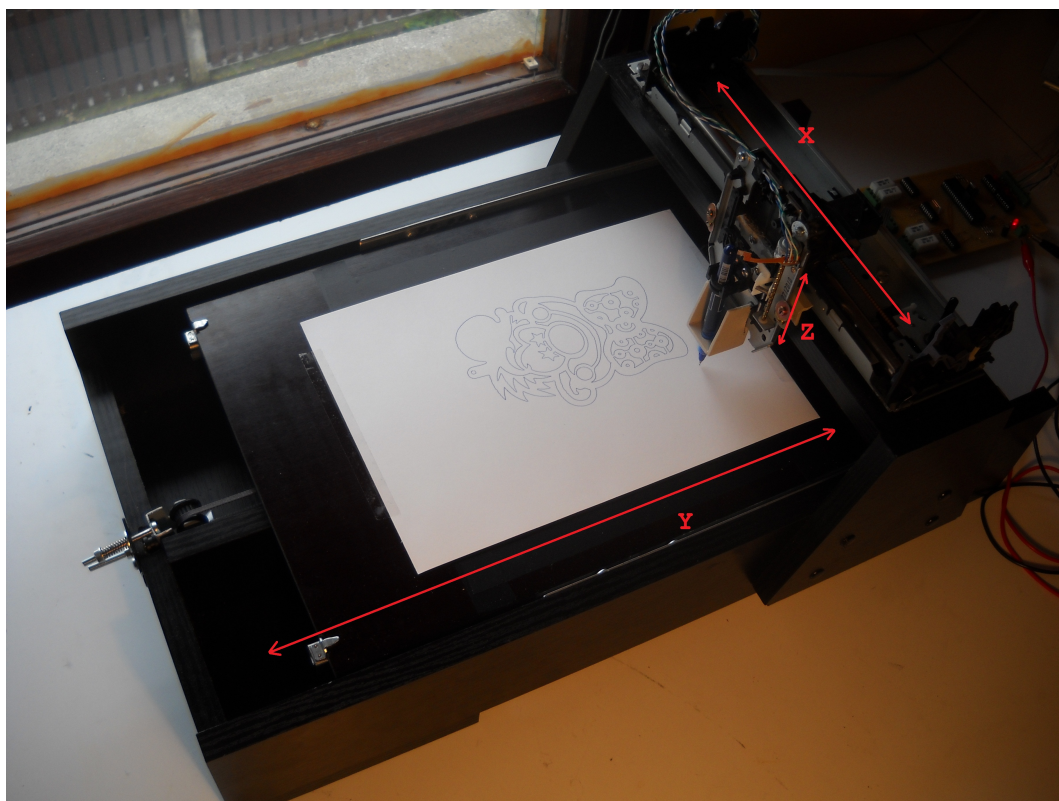
Tabela 4.3: Valovno vzbujanje.

4.1.2 Risalnik

Risalnik sestavljajo motorji ter mehanizmi, ki omogočajo premikanje po oseh, in ohišje kamor so vpeti (Slika 4.3). Ohišje je sestavljeno iz 18 mm iverala. Za delovno površino pa služi 9 mm vezana plošča (Slike A.3, A.1, A.2).

Mehanizem in motor, ki omogoča premikanje po osi X, sta bila vzeta iz odsluženega pljuvalnega tiskalnika Epson LQ-300+ (Slika A.4). To je mehanizem, ki je v tiskalniku služil za premik glave.

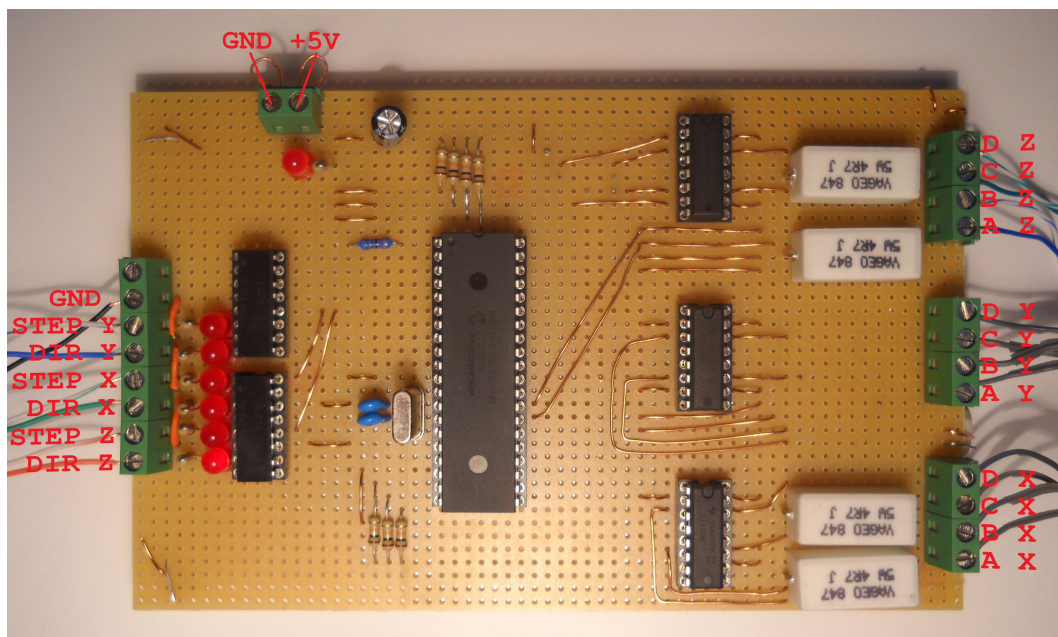
Premik v smeri Y je realiziran s premikom delovne površine. Delovna površina je vpeta na vodila za predal. Mehanizem, ki skrbi za premik Y, sestavljajo zobata kolesa, zobati jermen in motor. Motor je v tiskalniku Epson LQ-300+ služil za premikanje papirja, ostali deli mehanizma pa so bili vzeti iz igličnega tiskalnika NEC P72X (Slike A.5, A.6). Za os Z je uporabljen mehanizem za pozicioniranje glave iz CD-ROMa (Slika A.7).



Slika 4.3: Risalnik.

4.2 Krmilno vezje

4.2.1 Splošno

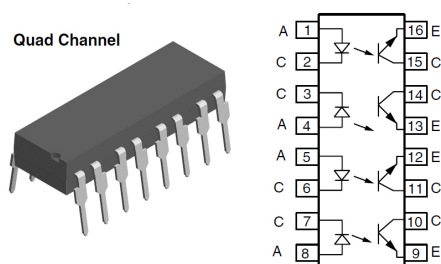


Slika 4.4: Vezje.

Vezje ima vhod za napajanje in vhode krmilnih signalov 'Step' in 'Dir' za tri motorje (Slika 4.4). Vezje pretvori vhodne krmilne signale v močnostne izhodne signale za motorje. Izhod za en bipolarni koračni motor je sestavljen iz štirih signalov - to sta po dva signala za eno navitje motorja (Slika B.1 in Tabela B.1).

4.2.2 Opto-spojnik

Opto-spojniki galvanjsko ločijo signale računalnika in krmilnega vezja. Koračni motorji povzročajo v vezju veliko motenj. Opto-spojniki poskrbijo za zaščito računalnika pred motnjami iz vezja. Vezje ILQ74 vsebuje štiri opto-spojnike. Opto-spojnik je par GaAlAs infrardeče LED diode in silicijevega NPN foto-tranzistorja (Slika 4.5) [7].



Slika 4.5: ILQ74.

4.2.3 Mikrokrmilnik

PIC16F877 je 8 bitni mikrokrmilnik proizvajalca Microchip. Družina PIC obsega veliko mikrokrmilnikov, od enostavnih z 8 priključki pa do zmogljivejših s 40 priključki. Prednost teh mikrokrmilnikov je v nizki ceni in FLASH programskem pomnilniku, ki omogoča večkratno vpisovanje programa. PIC16F877 ima 40 priključkov, od katerih je 33 vhodno/izhodnih in jih lahko programsko krmlimo. Največja frekvenca, pri kateri še deluje, je 20MHz. Deluje pri napetosti od 2,0V do 5,5V. PIC16F877 vsebuje 8K FLASH programskega pomnilnika (14-bitne besede), 368 bajtov RAM pomnilnika za splošno uporabo in 256 bajtov podatkovnega EEPROM pomnilnika. Mikrokrmilnik je tipa RISC. Ima le 35 ukazov, od katerih se vsi, razen vejitvenih ukazov (osem urinih period) izvedejo v štirih urinih periodah [6].

Priključki RC0, RC1 in RC2 so vhodni. To so vhodi za 'Dir' signale treh osi risalnika. Priključki RB5, RB6 in RB7 služijo kot vhodi signalov 'Step' za vse tri osi. 'Step' signali ob spremembi vrednosti (pozitivna in negativna fronta) prožijo prekinitve. Potrebna je le prekinitve ob pozitivni fronti, zato je ob prekinitvi potrebno preveriti katera jo je prožila. Kadar pride do prekinitve pozitivne fronte se v odvisnosti od signala 'Dir' posodobi števec stanja motorja. V glavnem delu programa se glede na vrednost števca stanja motorja postavijo izhodni signali na priključkih RD0 - RD3, RC4 - RC7 in RD4 - RD7 (Slika 4.6).

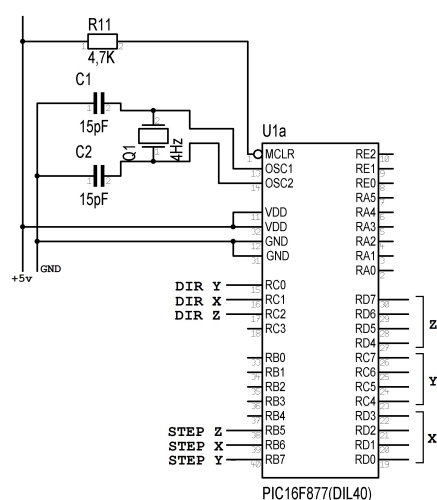
Psevdokoda PIC programa:

```
Prekinitvev:
  if pozitivna fronta signala Step
    if Dir == 1
      Stanje_motorja++ po modulu 4
    else
      Stanje_motorja-- po modulu 4
```

```

Main:
  Zanka
    if Stanje_motorja == 0
      izhod = 1010
    else if Stanje_motorja == 1
      izhod = 0110
    else if Stanje_motorja == 2
      izhod = 0101
    else Stanje_motorja == 3
      izhod = 1001
  Goto Zanka

```

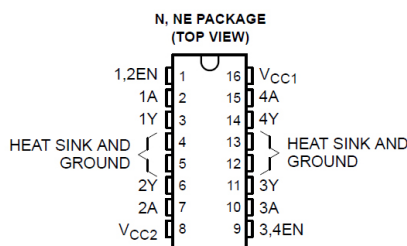


Slika 4.6: PIC16F877.

4.2.4 Gonilnik

Integrirano vezje L293D vsebuje štiri polovične gonilnike tipa H-most. Dva H mostova sta potrebna za krmiljenje enega koračnega motorja, po en za vsako navitje. Vezje L293D prenese tokovno obremenitev do maksimalno 1,2A pri napajalni napetosti v območju med 4,5V in 36V. Vezje ima ločeno napajalno napetost za logiko in močnostni del. Ima NE ohišje za odvajanja toplote - hlajenje preko priključnih pinov. Vsebuje tudi temperaturno zaščito [5]. V vezju so tudi zelo hitre omejevalne diode, ki so potrebne zaradi napetostnih prenihajev, ki lahko poškodujejo ali uničijo elektroniko in se pojavijo pri hitrem preklopu napetosti (pravokotni impulzi).

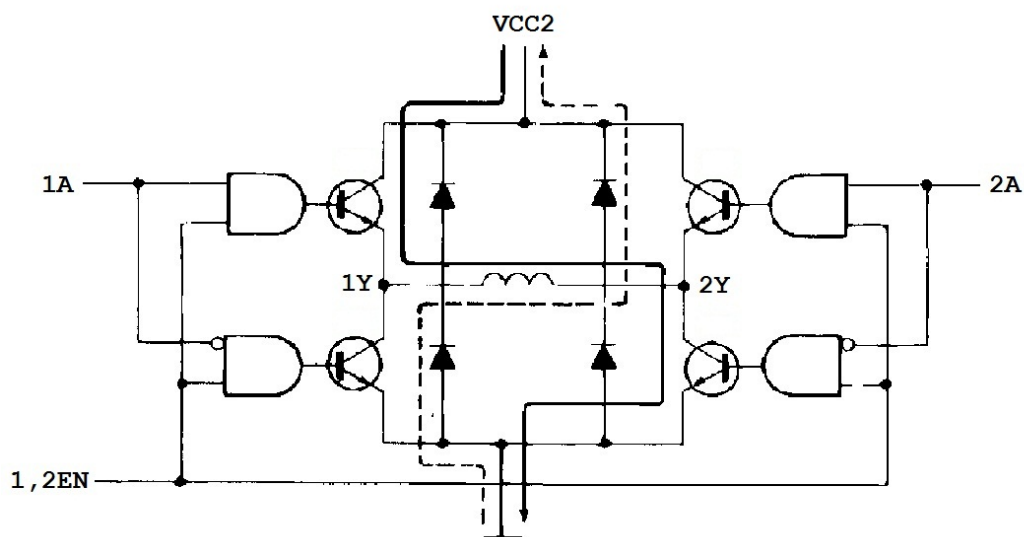
Gonilnik ima vhode (1A, 2A, 3A, 4A) in izhode (1Y, 2Y, 3Y, 4Y) (Slika 4.7). Na vhode so vezani signali, ki jih generira mikrokrmilnik PIC, izhodi pa



Slika 4.7: L293D.

so vezani na motorje. Ima dva vhoda za omogočitev 1,2EN in 3,4EN. Vsak omogoči po en par vhodov in izhodov, kadar je postavljen na logični nivo 1. Vezje ima še dva vhoda za napetost. V_{cc1} je napajalna napetost za logiko, V_{cc2} pa napajanje pogona.

Na Sliki 4.8 je prikazan princip delovanja H-mosta. Vezje vsebuje štiri stikala (tranzistorji). Stikala se preklapljajo v parih. Ko sta sklenjeni stikali S1 in S4 steče tok skozi tuljavo in motor se premakne za en korak v smeri urinega kazalca. Ko sta sklenjeni stikali S2 in S3 pa steče tok skozi tuljavo v nasprotni smeri in motor se premakne za en korak v nasprotni smeri urinega kazalca.



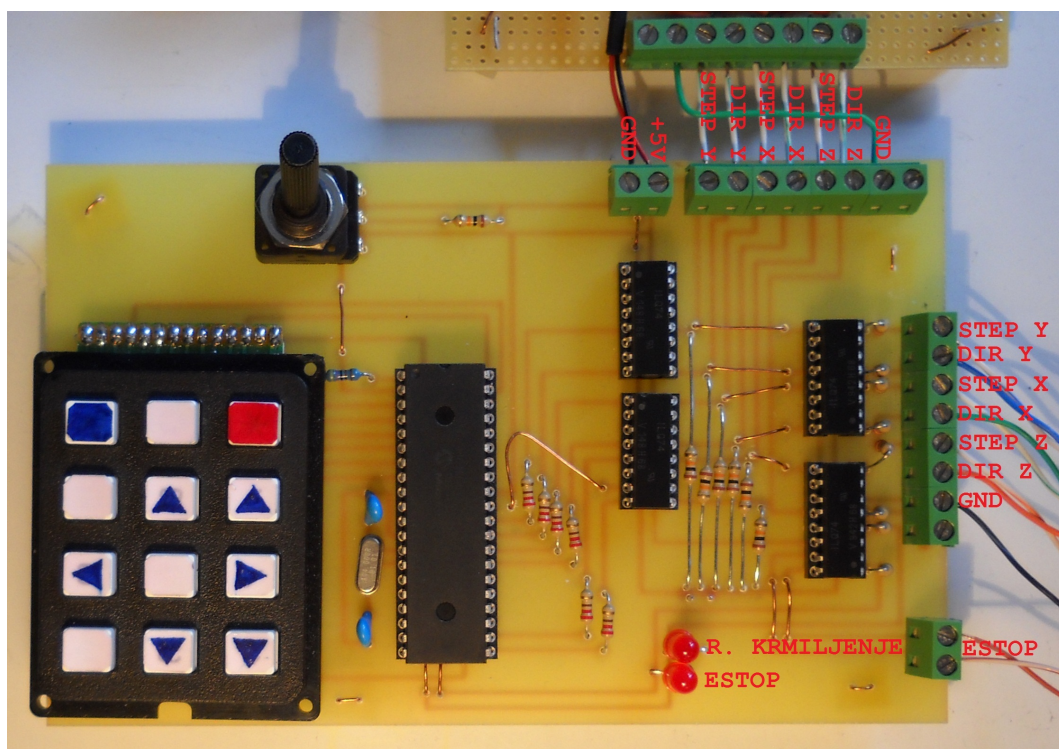
Slika 4.8: H-most.

4.3 Nadzorno vezje

4.3.1 Splošno

Nadzorno vezje je vezni člen med računalnikom in krmilnim vezjem. Risalniku doda dodatne funkcionalnosti:

- Ročno krmiljenje (S pomočjo smernih tipk in mikrokrmilnika se generirajo 'Step' in 'Dir' signali za krmiljenje motorjev. S potenciometrom se uravnava hitrost krmiljenja.).
- Senzorji za mejne in začetne pozicije osi.
- EStop signal (prekinitev delovanja risalnika).



Slika 4.9: Vezje.

Postopek izdelave vezja je prikazan v dodatku D. Vezje je bilo načrtovano s pomočjo programa 'Target 3001!' (Slika C.1). Izhodna datoteka je predloga tiskanega vezja v formatu DXF (Slika D.1). Predlogo je potrebno pretvoriti

v G kodo in jo s pomočjo risalnika narisati (Slika D.2) na ploščico za tiskano vezje (viroplast na katerega je nanešena tanka plast bakra). Postopek risanja je potrebno večkrat ponoviti, zato, da je plast jedkanju odpornega nanosa dovolj debela. Za risanje je bil uporabljen "Fine-Tip Red Color Staedtler Lumocolor Permanent Marker 318-2". Zadnja faza izdelave vezja je jedkanje. Vezje je bilo jedkano v zmesi vode - H_2O , solne kisline - HCl in vodikovega peroksida - H_2O_2 , v razmerju 3:2:1 (Slika D.3). Uporabljena je bila solna kislina koncentracije 30% in stabilizirana vodna raztopina s cca. 30% vodikovega peroksida. Končano tiskano vezje je prikazano na slikah D.4 in 4.9.

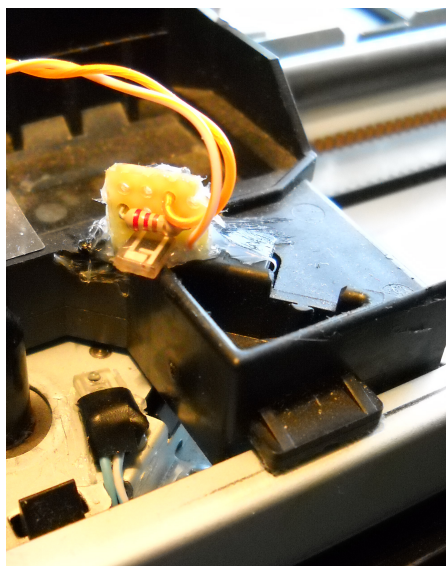
4.3.2 Senzorji

Napake v programski kodi lahko povzročijo nenadzorovano delovanje CNC naprave. Programska koda lahko zahteva delovanje naprave izven delovnega območja. Takšno delovanje je nevarno za okolico, lahko pa se poškoduje ali uniči tudi naprava sama. Zato je potrebno omejiti delovanje naprave na področje delovne površine. To se doseže s senzorji mejnih pozicij (ang. limit switch). Senzorji kontrolnemu programu posredujejo informacijo o prekoračitvi meje, le ta pa ustavi napravo in tako prepreči nedovoljeno delovanje naprave.

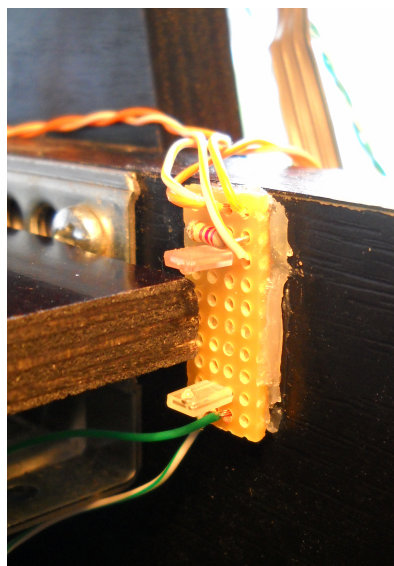
Za pravilno delovanje naprave so potrebni tudi senzorji začetnega položaja (ang. home switch). Ob zagonu sistema je potrebna inicializacija naprave. S pomočjo kontrolnega programa Mach3 lahko uporabnik zateva postavitev osi v začetni položaj. Ob tej zahtevi začne kontrolni program premikati posamezno os v smeri proti senzorju začetnega položaja, ko ga doseže, preneha s premikanjem in nastavi trenutno pozicijo osi. Senzor začetnega položaja se lahko nahaja na katerikoli koordinati osi in ne nujno v izhodišču delovne površine. Mach3 nastavi trenutno pozicijo osi na koordinato, ki je podana v nastavitvah (Slika 4.13).

Vsaka os naprave bi potrebovala tri senzorje (po dva senzorja mejnih pozicij in en senzor začetnega položaja). Skupaj je to devet senzorjev, za kar bi bilo potrebnih devet vhodov na paralelnih vratih, te pa imajo le pet vhodnih priključkov. Zato ima risalnik le dva senzorja začetnega položaja - senzor začetnega položaja osi X (Slika 4.10) in senzor začetnega položaja osi Y (Slika 4.11). Senzorja sta postavljena tako, da določata izhodišče delovne površine. Mejne točke pa so emulirane programsko (ang. soft limits) v Mach3. Dodatnih senzorjev nisem vgradila v risalnik, saj takšna realizacija zadošča potrebam risalnika. Več načinov, za rešitev problema premajhnega števila vhodov, je podanih v [2].

Programsko definirane mejne točke lahko nadomestijo senzorji mejnih po-



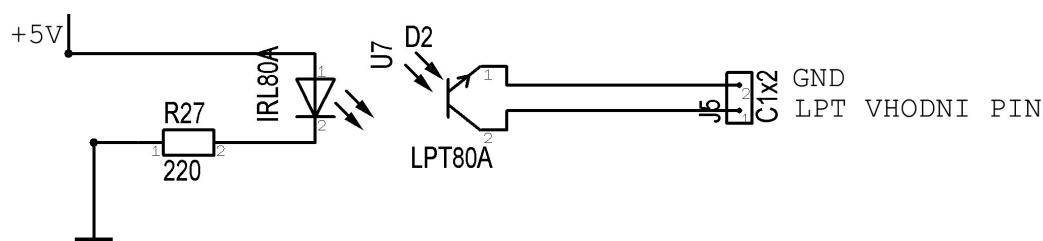
Slika 4.10: Senzor osi X.



Slika 4.11: Senzor osi Y.

zicij. To lahko deluje le ob predpostavkah, da kontrolni program pozna koordinate, na katerih se naprava trenutno nahaja. To pomeni, da je bila naprava predhodno inicializirana in deluje natančno - pri delovanju motorjev ne izgublja korakov. Programsko morajo biti določene minimalne in maksimalne koordinate (Slika 4.13), ki predstavljajo delovno površino v okviru katere naprava sme delovati. Operater mora izvesti inicializacijo ob vklopu naprave. V nastavitvah je določena smer, v kateri se na posamezni osi išče začetni položaj. Ko se sproži senzor začetnega položaja, kontrolni program ve na kateri koordinati se trenutno nahaja. Postopek se ponovi za vsako os posebej. Mach3 omogoča tudi, da ta senzor začetnega položaja deluje kot senzor mejne pozicije. Pomembni prednosti osi Z sta, da omogoča menjavo pisala in da ima varnostni mehanizem, ki omogoča da ne pride do poškodb na napravi v primeru dostopa izven delovnega področja. Zaradi teh dveh lastnosti pri osi Z ni bilo smiselno vgraditi senzorja začetnega položaja. Posledično mora operater ročno nastaviti začetni položaj ob inicializaciji.

Posamezen fotoelektrični senzor (Slika 4.12) je optično stikalo in je realiziran kot par IR oddajniške diode (IRL81A - GaAlAs Infrared Emitter [9]) in fototranzistorja (LPT80A - Silicon NPN Phototransistor [8]). S pomočjo fototranzistorja se zazna optični signal, ki ga oddaja IR dioda. Signal senzorja je aktiven v nizkem stanju (ang. active low). Fototranzistor senzorja je priključen med vhodni priključek in GND priključek paralelnih vrat. Privzeto



Slika 4.12: Shema vezave fotoelektričnega senzorja.

Motor Home/SoftLimits

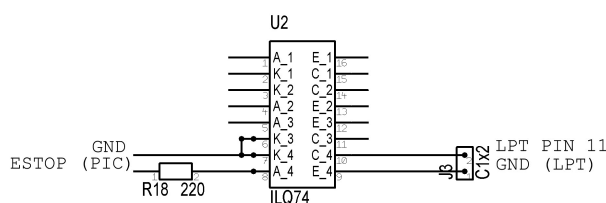
Entries are in setup units.

Axis	Reversed	Soft Max	Soft Min	Slow Zone	Home Off.	Home Neg	Auto Zero	Speed %
X		190.00	0.00	1.00	0.0000			20
Y		190.00	0.00	1.00	0.0000			20
Z		100.00	0.00	1.00	0.0000			20

Slika 4.13: Mach3 nastavitve začetnega položaja.

stanje vhodnega priključka je visoko (+5V). Ko posamezna os doseže začetno pozicijo, se stikalo sklene in povzroči nizko stanje signala na vhodu. Senzor je lahko priključen na kateregakoli od vhodnih priključkov paralelnih vrat (priključki 10, 11, 12, 13 in 15). Senzor začetnega položaja osi X je priključen na 12. priključek, osi Y pa na 13. priključek.

4.3.3 EStop



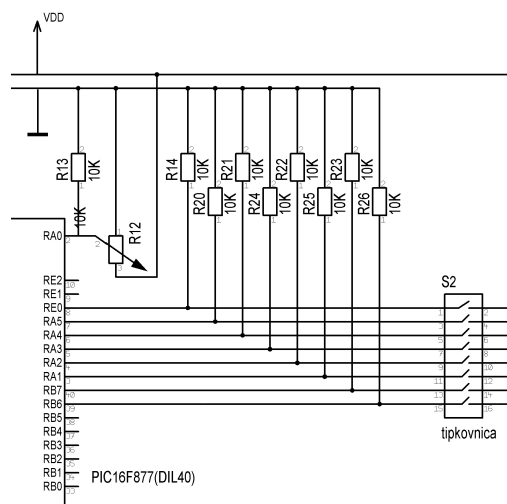
Slika 4.14: Shema EStop.

Vsaka naprava mora imeti EStop gumb za zaustavitev v sili. Ob pritisku na gumb mora naprava prenehati z delovanjem. Mach3 ima poseben vhod za signal Estop. Ob aktivnem stanju signala (nizko stanje), program preneha z

vsemi aktivnostmi in šele, ko je signal v visokem stanju, je omogočen reset programa in nadaljevanje z delom.

Estop gumb se nahaja na tipkovnici in je obarvan rdeče (Slika 4.9). Gumb je povezan na mikrokrmilnik PIC. Pritisk gumba postavi signal v visoko stanje, ta je povezan na vhod opto-spojnika in povzroči nizko - aktivno stanje na vhodu paralelnih vrat (Slika 4.14). Signal Estop se deaktivira s ponovnim pritiskom na Estop gumb. Estop signal je povezan na 11. priključek paralelnih vrat.

4.3.4 Ročno krmiljenje



Slika 4.15: Shema ročno krmiljenje.

Del vezja, ki omogoča ročno krmiljenje risalnika, sestavlja tipkovnica in potenciometer, ki sta povezana na mikrokrmilnik. Na tipkovnici se nahajajo smerne tipke za premik v treh oseh: levo, desno - os X, naprej, nazaj - os Y in gor, dol - os Z. Tipkovnica ima tudi dve funkcijski tipki: modra - izbira med računalniškim in ročnim krmiljenjem risalnika, ter rdeča - zaustavitev v sili. Potenciometer pa omogoča nastavitve hitrosti premikanja po oseh. Vezje ima dve LED diodi, ki delujeta kot indikatorja EStop načina in načina krmiljenja. Kadar je risalnik v ročnem načinu (indikator krmiljenja je ugašjen) ga je mogoče upravljati preko smernih tipk, računalniško krmiljenje pa je onemogočeno. Ko je indikator krmiljenja prižgan, je mogoče z risalnikom upravljati preko računalnika, ročno krmiljenje pa je onemogočeno.

Vhodne signale mikrokrmilnik dobi preko tipkovnice in potenciometra. S pomočjo vhodnih signalov tvori izhodne signale 'Step' in 'Dir' za posamezno

os risalnika, ki so potrebni za krmiljenje motorjev. Frekvenco signala 'Step' določa nivo napetosti na poteciometru. Potenciometer je povezan na vhod RA0 mikrokrmilnika-PIC, ki je konfiguriran kot analogni vhod. Analogno-digitalni pretvornik pretvori napetostni nivo na vhodu v 10 bitno binarno vrednost. Rezultat je podan kot razmerje med vhodno napetostjo V in referenčno napetostjo V_{REF} ($ADC = V/V_{REF} * 1023$). Po končani pretvorbi se najtežji del operanda, to je zgornjih osem bitov, nahaja v registru ADRESH. Zakasnitev med signali 'Step' določa vgnezdna zanka. Notranja zanka se izvede 127-krat, število ponovitev zunanje pa je določeno z vrednostjo ADRESH. Mikrokrmilnik PIC potrebuje 4 urine periode, da izvrši posamezen ukaz. Za vejitvene ukaze pa potrebuje 8 urinih period [14]. Pri frekvenci ure $4MHz$ izvrši en ukaz v $1\mu s$, za skočni ukaz pa potrebuje dvakrat toliko. ADC (ang. Analog-to-Digital Converter) za pretvorbo porabi $2\mu s/bit$ [15], ostali ukazi pa cca. $42\mu s$.

$$Zunanja_zanka = 3\mu s * 127 = 381\mu s \quad (4.1)$$

$$Zanka_min = ((3 * 127) + 5) * 1 = 386\mu s \quad (4.2)$$

$$Zanka_max = ((3 * 127) + 5) * 255 = 98430\mu s \quad (4.3)$$

$$T_ADC = 2\mu s/bit * 10bit = 20\mu s \quad (4.4)$$

$$Celotna_zakasnitev_min = (386\mu s) * 2 + 20\mu s + 42\mu s \quad (4.5)$$

$$= 834\mu s \quad (4.6)$$

$$Min_frekvenca = 1199,04Hz \quad (4.7)$$

$$Celotna_zakasnitev_max = (98430\mu s) * 2 + 20\mu s + 42\mu s \quad (4.8)$$

$$= 196922\mu s \quad (4.9)$$

$$Max_frekvenca = 5,08Hz \quad (4.10)$$

$$(4.11)$$

Minimalna frekvenca 'Step' signala je cca. $5Hz$, maksimalna pa cca. $1199Hz$. Izhodni signali Nadzornega vezja so ali izhodni signali mikrokrmilnika ali signali, ki jih generira krmilni program Mach3, odvisno od načina v katerem risalnik je. Ti izhodni signali so vhodni signali Krmilnega vezja.

Psevdokoda programa ročnega krmiljenja:

```
Delay1=7f
Delay2=0
cntKrmiljenje=1

Prekinitev :
```

```
if pozitivna fronta tipkaEStop
    cntEstop++
    signalEStop = cntEStop (bit 0)
if pozitivna fronta tipkaKrmiljenje
    cntKrmiljenje++
    signalKrmiljenje = cntKrmiljenje (bit 0)

Main :
    Delay2 = vrednost ADRESH

    if cntKrmiljenje (bit 0) == 0
        izhodKorak = tipkovnica
        izhodSmer = tipkovnica
        čakaj Delay1*Delay2
        izhodKorak = 0
        izhodSmer = tipkovnica
        čakaj Delay1*Delay2

    else if cntKrmiljenje (bit 0) == 1
        izhod = 0

    Goto Main
```

Poglavje 5

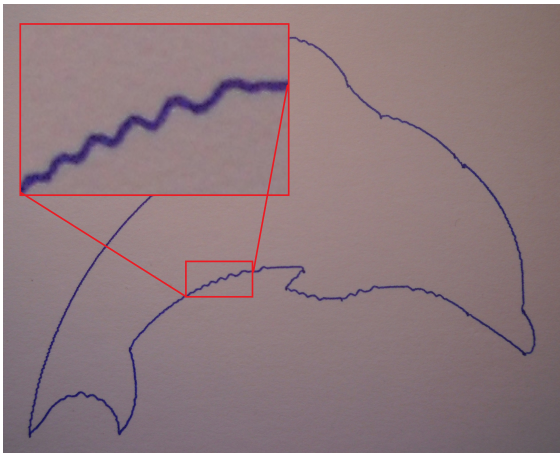
Sklepne ugotovitve

Risalnik, ki sem ga razvila v okviru diplomske naloge, sem tekom izdelave uporabila za izdelavo tiskanega vezja nadzornega dela vezja. Sicer pa bi bilo risalnik precej lahko predelati v neko bolj uporabno napravo kot npr. stroj za rezkanje vezij, stroj za potisk majic, 3D tiskalnik... , predvsem s stališča, ker sem si ob razvijanju pridobila nova znanja in izkušnje. CNC stroji so zelo uporabne naprave, tako v industrijske namene, kot tudi za domačo rabo. Omogočajo večkratno izvajanje shranjenega programa in večjo natančnost končnega izdelka, predvsem pa skrajšajo čas, ki je potreben za idelavo.

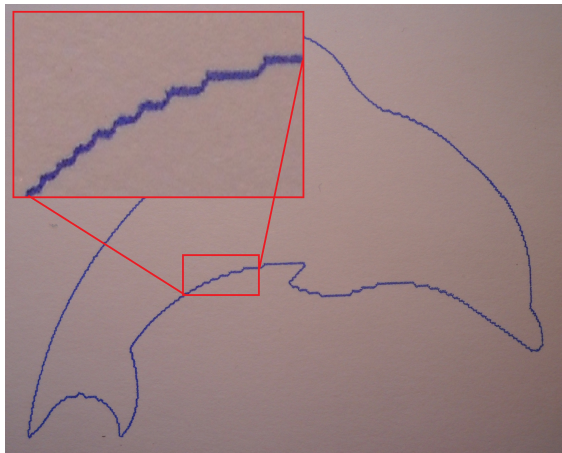
Pri razvoju risalnika sem naletela na kar nekaj novih izzivov. Tu bi posebej izpostavila načrtovanje in izdelavo tiskanih vezij, saj sem se ob tem delu prvič srečala s takšnim načrtovanjem. Ob jedkanju ploščice za tiskano vezje, se je zgodilo, da mi je ponekod, po sredini povezav, malo razjedlo bakreno plast. To se je zgodilo zato, ker je pritisk pisala, s katerim sem nanašala jedkanju odporno plast, na sredini povezave največji, zato je bil na tem delu nanos najtanjši. Bakrene povezave so sicer dovolj široke, tako da to ne predstavlja posebnega problema. Sem se pa naučila, da bo v prihodnje potrebna še kakšna dodatna plast jedkanju odpornega nanosa. Poseben izziv sta mi predstavljala tudi programiranje mikrokrmilnika PIC in nepoznavanje delovanja koračnih motorjev. Problematično je bilo tudi nepoznavanje specifikacij uporabljenih koračnih motorjev, saj tovarniških listin zanje ni bilo mogoče najti.

Do prvega zagona nisem vedela, ali bo motor osi Y imel zadosten navor za premik delovne površine. Sicer pa so bili rezultati kar zadovoljivi. Vezje in mehanizmi delujejo po pričakovanjih, kar pomeni, da je mogoče natančno pozicioniranje pisala. Problematičen je le mehanizem osi Y. Premik osi Y je realiziran s pomočjo zobatega jermena. V začetku os Y ni imela nobenega mehanizma, s katerim bi bil zobati jermen napet, posledica so bila nihanja

v smeri osi Y (Slika 5.1). Nihanja sem zmanjšala z vgraditvijo vzmeti, ki drži jermen napet (Slika 5.2). Vseeno pa ta izvedba ni najbolj primerna, saj jermen ne more biti vpet v ravni liniji, zaradi višine motorja, ki se nahaja pod delovno površino. Zaradi takšnega vpetja jermena pride pri različnih pozicijah osi Y do različnih sil, ki delujejo na jermen. Bolj primerna bi bila realizacija s pomočjo navojnega vretena, ampak zaenkrat zadošča tudi realizacija z zobatim jermenom.



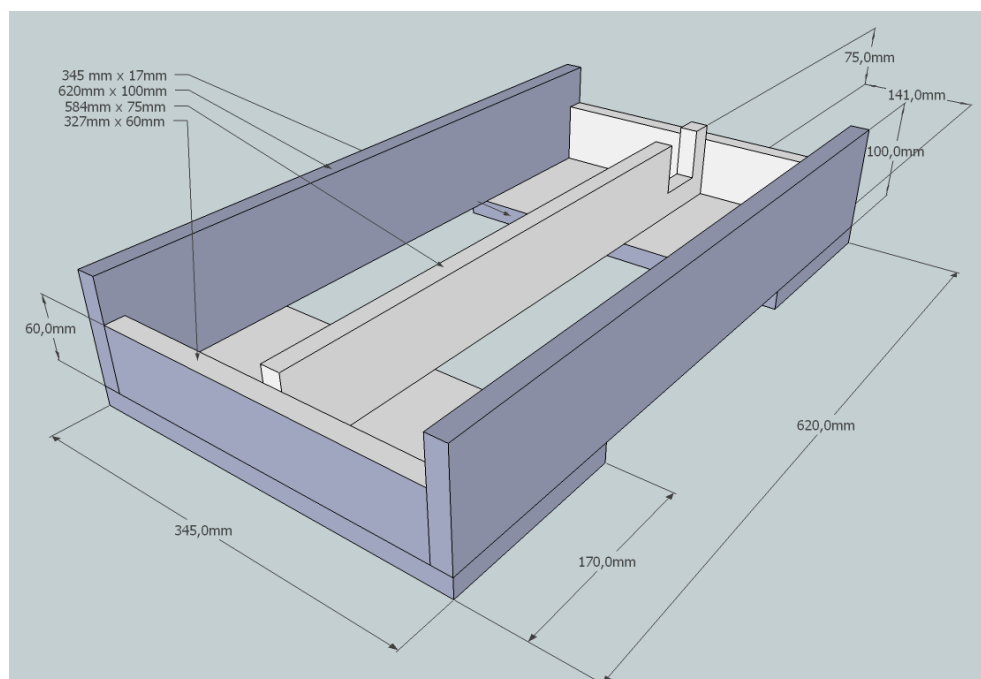
Slika 5.1: Izris 1.



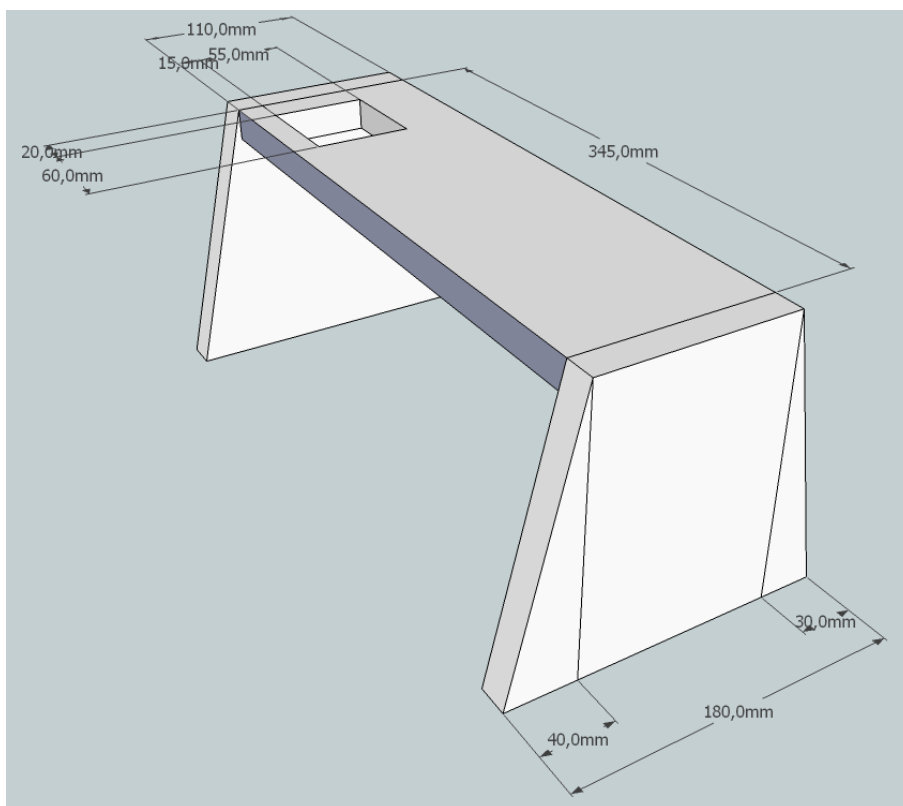
Slika 5.2: Izris 2.

Dodatek A

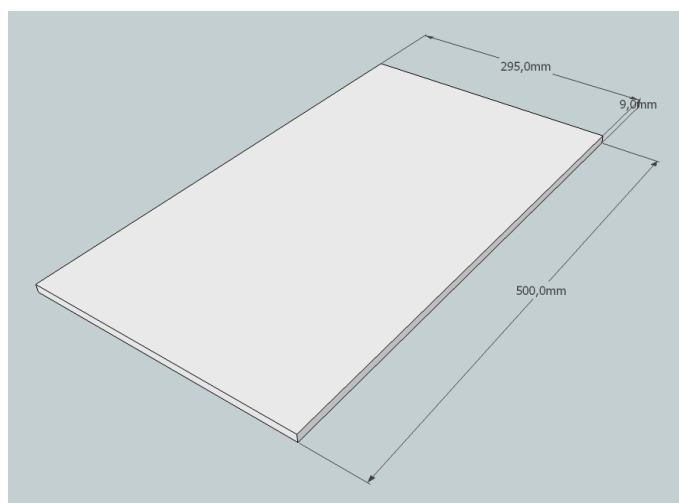
Slike risalnika



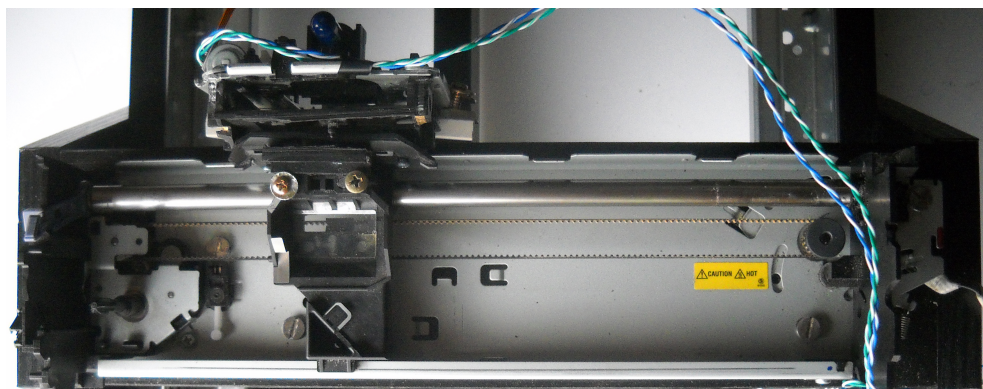
Slika A.1: Spodnji del ohišja.



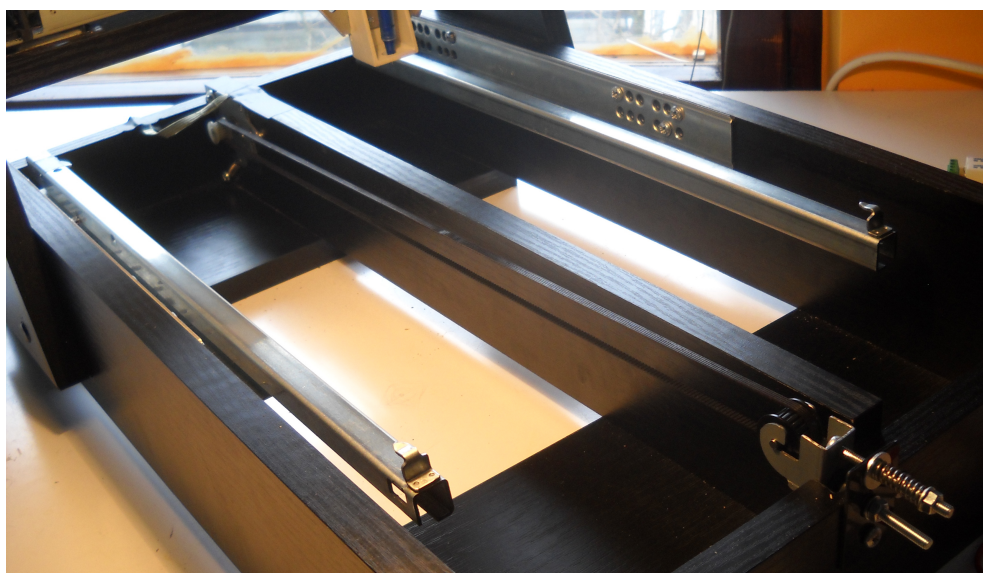
Slika A.2: Zgornji del ohišja.



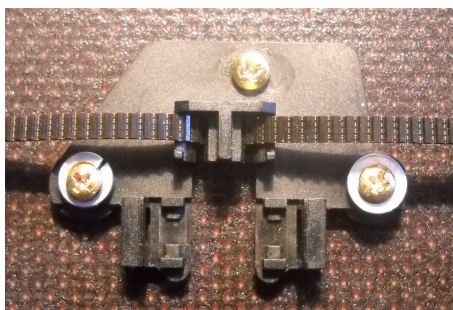
Slika A.3: Delovna površina.



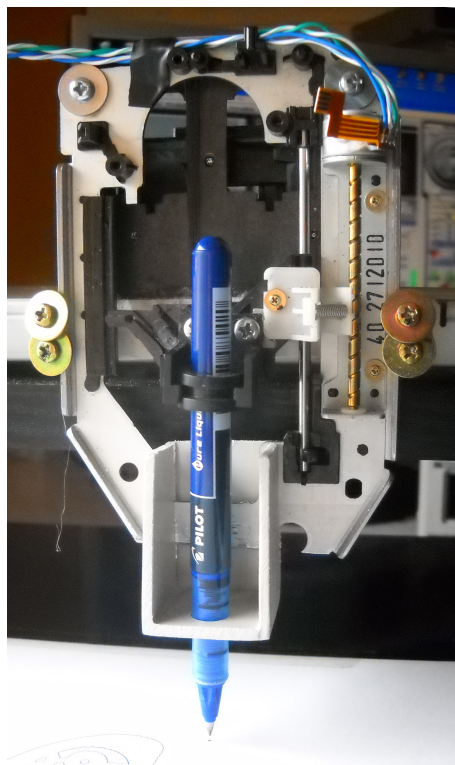
Slika A.4: Mehanizem osi X.



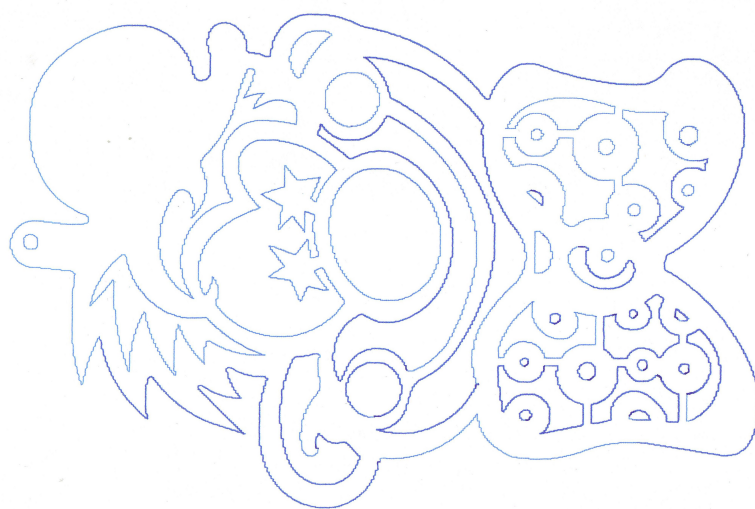
Slika A.5: Mehanizem osi Y.



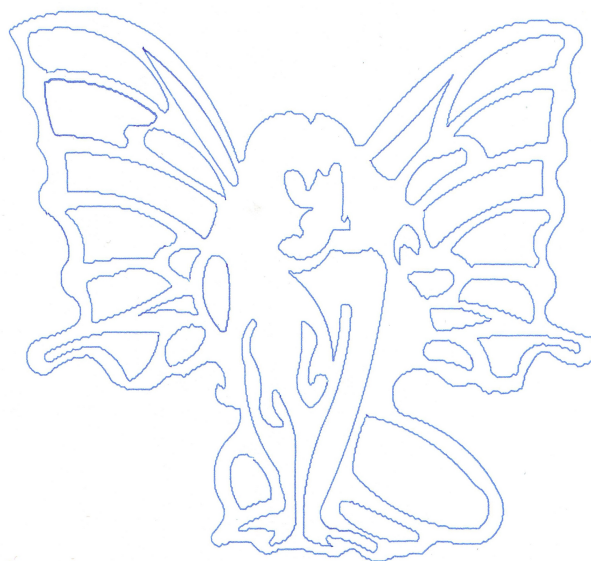
Slika A.6: Vpetje jermena na delovno površino.



Slika A.7: Mehanizem osi Z.

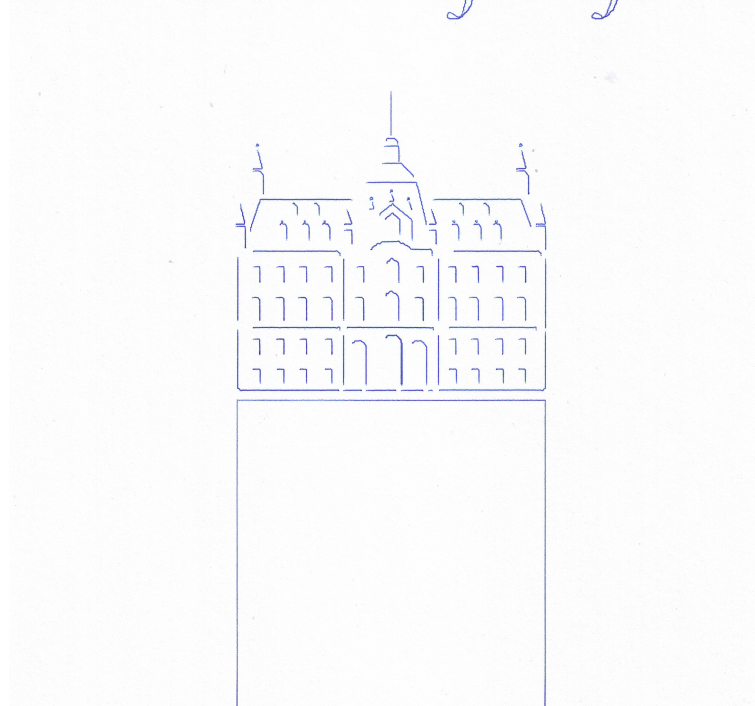


Slika A.8: Primer izrisa 1.



Slika A.9: Primer izrisa 2.

Univerza v Ljubljani



Slika A.10: Primer izrisa 3.

Dodatek B

Shema krmilnega vezja

KOL.	VREDNOST	ELEMENT	OZNAKA
11		vrstna sponka 2p	J1, J2, J3, J4
6	479ohm 0,25w 5%	upor	R1, R2, R3, R4, R5, R6
7		LED DIODA 5MM	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7
2		ilq74 dip-16	U5, U6
3		L293D DIP16	U2, U3, U4
1		pic16f877-20/p dip40	U1a
6	10K ohm 0,25W 5%	UPOR	R12, R13, R14, R15, R16, 517
1	4,7k ohm 0,25W 5%	UPOR	R11
1	220 ohm 0,25W 5%	UPOR	R18
1	4,000MHz	QUARTZ	Q1
2	15pF 500V 5,08mm	KERAMIČNI	C1, C2
4	4R7 5W 5%	UPOR	R7, R8, R9, R10
1		PODNOŽJE 40 PIN	
5		PODNOŽJE 16PIN	
1	100uF 25V	ELCO	C3

Tabela B.1: Kosovnica krmilnega vezja.

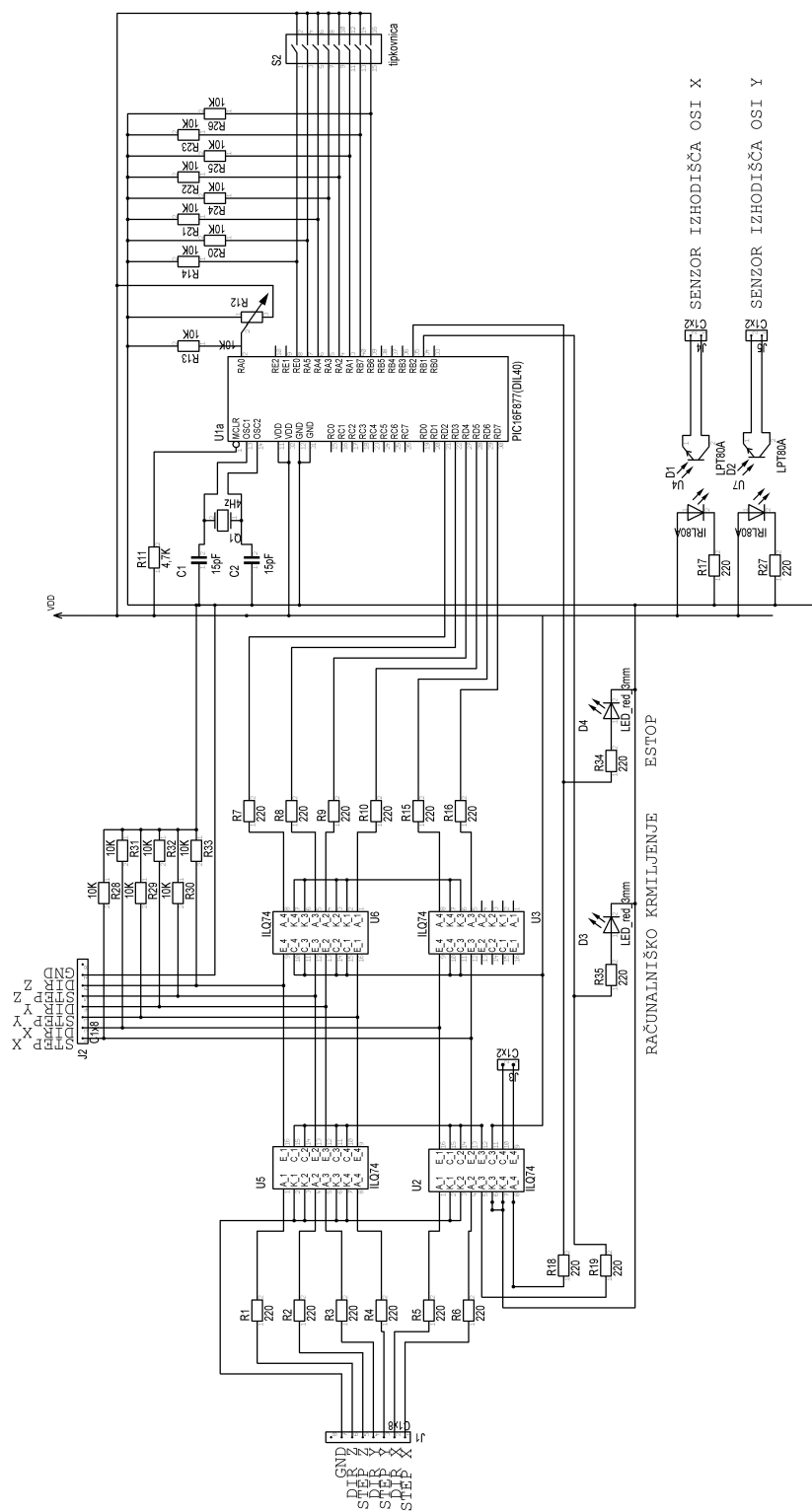
Slika B.1: Shema krmilnega vezja.

Dodatek C

Shema nadzornega vezja

KOL.	VREDNOST	ELEMENT	OZNAKA
10		vrstna sponka 2p	J1, J2, J3, J4, J5
7		LED DIODA 3MM	D3, D4
2		LPT80A	U4, U7
2		IRL80A	D1, D2
2		ilq74 dip-16	U2, U3, U5, U6
1		pic16f877-20/p dip40	U1a
14	10K ohm 0,25W 5%	UPOR	R14, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R28, R29, R30, R31, R32, R33,
1	4,7k ohm 0,25W 5%	UPOR	R11
18	220 ohm 0,25W 5%	UPOR	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R15, R16, R17, R18, R19, R27, R34, R35
1	4,000MHz	QUARTZ	Q1
2	15pF 500V 5,08mm	KERAMIČNI	C1, C2
1		PODNOŽJE 40 PIN	
1		TIPKOVNICA	
4		PODNOŽJE 16PIN	
1	10K ohm	POTENCIOMETER	R12

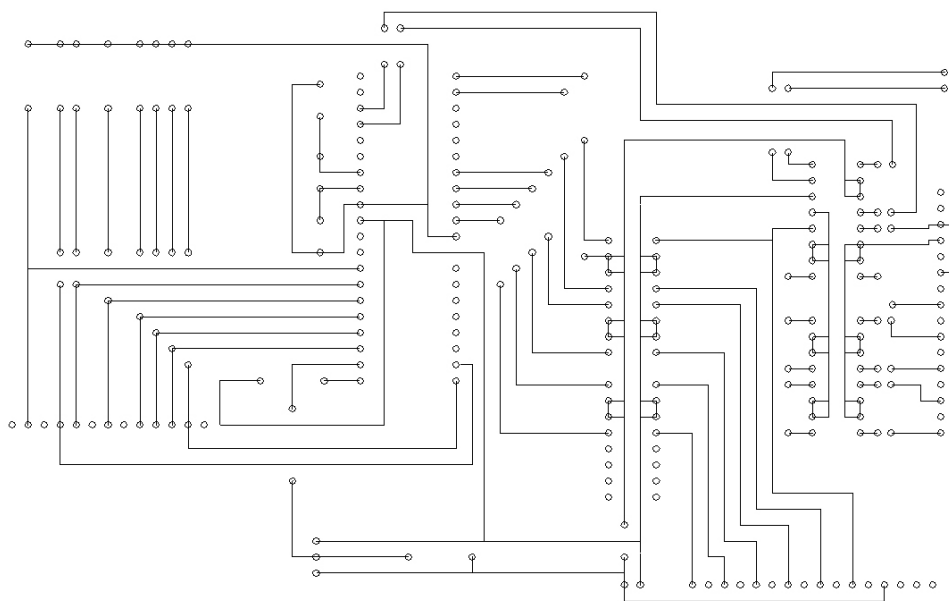
Tabela C.1: Kosovnica nadzornega vezja.



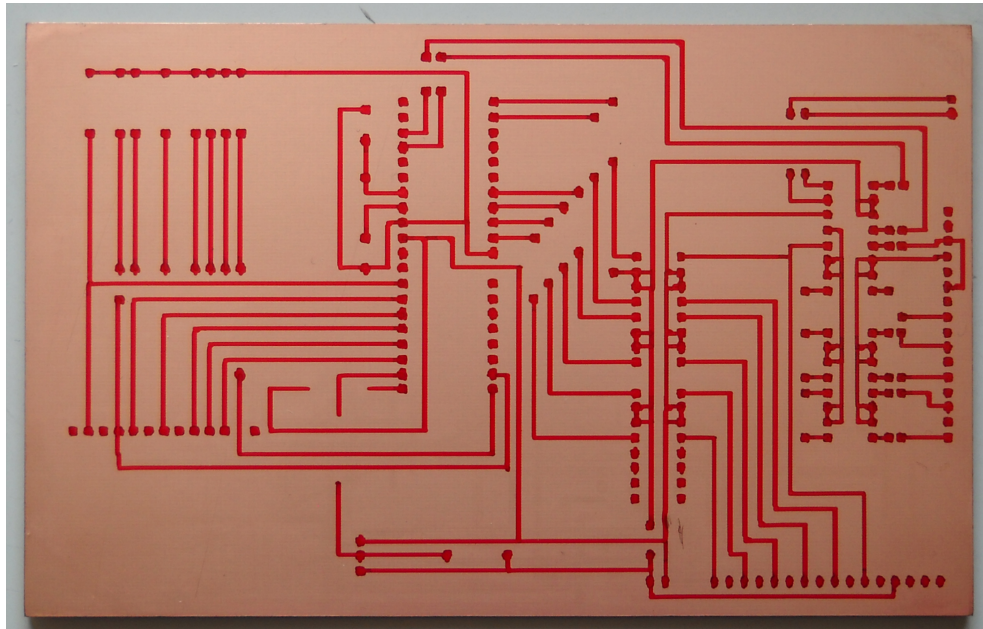
Slika C.1: Shema vezja 2.

Dodatek D

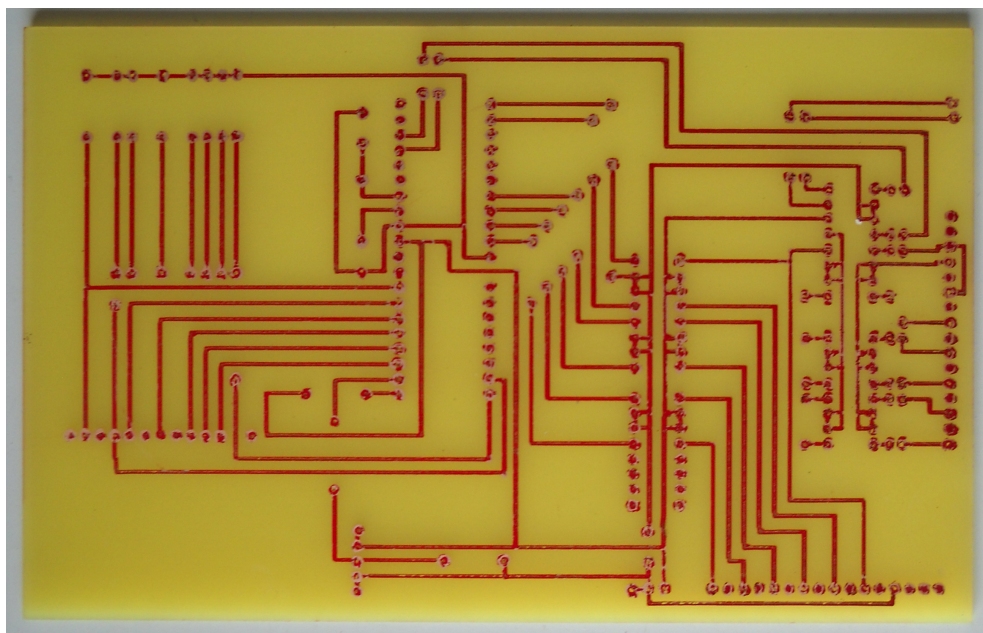
Izdelava vezja



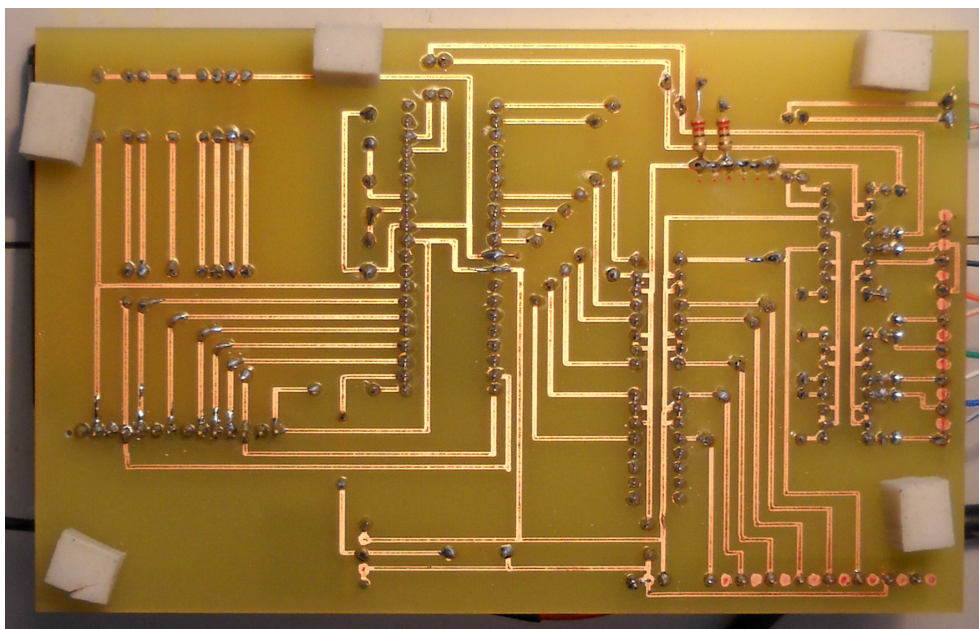
Slika D.1: Predloga tiskanega vezja v formatu DXF.



Slika D.2: Narisane povezave.



Slika D.3: Izjedkana ploščica.



Slika D.4: Spodnja stran nadzornega vezja.

Dodatek E

Test programa

Dokument	Izris (mm)	Premik -neopt (mm)	Premik -ns (mm)	Premik -3opt (mm)	Objekti	Entitete
sword.dxf	1088,43	226,39	226,39	226,39	1	225
Elephant.dxf	2169,59	151,28	148,83	148,83	3	553
steamer train.dxf	2893,11	424,86	234,82	234,82	4	413
dolphin01.dxf	628,1	175,76	0	0	5	21
Duck.dxf	2162,74	208,3	160,23	160,23	8	409
Lips.dxf	1822,11	714,12	440,3	392,67	10	74
Butterfly.dxf	2164,63	1009,77	533,25	473,03	29	1236
World.dxf	1383,66	761,67	452,34	451,78	32	2872
farrie.dxf	3651,34	986,23	795,54	688,18	32	235
klovn.dxf	3144,9	2159,99	796,96	668,83	38	341
MickeyM.dxf	2013,39	2367,7	717,37	603,23	53	221
Ferrari.dxf	2527,18	2654,94	685,81	598,19	58	545
logo.dxf	2546,59	5901,45	1524,4	1392,85	71	1736
Bear.dxf	1312,59	2004,22	728,05	614,13	78	747
Mustang.dxf	2325,83	2971,1	881,95	609,45	95	231
dragonfly_2mm.dxf	7323,91	4637,9	1543,84	1231,48	174	1314
eagle05.dxf	3496,12	2417,46	1511,87	1138,61	176	1268
school house.dxf	7321,63	2188,09	1459,96	1162,49	351	10740
Vezje shema.dxf	3483,42	5658,92	2433,71	1721,36	354	616

Tabela E.1: Izhod Generatorja G kode za različne datoteke.

Slike

1.1	Načini krmiljenja CNC stroja.	5
1.2	Skica sistema.	6
2.1	Glavno pogovorno okno programa Mach3.	8
2.2	Ročno upravljanje z napravo.	9
2.3	Vnosno polje za G kodo.	9
2.4	Paralelna vrata.	10
2.5	Signal 'Step'.	10
2.6	Dolžina signala 'Step'.	11
2.7	Mehanizem osi Z.	12
2.8	Mehanizem osi X.	12
2.9	Umerjanje motorja osi X.	14
2.10	Programski stavek G kode.	15
2.11	Krožna interpolacija.	15
3.1	Program za generiranje G kode.	17
3.2	Črta.	18
3.3	Lok.	18
3.4	Krog.	18
3.5	Neopt.	21
3.6	NSopt.	21
3.7	Opt3.	21
3.8	Graf faktor optimizacije.	22
3.9	Graf razmerja izris/premik.	22
3.10	Primer predloge DXF.	23
4.1	Unipolarni koračni motor.	25
4.2	Bipolarni koračni motor.	25
4.3	Risalnik.	27
4.4	Vezje.	28

4.5	ILQ74.	29
4.6	PIC16F877.	30
4.7	L293D.	31
4.8	H-most.	31
4.9	Vezje.	32
4.10	Senzor osi X.	34
4.11	Senzor osi Y.	34
4.12	Shema vezave fotoelektričnega senzorja.	35
4.13	Mach3 nastavitve začetnega položaja.	35
4.14	Shema EStop.	35
4.15	Shema ročno krmiljenje.	36
5.1	Izris 1.	40
5.2	Izris 2.	40
A.1	Spodnji del ohišja.	41
A.2	Zgornji del ohišja.	42
A.3	Delovna površina.	42
A.4	Mehanizem osi X.	43
A.5	Mehanizem osi Y.	43
A.6	Vpetje jermena na delovno površino.	43
A.7	Mehanizem osi Z.	44
A.8	Primer izrisa 1.	44
A.9	Primer izrisa 2.	45
A.10	Primer izrisa 3.	45
B.1	Shema krmilnega vezja.	47
C.1	Shema vezja 2.	49
D.1	Predloga tiskanega vezja v formatu DXF.	50
D.2	Narisane povezave.	51
D.3	Izjedkana ploščica.	51
D.4	Spodnja stran nadzornega vezja.	52

Tabele

2.1	Vezava signalov na paralelna vrata.	10
2.2	G kode in razlaga.	16
3.1	Zapis slik 3.2, 3.3 in 3.4 v datoteki DXF.	19
3.2	Grupne kode.	20
4.1	Vzbujanje s polnim korakom.	26
4.2	Vzbujanje s polovičnim korakom.	26
4.3	Valovno vzbujanje.	26
B.1	Kosovnica krmilnega vezja.	46
C.1	Kosovnica nadzornega vezja.	48
E.1	Izhod Generatorja G kode za različne datoteke.	53

Literatura

- [1] (2012) Elementi računalniško integrirane proizvodnje. Dostopno na:
http://lab.fs.uni-lj.si/lakos/education/undergraduate/erip/Materiali%20predavanja/ERIP%202.0%20NC_CNC%5D.pdf
- [2] (2012) Mach3Mill Install and Config Guide. Dostopno na:
http://www.machsupport.com/docs/Mach3Mill_Install_Config.pdf
- [3] (2012) Programiranje CNC strojev. Dostopno na:
http://www.visjales-mb.org/download/programiranje_cnc_strojev.pdf
- [4] (2012) Applications of monolithic bridge drivers. Dostopno na:
<http://www.positron-libre.com/archives/moteurpasapas/l293e-applications.pdf>
- [5] (2012) L293D Datasheet. Dostopno na:
http://www.ic-elect.si/pub/files/product_files/018002930200.pdf
- [6] (2012) PIC16F877 Datasheet. Dostopno na:
http://www.ic-elect.si/pub/files/product_files/122016877100.pdf
- [7] (2012) ILQ74 Datasheet. Dostopno na:
http://www.ic-elect.si/pub/files/product_files/203004500100.pdf
- [8] (2012) LPT80A Datasheet. Dostopno na:
http://www.ic-elect.si/pub/files/product_files/199001818500.pdf
- [9] (2012) IRL81A Datasheet. Dostopno na:
http://www.ic-elect.si/pub/files/product_files/199001818200.pdf
- [10] (2012) Keyboard Datasheet. Dostopno na:
http://www.ic-elect.si/pub/files/product_files/670000040100.pdf

- [11] (2012) Napajanje in krmiljenje koračnih motorjev. Dostopno na:
ftp://ftp.scv.si/vss/franc_stravs/PRENOVLJENI%20PROGRAMI%20Elektronika,%20Mehatronika/EES_pdf/EES6%20_98-105_%20%20kor.%20mot.pdf
- [12] (2012) Krmiljenje koračnih motorjev v teoriji in praksi. Dostopno na:
http://www2.arnes.si/sspslavr/k_motor/k_motor.html
- [13] (2012) DXF Reference. Dostopno na:
http://images.autodesk.com/adsk/files/acad_dxf0.pdf
- [14] (2012) 44-PIN DEMO BOARD USER'S GUIDE. Dostopno na:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41296b.pdf>
- [15] (2012) PICmicro Mid-Range MCU Family Reference Manual. Dostopno na:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/33023a.pdf>
- [16] (2012) DXF dokumenti. Dostopno na:
http://www.newtime.dk/dxf_files/2D%20flies/
- [17] (2012) The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization. Dostopno na:
<http://www2.research.att.com/dsj/papers/TSPchapter.pdf>