

Polarni 3D писаč

Barbarić, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:041118>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I

INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

POLARNI 3D PISAČ

Završni rad

Tomislav Barbarić

Osijek, 2022.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 03.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Tomislav Barbarić
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Računarstvo
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	R 4315, 22.07.2019.
OIB Pristupnika:	04790402390
Mentor:	Izv.prof.dr.sc. Tomislav Keser
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Polarni 3D pisac
Znanstvena grana rada:	Procesno računarstvo (zn. polje računarstvo)
Zadatak završnog rad:	Projektirati, izraditi i testirati sustav FFD 3D pisaca koristeći polarno referencirani koordinatni sustav pomaka ispisne glave. Konstruirati jednostavan demonstracijski primjer pisaca i upogoniti adekvatnu programsku podršku. Ispitati i verificirati funkcionalnost istog.
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	03.09.2022.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	21.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 21.09.2022.

Ime i prezime studenta:

Tomislav Barbarić

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Računarstvo

Mat. br. studenta, godina upisa:

R 4315, 22.07.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Polarni 3D pisac**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.prof.dr.sc. Tomislav Keser

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. IZRADA 3D PISAČA NA PRINCIPU DELTA STROJEVA	2
2.1. Teorijski osvrt na projekt.....	2
2.2. Prijedlog sklopovskog rješenja.....	2
2.3. Prijedlog programskog rješenja	7
3. REALIZACIJA DELTA 3D PISAČA.....	8
3.1. Korišteni alati i programska okruženja.....	8
3.2. Realizacija sklopovskog rješenja.....	8
3.3. Realizacija programskog rješenja.....	17
4. TESTIRANJE I REZULTATI.....	21
4.1. Metodologija testiranja.....	21
4.2. Rezultati testiranja	21
5. ZAKLJUČAK	25
LITERATURA.....	26
SAŽETAK.....	27
ABSTRACT	28
ŽIVOTOPIS	29

1. UVOD

Jedan od najčešćih načina proizvodnje dijelova je 3D ispis. Sam postupak postaje sve isplativiji i dostupniji za korištenje pri izradi manjih dijelova u svrhu prototipa. U kratkom vremenu dio napravljen na računalu se može izraditi pomoću 3D pisača. Razvojem tehnologije se obuhvaća sve više i više mogućih materijala korištenih za 3D ispis.

Tema završnog rada je izrada 3D pisača. Modificiranjem i nadogradnjom *open source* modela pisača izrađen je delta pisač. Ovakav model pisača pruža veliku brzinu ispisa s visokim volumenom ispisa.

U drugom poglavlju razrađena je teorijska podloga o pisačima. Predstavljene su načini ispisa te tri najčešće vrste pisača. Također su uspoređene prednosti i nedostaci te tri vrste. U trećem poglavlju detaljnije je predstavljen rad delta pisača. Četvrto poglavlje opisuje pojedine dijelove pisača od konstrukcijskih do električnih dijelova. Za pojedini dio je opisana njegova svrha u pisaču. U petom poglavlju opisan je softverski dio pisača te načini kalibracije i testiranja ispravnosti pisača. Za kraj je naveden zaključak u kojemu se nalazi osvrt na rad te sama evaluacija uspješnosti izrade pisača.

1.1. Zadatak završnog rada

Projektirati, izraditi i testirati sustav FFD 3D pisača koristeći polarno referencirani koordinatni sustav pomaka ispisne glave. Konstruirati jednostavan demonstracijski primjer pisača i upogoniti adekvatnu programsku podršku. Ispitati i verificirati funkcionalnost istog.

2. IZRADA 3D PISAČA NA PRINCIPU DELTA STROJEVA

2.1. Teorijski osvrt na projekt

Proces ispisa se može izvršiti drugačije s obzirom na pisač o kojem se radi. Osnovna i najznačajnija značajka svakog 3D pisača je sustav koji upravlja pokretima ekstrudera. Ovisno o vrsti sustava za upravljanje ekstruderom 3D pisači se mogu svrstati u tri osnovne kategorije:

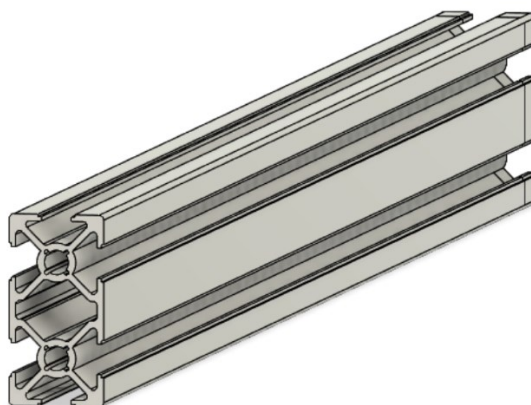
1. Kartezijski pisači
2. Delta pisači
3. Polarni pisači

Delta robot ili pisač je robot kojemu je platforma održana s tri para ruku koje su raspoređene u trokut. Pokretanje ruku pomiče platformu u tri dimenzije. Na 3D pisačima platforma je glava pisača. Najčešći način postavljanja ruku u delta 3D pisačima naziva se linearna delta. Parovi ruku su pričvršćeni na nosilo koje se giba po paralelnim stupovima. Ruke su najčešće izrađene od čvrstog materijala poput aluminija ili ugljičnih vlakana, no postoje i izvedbe pisača sa žicom.

Računanje linearnog kretanja glave pisača relativno je jednostavno. Horizontalno gibanje glave pisača povezano je s vertikalnim gibanjem nosila preko Pitagorinog teorema. Dužina ruku predstavlja dijagonalu trokuta koja je konstantna, vertikalna strana trokuta je relativna vertikalna pozicija platforme i nosila dok je horizontalan stranica trokuta relativna horizontalna pozicija platforme i nosila. Iako matematika nije teška pisač mora računati puno korijena. Upravljačke ploče s 8-bitnim procesorima teže računaju korijene te je potrebno izvršiti softversku optimizaciju za takve procesore. Novije upravljačke ploče s 32-bitnim procesorima lagano računaju korijene zbog puno bržih procesora.

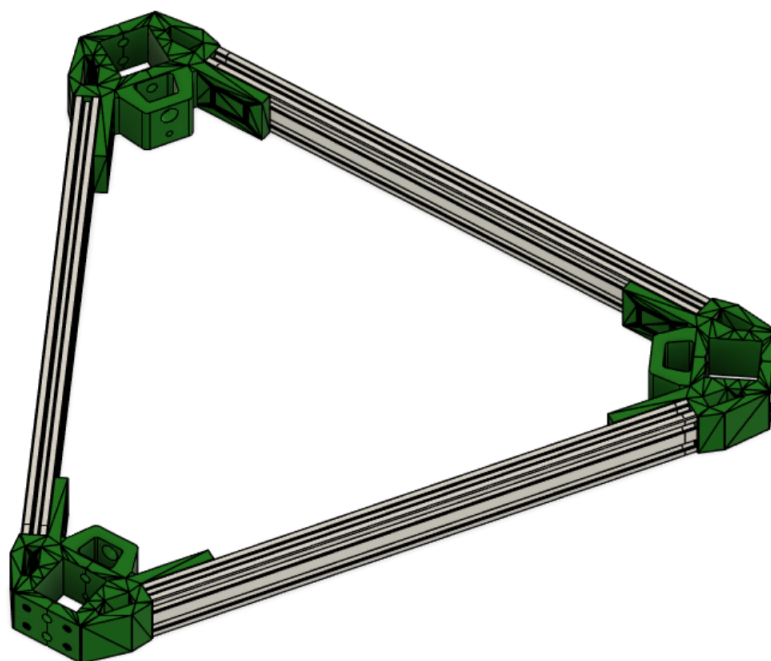
2.2. Prijedlog sklopovskog rješenja

Za izradu konstrukcije pisača koristit će se ekstruzije aluminijskih profila. Na slici 2.1. vidljiv je model aluminijske ekstruzije. Zbog svojih uniformnih dimenzija i utora idealne su za daljnja nadodavanja i nadogradnje elemenata.



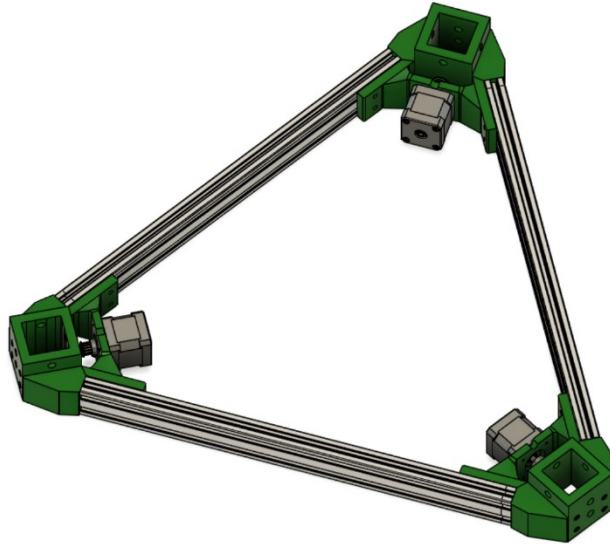
Slika 2.1. Model aluminijske ekstruzije [5]

Za povezivanje pojedinih aluminijskih ekstruzija koristit će se plastične spojnice koje će tri aluminijske ekstruzije spojiti u trokut. Potrebno je ostvariti što čvršću vezu kako bi se izbjegle eventualne vibracije i neželjena gibanja pisača. Na slici 2.2. vidljiv je model spojenih aluminijskih ekstruzija s plastičnim spojnica.



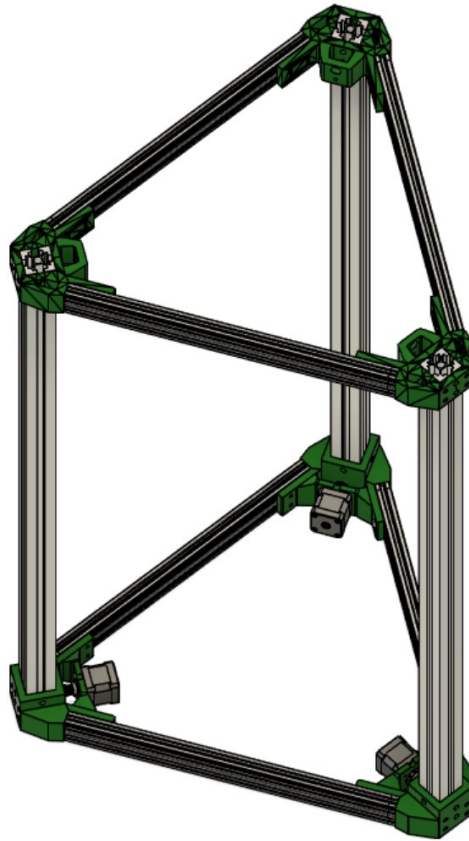
Slika 2.2. Model aluminijskih ekstruzija s spojnica [5]

Kako bi se omogućilo kretanje pisača na donji dio konstrukcije spajaju se motori. Pričvršćeni su za plastične spojnice kako bi se efektivno iskoristio prostor te smanjio broj potrebnih dijelova. Na slici 2.3. vidljiv je model donjeg dijela konstrukcije zajedno s motorima.



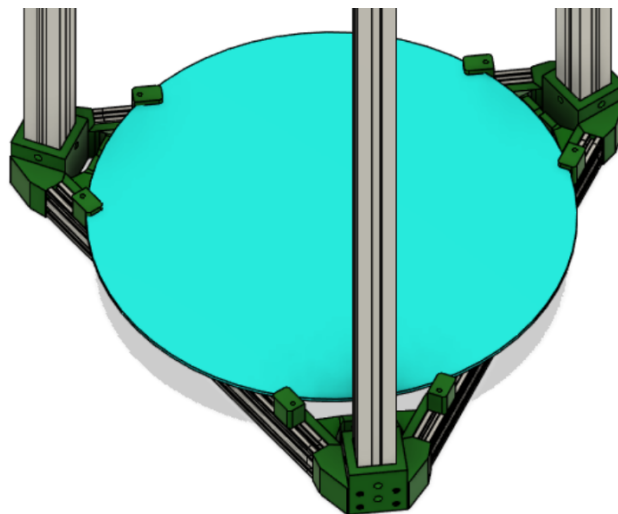
Slika 2.3. Model donjeg dijela konstrukcije s motorima [5]

Na slici 2.4. vidljiva je cijela konstrukcija pisača. Na donji dio konstrukcije spojeni su stupovi također izrađeni od aluminijskih ekstruzija. Gornji dio identičan je donjem dijelu samo nema motore.



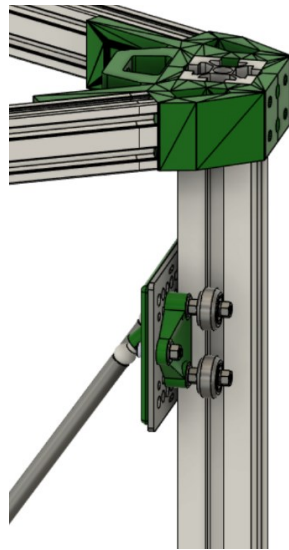
Slika 2.4. Model konstrukcije pisača [5]

Podloga pisača je kružnog oblika kako bi se lakše pričvrstila za trokutastu konstrukciju. Na slici 2.5. vidljiv je model podloge pisača zajedno s plastičnim spojnicama. Na konstrukciju su spojeni pomoću vijaka i matica koje se stavljaju u utore aluminijskih ekstruzija.



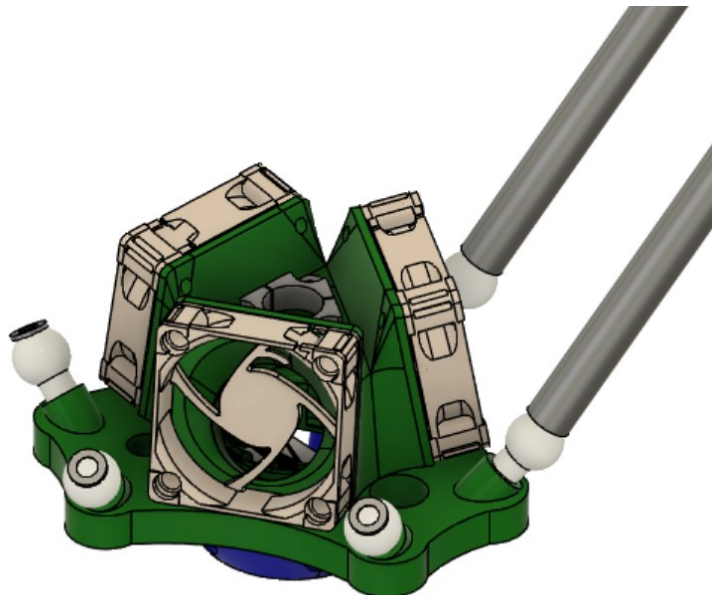
Slika 2.5. Model podloge pisača [5]

Ruke i nosači postavljaju se na stupove pisača. Pokretanjem nosača pokreće se i glava pisača. Na slici 2.6. vidljive su ruke pisača i nosač. Također je vidljiv način povezivanja sa stupovima preko okruglih ležajeva koji upadaju u utore aluminijskih ekstruzija i omogućuju lagano kretanje.



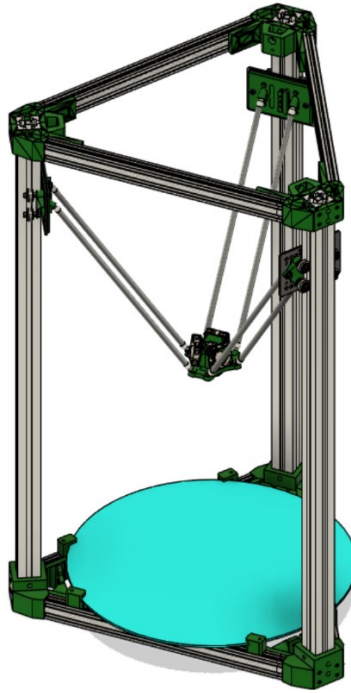
Slika 2.6. Model ruke i nosača pisača [5]

Glava pisača sastoji se od tri ventilatora, grijaćeg dijela i mlaznice pisača. Ventilatori služe za adekvatno hlađenje materijala ispisa te ravnomjernu raspodjelu topline cijele glave. Na slici 2.7. vidljiv je model glave pisača zajedno sa spojnicama za ruke nosača. Također dio obojan plavom bojom je zaštita za mlaznicu koja će smanjiti vanjske utjecaje poput povjetarca.



Slika 2.7. Model glave pisača [5]

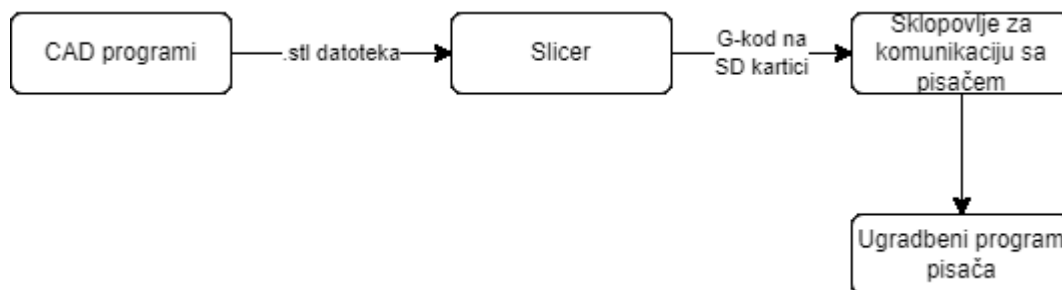
Spajanjem svih dijelova izrađen je delta pisač. Na slici 2.8. vidljiv je model gotovog pisača.



2.8. Modeli gotovog pisača [5]

2.3. Prijedlog programskog rješenja

Korištenje izrađenog 3D pisača kreće od izrade željenog modela za ispis. Moguće je koristiti razne CAD programe. Izrađeni modeli se šalju u *slicer*. Njegova zadaća je izraditi kod kojeg će pisač čitati i preko njega upravljati pojedinim dijelovima. Također se u *slicer-u* postavljaju vrijednosti poput temperature ispisa, potpora i ispune. Dobiveni kod se pomoću SD kartice prenosi na pisač koji ga čita i ispisuje izrađeni dio. Ugradbeni program upravljačke ploče zaslužan je za interpretiranje koda. Na slici 2.9. vidljiv je dijagram toka korištenja pisača.



Slika 2.9. Dijagram toka korištenja pisača

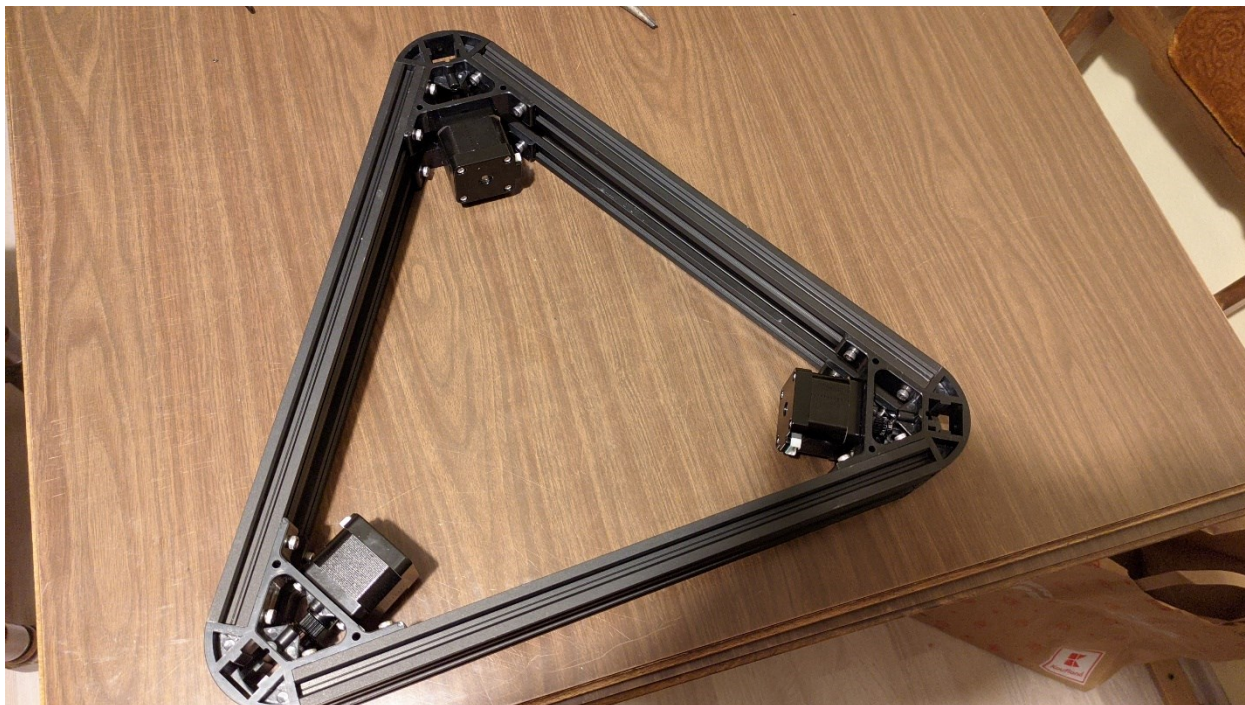
3. REALIZACIJA DELTA 3D PISAČA

3.1. Korišteni alati i programska okruženja

Pri izradi pisača bilo je potrebno pronaći dostupne modele. *RepRap* zajednica ima bazu podataka s *open source* modelima 3D pisača. Dostupni su kartezijski i delta pisači. Odabran je model K200 s nekim modifikacijama. CAD datoteke pisača dostupne su na reprap.org/wiki/K200. Autor pisača je tvrtka HE3D. Modifikacije koje su primijenjene na već postojeće datoteke su veći volumen ispisa povećanjem okvira pisača, drugačiji mehanizam za pričvršćivanje podloge za ispis, dodani su držači za napajanje te je dodan držač za *filament*.

3.2. Realizacija sklopovskog rješenja

Okvir pisača izrađen je od ekstrudiranih aluminijskih profila. Kako bi se ostvario veliki volumen za ispis, sam pisač mora biti velikih dimenzija. Promjenom nosećih aluminijskih profila za duže dobivene su ukupne dimenzije pisača 430x430x1120mm. Na slici 3.1. prikazan je donji dio okvira pisača. Potrebno je napraviti dva takva dijela. Na slici su također vidljivi motori koji su dodani sada zbog jednostavnosti slaganja.



Slika 3.1. Donji dio okvira

Slika 3.2. prikazuje nosila zajedno s parovima ruku koje su izrađene od aluminija. Okrugli klizači sjedaju u aluminijske profile te se pomoću GT2 remena stvara petlja između motora i nosila. Petlja prolazi kroz donji pisača gdje zahvaća zubiće motora te se vraća nazad kroz gornji dio pisača. Na slici 3.3. prikazan je pojednostavljeni primjer petlje bez nosila te je također vidljiv GT2 remen sa svojim zubićima.



Slika 3.2. Nosila pisača



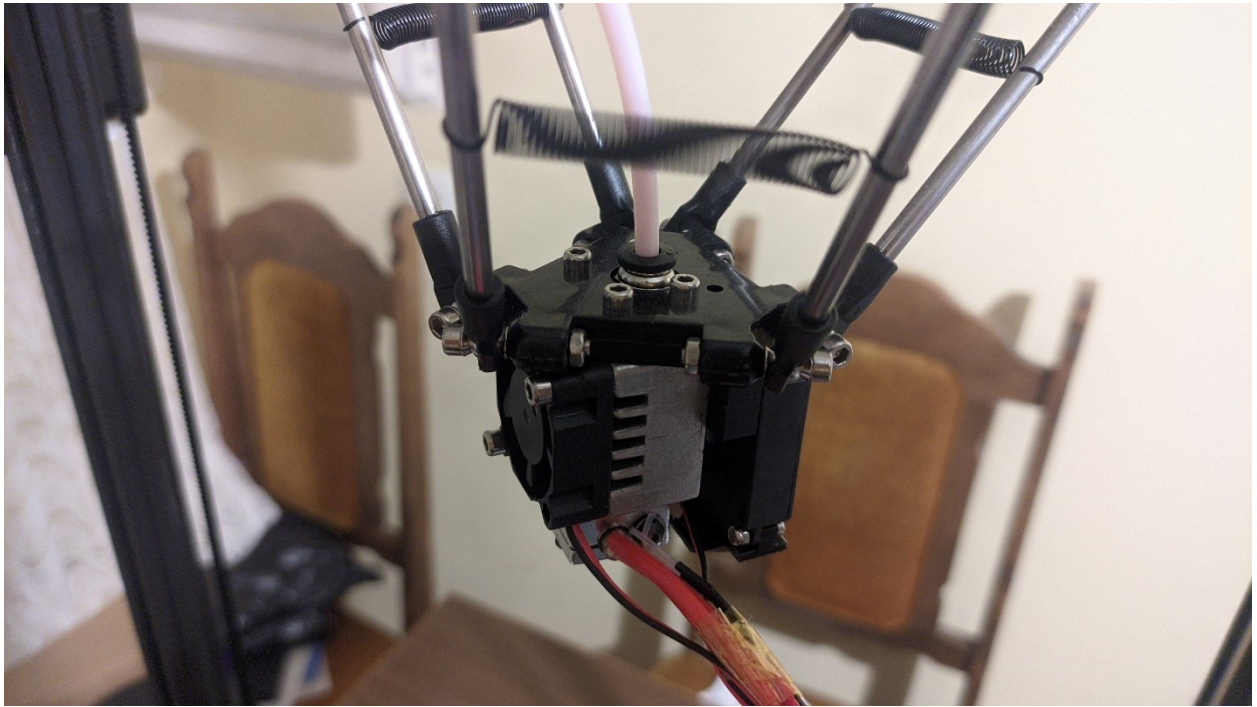
Slika 3.3. Pojednostavljena petlja pisača s GT2 remenom [9]

Nakon sastavljanja svakog pojedinog dijela potrebno ih je spojiti. Iz slike 3.4. vidljivo je da su u donji dio pisača pričvršćeni dugački aluminijski profili zbog kojih je povećan originalni volumen ispisa, a samim time i ukupne dimenzije pisača. Prije stavljanja gornjeg dijela nosači su ulegnuti na individualne stupove. Pričvršćivanjem gornjeg dijela pisač poprima trokutasti oblik te su jasno vidljivi parovi ruku raspoređeni u trokut.



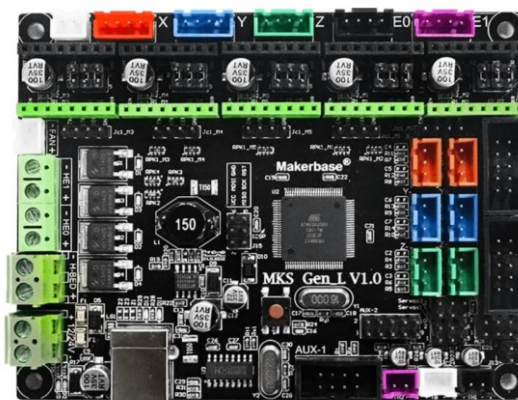
Slika 3.4. Konstrukcija pisača

Kako bi se dovršila konstrukcija pisača potrebno je krajeve ruku spojiti s nosačem za glavu pisača. Nosač za glavu je također izrađen od plastike. Na slici 3.5. prikazani su parovi ruku spojeni s nosačem glave čime je konstrukcija dovršena. Između parova ruku stavljen su opruge kako bi se smanjilo širenje ruku i ujednačio razmak duž istih.



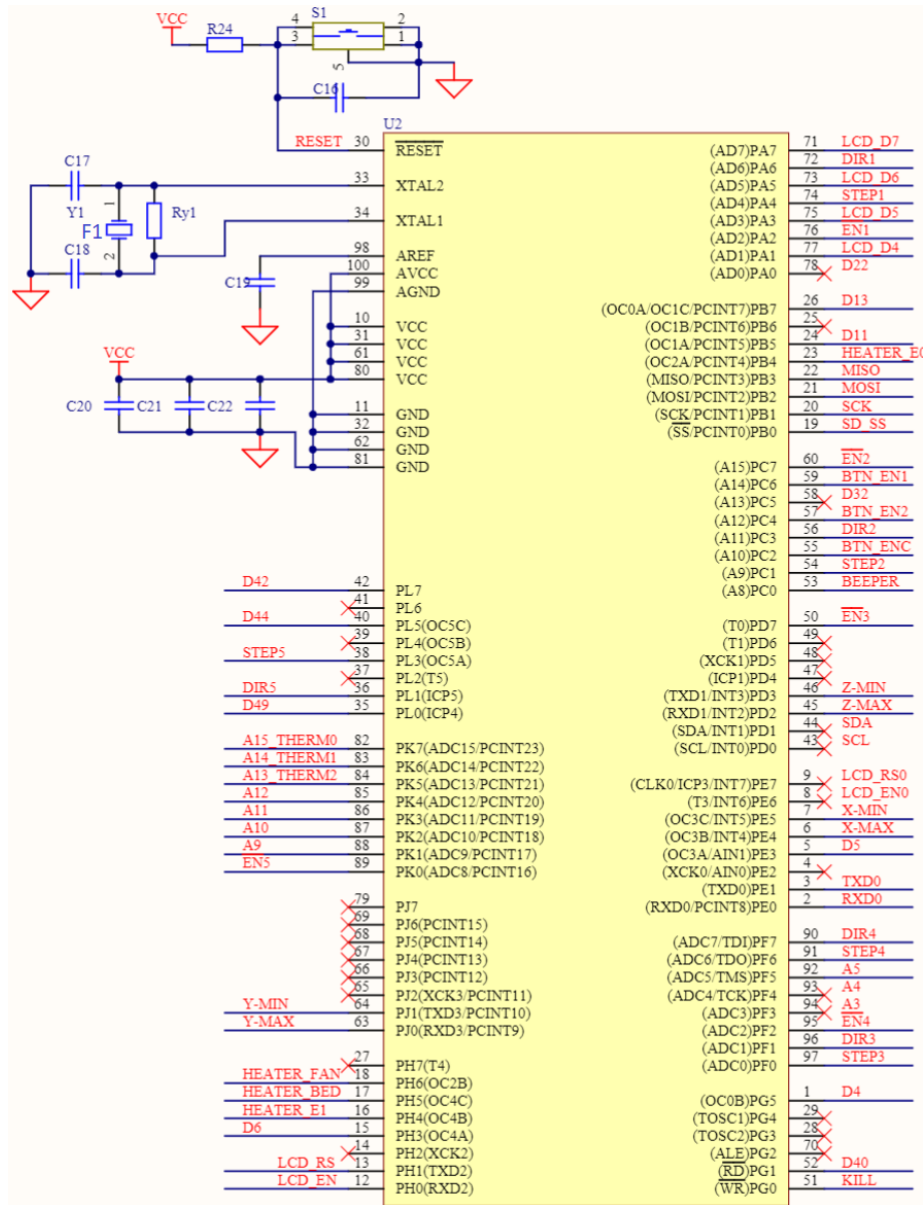
Slika 3.5 Nosač glave pisača

Mozak cijelog pisača je upravljačka ploča. Zadaća joj je pretvaranje G-koda u pokrete pisača. Upravlja sa svim motorima pisača što uključuje i motor ekstrudera. Također prati i regulira temperaturu ekstrudera i pisače podloge. U slučaju prevelike temperature nastale zbog kvara ili neke druge greške iz sigurnosnih razloga isključuje cijeli pisač. Sastavljeni pisač koristi *Makerbase Gen L v1.0* matičnu ploču. Izgled matične ploče vidljiv je na slici 3.6.



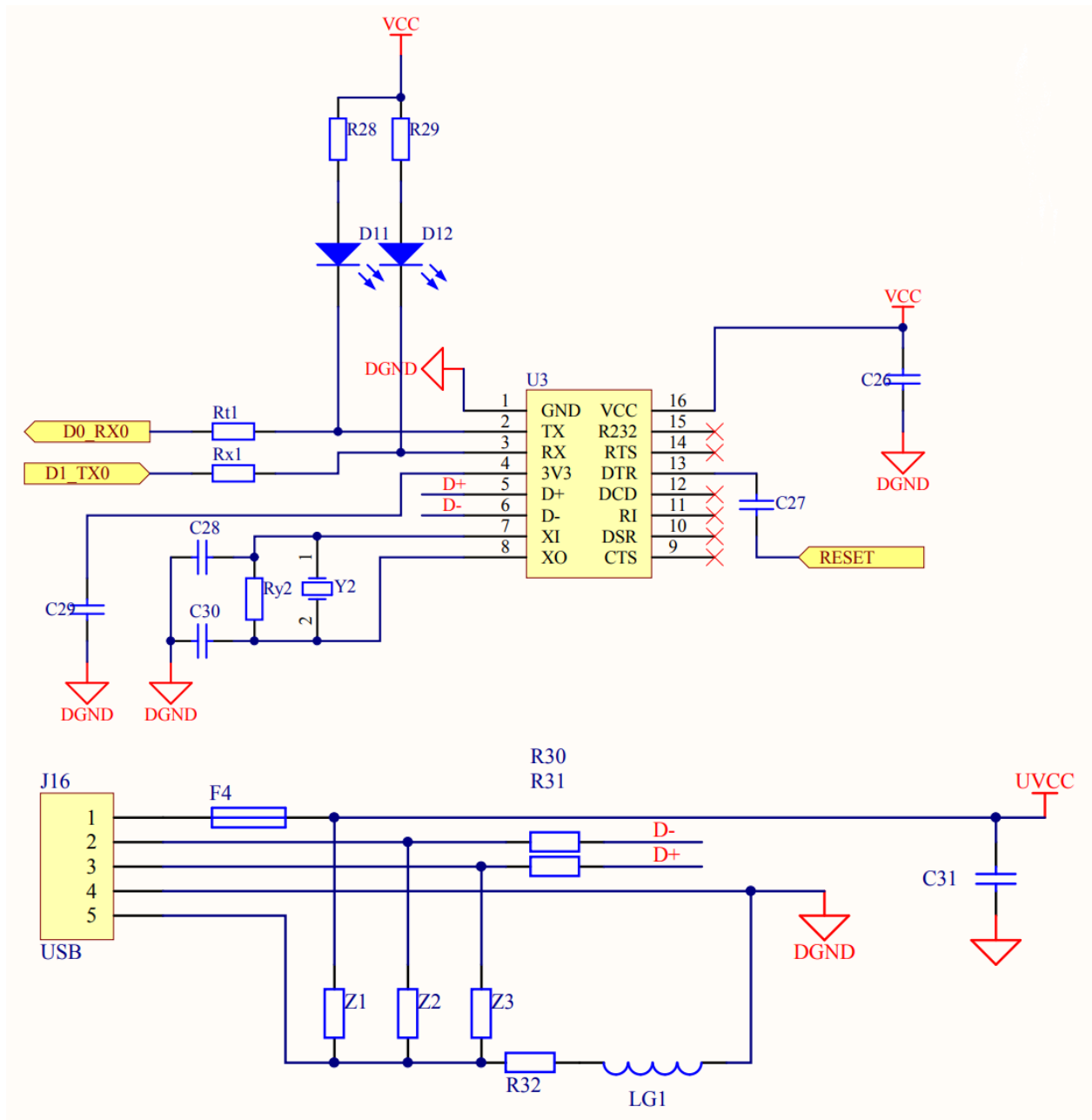
Slika 3.6. *Makerbase Gen L v1.0* [6]

Procesor na upravljačkoj ploči je Atmel ATmega2560. Na slici 3.7. nalazi se električna shema spajanja procesora s ostalim dijelovima. Takt procesora određuje oscilator na slici označen F1 te iznosi 16 MHz. Driveri za motore spojeni su na pinove *STEP*, *DIR* i *EN*. Na samoj ploči se ne nalaze driveri već konektori za drivere. *MISO*, *MOSI*, *SCK* i *SD_SS* se koriste za detekciju i čitanje *SD* kartice. *LCD* pinovi i *BEEPER* se koriste za prikaz informacija na *LCD* ekranu. Za spajanje tipkala za određivanje položaja spajaju se *X-MIN*, *X-MAX*, *Y-MIN*, *Y-MAX*, *Z-MIN* i *Z-MAX* pinovi.



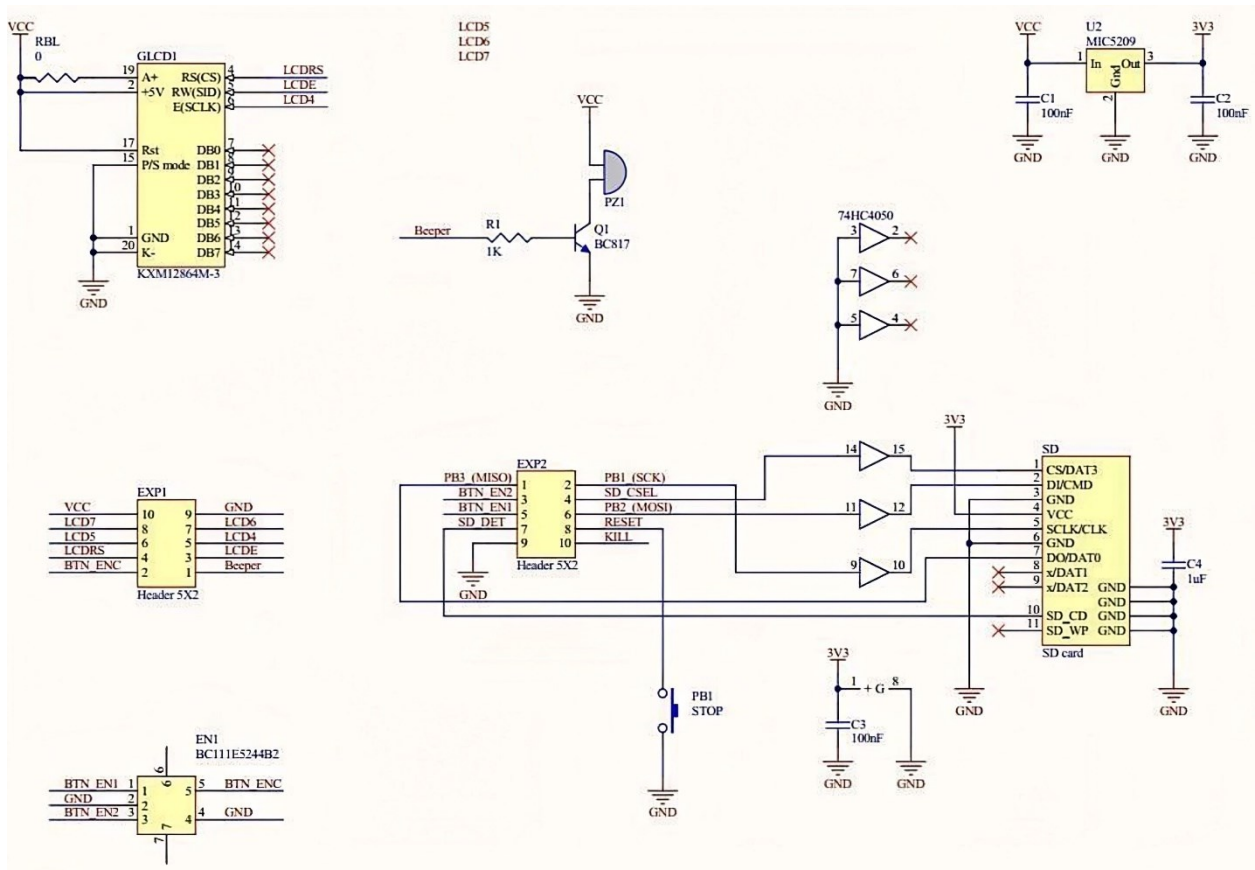
Slika 3.8. Shema spajanja procesora [6]

Za komunikaciju s računalom koristi se *FT232RL* integrirani krug. Na slici 3.8. vidljiva je shema spajanja komunikacijskog čipa s upravljačkom pločom. *J16* je *USB B* konektor. Linije za prijenos podataka iz njega ulaze u pinove *D+* i *D-* komunikacijskog čipa. Iz njega izlaze *RX0* i *TX0* koji se spajaju na pinove 2 i 3 procesora. Zadaća *FT232RL* čipa je pretvaranje *USB* serijskog prijenosa bitova u *UART* prijenos bitova.



Slika 3.8. Shema komunikacijskog sučelja [6]

Konektor za *SD* karticu se nalazi na korisničkom sučelju zajedno s *LCD* ekranom. Na slici 3.9. se nalazi shema *LCD* upravljača i čitača *SD* kartica. *EXP1* i *EXP2* su konektori koji povezuju upravljačku ploču na ovaj sklop. *LCD* ekran radi na 5V dok je za čitanje *SD* kartice potrebno smanjiti 5V na 3.3V. Na slici 3.10. prikazan je izgled *LCD* ekrana.

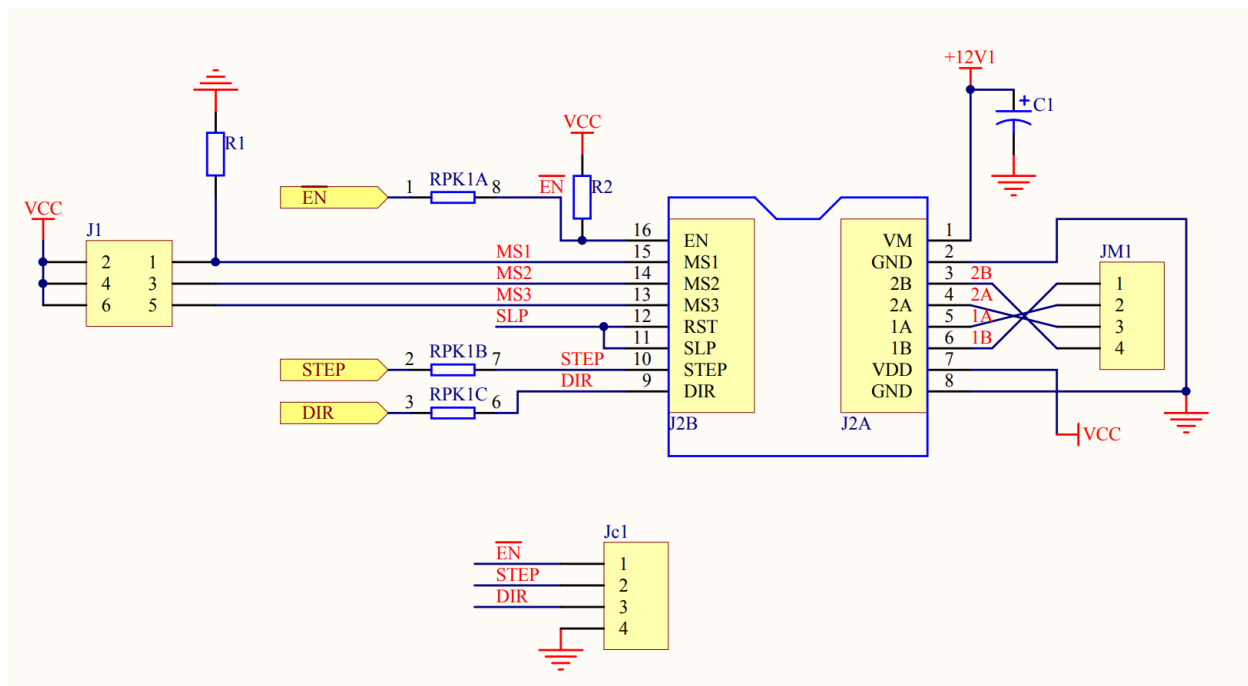


Slika 3.9. Shema *LCD* upravljača i čitača *SD* kartica [8]

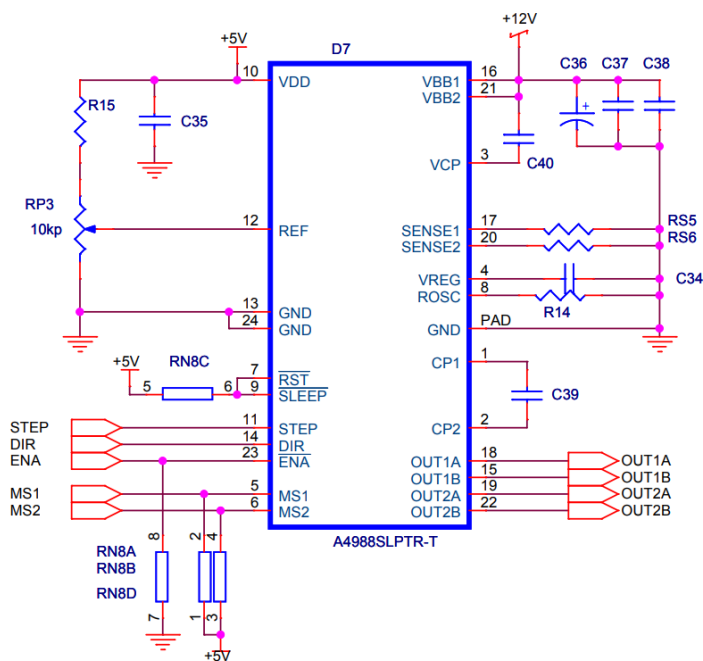


Slika 3.10. Izgled *LCD* ekrana

Na slici 3.11. se nalazi konektor za spajanje drivera koračnog motora. Pinovi *STEP* i *DIR* upravljaju smjerom i korakom motora. *EN* pin se koristi za paljenje samog drivera motora. *JMI* je konektor za koračni motor. Slika 3.12. prikazuje shemu A4988 drivera motora. Njegovi izlazi *1A*, *1B*, *2A* i *2B* se prosljeđuju na konektor *JMI*.

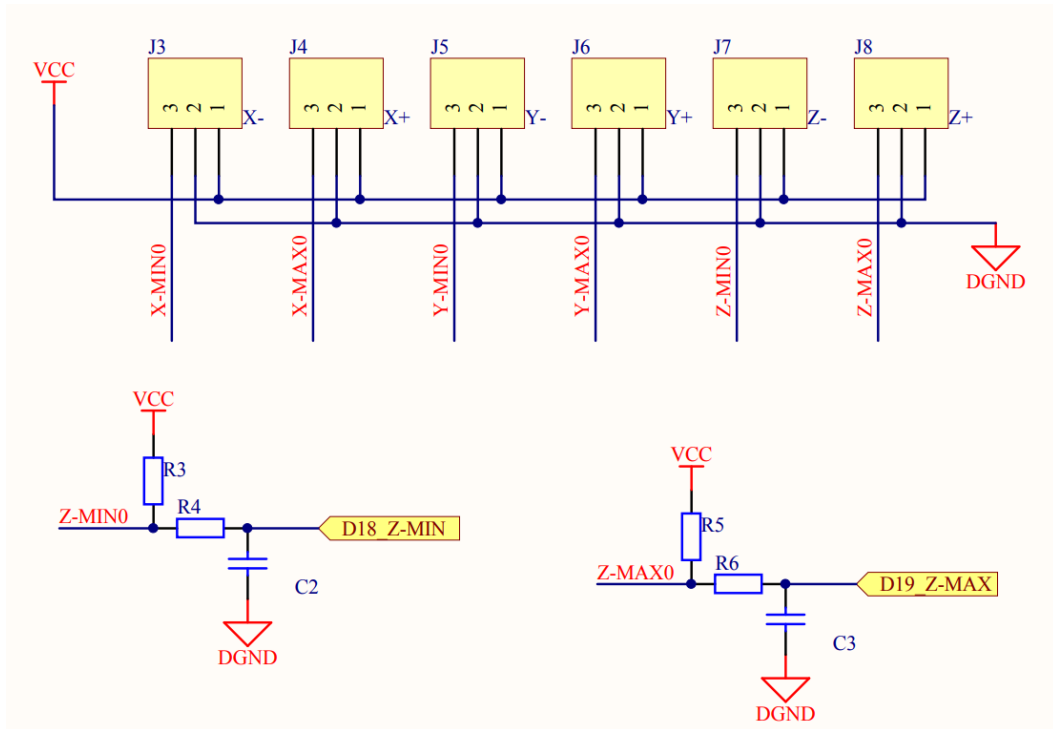


Slika 3.11. Shema konektora drivera motora [6]

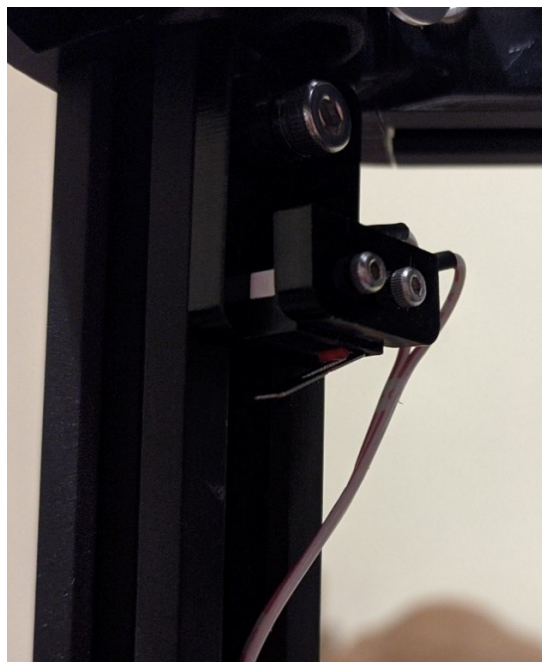


Slika 3.12. Shema A4988 drivera motora [7]

Za određivanje početnog položaja glave pisača koriste se tipkala spojena na konstrukciju pisača. Na slici 3.13. prikazana je shema spajanja tipkala. Na konektore *J4*, *J6* i *J8* se spajaju tri tipkala za svako nosilo. Kada se tipkalo pritisne na procesoru se očita promjena stanja i u tom položaju pisač je na početnim koordinatama. Slika 3.14. prikazuje tipkalo spojeno na konstrukciju pisača.



Slika 3.13. Shema spajanja tipkala [6]



Slika 3.14. Tipkalo na konstrukciji

Za napajanje svih komponenti koristi se napajanje od 24V. Zbog velike struje motora i struje potrebne za zagrijavanje glave pisača ukupna snage napajanja iznosi 350W. Također je bitno da napajanje može konstantno davati 350W bez pretjeranog zagrijavanja iz sigurnosnih razloga.

3.3. Realizacija programskog rješenja

Marlin[10] je *open source* upravljački program koji se programira na upravljačku ploču. Podržava različite arhitekture ploča najčešće baziranih na Arduino platformi. Pokreće G-kod odnosno set instrukcija i komandi formatiranih tako da upravlja koračnim motorima, grijaćim elementima i ostalim sensorima pisača. Izvorni kod je dostupan na službenoj stranici.

Prednost korištenja Marlin[10] upravljačkog programa je što ga koriste skoro svi *RepRap* pisači. Zbog toga postoje velike zajednice te otkrivanje i popravljavanje problema je relativno lagano. Također je memorijski efikasan te je dodavanje novih značajki iznimno jednostavno.

Za izrađeni pisač bilo je potrebno izmijeniti kod s pripadajućim parametrima. Kod se sastoji od predefiniраниh funkcija te je potrebno odkomentirati željenu funkciju. Svaka funkcija zauzima određenu količinu memorije te je to jedino ograničenje upravljačke ploče.

Za početak konfiguriranja je potrebno unijeti dimenzije pisača. Dimenzije uključuju visinu pisača, duljinu parova ruku te radijus ispisne podloge. Na slici 3.15. vidljiv je isječak koda za definiranje dimenzija.

```
// Print surface diameter/2 minus unreachable space (avoid collisions with vertical towers).
#define DELTA_PRINTABLE_RADIUS 140.0    // (mm)

// Maximum reachable area
#define DELTA_MAX_RADIUS          140.0    // (mm)

// Center-to-center distance of the holes in the diagonal push rods.
#define DELTA_DIAGONAL_ROD 340          // (mm)

// Distance between bed and nozzle Z home position
#define DELTA_HEIGHT 610                // (mm) Get this value from G33 auto calibrate
```

Slika 3.15. Definiranje dimenzija pisača

Nakon unošenja dimenzija potrebno je omogućiti automatsko niveliranje podloge. Postoji nekoliko vrsta sa svojim prednostima i nedostacima. Odabran je bilinearan način koji kao rezultat daje mrežu s odstupanjima podloge. Prigodan je za veće i neravne podloge. Na slici 3.16. nalazi se isječak koda koji prikazuje odkomentirani odabir načina niveliranja podloge. Također na slici 3.17. vidljiv je broj točaka na podlozi koje će se ispitati.

```
//#define AUTO_BED_LEVELING_3POINT
//#define AUTO_BED_LEVELING_LINEAR
#define AUTO_BED_LEVELING_BILINEAR
//#define AUTO_BED_LEVELING_UBL
//#define MESH_BED_LEVELING
```

Slika 3.16. Odabir načina niveliranja podloge

```
#if EITHER(AUTO_BED_LEVELING_LINEAR, AUTO_BED_LEVELING_BILINEAR)

// Set the number of grid points per dimension.
// Works best with 5 or more points in each dimension.
#define GRID_MAX_POINTS_X 5
#define GRID_MAX_POINTS_Y GRID_MAX_POINTS_X

// Probe along the Y axis, advancing X after each column
//#define PROBE_Y_FIRST

#if ENABLED(AUTO_BED_LEVELING_BILINEAR)

// Beyond the probed grid, continue the implied tilt?
// Default is to maintain the height of the nearest edge.
//#define EXTRAPOLATE_BEYOND_GRID

//
// Experimental Subdivision of the grid by Catmull-Rom method.
// Synthesizes intermediate points to produce a more detailed mesh.
//
//#define ABL_BILINEAR_SUBDIVISION
#if ENABLED(ABL_BILINEAR_SUBDIVISION)
// Number of subdivisions between probe points
#define BILINEAR_SUBDIVISIONS 3
#endif
#endif

#endif
```

Slika 3.17. Isječak koda s brojem ispitnih točaka

Ostale vrijednosti i funkcije već su točno odabrane u zadanom kodu Marlina[10]. Izmijenjeni kod potrebno je programirati na upravljačku ploču. Svaka kasnija izmjena koda zahtjeva ponovno programiranje na upravljačku ploču.

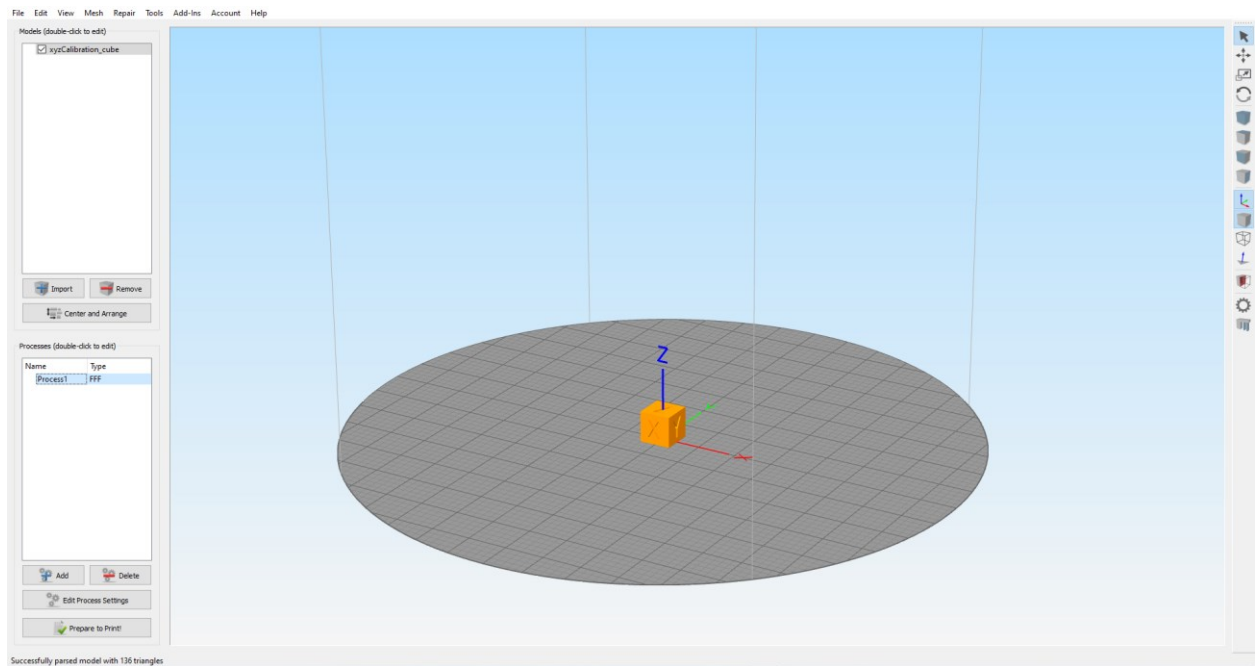
G-kod je najčešće korišteni programski jezik u proizvodnoj industriji. Koristi se u CAM proizvodnji za kontrolu automatiziranih strojeva. Sadrži set instrukcija koje govore gdje da se glava pisača pomakne, količinu materijala kojeg će ekstruder izbaciti, brzinu pisača te druge slične instrukcije. Procesor upravljačke ploče ga izvodi liniju po liniju. Na slici 3.18. se nalazi isječak G-koda koji postavi temperaturu glave pisača i podloge pisača, čeka da se zagrije, postavi pisač na početnu poziciju te zatim ispiše jednu liniju visine 0.3mm.

```
M104 S210
M140 S60
M190 S60
M109 S210
G28
G1 Z2.0 F3000
G1 X0.1 Y20 Z0.3 F5000.0
G1 X0.1 Y200.0 Z0.3 F1500.0 E15
```

Slika 3.18. G-kod

Slicer je program koji pretvara modele napravljen u CAD programima u set instrukcija za pisač odnosno G-kod. Zadužen je za računanje najbržeg puta za ispis modela. Također u njemu se odabiru ostale značajke poput vrste i postotak ispune, brzina ispisa te potporne strukture za ispis modela kojima je to potrebno.

Za izrađeni pisač odabran je Simplify3D[11] *slicer*. Potrebno je napraviti profil za pisač koji će sadržavati sve parametre. Na slici 3.19. vidljivo je korisničko sučelje *Simplify3D*-a zajedno s testnim modelom.



Slika 3.19. Korisničko sučelje *Simplify3D*-a

4. TESTIRANJE I REZULTATI

4.1. Metodologija testiranja

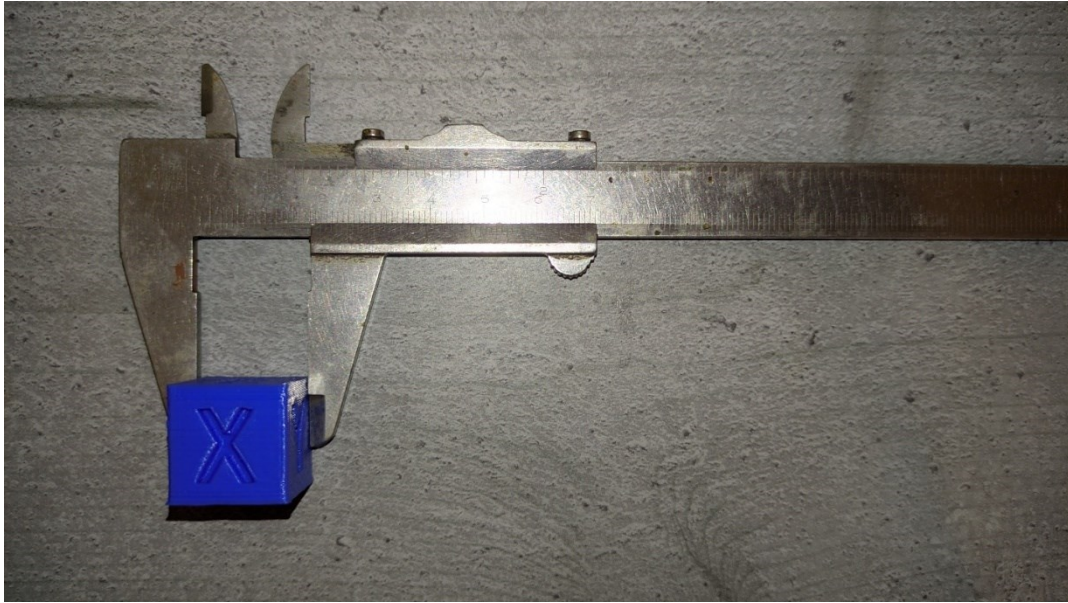
Testiranje pisača provodi se ispisom kalibracijske kocke dostupne na: <https://www.thingiverse.com/thing:1278865/files>. Ispis se provodi deset puta pod istim uvjetima. Rezultati testa predstaviti će uspješnost kalibracije pisača odnosno dimenzionalnu točnost ispisa. Dimenzije modela kocke su 20x20x20mm te bi te iste dimenzije trebale biti na ispisanom dijelu. Kocka je ispisana od PLA plastike, temperatura mlaznice 210°C i temperatura podloge 60°C. Ispuna je 10% pravokutnog uzorka te je brzina ispisa 60 mm/s. Ambijentna temperatura svakog ispisa je ista odnosno 26°C. Između svakog ispisa podloga pisača je obrisana medicinskim alkoholom.

4.2. Rezultati testiranja

Nakon svakog ispisa izmjerena je svaka dimenzija kocke. Tablica 4.1. prikazuje rezultate dobivene za svaku kocku te srednje vrijednosti za pojedine dimenzije. Na slici 4.1. prikazan je princip mjerenja s pomičnim mjerilom za petu kocku za X dimenziju.

Tablica 4.1. Rezultati mjerenja

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Kocka 1	20	20	19.96
Kocka 2	19.98	20	19.98
Kocka 3	20.01	20.02	19.94
Kocka 4	20	20.08	20
Kocka 5	20.02	20	19.99
Kocka 6	20	20.04	19.98
Kocka 7	20.04	20	19.94
Kocka 8	20.02	20.09	20
Kocka 9	20.08	20.08	20
Kocka 10	20.04	20.01	19.92
Srednja vrijednost	20.015	20.032	19.971



Slika 4.1. Mjerenje X dimenzije za petu kocku

U tablici 4.2. prikazano je odstupanje pojedine kocke od dimenzija modela te srednje odstupanje svih kocaka. Iz tablice vidimo da je najveće odstupanje jedne dimenzije kocke 0.09mm što je prihvatljivo za izrađeni pisač. Najveće srednje odstupanje iznosi 0.032 te se može reći da je pisač uspješno kalibriran i daje konzistentne rezultate. Slika 4.2. prikazuje ispisane kocke s lijeva na desno od prve do desete.

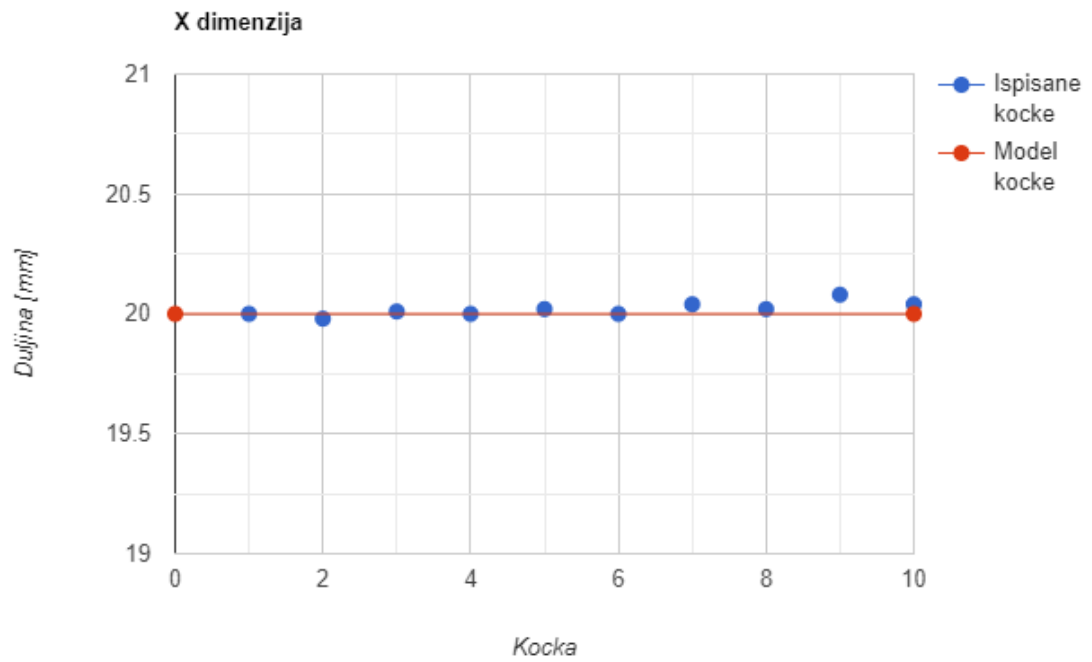
Tablica 4.2. Odstupanje rezultata od modela

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Kocka 1	0	0	0.04
Kocka 2	0.02	0	0.02
Kocka 3	0.01	0.02	0.06
Kocka 4	0	0.08	0
Kocka 5	0.01	0	0.01
Kocka 6	0	0.04	0.02
Kocka 7	0.01	0	0.06
Kocka 8	0.02	0.09	0
Kocka 9	0.08	0.08	0
Kocka 10	0.04	0.01	0.08
Srednja vrijednost	0.019	0.032	0.029

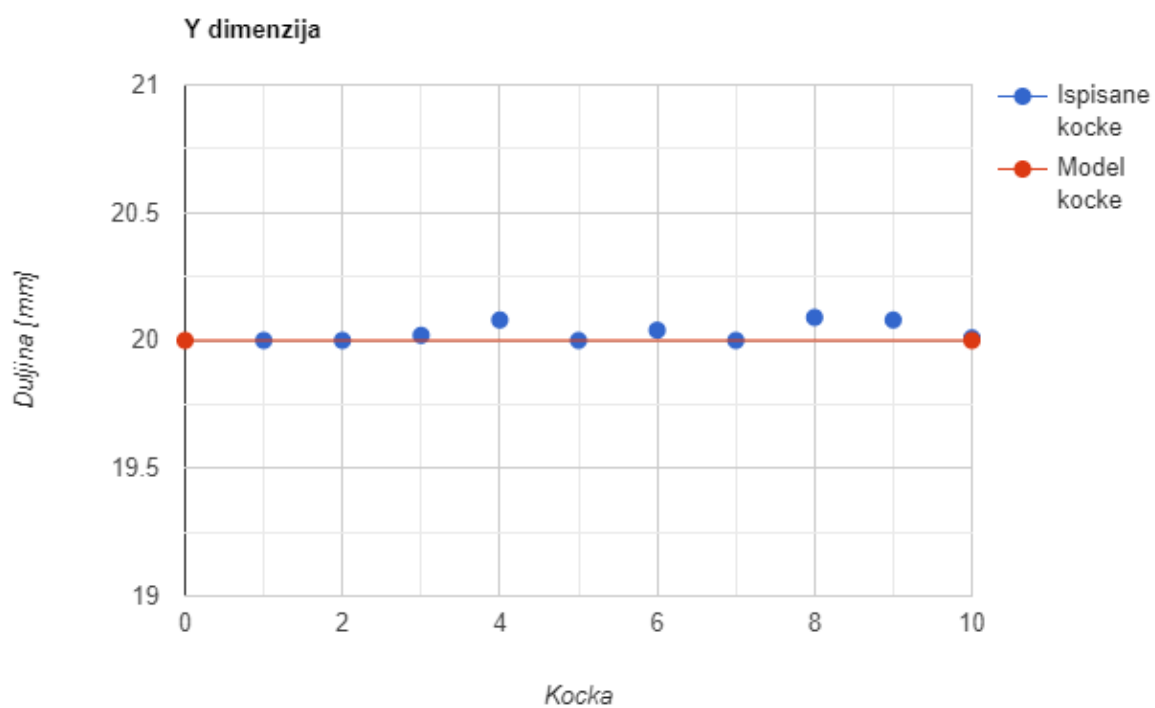


Slika 4.2. Ispisane testne kocke

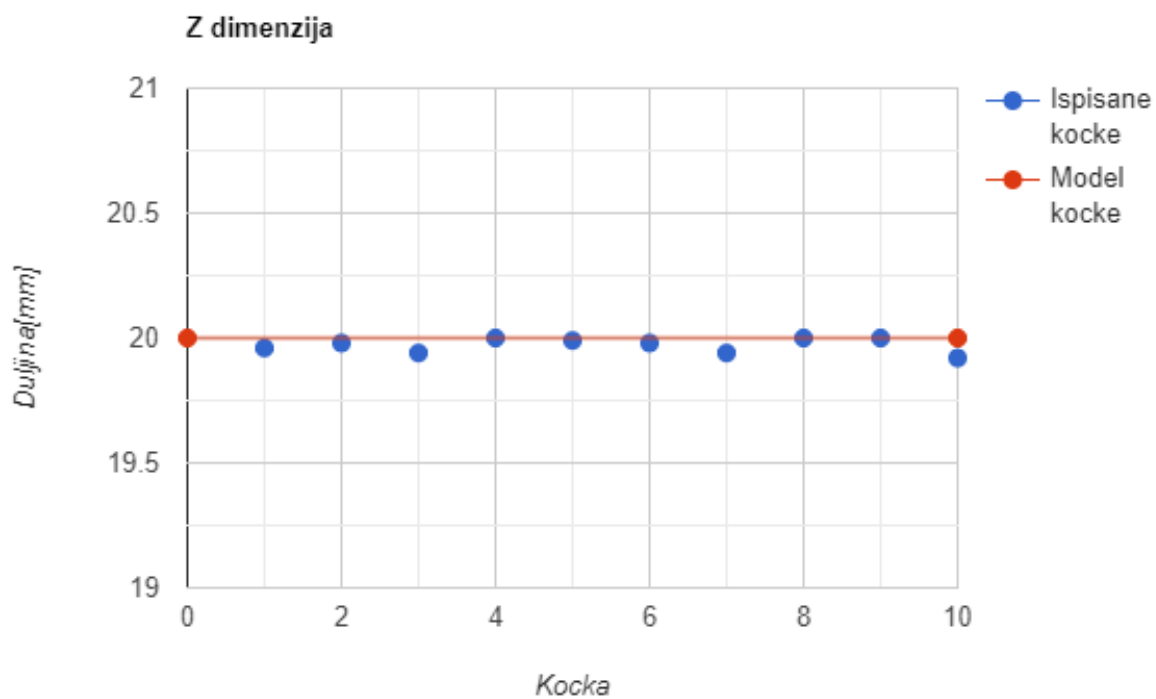
Na slikama 4.3., 4.4. i 4.5. grafički su prikazani rezultati za pojedinu dimenziju. Crvenom bojom označena je linija od 20mm za vrijednost dimenzije modela dok su plave točke rezultati mjerenja.



Slika 4.3. Graf odstupanja X dimenzije



Slika 4.4. Graf odstupanja Y dimenzije



Slika 4.5. Graf odstupanja Z dimenzije

5. ZAKLJUČAK

Cilj rada bio je izrada i realizacija 3D pisača. Prikazano je kako pojedine vrste 3D pisača ostvaruju 3D ispis. Također su navedene neke prednosti i nedostatci istih. Pojašnjeno je određivanje zadanih koordinata u delta koordinatnom sustavu. Izrađeni 3D pisač implementira sve prednosti delta pisača. Jedna od mogućih korekcija dizajna je očvršćivanje konstrukcije 3D pisača. Zbog svoje visine pri velikim brzinama dolazi do neželjenih kretanja gornjeg dijela pisača. Također nadogradnja na 32-bitni procesor bi omogućila dodavanje više softverskih mogućnosti te brže računanje koordinata. Izrađeni modeli su adekvatne kvalitete te bi se u budućnosti trebao ispitati rad pisača s drugačijim materijalima koji su malo zahtjevniji za ispis poput ABS-a i TPE-a.

LITERATURA

- [1] *The Main Differences Between FFF and FDM Explained*, <https://www.3dprintingspot.com/post/the-main-differences-between-fff-and-fdm-explained>, pristup: 07.06.2022.
- [2] *The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More*, <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>, pristup: 07.06.2022.
- [3] *Delta geometry – RepRap*, https://reprap.org/wiki/Delta_geometry, pristup: 07.06.2022.
- [4] *L. Carolo, „What Is a 3D Slicer? – Simply Explained*, <https://all3dp.com/2/what-is-a-3d-slicer-simply-explained/>, pristup: 12.06.2022.
- [5] *Beefy Delta 3D Printer*, <https://grabcad.com/library/beefy-delta-3d-printer-1>, pristup: 21.06.2022.
- [6] *MKS-GEN_L*, https://github.com/makerbase-mks/MKS-GEN_L/tree/master/hardware, pristup: 22.06.2022.
- [7] *MKS Base 1.0*, https://reprap.org/wiki/File:MKS_Base_V1.0_source.zip, pristup: 22.06.2022.
- [8] *Blinking LCD*, <https://reprap.org/forum/read.php?219,817696>, pristup: 22.06.2022.
- [9] *GT2 Closed Loop Belt*, <https://bc-robotics.com/shop/gt2-closed-loop-belt-400mm/>, pristup: 12.06.2022.
- [10] *Marlin*, <https://marlinfw.org/>, pristup: 30.8.2022.
- [11] *Simplify3D*, <https://www.simplify3d.com/>, pristup: 30.8.2022.

SAŽETAK

Zadatak ovog rada je izrada i testiranje polarnog 3D pisača. Omogućuje jednostavniju i bržu izradu proizvoda te smanjuje vrijeme čekanja pri izradi prototipa proizvoda. Prisutni su u približno svim industrijskim granama od medicine do vojske. Tehnologija ispisa FFF koja je izabrana u radu koristi materijale niže temperature taljenja, najčešće PLA i ABS plastika. Konstrukcija pisača izrađena je od aluminijskih profila kako bi se osigurala sama čvrstoća konstrukcije i duži vijek trajanja. Koristi se ATmega2560 procesor te Nema 17 koračni motori pogonjeni A4988 driverima motora. Na upravljačkoj ploči instaliran je Marlin ugradbeni sustav koji je zaslužan za sveukupno upravljanje pisača i čitanje G-koda. Temperature podloge i ispisne glave očitavaju se preko senzora na njima, a prvobitno se postavljaju u *slicer*-u. Testiranje pisača provodi se uzastopnim ispisom kalibracijske kocke uz konstantnu ambijentnu temperaturu.

Ključne riječi: 3D ispis, 3D pisac, ATmega 2560, CAD, delta pisac, kartezijski pisac, polarni pisac, *slicer*

ABSTRACT

Title: Polar 3D printer

Abstract

The task of this work is construction and testing of polar 3D printer. It enables simpler and faster product creation and reduces the waiting time when creating a product prototype. They are present in almost all industrial branches from medicine to the military. The FFF printing technology chosen in the paper uses materials with a lower melting temperature, most often PLA and ABS plastic. The construction of the printer is made of aluminum profiles to ensure the strength of the construction and a longer service life. It uses an ATmega2560 processor and Nema 17 stepper motors powered by A4988 motor drivers. Marlin firmware is installed on the control board, which is responsible for overall printer management and G-code reading. The build plate and printhead temperatures are read via sensors on them and are initially set in the slicer. The printer is tested by repeatedly printing the calibration cube at a constant ambient temperature.

Keywords: 3D printing, 3D printer, ATmega 2560, CAD, delta printer, Cartesian printer, polar printer, slicer

ŽIVOTOPIS

Srednjoškolsko obrazovanje završava u Tehničkoj školi Slavonski Brod smjer tehničar za elektroniku. U srednjoj školi stekao osnovna znanja o računarstvu i elektrotehnici. Na Erasmus-u u Španjolskoj uči osnove razvoja Android aplikacija. Nakon srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku gdje dalje unapređuje svoje znanje o računarstvu i elektrotehnici.