

UNIVERZITA KONŠTANTÍNA FILOZOFA V NITRE
FAKULTA PRÍRODNÝCH VIED

RIADENIE A OVLÁDANIE CNC STROJA MIKROKONTROLÉROM ARDUINO
DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný odbor: 9.2.9 Aplikovaná informatika
Študijný program: Aplikovaná informatika
Školiace pracovisko: Katedra informatiky
Školiteľ: doc. Ing. Štefan Koprda, PhD.

Nitra 2018

Bc. Darko Šajben



152392

Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre
Fakulta prírodných vied

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Darko Šajben
Študijný program: Aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: 9.2.9 aplikovaná informatika
Typ záverečnej práce: Diplomová práca
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Riadenie a ovládanie CNC stroja mikrokontrolérom Arduino
Anotácia: Programovanie CNC strojov v praxi, dnes zohráva dôležitú úlohu či už v automobilovom alebo strojárskom priemysle. V teoretickej časti študent analyzuje využívanie CNC strojov v praxi a oboznámi sa s ich možnosťou programovania. V praktickej časti vytvorí a naprogramuje vlastný CNC stroj pomocou mikrokontroléra Arduino. Študent vytvorí vlastný CNC stroj, ktorý bude vyrobený pomocou 3D tlačiarne. Použitím mikrokontroléra Arduino v prostredí Atmelstudio vytvorí program, ktorý bude ovládať samotný CNC stroj. Požiadavky na vedomosti a zručnosti študenta: Téma je vhodná pre študenta s elektrotechnickým zameraním a dobrou znalosťou s programovaním mikrokontroléra Arduino

Školiteľ: doc. Ing. Štefan Koprda, PhD.
Oponent: PaedDr. Martin Magdín, Ph.D.
Katedra: KI - Katedra informatiky
Dátum zadania: 28.09.2016

Dátum schválenia: 10.10.2016

prof. Ing. Milan Turčáni, CSc.
schválil/a

ABSTRAKT

ŠAJBEN, Darko: Riadenie a ovládanie CNC stroja mikrokontrolérom Arduino. [Diplomová práca]. Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre. Fakulta prírodných vied. Školiteľ: doc. Ing. Štefan Koprda PhD. Stupeň odbornej kvalifikácie: Magister odboru Aplikovaná informatika. Nitra: FPV, 2018. 52 s.

Cieľom diplomovej práce bolo navrhnuť a skonštruovať CNC stroj, ktorý ako riadiacu jednotku bude používať mikrokontrolér Arduino. Stroj bol vyrobený podľa počítačového 3D modelu. Mnohé použité súčiastky boli vytlačené na 3D tlačiarni. Stroj je primárne určený na laserové gravírovanie do dreva, ale výmenou obrábacieho nástroja sa môže použiť aj na iné účely. Cena výslednej zostavy nepresahovala 250 eur. V softvérovej časti projektu sú použité open source softvérové riešenia, ktoré boli upravené podľa potrieb projektu. Výsledkom práce je fungujúca laserová gravírka schopná vyrobiť produkt v maximálnych rozmeroch 210x290 mm. Stroj je možné použiť na edukačné účely alebo na gravírovanie suvenírov a podobných výrobkov.

Kľúčové slová: CNC. Arduino. GRBL. Laser.

ABSTRACT

ŠAJBEN, Darko: [Bachelor Thesis]. Constantine the Philosopher University in Nitra. Faculty of Natural Sciences. Supervisor: doc. Ing. Štefan Koprda PhD. Degree of Qualification: Magister of Applied Informatics. Nitra: FNS, 2018. 52 p.

The aim of the diploma thesis was to design and construct a CNC machine that will use the Arduino microcontroller as the control unit. The machine has been made according to a computer 3D model. Numerous components have been printed on a 3D printer. The machine is primarily designed for laser engraving on wood, but it can also be used for other purposes by replacing the machine tool. The cost of the final set did not exceed 250 euros. The software part of the project uses open source software solutions tailored to the needs of the project. The result of the work is a working laser capable of engraving and producing a product in maximum dimensions of 210x290 mm. The machine can be used for educational purposes or for engraving of souvenirs and similar products.

Keywords: CNC. Arduino. GRBL. Laser.

Obsah

Úvod	7
1 Analýza súčasného stavu.....	8
1.1 Vývoj numericky riadených strojov	8
1.2 Domáce CNC stroje.....	9
1.2.1 Arduino.....	10
1.2.2 Arduino CNC stroj.....	11
1.3 Obrábacie náradia.....	12
1.3.1 Mechanické obrábanie.....	12
1.3.2 Laserové obrábanie	13
1.4 Riadiaci a komunikačný softvér.....	16
1.4.1 G kód.....	17
1.4.2 Interpretér g kódu.....	17
1.4.2 Odosielateľ g kódu.....	18
1.5 Tvorba vektorovej grafiky a generovanie g kódu	19
1.5.1 Inkscape.....	20
1.6 3D modelovanie	22
1.6.1 SolidWorks.....	22
1.6.2 AutoCAD.....	22
2 Ciele diplomovej práce.....	23
3 Realizácia	24
3.1 Návrh a výroba CNC stroja.....	24
3.1.1 Konštrukcia stroja.....	25
3.1.2 Zostavenie mechanickej časti.....	28
3.1.2 Pripojenie elektronických súčiastok	31
3.2 Programovanie Arduina a príprava používateľského prostredia	34

3.2.1 Interpretér g kódu pre Arduino.....	34
3.2.2 Nastavenie používateľského prostredia	37
3.3 Nastavenie CNC stroja a postup gravírovania	38
3.4 Zhodnotenie výsledkov.....	44
Záver.....	46
Zoznam bibliografických odkazov	
Zoznam príloh	

ÚVOD

Vždy existovala snaha ľudí vytvoriť pomôcky, ktoré by im uľahčili život a zrýchlili prácu. Začiatkom priemyselnej revolúcie ľudstvo bolo schopné vyrobiť dovedy nevídané množstvo výrobkov. Stroje aj naďalej potrebovali človeka, ktorý ho bude obsluhovať. Mnohé pracovné pozície už nemusia existovať lebo sú nahradené strojom, ktorý dokáže vyrábať rýchlejšie a lacnejšie než sám človek. S rozvojom techniky prišla aj automatizácia, ktorá umožnila riadenie výrobných procesov bez priameho zásahu človeka a spojená je s obsluhou automatických výrobných liniek. Stroje zavítali do všetkých priemyselných odvetví od automobilového až po textilný priemysel. Ako aj celkový priemysel, tak aj obrábacie stroje sprevádzal vývoj od manuálnych, poloautomatizovaných až po plne automatizované stroje, ktoré dokážu bez zásahu človeka pracovať dennodenne a vždy v rovnakej kvalite a rovnakou rýchlosťou.

Laser použitý ako obrábací nástroj dokázal rezať a obrábať materiál s neuveriteľnou presnosťou, ktorú žiadny človek nedokázal. Svet bol ohromený čo všetko CNC stroje dokážu a začali si vyrábať zmenšené lacnejšie zostavy na domáce použitie. Na rozdiel od profesionálnych laserových strojov, ktoré sa používajú na rezanie náročných materiálov, domáce laserové gravírovacie stroje používajú laser s menším výkonom, ktorý môže gravírovať alebo rezať len tenké materiály, ako je koža, preglejka, akryl atď. Takéto stroje popri tom, že priniesli možnosť malým podnikateľom a nadšencom CNC stroje vlastniť, jeden taký stroj mal aj edukačný charakter, lebo ich cena bola mnohokrát menšia v porovnaní s profesionálnym strojom a tak si ho mohli aj mnohé školy dovoliť a používať ho vo výučbe. Riadiaca jednotka týchto strojov je najčastejšie doska Arduino a k nej aj príslušný hardvér na ovládanie motorov. K dispozícii sú aj stavebnice, ktoré obsahujú všetky potrebné súčiastky v balení a stačí ich podľa návodu zostaviť a sú pripravené na použitie. Ďalšia možnosť je navrhnuť vlastnú zostavu, ktorá zvyčajne zaberie viac času a všetky potrebné súčiastky sa musia kupovať zvlášť alebo vyrobiť na mieru. Z týchto dôvodov sa mnohí rozhodujú pre hotové stavebnice. Keďže na trhu nebol v ponuke typ stavebnice CNC stroja aký sme chceli, rozhodli sme sa vymodelovať a zostaviť vlastný stroj podľa našich požiadaviek.

1 ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU

CNC je skratka, ktorá pochádza z anglického výrazu Computer Numeric Controll, čo znamená počítačové číselné riadenie. CNC sa používa na automatizáciu obrábacích strojov. Obsluhujú sa prostredníctvom programových príkazov zaznamenaných na pamäťové médium. Zavedenie CNC systému prinieslo doslova revolúciu vo výrobných procesoch. Obrábacie stroje sú plne riadené počítačom a ovládacie funkcie sú riadené vďaka riadiacemu systému pomocou vytvoreného programu. Určený je na ovládanie výkonových prvkov stroja a zabezpečuje, aby sa vykonala požadovaná výroba komponentov (Faunc, 2017).

1.1 VÝVOJ NUMERICKY RIADENÝCH STROJOV

Numerická kontrola, známa ako NC, je veľmi bežne používaná v obrábacích strojoch. NC je definovaná ako forma programovateľnej automatizácie, v ktorej je proces riadený číslom, písmenami a symbolmi. V prípade obrábacích strojov sa táto programovateľná automatizácia používa na prevádzku strojov. Inými slovami, numerický riadiaci stroj je definovaný ako stroj na obrábanie, ktorý je riadený súborom inštrukcií nazývaných program. Pri číslicovom riadení sú čísla základnými pokynmi pre rôzne typy úloh, z toho dôvodu sa tomuto typu programovania hovorí numerická kontrola. Pri zmene typu úloh sa tiež zmenia programové pokyny. NC je vhodná pri opakovanom obrábaní rovnakého výrobku na jednom či viacerých obrábacích strojoch. NC technológia môže byť použitá na širokú škálu operácií, ako je kreslenie, montáž, kontrola spracovaného výrobku atď. Je však používanějšía pri rôznych obrábacích procesoch ako je sústruženie, vŕtanie, frézovanie, tvarovanie atď. Operácie obrábania môžu byť vykonávané rýchlo, čo vedie k tomu, že objemová výroba sa stáva pomerne lacnejšou. Vynájdenie numerickej kontroly bolo spôsobené priekopníckymi prácami Johna T. Parsonsa v roku 1940, keď sa pokúsil automatizovane generovať krivku na frézy pomocou súradnicových pohybov. Koncom 40-tych rokov minulého storočia Parsons predstavil metódu použitia dierovaných kariet obsahujúcich súradnicový polohový systém na riadenie obrábacieho stroja. V roku 1948 Parsons demonštroval tento koncept americkému letectvu, ktoré sponzorovalo sériu projektov na Massachusetts Institute of Technology (MIT). Po mnohých výskumoch na MIT dokázali zostrojiť prvý prototyp NC v roku 1952 a onedlho dokázali potenciálne využitie NC. Čoskoro výrobcovia obrábacích strojov začali s vlastným úsilím o zavedenie komerčných strojov, teda o

zavedenie komerčných NC jednotiek na trhu. Medzitým na MIT pracovali na automatickom programovacom nástroji, známy ako APT jazyk, ktorý by mohol byť použitý na programovanie NC strojov. Hlavným cieľom jazyka APT bolo poskytnúť jednoduchšiu komunikáciu s obrábacími strojmi v podobe Anglického jazyka. APT jazyk stále vo veľkej miere používa vo výrobnom priemysle a mnohé moderné programovacie jazyky sú založené na APT.

Jazyk APT označil príchod počítačom riadených numerických strojov, všeobecne známych ako CNC stroje. Ďalší jazyk, PRONTO, objavil Patrick Hanratty, ktorý v roku 1958 vykonal rôzne experimenty v GE a vydal tento jazyk. Riadiaca jednotka ktorá čítala dierované karty v NC strojoch, bola na CNC stroji nahradená mikropočítačom. CNC priniesla významnú revolúciu vo výrobnom priemysle. Ďalším vývojom bola kombinácia počítačovo podporovanej výroby (CAM) a počítačom podporovaný dizajn (CAD) nazývaných aj CAD/CAM (Khemani, 2009).

CNC stroj sa skladá z počítača, v ktorom je program podávaný na rezanie obrábaného materiálu. Všetky procesy rezania, ktoré sa majú vykonať, a všetky konečné rozmery sa do programu vkladajú do počítača. Počítač tak vie, čo presne sa má robiť a vykonáva všetky procesy rezania. CNC stroj funguje ako robot, ktorý musí byť napájaný programom a postupuje podľa všetkých pokynov. Niektoré z bežných obrábacích strojov, ktoré môžu bežať na CNC sú: Sústruh, fréza, vrtačka atď. Hlavným účelom týchto strojov je odstrániť časť materiálu tak, aby sa dostal vhodný tvar. Pri tradičných metódach tieto stroje prevádzkujú prevádzkovatelia, ktorí sú odborníkmi na prevádzku týchto strojov. Väčšina pracovných úloh musí byť presne obrábaná a operátor by mal byť dostatočne skúsený na vykonávanie zložitých úloh. V CNC strojoch je úloha operátorov minimálna. Prevádzkovateľ musí vedieť napísať program pokynov v počítači a nahráť pokyny do stroja a zvyšok práce vykoná stroj automaticky. Počítač nasmeruje obrábací stroj na vykonávanie rôznych obrábacích operácií podľa programu pokynov dodaných obsluhou. O presnosť výsledného produktu sa nemusíte obávať, všetky CNC stroje sú navrhnuté tak, aby spĺňali vysoké požiadavky na presnosť (Khemani, 2009).

1.2 DOMÁCE CNC STROJE

Popularita CNC strojov rýchlo stúpala ale dovoliť si ich mohli iba veľké spoločnosti. Rozvojom techniky si CNC stroj mohli zaobstaráť aj menšie spoločnosti a dokonca si ľudia zostrojovali vlastné stroje v domácnosti. Bežná vec ako je tlačiareň sa

dostala do mnohých domácností kôli malým rozmerom, ľahkej použiteľnosti a cenovej dostupnosti. Rovnakým spôsobom sa zmenšené verzie CNC strojov dostali do niektorých domácností a dielní, najznámejšie z nich sú plotre a 3D tlačiarne. Nezaberali veľa miesta a ponúkali prenesenie počítačom kreslených výkresov a trojrozmerných modelov do reálneho sveta.

1.2.1 Arduino

Arduino je open-source elektronická platforma založená na ľahko použiteľnom hardvéri a softvéri. Arduino dosky dokážu čítať vstupy ako sú svetlo na snímači, stlačené tlačidlo alebo teplotu vzduchu a zmeniť ho na výstup. Výstupom môže byť blikanie LED svetla alebo text či obraz na zobrazovacom zariadení. Doska má vstupno-výstupné piny, ktoré môžeme naprogramovať podľa žiadosti. Na tieto účely sa používa programovací jazyk Arduino (založený na Wiring), a softvér Arduino IDE, založenom na Processing. V priebehu rokov bol Arduino mozgom tisícov projektov, od každodenných objektov po zložité vedecké nástroje. Na tejto open-source platforme sa zhromaždila celosvetová komunita tvorcov ktorú tvoria študenti, hudobníci, umelci, programátori a odborníci, ktorí prispeli k neuveriteľnému množstvu poznatkov. Tieto poznatky sú pre všetkých dostupné a sú úplne zadarmo. Arduino sa zrodil na Ivrea Interaction Design Institute ako jednoduchý nástroj pre rýchle prototypovanie, zameraný na študentov bez zázemia v oblasti elektroniky a programovania. Akonáhle sa dostala do širšej komunity, doska Arduino sa začala meniť, aby sa prispôbila novým potrebám a výzvam, rozlíšila svoju ponuku od jednoduchých 8-bitových dosiek k produktom pre aplikácie IoT, nositeľné zariadenia, 3D tlač či obrábacie CNC stroje. Všetky dosky Arduino sú úplne open source, umožňujú používateľom samostatne ich budovať a prispôbovať konkrétnym potrebám. Softvér je tiež open source a rastie prostredníctvom príspevkov používateľov na celom svete. Arduino je rôznorodá open-source platforma, ktorá sa dá kúpiť za menej ako 50 eur, v prípade kópie okolo 5 eur. Ďalšou výhodou je, že Arduino IDE pobeží na Windows, Macintosh OSX a Linux operačnom systéme (arduino.cc, 2017). Vďaka popularite Arduino platforme sa na trhu objavilo veľké množstvo modulov kompatibilných s touto platformou a s tým aj knižnic pre ich jednoduchšie používanie. Sú to napríklad relé, snímač teploty, ultrazvukový snímač vzdialenosti, Bluetooth či WiFi modul na bezdrôtovú komunikáciu, ovládače na krokové motory a rôzne iné.

1.2.2 Arduino CNC stroj

Netrvalo dlho a Arduino sa stal aj riadiacou jednotkou pre CNC stroje. Pomocou motorového ovládača dokázal ovládať krokové motory a tým sa stal jadrom mnohých strojov po celom svete. Kvôli jednoduchosti sa všetky potrebné komponenty prispájkovali na jednu dosku. Táto doska je navrhnutá tak, aby presne zapadla do Arduino doske, takejto doske hovoríme aj shield. Stretneme ju v rôznych podobách a umožňuje nám ovládať viacero krokových motorov a príslušných zariadení. Štandardom na týchto doskách je, že ovládače pre krokové motory sa v prípade poruchy môžu jednoducho a rýchlo vymeniť. Najvýznamnejšia doska ktorá umožňuje zmeniť Arduino na ovládač pre CNC stroje sa nazýva grblShield. Návrh samotnej dosky je voľne šíriteľný čo znamená, že ju môže vyrábať hocikto. Ďalší dôvod prečo je tak významná je ukrytý v jej názve, je kompatibilná s ďalším open source projektom a to grbl CNC firmverom. V podstate stačí nahrať grbl program na Arduino dosku pripojiť k tomu grblShield a sme pripravený vytvoriť vlastný CNC stroj (stnhetos.com, 2015).

Jeden taký stroj bol vytvorený ako záverečný projekt dvoch študentov. Podľa slov jedného z autorov sa dozvedáme, že plánoval kúpiť laserovú rezačku ale zistil, že sú príliš drahé aby sa používali na domáce použitie, a tak sa rozhodol postaviť vlastnú. Táto laserová rezačka používa 40W CO2 laser, má veľkú oblasť rezania 1000 x 600 mm a tiež disponuje dotykovou obrazovkou na ovládanie. Beží na dvoch mikrokontroléroch Arduino s grblShieldom a mikropočítači Raspberry pi na ktorý je pripojená dotyková obrazovka. Vďaka tomuto mikro počítaču je tento stroj samostatným zariadením. To znamená, že nepotrebuje počítač na odosielanie súborov do stroja. Kryt stroja je tak navrhnutý, že nie je možné zapnúť laser pokiaľ nie je zatvorený. Tieto opatrenia sú dôležité kvôli 40W laseru. Odrazy lúča sú veľmi nebezpečné pre oči. Celková zostava tohto projektu stála niečo cez 1900 EUR (Michael, 2017).

Mechanické obrábanie materiálu je veľmi časté pri CNC strojoch. Jeden nadšenec do automatizovaných strojov sa rozhodol postaviť vlastnú nízko nákladovú frézu. Konštrukcia stroja je prevažne postavená z dreva ale niektoré časti boli vytlačené na 3D tlačiarňi. Z elektronických súčiastok stroj obsahuje tri krokové motory, jedno vreteno na ktoré sa pripevní nástroj na obrábanie 120W zdroj napätia, Arduino UNO na ktorom je nahratý grbl firmvér. V tomto prípade nebol použitý grblShield ale 3x TB6560 ovládač na krokové motory. Dôvod je ten, že fréza potrebuje väčší výkon motorov kvôli mechanickému obrábaniu materiálu, a samotný grblShield nevedel dodať

dostatok energie pre tieto motory. Cena tejto zostavy je 140 eur ale tu nie je zahrnuté frézovacie zariadenie (Azielaan, 2015).

1.3 OBRÁBACIE NÁRADIA

Obrábacie nástroje sú súčasťou každého obrábacieho stroja bez ohľadu či on bol manuálny alebo riadený počítačom. Môžu počas obrábania mať priamy styk s materiálom alebo z určitej vzdialenosti, príkladmi sú frézovanie a laserová úprava. Nástadia pre mechanické obrábanie sa spravidla vyrábajú z pevnejšieho materiálu ako je obrábací materiál. Keď hovoríme o laserovej úprave materiály ktoré dokážeme obrábať súvisia prevažne od výkonu zariadenia, Na obrábanie dreva nám stačí diódový laser výkonu od 500 do 5000mW ale na obrábanie pevnejších materiálov sa používajú CO2 lasery minimálneho výkonu 40W.

1.3.1 Mechanické obrábanie

Mechanické obrábanie alebo obrábanie rezaním je obrábanie pri ktorom sa z polovýrobku získava požadovaný tvar a rozmer súčiastky odobraním čiastočiek materiálu z povrchovej vrstvy polovýrobku rezaním pomocou klinu rezného nástroja mechanizmom premeny materiálu a triesku. Cieľom obrábania je dať materiálu alebo polovýrobku funkčnú presnosť, charakterizovanú rozmermi a stavom obrobených povrchov (majanbb.sk, 2016).

Rezanie je základný spôsob trieskového delenia materiálov. Pri rezaní rezným nástrojom oddeľujeme z materiálu časti na získanie výrobku požadovaného tvaru a rozmerov. Pri rezaní zuby pílového listu odoberajú z materiálu triesku, čím sa vytvára medzera, ktorá potom oddelí od seba časti materiálu (gbfoam.co.uk, 2015).

Sústruženie je trieskové obrábanie vonkajších a vnútorných povrchov pri ktorom obrobok koná hlavný otáčavý pohyb a nástroj koná posuv, a to rovnobežne s osou otáčania obrobku alebo kolmo na túto os otáčania. Obrábací stroj sa nazýva sústruh a obrábací nástroj sústružnícky nôž. Sústruženie sa používa na obrábanie kovov, dreva a plastov (gbfoam.co.uk, 2015).

Frézovanie je mechanické obrábanie materiálu frézami na frézovačke. Frézovanie je spôsob mechanického trieskového obrábania, pri ktorom hlavný rezný pohyb je rotačný. Pohyb frézy a nositeľom posuvu je obrobok (gbfoam.co.uk, 2015).

1.3.2 Laserové obrábanie

Laser

Laserová technológia má široké spektrum využitia, počnúc meracími zariadeniami, informačnými technológiami, liečením rôznych chorôb, na opracovanie materiálov až po obranné zariadenia a žiaľ aj ničivé zbrane. Ani si neuvedomujeme, že sa lasery stali súčasťou nášho každodenného života. Svetlo vyžarované laserom sa líši od svetla, ktoré produkujú iné zdroje, ako sú žiarovky, reflektory atď. Každá farba viditeľného svetla má sebe charakteristickú vlnovú dĺžku. Svetlo s veľmi úzkym intervalom vlnových dĺžok nazývame monochromatické alebo jedno-farebné. Monochromatickosť je jedinečná vlastnosť laserového svetla. Dokonale monochromatické svetlo by obsahovalo svetlo len jednej vlnovej dĺžky (Ivana, 2014).

Existuje množstvo typov laserov a taktiež množstvo kategórií, podľa ktorých ich môžeme rozdeľovať.

Najčastejšie ich delíme podľa aktívneho prostredia a to na:

- Pevno-látkové
- Polovodičové
- Plynové
- Kvapalinové
- Plazmové
- Lasery s voľnými elektrónmi

Na účel obrábania materiálov sa najčastejšie používajú: Polovodičové, plynové a plazmové.

Laserové obrábanie materiálov je obrábanie tepelnou energiou. Svetelný lúč vyžarovaný laserom sa pomocou optickej sústavy sústreďí na veľmi malú plochu. Pri dopade tohto žiarenia sa svetelná energia mení na tepelnú a spôsobí roztavenie alebo zhorenie materiálu.

Princíp fungovania laseru

Pre správnu funkčnosť laseru a jeho produkciu koherentného svetla, musí obsahovať štyri funkčné elementy: Aktívne médium, budiaci mechanizmus, mechanizmus spätnej väzby a výstupné zrkadlo.

Pod aktívnym médium rozumieme zmes atómov alebo molekúl, ktoré je možné vzbudiť do excitovaného stavu a tak vytvoriť inverznú populáciu, čo vlastne znamená, že väčšie množstvo častíc je v excitovanom stave ako v základnom energetickom stave. Musia

byť splnené dve podmienky, aby došlo k vytvoreniu tohto stavu. Prvou podmienkou je, že atómy musia zotrvať na vyššej energetickej hladine relatívne dlhý čas, kvôli zabezpečeniu väčšieho množstva emitovaných fotónov stimulovanou emisiou ako spontánnym vyžiarím. Druhou podmienkou je existencia efektívnej metódy pumpovania atómov na vyššiu energetickú hladinu a tým zabezpečenie početnejšej obsadenosti vyšších energetických hladín. Inými slovami, keď atómy prechádzajú z vyšších energetických hladín na nižšie, väčšie množstvo fotónov sa vyžiari spontánnou emisiou ako emisiou stimulovanou. A tieto fotóny sú vyžiarené v rozličných smeroch a s rôznou fázou. Aktívne médium si môžeme predstaviť ako optický zosilňovač. Lúč koherentného svetla vchádza na jednej strane do aktívneho média, kde je zosilnený stimulovanou emisiou a na opačnej strane aktívneho média vychádza lúč zvýšenej intenzity. Rubínový kryštál bol aktívnym médiom prvého funkčného lasera.

Budiaci mechanizmus je vlastne zdroj energie, ktorý budí (excituje alebo pumpuje) atómy aktívneho média z nižších hladín na vyššie, a tým vytvára populačnú inverziu. V plynových a polovodičových laseroch je tento budiaci mechanizmus obvyčajne vytvorený elektrickým prúdom prúdiacim cez aktívne médium. Pevnolátkové a kvapalinové lasery bývajú najčastejšie budené opticky.

Mechanizmus spätnej väzby vracia časť koherentného svetla pôvodne vyprodukovaného v aktívnom médiu späť do aktívneho prostredia pre ďalšie zosilnenie v stimulovanej emisii. Množstvo koherentného svetla vyprodukované stimulovanou emisiou závisí od stavu populačnej inverzie a od intenzity stimulujúceho signálu. Tento mechanizmus sa obvyčajne skladá z dvoch zrkadiel umiestnených na oboch koncoch aktívneho média. Tieto zrkadlá zabezpečujú neustále odrazy koherentného svetla cez aktívne médium.

Výstupné zrkadlo dovoľuje časti laserového svetla odrážajúceho sa medzi dvoma zrkadlami opustiť laser vo forme lúča. Jedno zo zrkadiel mechanizmu spätnej väzby býva čiastočne priepustné a dovoľuje časti svetla vyžiariť von. Množstvo svetla, ktoré môže prejsť výstupným zrkadlom je veľmi variabilné a závisí od typu lasera. Pohybuje sa od 1% pri HeNe laseroch až po 80 % pri pevnolátkových laseroch.

Proces generovania

Prvým krokom je spustenie budiaceho mechanizmu lasera. Energia, ktorá prúdi do aktívneho média a je príčinou toho, že atómy prechádzajú zo základných stavov do stavov excitovaných. Práve v tomto momente sa začína vytvárať populačná inverzia. Niektoré excitované atómy prechádzajú spontánne naspäť na základnú energetickú hladinu a vyžiaria pritom nekoherentné fotóny s vlnovou dĺžkou laserového svetla.

Tieto fotóny sú však vyžiarené v rôznych smeroch. Mnohé z týchto fotónov teda uniknú z aktívneho média, ale tie, ktoré sú vyžiarené v smere osi aktívneho média vytvoria tak stimulovanú emisiu. Vyprodukovaný lúč po odraze od zrkadiel znovu prechádza do aktívneho prostredia. Časť tohto žiarenia po prechode cez čiastočne priepustné zrkadlo opúšťa aktívne prostredie a vychádza v podobe laserového lúča (Ivana, 2014).

Ak počet fotónov, ktoré sa odrážajú medzi zrkadlami, je v čase približne stály, aj výkon lasera sa v čase nemení, je konštantný. Ak sa toto množstvo znižuje, znižuje sa aj výkon na výstupe lasera, prípadne sa generovanie zastaví. Približná hranica, na ktorej laser začína produkovať lúč, závisí od miery populačnej inverzie v aktívnom prostredí a od spustenia stimulovanej emisie. Straty výkonu v laseri vznikajú nedokonalou odrazivosťou zrkadiel, rozptylom a difrakciami pri prechode lúča aktívnym prostredím, nesprávnym nastavením zrkadiel a plánovanými stratami cez výstupné zrkadlo. Ak je množstvo vyprodukovaných fotónov väčšie ako množstvo ktoré sa „stratí“, tak výkon lasera rastie (Ivana, 2014). V stave, keď je produkcia fotónov v rovnováhe so stratami, pracuje laser v ustálenom stave s konštantným výstupným výkonom lúča. V impulzných laseroch dodáva budiaci mechanizmus energiu v krátkych impulzoch. Dobíjanie aj vybíjanie energie prebieha veľmi rýchlo. Energia rýchlo dosiahne vysokú hladinu a po-tom dôjde k rýchlemu vybitiu, ktoré vyprodukuje laserový impulz. V laseroch pracujúcich kontinuálne dodáva budiaci mechanizmus konštantné množstvo energie do aktívneho prostredia. Systém pracuje v ustálenom stave, keď sú dodávaná a vyprodukovaná energia v rovnováhe. Výsledkom týchto pomerov je konštantný lúč na výstupe lasera.

Polovodičové diódové lasery

Výroba laserových diód je zložitý technologický proces. Laserové diódy pozostávajú z PN prechodu v kryštále arzenidu gália (GaAs), ktorý sa najčastejšie využíva na výrobu laserových diód. Ak potrebujeme dosiahnuť vyššie výkony, jednotlivé diódy sa spájajú do tzv. matíc a tým sa znásobuje ich výkon podľa požiadavky. Jednotlivé diódy sú v matici zapojené sériovo. Laserové diódy našli využitie v hlasovej komunikácii, bezpečnostných systémoch, optickom prenose dát a v mnohých iných aplikáciách. Využívajú sa pri meraní vzdialeností, pri vytyčovaní v zememeračstve, v radarovej technike a v leteckej technike ako výškomery. Ich výhodou sú malé rozmery, možnosť napájania z batérií, nízka cena a možnosť zoradovania do radov, čím sa dosiahnu výkony niekoľkých stoviek wattov (Ivana, 2014).

Princíp činnosti tohto typu laseru je podobný ako u iných, najmä vytváranie populárnej inverzie, ktorá zabezpečuje zvýšenie poveternostnej stimulovanej emisie nad absorpciu. Inverzia sa zvyčajne realizuje injekčným elektrickým prúdom v dióde, v priechodnom smere vyvoláva injekčnú dávku nosičov do oblasti prechodu, kde sa rekombinujú pri stimulovanom výstupe. Polovodičový injekčný laser sa tiež nazýva laserová dióda (LD), ktorá je podobná svetelným diódam (LED). V oboch diódach je zdroj energie elektrický prúd injektovaný do prechodu PN. Žiarenie emitované LED je však generované spontánnou emisiou, zatiaľ čo žiarenie LD vznikne stimulovanou emisiou. Jeho výhodou sú malé rozmery, vysoká účinnosť a integrovateľnosť s elektronickými súčiastkami. Polovodičové lasery pracujú na vlnových dĺžkach od blízkeho ultrazvuku do vzdialenej infračervenej oblasti. Výstupné výkony dosahujú 2W. Všeobecne patrí medzi najpoužívanejšie lasery, ktoré sa uplatňujú najmä v telekomunikáciách, výpočtovej technike a v medicíne (nasa.gov, 2017).

Plynové lasery

Aktívne plynné prostredie môže byť tvorené atómami, iónami alebo molekulami. Plynové lasery pracujú vo veľmi širokom rozsahu vlnových dĺžok v kontinuálnom alebo pulznom režime. Ich excitácia je zvyčajne pomocou elektrického výboja v zriedenom plyne, optická excitácia sa používa len zriedka. Plynové lasery majú homogénne aktívne prostredie, ktoré zabezpečuje ich výborné parametre. Nevýhodou je pomerne malý výkon. K najrozšírenejším typom patrí červeno-lesklý hélium-neónový laser, argónový alebo helium-kadmiový (červenooranžové, zelené a modré žiarenie). V priemysle a medicíne sa najviac používa infračervený laser CO₂ (nasa.gov, 2017).

1.4 RIADIACI A KOMUNIKAČNÝ SOFTVÉR

3D tlačiarne, laserové rezačky, robotické ramená, delta roboty: to všetko sú príklady strojov s numerickým riadením (CNC). CNC stroje sa musia presne pohybovať a riadiť. Krokové motory sú skvelý spôsob, ako sa presne pohybovať. Na ovládanie krokových motorov potrebujeme spôsob, ako jednoducho previesť naše ľudské túžby do strojových pokynov na kroky motora. V skutočnosti potrebujeme, aby náš robotový mozog bol tlmočníkom. Tento prevod zložený z dvoch častí a to preklad obrazu na g kód a následne ho interpretér preloží na pohyb. G kód by mal byť určitým štandardom a interpretér ako taký sa môže líšiť v závislosti od stroja. Sám interpretér by mal chrániť stroj od chybného g kódu a to tak, že zabráni aby stroj narazil či dokonca nedovolil aby sa program vykonal.

1.4.1 G kód

G kód je jazyk používaný na opis toho, ako sa stroj bude pohybovať, aby vykonal danú úlohu pomocou číselného ovládania (NC). Je najpoužívanejším programovacím jazykom. Bol vyvinutý spoločnosťou EIA začiatkom šesťdesiatych rokov, konečná verzia bola schválená v roku 1980 ako RS274D. G kód je tiež názov pre ľubovoľný reťazec znakov v NC programe, ktorý začína písmenom G. Všeobecne je to kód, ktorý hovorí obrábaciemu stroju, ako má akciu vykonať. Napríklad rýchle polohovanie, posuvný pohyb po priamke alebo oblúku, vŕtanie, rezanie, výmena nástroja, počet otáčok obrábacieho nástroja atď. Rôzne obrábacie stroje môžu pomocou rôznych kódov vykonávať rôzne funkcie. (shapeoko.com, 2017).

Tabuľka 1 Čiastočný zoznam prípravných funkcií pre g kód

G00	Rýchle polohovanie
G01	Lineárna interpolácia
G02	Kruhová interpolácia vo smere hod. ručičiek
G03	Kruhová interpolácia proti smeru hod. ručičiek
G90	Absolútne programovanie
G91	Inkrementálne programovanie
M3	Zapnúť vreteno
M5	Vypnúť vreteno

1.4.2 Interpretér g kódu

Program ktorý na základe vstupného g kódu následne hýbe CNC strojom sa nazýva interpretér. GRBL je bezplatný, open source, vysoko výkonný softvér na ovládanie pohybu strojov ktoré sa pohybujú, vyrábajú veci alebo hýbu vecami a budú bežať priamo na Arduine. Väčšina open source CNC strojov má v srdci GRBL. Bol prispôbený na použitie v stovkách projektov vrátane laserových gravírok, písací stroj napodobňujúci pohyb ruky, vrták otvorov. Vďaka svojmu výkonu, jednoduchosti a nízko nákladným hardvérovým požiadavkám GRBL narástol na malý open source fenomén. Je pripravený na nízko objemovú výrobu. Bežia aj zložitejšie stroje ako sú

frézy a jednoducho ich môžeme ovládať pomocou programu inštalovanom na našom notebooku s prívetivým grafickým vzhľadom, alebo dokonca konzolovým skriptom na strimovanie g kódu. Je napísaný v optimalizovanom jazyku C využívajúcim všetky chytré funkcie čipov Atmega328p ktoré sú umiestnené na doskách Arduino. GRBL je určený pre trojosové stroje, čiže nepodporuje otáčanie osí iba X,Y,Z. Interpreter g kódu implementuje podmnožinu normy NIST RS274/ngc. Väčšina možností konfigurácie môže byť nastavená za behu a uložená je vo vnútornej pamäte Arduina a zostáva uchovaná aj po vypnutí stroju (Hasse, 2016). S programom GRBL je možné bez problémov komunikovať cez USB port a nevyžaduje od nadriadeného počítača žiadne zvláštne vlastnosti ani výkon. Ovládanie úspešne zvládne aj najznámejší jednodoskový počítač Raspberry Pi. Vďaka využitiu všetkých vlastností mikrokontrolérov AT 168/328 program umožňuje presné načasovanie výstupných signálov pri krokovej frekvencii vyššej ako 30 kHz. V programe je integrovaný inteligentný spôsob zrýchlenia a spomalenia rýchlosti pohybu jednotlivých os, takže je možné, že stroj dosiahne vyššiu pracovnú rýchlosť bez straty pozície pri náhlych zmenách pohybu. Program úplne podporuje lineárnu a kruhovú interpoláciu (robodoupe.cz,2013).

1.4.2 Odosielateľ g kódu

Ako už bolo spomenuté CNC stroje sa riadia pomocou G kódu ktorý vieme vygenerovať pomocou CAD programov alebo vektorových editorov ako je Inkscape. Tento súbor musíme určitým spôsobom poslať do CNC stroja. V prípade, že jadrom nášho stroja je softvér GRBL pravdepodobne použijeme jeden z nasledovných programov.

bcNC

Pokročilý plne vybavený odosielateľ g kódu pre Brbl. bcNC je multiplatformový program pre Windows, Linux a Mac. Napísaný v Pythone s minimálnymi vonkajšími závislosťami. Program je robustný a schopný rýchlo a spoľahlivo pracovať aj so starým alebo pomalým hardvérom, ako je Raspberry Pi.

Vlastnosti:

Jednoduché a intuitívne rozhranie pre malé obrazovky.

Dokáže importovať g kód a dxf súbory.

Zobrazenie farebne odlišených výšok.

G kód editor a zobrazovač.

Grafické zobrazenie g kódu a pracovného priestoru.

Presunutie a úprava g kódu.

Preusporiadanie a optimalizácia rýchleho pohybu.

Posúvanie, otáčanie a zrkadlenie g kódu. (Grbl Team, 2017)

Universal Gcode Sender (UGS)

Plnohodnotné grafické používateľské rozhranie vyvinuté spoločnosťou wwinder, ktoré posiela g kód, vizualizuje ho a má úplnú kontrolu nad Grbl. Tiež dokáže spracovať spätnú väzbu ktorú Grbl posiela. Je napísaný v Jave čo znamená, že môže byť spustený na ľubovoľnom zariadení ktoré podporuje Javu, vrátane RaspberryPi. Skupina Grbl úzko spolupracuje s týmto projektom a dôrazne odporúča použitie tohto grafického rozhrania. (Grbl Team, 2017)

LaserGRBL

Je jedným z najlepších Windows g kód odosielačov pre domáce laserové gravírky. Ako vstup do tohto programu môže byť samozrejme g kód ale aj dxf a rôzne formáty obrázkov ako sú jpeg a png ktoré následne dokáže prekonvertovať do g kódu. Na rozdiel od ostatných grafických aplikácií na odosielanie g kódu, LaserGRBL je špeciálne vyvinutý pre použitie s koníčkovým laserovým rezačom. Aby boli všetky funkcie tohto programu dostupné, stroj musí podporovať moduláciu výkonu pomocou príkazu S (lasergrbl.com, 2016).

grblControl

je GUI aplikácie pre CNC stroje založené na Grbl a podporuje vizualizáciu g kódu. Dokáže ovládať CNC stroj pomocou príkazov konzoly, tlačidiel na obrazovke alebo klávesnice. Umožňuje monitorovanie stavu CNC stroja na základe spätnej väzby ktorú posiela Grbl. Podporuje aj editovanie, ukladanie a odosielanie g kódu do CNC stroja, a v prípade frézovania automatické vyrovňovanie z osi (Grbl Team, 2017).

1.5 TVORBA VEKTOROVEJ GRAFIKY A GENEROVANIE G KÓDU

Vektorová grafika označuje spôsob definovania obrazových informácií pomocou základných geometrických primitív, akými sú bod, úsečka (vektor), priamka, krivka, mnohoúhelník, ktoré sa dajú vyjadriť matematickými rovnicami. Obrázok vytvorený vo vektorovej grafike nestráca kvalitu pri zmene rozlíšenia. Programy pre prácu s vektorovou grafikou sú: Inkscape, CorelDRAW, Adobe Illustrator. Ďalšou skupinou programov ktoré pracujú s vektorovou grafikou sú CAD programy a medzi

najznámejšie patria AutoCAD a Solidworks. Ponúkajú rozsiahle možnosti pri tvorbe ako 2D tak i 3D objektov a navrhovaní modelov pre výrobu strojov.

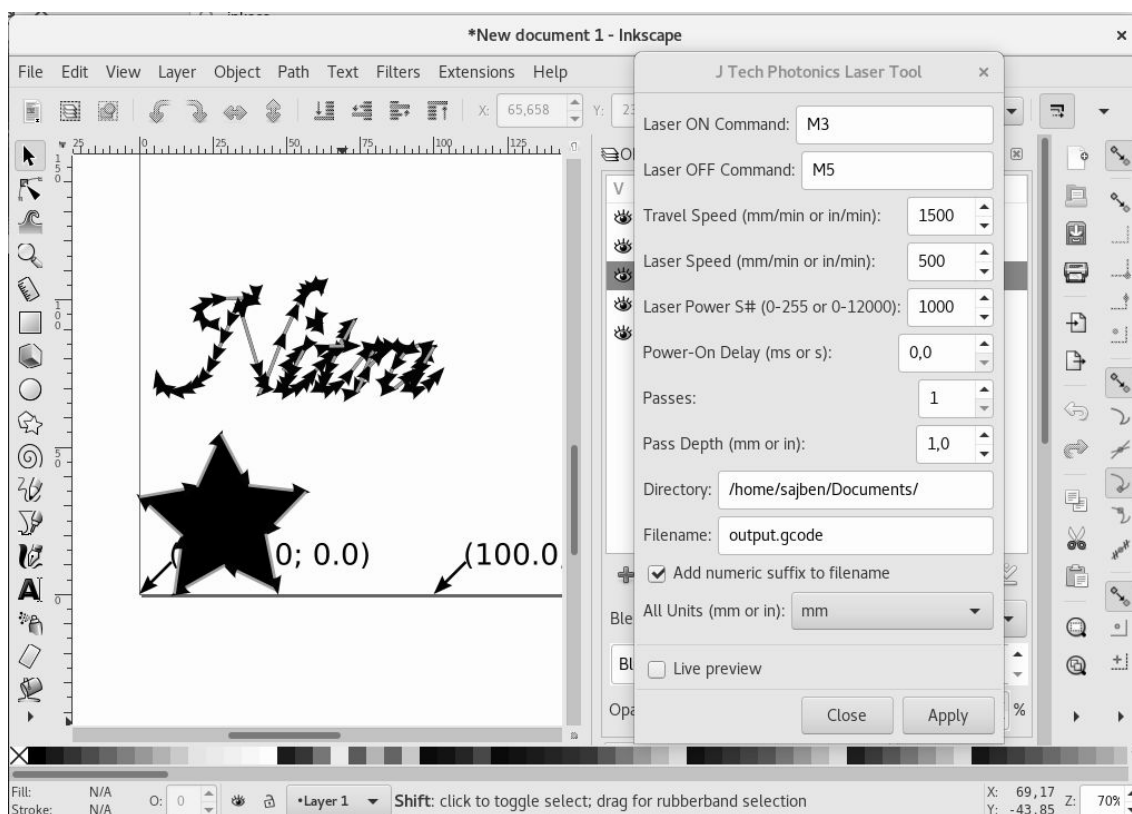
1.5.1 Inkscape

Inkscape je vektorový grafický editor pre osobné počítače. Jeho cieľom je byť všestranným grafickým nástrojom a úplná konformnosť so štandardmi XML, SVG a CSS (Edman, 2015). Hoci Inkscape nemá niektoré vlastnosti, ktoré obsahujú komerčné vektorové editory, hodí sa na množstvo aplikácií. Bežne sa napríklad používa na tvorbu obrázkov ako čo sú ikony, vlajky, mapy, diagramy, atď. Inkscape sa primárne vyvíja pre Linux, ale je multiplatformový a beží aj na Window a Mac OSX operačnom systéme. Je v aktívnom vývoji a pravidelne sú pridávané nové vlastnosti. Je to open-source softvér uvoľnený pod licenciou GNU General Public License. Je lokalizovaný aj do slovenčiny (Edman, 2015). Niektoré z nástrojov ktoré sa nachádzajú v programe Inkscape sú:

- Štvoruholník - Vytvára obdĺžniky a štvorce. Rohy štvorcov a obdĺžnikov môžu byť zaoblené.
- Kruhy / Elipsy / Oblúky - Kruhy a oblúky môžu byť zmenené na oblúk alebo uzavretý segment.
- Hviezdičky / Polygóny - Môžeme nastaviť 3 až 1023 bodov.
- Ceruzka (Path) - Umožňuje voľné kreslenie čiar.
- Pero (Bezier) - vytvorí Bezierovu krivku
- Text - vytvára text, a môže používať ľubovoľné písmo operačného systému a písmo Unicode.
- Nástroj na úpravu trasy podľa uzla - umožňuje editovanie jednej alebo viacerých ciest a ich uzlov.

Aj keď je Inkscape program na editovanie vektorových formátov, dokáže sa načítať a pracovať aj s rastrovými obrázkami. Jedna často používaná možnosť je aj vektorizácia bitmapy. Vektorizácia predstavuje spôsob konvertovania z rastrovej do vektorovej grafike.

Väčšinou sa používa na konvertovanie jednoduchých dvoj alebo troj farebných obrázkov ale dokáže konvertovať aj zložitejšie obrázky. Inkscape obsahuje zabudované rozhranie pre pluginy. Pluginy umožňujú rozširovanie existujúcich funkcionalít čo umožňuje osobám ktoré nie sú autorom programu, pridať chýbajúcu funkcionalitu. Po inštalácii softvéru uvidíme desiatky pluginov ktoré sú pred inštalované (Oskay, 2017).



Obrázok 1 Inkscape s pluginom na g kód¹

Inkscape bez pluginov nie je vhodný na použitie v oblasti obrábania materiálov a kreslení pomocou CNC strojov. Inkscape Laser Plugin nám požadujúcu funkcionality doplní a program bude schopný generovať gcode ktorý môžeme spustiť na CNC stroji. Na obrázku 1 je zobrazený program Inkscape s pluginom. Plugin nám umožňuje rôzne nastavenia ako napríklad zapnutie a vypnutie lasera podľa toho ako je náš stroj nastavený, rýchlosť presunu, laserovú rýchlosť ktorá predstavuje pohyb keď je laser zapnutý. Ďalším parametrom je výkon lasera ktorý uvádzame od 0 (laser je vypnutý) do 1023 (laser je na 100% výkonu). Kombinovaním rýchlosti a výkonu lasera dokážeme výsledný obraz prispôsobiť materiálu na ktorý gravírujeme, takisto vieme docieľiť vyrezávanie. Pri rezaní s menej výkonným laserom sa zadáva počet opakovaní daného obrázku, čo nám umožní prerezať aj hrubšie materiály.

Hershey Text rozširuje Inkscape písma ktoré sú navrhnuté pre gravírovanie textu. Keď použijeme písmo, ktoré sa nachádza v programe, gravírovaný text bude mať dvojité čiary okolo písmen. Keď chceme napodobniť text písaný jednou čiarou použijeme písmo na gravírovanie (Oskay, 2017).

¹ Zdroj: vlastná tvorba

1.6 3D MODELOVANIE

1.6.1 SolidWorks

Solidworks je strojársky 3D softvér pre platformu Microsoft Windows, ktorý bol vyvinutý spoločnosťou SolidWorks Corporation - teraz dcérska spoločnosť Dassault Systems, S.A. Umožňuje virtuálne prototypovanie, montáž, simuláciu a konečný výstup ako natívny či otvorený 3D model alebo v podobe výkresov. K dispozícii sú pluginy pre dizajn električky, FEA, optické vykresľovanie, elektromagnetickú simuláciu a ďalšie. Je to pravdepodobne najpoužívanejšia a najviac vyučovaná CAD sada na svete a používa sa v celom spektre priemyselných odvetví vrátane automobilového, leteckého a kozmického priemyslu, v komunikácii, energetiky, baníctve a stavebníctve. Vytváranie modelu v programe SolidWorks zvyčajne začína s 2D náčrtom. Náčrt pozostáva z bodov, čiar a oblúkov. Do náčrtu sa pridávajú dimenzie na definovanie veľkosti a polohy. K nim sa pridávajú atribúty ako sú rovnobežnosť, kolmosť, sústredenosť. Parametrický charakter SolidWorksu znamená, že rozmery a vzťahy riadia geometriu, nie opačne. Rozmery v náčrte je možné ovládať nezávisle alebo vzťahom s ostatnými parametrami.

1.6.2 AutoCAD

Je to jeden z najpoužívanejších 2D a 3D CAD návrhových nástrojov na svete, funguje na ohraničenom počte operačných systémov ale obsahuje mnoho jazykových mutácií. Je určený pre jednoduché kreslenie a i pre zložité návrhy. Aj keď podporuje aj 3D návrhy odborníci ho prevažne používajú na kreslenie 2D strojníckych dokumentov. Formáty do ktorých AutoCAD ukladá svoje výkresy sú DWG a DXF. Tieto formáty sú brané ako základ pre zdieľanie dát medzi CAD programami. Prvá verzia programu AutoCAD vyšla v roku 1982, vtedy ešte na halových počítačoch. V roku 1997 bola vydaná prvá verzia výlučne pre grafický operačný systém Windows a od roku 1999 sa verzie programu označujú rokom vydania. S názvom sa menia aj vnútorné nastavenia programu a tým aj výsledného súboru. Súbor má vždy rovnakú koncovku DWG, ale problém nastáva keď ho chceme otvoriť v staršej verzii, inými slovami nie je spätne kompatibilný. Avšak starší súbor sa bez problémov môže otvoriť v novej verzii programu.(edulearn.com, 2014)

2 CIELE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Cieľom diplomovej práce je navrhnuť 3D model stroja a optimalizovať ho aby bol jednoduchý na výrobu a nemal mnoho súčiastok. Tiež sa treba zamerať aj na to, aby sa používali štandardné súčiastky ako sú vozítka a vodiace tyče. Nasledovným krokom je vyrobiť a zostrojiť CNC stroj podľa 3D modelu, zapojiť všetky elektronické súčiastky a napojiť ich na Arduino riadiacu jednotku do ktorej bude nahratý softvér na ovládanie. Posledná časť bude príprava počítačového prostredia, ktoré bude umožňovať prácu s CNC strojom ako je kreslenie, generovanie g kódu a odosielanie kódu do stroja cez USB port.

Podciele:

- **Návrh a výroba CNC stroja** - Táto časť zahŕňa návrh 3D modelu stroja, tlačenie súčiastok na trojrozmernej tlačiarni a zaobstaranie všetkých súčiastok a náradia potrebných na zostavenie stroja.
- **Zostavenie mechanickej časti** - Všetky súčiastky postupne namontujeme a vytvoríme tak kostru budúceho stroja.
- **Pripojenie elektronických súčiastok** - Pripojením elektronických súčiastok ako sú motor, riadiaca jednotka, zdroj napätia a koncové spínače dokončíme hardvérovú časť stroja.
- **Kompilovanie a nahrávanie softvéru pre Arduino** - Editovaním, kompilovaním a následným nahraním softvéru na Arduino dosku budeme môcť prvýkrát stroj uviesť do pohybu a otestovať jeho charakteristiky.
- **Konfigurácia CNC stroja** - Keďže každý stroj je jedinečný, budeme musieť nastaviť hardvér a softvér tak, aby výsledný produkt spĺňal požadovanú presnosť.
- **Príprava prostredia** - Potrebujeme pripraviť prostredie obsahujúce softvér na tvorenie produktu jeho generovanie na g kód a následne odosielanie do stroja.
- **Generovanie g kódu a odosielanie do stroja** - So strojom budeme komunikovať cez g kód, čo je vlastne súbor inštrukcií, ktorým stroj rozumie.
- **Testovanie a vyhodnotenie výsledkov** - Počas testovania sa budeme zameriavať na presnosť a opakovateľnosť, čiže do akej miery je výsledný produkt podobný s požadujúcim a či dokáže v rovnakej kvalite produkovať viacero kusov.

3 REALIZÁCIA

V nasledovnej kapitole bude popísaná praktická časť diplomovej práce, ktorá sa skladá z niekoľkých častí. Popis celkového postupu, ktorý zahŕňa návrh stroja, zoznam všetkých komponentov použitých v stroji, návod na zostavenie mechanickej a elektronickej časti stroja. Taktiež preberieme spôsob programovania stroja, nastavenie softvéru a hardvéru ako aj návod na tvorenie obrazu v podobe inštrukcií, ktorým stroj rozumie. Súbor inštrukcií sa generuje podľa vstupných nastavení, ktoré určia rýchlosť pohybu a výkon laseru. Výsledný produkt zmeriame a porovnáme s očakávanými hodnotami a zistíme či sme dosiahli požadovanú presnosť. Časti sú zoradené chronologicky, presne podľa toho ako sme postupovali počas realizácie projektu. Nadväzujú jedna na druhú, a na konci prinesú fungujúci produkt. Budeme sa zaoberať aj problémami na ktoré sme narazili počas práce na projekte, aj spôsobom ako sme ich vyriešili.

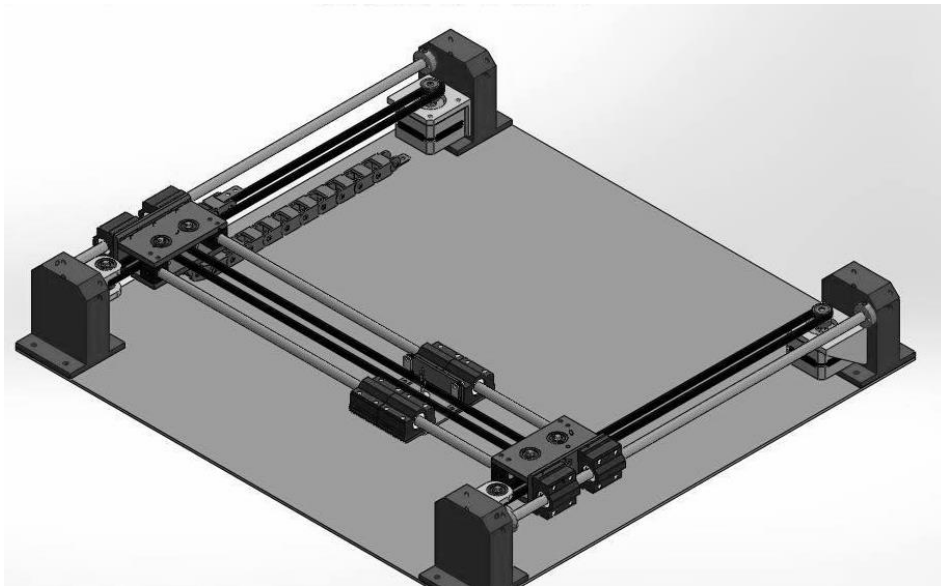
3.1 NÁVRH A VÝROBA CNC STROJA

Keď hovoríme o návrhu, ovplyvňujú nás rôzne charakteristiky a požiadavky kladené na stroj. Sú to napríklad veľkosť, presnosť, rýchlosť, možnosť dlhodobej produkcie, či sa jedná o priemyselný stroj alebo opak o stroj ktorý sa bude nachádzať v malých dielniach a nakoniec samozrejme množstvo peňazí ktoré sme ochotný investovať. Cenu výsledného produktu ovplyvňujú aj použité materiály a kvalita súčiastok. Podľa toho aké charakteristiky stroja zvolíme, môžeme na dva druhy. Stroje určené na prezentáciu a edukáciu čiže najjednoduchšie, a amatérske stroje, ktoré už dokážu produkovať určité výrobky, ale s obmedzenou rýchlosťou a kvalitou a predovšetkým nedokážu dlhodobo pracovať bez zastavenia čo je jeden z podstatných rozdielov medzi amatérskym a priemyselným CNC strojom. Poslednou kategóriou sú poloprofesionálne a profesionálne stroje ktoré sú určené pre objemovú výrobu a dokážu rovnakú kvalitu výrobku dodržať dlhodobo počas životnosti daného stroja ktorá sa pohybuje od niekoľko až do 20 rokov. Presnosť týchto strojov sa pohybuje od 0.001mm čo už predstavuje akýsi základ a do 1 nm čiže 0,000001 mm. Ak profit spoločnosti čiastočne alebo úplne závisí na produkcii CNC stroja musí byť predovšetkým spoľahlivý ale aj bezpečný pre operátorov. Návrh strojov je v dnešnej dobe úplne závislé na CAD (Computer-aided design) programoch. Oni umožňujú vytvoriť presný 3D model v počítači a tak ešte predtým ako začneme vyrábať stroj dokážeme predísť

chybám v návrhu skôr ako stroj bude vyrobený a samozrejme môžeme odhadnúť jeho cenu na základe súčiastok a konštrukčných častí. Program použitý pre návrh tohto stroja sa nazýva SolidWorks. Je to komerčný program na 3D modelovanie a obsahuje predpripravené súčiastky, ktoré sa často používajú a vieme ich rýchlo použiť v našom projekte.

3.1.1 Konštrukcia stroja

Základná konštrukcia CNC stroja obsahuje tri osi pomenované X,Y,Z. Keďže obrábací nástroj pri našom stroji je Laser nepotrebovali sme implementovať Z os, čím sa zjednodušila konštrukcia a čiastočne znížila cena. Štandardné riešenie pri návrhu XY strojov je také, že jeden motor bude posúvať X os a druhý Y os, pričom je motor na X osi je stacionárny ale druhý motor sa hýbe spolu s Y osou. To by znamenalo, že motor na x osi musí posúvať vedenie Y osi a k tomu aj váhu motora. Toto riešenie sa nám nepozdávalo ako dostatočne vhodné tak sme museli vyhľadať iné riešenie.

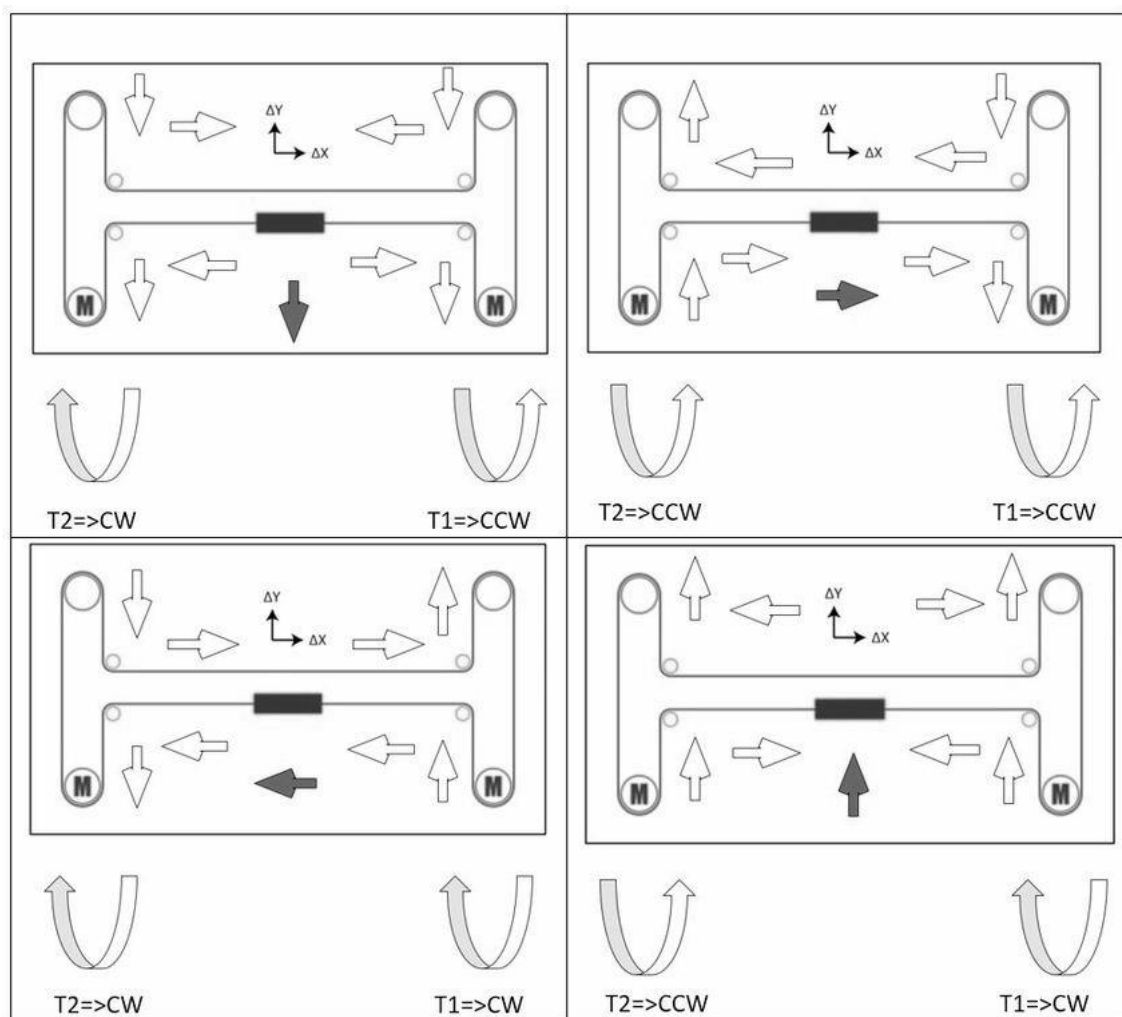


Obrázok 2 3D model CNC stroja ²

Použili sme h bot nazvaný tak lebo jeho dizajn sa podobá na písmeno H. 3D model stroja na ktorom je vidieť aj h bot zostavu je zobrazený na obrázku 2. Väčšinou sa používa na 2D roboti čiže rovinový pohyb v XY priestore. Jednoducho sa vyrába lebo obsahuje dva motory, jeden rozvodový remeň, a dve kolmo namontované

² Zdroj: vlastná tvorba

koľajnice. Každý z motorov je stacionárny a pri pohybe motory spolupracujú. Popri jednoduchosti ďalšou výhodou je aj rýchlosť ktorou sa takáto zostava dokáže pohybovať. Skutočnosť, že sú oba motory prepojené jedným remeňom komplikuje programovanie tohto robota. Točenie jedným motorom spôsobuje šikmý pohyb v 45° uhle. Ak v rovnakom čase a rovnakou rýchlosťou točíme motormi dostaneme požadovaný lineárny pohyb. V závislosti od toho do ktorej strany ktorým motorom hýbeme dokážeme strojom hýbať do ľubovoľnej strany ako je to znázornené na obrázku 3.



Obrázok 3 Spôsob pohybu h bot návrhu ³

Keď hovoríme o pohybe nemôžeme zabudnúť na lineárne vedenia. Ako už názov napovedá, slúžia na vedenie pohyblivých častí stroja. Zväčša sú používané v pároch a ich uloženie je veľmi dôležité. Treba dbať na rovnobežnosť uloženia a zamedziť tomu,

³ Zdroj: researchgate.net/figure/Movement-analysis-in-the-H-bot-mechanism_fig6_317974747

aby samotné vedenie bolo nosným prvkom konštrukcie stroja. Existujú rôzne typy vedenia ako sú nepodopreté tyče, podopreté tyče, alebo prizmatické vedenia. Druhá neoddeliteľná časť sú vozíky na ktoré sú montované časti stroja v závislosti od zvoleného typu konštrukcie. Ich úlohou je viesť smer pohybu pri obrábacom procese. Rozdelené sú do troch hlavných kategórií. Samozrejme jednotlivé typy majú svoje varianty a veľkosti, ale funkcionalitu a princíp majú rovnaké. Nepodopreté tyče s guľôčkovými ložiskami sú najlacnejším z variantov a vyznačujú sa nízkou tuhosťou. Keďže sú podopreté len na koncoch, ich použitie končí pri strojoch menších rozmerov so schopnosťou obrábať nanajvyš drevo. Prípadne sa využívajú na gravírovacie stroje a 3D tlačiarne, kde pôsobia len malé obrábacie sily. Podopreté tyče ponúkajú o niečo vyššiu kvalitu. Podopretím tyče získava vedenie dostatočnú tuhosť i pri dĺžkach nad 500 mm. Vedenie totiž neprenáša zaťaženie, ale to sa cez podoprenie prenáša do samotnej konštrukcie. Ložiská na vozíkoch sú masívnejšie, čím sa kompenzuje to, že ložisko nie je plne uzavreté a stráca stranovú presnosť. Tento typ vedení je najčastejšie používaný pre hobby obrábacie stroje, keďže pomer tuhosť a dosiahnutá presnosť voči cene je veľmi priaznivá. Stroje s podopretými tyčami sú schopné často obrábať drevo, umelé drevo, plasty a pri správnej konfigurácii a zvolenej konštrukcii dokonca aj hliník. Prizmatické alebo profilové vedenia sú najpresnejšie a najrýchlejšie spomedzi menovaných vedení, čomu taktiež zodpovedá vyššia cena. Ich vozíky sú masívnejšie, často inštalované s predpäťm, čím sa vymedzia akékoľvek vôle. Ak idete postaviť profesionálny stroj, sú jednoznačnou voľbou. Stroje s týmto druhom vedenia sú schopné obrábať okrem dreva, plastov a hliníka aj oceľ a nerez. Samozrejme ak sú inštalované správne a na tuhej konštrukcii. Samotná nosnosť vozíkov je dimenzovaná na desiatky až stovky kilogramov, takže unesú aj veľmi tuhé liatinové konštrukcie. Rozhodli sme sa použiť nepodopreté tyče s guľôčkovými ložiskami pretože splňali všetky požadované vlastnosti a mali najnižšiu cenu. Veľkosť obrábacej plochy stroja je 210x290mm, čiže ako formát papiera A4. Niektoré časti stroja ktoré boli navrhnuté v 3D modeli však nebolo možné kúpiť lebo boli jedinečné, jediným riešením bolo ich vyrobiť. Jedným spôsobom bol by napríklad vyrobiť ich z hliníku na manuálnom, alebo CNC obrábacom stroji. Hliník je ľahký a lacný materiál, ale výroba hliníkových častí na mieru by zvýšila cenu výslednej zostavy. Hľadali sme iné riešenie ako vyrobiť požadované časti stroja na mieru, a dopracovali sme sa k stroju ktorý už dlhodobo pomáha dizajnérom a návrhárom meniť 3D počítačové modely na reálne objekty, je to trojrozmerná tlačiareň. Je to zariadenie ktoré dokáže vytvoriť trojdimenzionálny (3D) objekt na

základe digitálnych dát. 3D tlač je aditívny spôsob výroby, kedy postupným nanášaním a spájaním materiálu vo vrstvách vzniká požadovaný objekt a zároveň pri ňom nevzniká žiadny odpad. V súčasnosti je využitie 3D tlače rozdelené do niekoľkých oblastí a to hlavne na základe použitej technológie. Priemyselné tlačiarne sa používajú na vytváranie prototypov alebo malých sérií výrobkov. V medicíne sú to rôzne typy protéz a implantátov alebo domáce hobby tlačiarne na výrobu plastových predmetov.

3D tlačiarne ako náplň používajú plast ktorý má nízku hmotnosť ale je nadostač pevný aby sme z neho vyrobili určité časti stroja. Nakoľko sme už mali vytvorený 3D model, stačilo vyčleniť časti ktoré sme chceli vytlačiť do jednotlivých súborov a jeden za druhým ich postupne tlačiť. 3D tlač je dosť pomalá a väčšie časti zabrali aj do 8h nepretržitého tlačenia. Dokopy s prestávkami to trvalo zhruba 4 dni.

3.1.2 Zostavenie mechanickej časti

Keď sme mali všetky súčiastky stroja pripravené, nasledovala ďalšia etapa a to montovanie stroja. Prejdeme si zoznam súčiastok použitých na montovanie mechanickej časti stroja, teda bez elektroniky.

Tabuľka 1 Zoznam súčiastok pre mechanickú časť stroja

Súčiastka	Počet kusov	Celková cena (euro)
Nepodopreté tyče	4	15
Remeň	1 (3m)	2
Remenice	8	4
Guličkové vozíky	8	15.5
Ložiská	12	5.5
Drevený rám	1	12
Spojovací materiál	60	8
3D tlač	20	80
Spolu		142

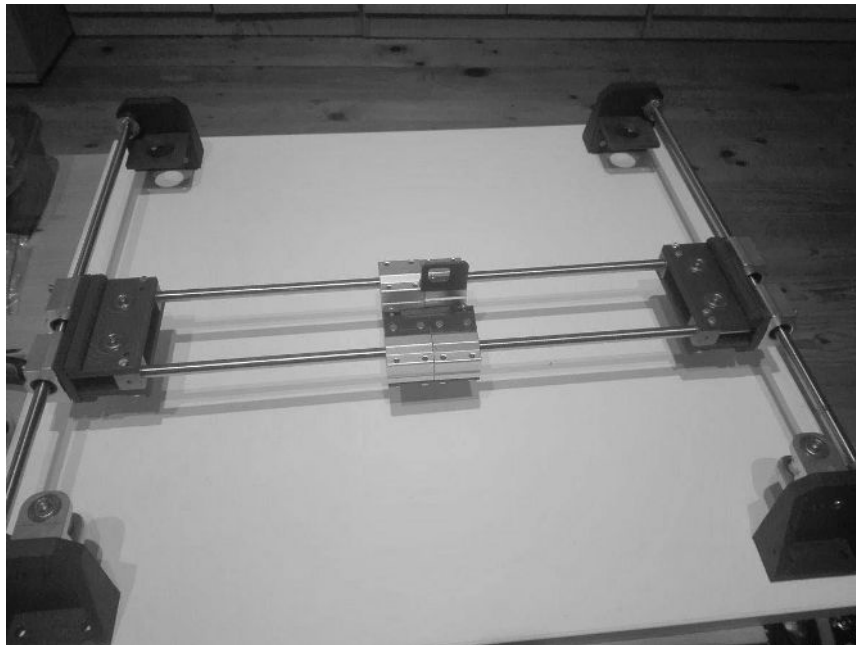


Obrázok 4 Predpripravené súčiastky pre mechanickú časť stroja ⁴

Po vytlačení plastové súčiastky sme museli trochu upraviť. V určitých častiach otvory neboli presné a tiež sme museli zarovnať všetky hrany keďže tam bol prebytočný plast ktorý sme tam nechceli mať. Zaskrutkovať niečo do plastových komponentov je nevhodné a môže prísť k poškodeniu. Namiesto toho sme nechali vytlačiť šesťuholníkové otvory do plastu, do ktorých sme zosunuli matice rovnakej veľkosti a upevnili sme ich pridaním sekundového lepidla. Celkovo na stroji sme použili dvanásť guľčkových ložísk ktoré sme umiestnili do pred pripravených otvorov. Stroj obsahuje dva držiaky pre Y os, ktoré sú úplne rovnaké a zložené sú z dvoch plastových dosiek. Na sebe majú po dve ložiská a pomedzi sú dva držiaky pre vodiace tyče a dve remenice pripojené kovovou tyčou na ložiská. Hlava stroja na ktorú sa neskôr bude montovať laser je zložená z plastovej dosky a štyroch lineárnych vozíkov namontovaných na hornej strane. Rozostup vozíkov musí byť rovnaký ako rozostup držiakov pre tyče na oboch strán Y osi. Najskôr obe tyče namontujeme na jednu stranu potom nasadíme hlavu tak, že do vozíkov vsunieme voľný koniec tyče a potom namontujeme aj druhú časť a tým dokončíme Y os. Na oba konce Y osi montujeme po dva lineárne vozíky ktoré umožnia pohyb X osi. Pôvodná verzia stroju bola montovaná na veľkej doske. Na

⁴ Zdroj: vlastná tvorba

dosku sme namontovali 4 nosné stĺpiky ktoré mali za úlohu nosiť celkovú záťaž stroja a poslúžiť ako podporné stĺpiky pre C os. Dva z nich sme použili ako držiak pre motory a na ďalších dvoch boli namontované kovové držiaky, ktoré mali na sebe dve ložiská a remenicu na ktorú sa neskôr namontuje remeň. Na všetkých štyroch stĺpikoch boli namontované aj držiaky pre vodiace tyče X osi. Ako vidno aj na obrázku číslo x, stĺpiky sú dopredu zmontované a môžu sa osadiť na drevenú dosku. Bolo dôležité aby sa Y a X os montovali súčasne. Vozíky pre obe osi boli namontované na Y os tak, že stačilo tyče vložiť do vozíka pre X os a následne tie tyče umiestniť na 4 stĺpiky ktoré preberú nosnosť celého stroja. Kostra stroja bola namontovaná a môžeme ju vidieť na obrázku 5.



Obrázok 5 Mechanická časť stroja⁵

Aby sme mohli namontovať aj remeň potrebovali sme mať motory namontované. Najprv sme namontovali remenicu na hriadeľ motoru a potom celý motor namontovali do držiaku. Celý stroj sme prepojili remeňom a oba konce boli uchytené o hlavu ktorá sa neskôr použije ako držiak pre náradie, v našom prípade laserovú diódu. Remeň sme poriadne pritiahli aby pri pohybe nenastala nepresnosť. Mali sme prvú možnosť otestovať princíp fungovania H bot návrhu CNC stroja tak, že sme rukou otáčali hriadeľ motoru a sledovali ako sa platforma pohybuje. Základná zostava stroja bola dokončená, ale zostávalo ešte veľa práce. Montovanie prvej časti zabralo 3 dni. Montáž vyžadovala

⁵ Zdroj: vlastná tvorba

aj základné náradia a to sadu inbusových kľúčov, skrutkovač, skalpel, malé kladivo a iné.

3.1.2 Pripojenie elektronických súčiastok

Základnú zostavu stroja sme už mali pripravenú, ale bez elektronických súčiastok bola v podstate nepoužiteľná. Práca na mechanickej časti vyžadovala manuálnu zručnosť a náradie pre pohodlnejšiu prácu, pričom na zapojenie všetkých elektronických súčiastok boli potrebné aspoň základné vedomosti z elektrotechniky.

Tabuľka 2 Zoznam súčiastok pre elektronickú časť stroja

Súčiastka	Počet kusov	Celková cena (euro)
Motor Nema 17	2	22.5
Koncové spínače	4	2
Arduino Uno clone	1	5
Grbl Shield V3	1	10
A4988 Krokový ovládač	4	2.5
Zdroj 12V 10A 120W	1	9
Blue Laser Diode 2W 445nm	1	43
Spolu		94



Obrázok 6 Krokový motor NEMA 17⁶

⁶ Zdroj: vlastná tvorba

Dva NEMA17 motory zobrazené na obrázku 6 zabezpečujú pohon stroja. Boli namontované počas skladania mechanickej časti stroja. Stroj sám o sebe nevie či niekde narazil alebo nie, na tento účel sa na stroj pridávajú koncové spínače ktoré oznamujú riadiacej jednotke, že sa stroj dostal do nepovolenej alebo chybovej pozície. Riadiaca jednotka okamžite pozastaví stroj a vyšle upozornenie do programu ktorým stroj ovládame. Aby sme pokračovali s prácou musíme stroj dostať preč z chybového stavu a reštartovať ho. Stroj obsahuje dokopy 4 koncové spínače a to dva pre X a dva pre Y os. Z pohľadu bezpečnosti stroja ale aj ľudí ktorí pracujú so strojom sú koncové spínače záväznou výbavou každého CNC stroja tak i tohto. Predtým ako sa budeme zaoberať riadiacou jednotkou ktorá je najdôležitejšou časťou stroja pozrieme sa na jednu z najdrahších súčiastkou, laserovú diódu. Pôvodne bol stroj stavaný na 200mW modro-fialový laser vlnovej dĺžke 405nm, no po prvom testovaní sme zistili, že laser je nepoužiteľný na účel gravírovania kvôli nízkemu výkonu. Po krátkom prieskume sme sa dozvedeli, že na účel gravírovania potrebujeme výkon laseru aspoň 1000mW, rozhodli sme sa neriskovať ďalší neúspech a objednali sme výkonnejší laser ktorý odovzdával až 2000mW a vysiela svetlosť vlnovej dĺžke 450nm (Obrázok 7).

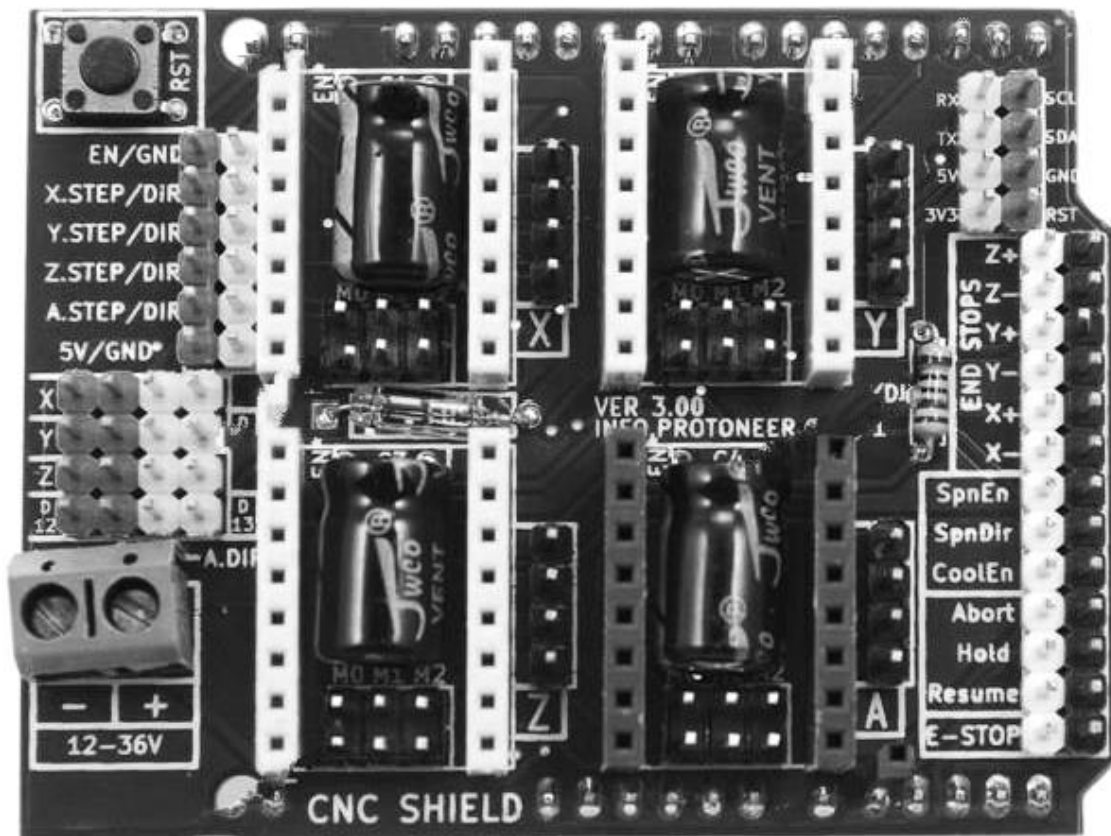


Obrázok 7 2W Laser s ovládacou elektronikou⁷

Na sebe má aktívne chladenie v podobe vetráku a k tomu aj hliníkový obal ktorý pomáha pri odvádzaní teploty s laseru. Laser je napojený na ovládač ktorý má na vstupe

⁷ Zdroj: vlastná tvorba

12V ale ako výstup do lasera posiela 0-5V. Na ovládači je zabudovaná TTL technológia ktorá na základe vstupného signálu z riadiacej jednotky mení 12V na ľubovoľnú hodnotu od 0 po 5V čo v podstate znamená, že dokážeme softvérom ovládať výkon lasera. Vstupný signál nám prichádza v tvare digitálneho portu hlavnej ovládacej jednotky ktorá podporuje PWM. Impulzová šírková modulácia, alebo PWM, je technika pre získanie analógových výsledkov s digitálnymi prostriedkami. Digitálne ovládanie sa používa na vytvorenie štvorcovej vlny, pričom sa signál vypína a zapína. Týmto spôsobom možno simulovať napätie medzi zapnutím (5V) a vypnutím (0V) tým, že zmeníme podiel času kedy je výstup zapnutý. Zvyčajne sa zadávajú hodnoty 0-255 ktoré korešpondujú s výstupným signálom 0-5V.



. Obrázok 8 GRBL Shield V3⁸

Komerčné CNC stroje vyvíjajú vlastný hardvér pre svoje stroje a snažia ho držať v tajnosti, na opačnej strane existuje hardvér ktorý je open-source a môže ho každý použiť pre svoj projekt. Keďže sme nemali finančné prostriedky na vývoj vlastného hardvéru rozhodli sme sa použiť existujúce open-source riešenie založené na stavebnici Arduino. Svetová popularita Arduino dosky nám priniesla množstvo nadstavbou, jedna z nich je

⁸ Zdroj: vlastná tvorba

aj GRBLShield (Obrázok 8). Táto doska je navrhnutá tak, že presne zapadá na dosku Arduino UNO. V závislosti od modelu môže ovládať až 4 krokové motory, každý z ovládačov pre motor sa môže vymeniť samostatne a veľmi rýchlo. Motory sa dajú veľmi rýchlo pripojiť a to bez spájkovania. Ďalej má vývody kde vieme pripojiť koncové spínače a PWM port na ktorý pripojíme laser. Na dosku je nutné priviesť napätie 12-36V. Doska podporuje pre každý z ovládačov nastaviť microstepping, bližšie k tomu si povieme keď budeme nastavovať presnosť motorov. Pre napájanie celého stroja sme použili 12V zdroj ktorý podporuje maximálny prúd 10A. Keď bola elektronika poprepájaná do Arduina, nahráli sme malý testovací program ktorý mal za úlohu rozhýbať motormi a otestovať funkčnosť celkovej zostavy. Stroj sa hýbal a neboli zistené žiadne konštrukčné chyby. Po ďalšom teste sme zistili, že motory nedokážu hýbať strojom dostatočnou rýchlosťou a tiež strácali krok. Chybu sme odstránili namontovaním výkonnejších motorov. Zmena motorov a použitie väčšieho laseru nás prinútila vyrobiť úplne nový drevený rám. Do 3D modelu sme nezahrnuli rám a držiak na laser ale môžete ich vidieť na obrázku číslo x.

3.2 PROGRAMOVANIE ARDUINA A PRÍPRAVA POUŽÍVATEĽSKÉHO PROSTREDIA

Na programovanie Arduino dosiek sa najčastejšie používa Arduino IDE, cez ktorý sa program kompiluje a nahráva na dosku. V prípade, že na vývoj softvéru nepoužívame Arduino IDE, celý proces kompilovania a nahrávania musíme spraviť manuálne. Výsledok kompilovania je hex súbor v ktorom sú zapísané všetky inštrukcie ktoré sme naprogramovali ale s tým rozdielom, že je program niekoľko krát menší. Keď už máme hex súbor pripravený musíme ho nahráť do pamäte mikrokontroléra a na to môžeme použiť rôzne programy s alebo bez grafického prostredia. Treba pripomenúť, že veľa grafických programov v pozadí používa niektorý z programov, ktorý možno spustiť iba cez príkazový riadok. Najpoužívanejší program textového typu sa menuje avrdude. Je to multiplatformový program a dokáže nahrávať programy do rôznych mikrokontrolérov. Nevýhodou je, že na to potrebujeme zadávať zložité nastavenia, pokým grafické programy sa snažia pomôcť a zjednodušiť nám prácu.

3.2.1 Interpretér g kódu pre Arduino

Plynulý pohyb motorov a tým aj celkového stroju zaobstaráva softvér ktorý nazývame interpretér g kódu. Podstata programu je jednoduchá, na vstupe dostane

súradnice v podobe textu ktoré preloží na pohyb. Text za zadáva v štandardizovanom tvare a nazývame ho g kód. Programovanie interpretéru zaberá veľa času a pre jedného programátora je to veľmi náročné, našťastie skupina programátorov zverejnila svoju dlhoročnú prácu na interpretéri zadarmo pre všetkých a to ako open-source. Komunita zoskupená okolo tohto projektu ho pravidelne vyvíja a vydáva nové verzie a opravuje zistené chyby. Projekt je svetovo známy pod menom GRBL, a najčastejšie sa používa spolu s hardvérom ktorý je kompatibilný s týmto softvérom. Pre bežné stroje stačí do Arduina s GRBL shieldom nahrat' poslednú verziu GRBL softvéru a stroj bude fungovať. Keď sme nahrali predpripravený hex súbor so strange grbl projektu dokázali sme hýbať strojom ale obraz tvorený strojom bol otočený o 45°. Našťastie riešenie problému bolo zahrnuté v rámci interpretéru grbl. Grbl vo verzii 1.1 podporoval CoreXY technológiu. CoreXY je vylepšená verzia h bot návrhu ale používa rovnaký spôsob pohybu. Aj keď podpora pre CoreXY v softvéri existovala, jediná možnosť ako si ju aktivovať bola zmeniť nastavenia v zdrojovom kóde projektu a skompilovať novú verziu softvéru s podporou CoreXY. Ako platformu sme použili operačný systém Linux Ubuntu 17.10 na ktorý sme potrebovali nainštalovať ďalšie programy potrebné na prácu. Programy sme inštalovali pomocou apt (Advanced Package Tool) ktorý je predinštalovaný na Ubuntu OS a používa sa na správu softvérových balíčkov. S programom apt pracujeme cez príkazový riadok (Terminal). Prvý program ktorý sme nainštalovali je git, používa sa na správu verzii softvéru a my sme ho použili na prevzatie zdrojového kódu s repozitáru grbl. Do terminálu zadáme nasledovné dva príkazy.

```
sudo apt update
sudo apt install git
```

Program si vyžiada vaše heslo a dokončí inštaláciu, samozrejme počas inštalácii cez program apt je nevyhnutné mať internetové pripojenie.

Nasledovným príkazom si nakopírujeme zdrojový kód grbl interpretéru do počítača.

```
git clone https://github.com/gnea/grbl.git
```

Keďže podpora na CoreXY v grbl už bola zabudovaná stačilo pozmeniť nastavenia v súbore config.h. Najskôr okomentujeme nasledovné dva riadky v súbore,

```
//#define HOMING_CYCLE_0 (1<<Z_AXIS) // REQUIRED: First
move Z to clear workspace.
//#define HOMING_CYCLE_1 ((1<<X_AXIS)|(1<<Y_AXIS))
```

a následne okomentujeme a v prípade, že tam nie sú pridáme tieto riadky

```
#define HOMING_CYCLE_0 (1<<X_AXIS) // COREXY specific
#define HOMING_CYCLE_1 (1<<Y_AXIS) // COREXY specific
#define COREXY // Default disabled. Uncomment to enable.
```

Tieto zmeny ovplyvnia kompilovanie softvéru tak, že výsledný súbor bude podporovať CoreXY a budeme ho môcť nahráť do nášho stroja. Na kompiláciu zdrojového kódu potrebujeme nainštalovať niekoľko programov. Použijeme rovnaký postup ako pri inštalovaní programu git s rozdielom, že použijeme nasledovné príkazy.

```
sudo apt update
sudo apt install arduino-core
sudo apt install make
```

Cez terminál sa nasmerujeme do priečinku grbl v ktorom sa nachádza zdrojový kód a nasledovným príkazom skompilujeme nový hex súbor s názvom grbl.hex.

```
sudo make grbl.hex
```

Chvíľu počkáme a v rovnakom priečinku sa nám objaví nový hex súbor s ktorým môžeme ďalej pracovať.

```
sudo apt install avrdude
sudo apt install libusb-dev
```

Program avrdude hneď po inštalácii nepodporuje mikrokontrolér atmega328p. Konfiguračný súbor pre avrdude sa nachádza na adrese `/etc/avrdude.conf`. Na koniec tohto súboru sme pridali nastavenia ktoré umožnili programu avrdude komunikovať aj s týmto mikrokontrolérom ktorý sa nachádza na doske Arduino UNO. Postup nahrávania programu bol nasledovný, najskôr sme arduino pripojili na USB port počítaču a zistili meno portu ktoré je najčastejšie v tvare `/dev/ttyUSB1`.

Máme otvorený terminál a sme nasmerovaný v súbore kde sa nachádza grbl.hex súbor a potom spustíme príkaz ktorý spustí nahrávanie súboru na Arduino UNO.

```
avrdude -v -patmega328p -Uflash:w:grbl.hex -carduino
-b 115200 -P /dev/ttyUSB1
```

-b je prenosová rýchlosť

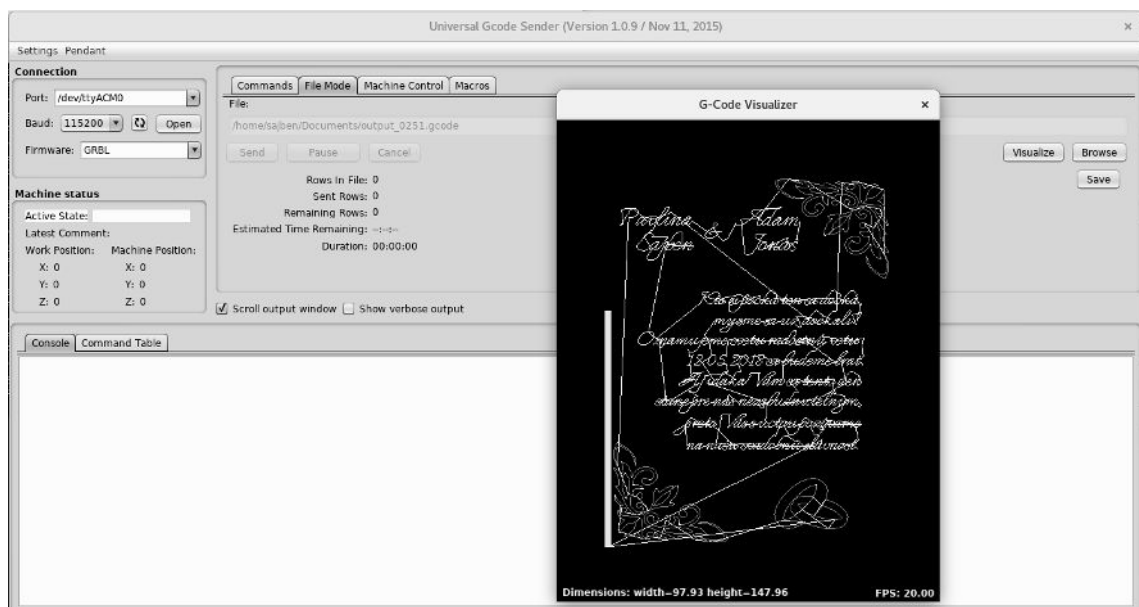
- p** je meno modelu mikrokontroléra
- v** nám zobrazí viac informácií ktoré sa dejú počas nahrávania
- c** je špecifický programátor ktorý chceme použiť
- U** pomocou tohto príkazu špecifikujeme typ pamäte, či chceme čítať alebo zapisovať a názov súboru. Dodržiavame tvar `-U<memtype>:r|w|v:<filename>`.
- P** tu špecifikujeme na ktorom porte je pripojený Arduino UNO.

Nahrávanie zvyčajne netrvá dlhšie ako 2 minúty, po úspešnom nahraní programu ho môžeme otestovať cez serial monitor ktorý je súčasťou programu Arduino IDE. Keď zapneme serial monitor nastavíme baud na 115200. Ak nahrávanie bolo úspešné dostaneme správu v tvare `Grbl 1.1f ['$' for help]`. Neskôr budeme serial monitor používať aj na nastavenia grbl. Softvér bol nahratý, teraz sme sa mohli zamerať na jeho ovládanie, tvorenie g kódu a samotným programom na vykonávanie g kódu na stroji.

3.2.2 Nastavenie používateľského prostredia

Na to, aby sme mohli pracovať s naším strojom potrebujeme nainštalovať programy ktoré nám umožnia nakresliť obraz ktorý chceme gravírovať, vygenerovať g kód ktorému rozumie CNC stroj a nakoniec nainštalovať program ktorý sa pripojí na stroj, nastaví nulový bod a nahrá g kód súbor. Snažili sme sa, aby všetko nainštalované v používateľskom prostredí bolo zdarma. Použitý operačný systém je Linux Ubuntu a v ňom nainštalované programy Inkscape a UGS(Universal Gcode Sender). Aby sme mohli používať UGS potrebujeme nainštalovať Java Virtual Machine. UGS je intuitívny program a natívne podporuje prácu s grbl softvérom ktorý máme nahratý na stroji. Jeho prívetivý dizajn môžeme vidieť na obrázku 9.

Po úspešnom pripojení prepne sa na machine control a pomocou tlačidiel X- X+ a Y- Y+ budeme schopný hýbať strojom. Nastavíme stroj na nulovú pozíciu a stlačíme Reset to zero. Teraz stroj bude považovať, že sa nachádza na pozícii (0,0). Nahrávať g kód ešte nemôžeme lebo ešte nemáme nastavený grbl tak, aby kreslený obraz korešpondoval s tým, ktorý bude gravírovaný strojom. Aby sme to nastavili, potrebujeme vytvoriť testovací g kód, a na to použijeme program Inkscape spolu s J Tech Laser Tool Pluginom. Ako mu aj samé meno hovorí, je to plugin ktorý je navrhnutý na generovanie g-kódu pre laserové gravírovanie. Máme k dispozícii rôzne nastavenia rýchlosti pohybu so zapnutým a vypnutým laserom, maximálneho výkonu laseru a počet opakovaní ktoré sa používa keď chceme rezať materiál.



Obrázok 9 Universal Gcode Sender s vizualizátorom g kódu⁹

3.3 NASTAVENIE CNC STROJA A POSTUP GRAVÍROVANIA

Na to, aby sme úspešne nastavili presnosť stroja musíme pochopiť čo sú a ako fungujú krokové motory. Krokový motor je synchronný točivý stroj, napájaný impulzmi jednosmerného prúdu. Magnetické pole je generované postupným napájaním jednotlivých pólových dvojíc. Rotor pri nižších rýchlostiach vibruje, pohybuje sa medzi stabilnými polohami vždy v určitom uhle. Tomuto javu hovoríme krokový pohyb. Vyznačujú sa vysokou mechanickou odolnosťou, dlhou dobou životnosti a prevádzkou takmer bez údržby. Nevýhodou krokových motorov je tzv. strata kroku, ktorá nastane pri prekročení medzného zaťaženia a tendencia k mechanickému zakmitaniu, ktorá

⁹ Zdroj: vlastná tvorba

môže viesť k nestabilite pri pohybe. Obe negatívne vlastnosti môžeme odstrániť zvolením správneho motora a ovládača s ohľadom na momentové charakteristiky pohonu. Ako bolo spomenuté, tiež sme mali problém so stratou kroku, pretože záťaž bola príliš vysoká a vyriešili sme to namontovaním silnejšieho motora. Ale tu to nekončí, treba si zvoliť aj správny ovládač krokového motora. Ovládač krokového motora je špeciálny elektronický obvod generujúci impulzy v určitom poradí a dĺžke. Tieto impulzy cez výkonovú časť sa vyhotovia v presnom poradí jednotlivých vrtoch rotoru. Frekvencia, poradie a dĺžka impulzov z riadiaceho obvodu riadi počet, smer otáčania a tiež točivý moment stroja. Motor NEMA17 ktorý je použitý na stroji má veľkosť kroku 1.8° . Keď 360° vydelíme s 1.8° dostaneme 200 čo predstavuje počet krokov na jednu otáčku motora. Zväčšenie počtu krokov môžeme dosiahnuť použitím krokového ovládača s podporou microstepping. Podľa nastavenia dokážeme zmenšiť krok motora a to na $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{8}$ $\frac{1}{16}$ pôvodného kroku motora.

Tabulka 3 Rozmiestnenie jumprov pre požadované rozlíšenie mikrokrokov

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution
			Full Step
J			Half Step
	J		Quarter Step
J	J		Eighth Step
J	J	J	Sixteenth Step

Na GRBLshield sa microstepping nastavuje pridávaním jumprov podľa tabuľky 3. V prípade, že pridáme všetky tri jumpre počet krokov sa nám zväčší 16 krát čiže s 200 na 3200 krokov a pri tom sme použili rovnaký motor. Zväčšením počtu krokov je náš stroj presnejší a odstránili sme aj nežiaduce vibrácie ktoré nastávali pri pomalšom pohybe motoru. Stroj ale môžeme nastavovať aj v rámci softvéru dokonca aj po tom čo ho nahráme na Arduino. Každý stroj je jedinečný svojím návrhom a použitými súčiastkami, preto je nutné prepísať pôvodné nastavenia. Grbl umožňuje pripájanie cez serial monitor a odosielaním príkazov meniť vnútorné nastavenia. Program UGS podporuje serial monitor tak, že pri tom vieme ovládať celý stroj. Pomocou tohto programu môžeme aj meniť vnútorné nastavenia ktoré potom zostávajú uchované v pamäti mikrokontroléra. Po úspešnom pripojení na Arduino dostaneme informáciu o

verzii grbl ktorú používame a príkazom \$\$ zobrazíme všetky nastavenia ktoré sú uchované v EEPROM. Niektoré z častejšie používaných sa nachádzajú v tabuľke 4.

Tabuľka 4 Zoznam nastavení pre GRBL

Nastavenie a ukážková hodnota	Popis
\$0=10	Step pulse, microseconds
\$1=25	Step idle delay, milliseconds
\$5=0	Limit pins invert, boolean
\$12=0.002	Arc tolerance, mm
\$20=0	Soft limits, boolean
\$21=0	Hard limits, boolean
\$22=1	Homing cycle, boolean
\$23=0	Homing dir invert, mask
\$24=25.000	Homing feed, mm/min
\$25=500.000	Homing seek, mm/min
\$30=1000.	Max spindle speed, RPM
\$32=0	Laser mode, boolean
\$100=250.000	X steps/mm
\$101=250.000	Y steps/mm
\$102=250.000	Z steps/mm
\$120=10.000	X Acceleration, mm/sec ²
\$121=10.000	Y Acceleration, mm/sec ²
\$122=10.000	Z Acceleration, mm/sec ²

Hodnoty sa menia nasledovným spôsobom \$x=val kde x je konkrétne nastavenie ktoré chceme zmeniť a val je nová hodnota, napríklad \$100=120 zmení počet krokov na milimeter pre os X na 120. Počas nastavenia presnosti X a Y osi sa budeme zaoberať počtom krokov na milimeter. Na to, aby sme zistili aké čísla máme priradiť musíme najskôr prichystať obraz v tvare štvorca, ktorý bude mať rozmery napríklad 4x4cm. Z ponuky rozšírení zvolíme Extensions>Generate Laser Gcode>J Tech Laser Tool a vygenerujeme g kód. Pomocou programu UGS nahráme g kód do stroja. Prvé

nastavenia pre naser neboli správne tak, že sa výsledný obraz na doske ani nezobrazil, skúšali sme rôzne nastavenia. Pre danú dosku sme zadali rýchlosť laseru 600 mm/min a výkon laseru na maximum čiže 1023. Výsledný obraz na doske nebol uspokojivý, namiesto štvorca 4x4cm sme ako výsledok nedostali ani štvorec. Bol to obdĺžnik a ani jedna so strán nebola 4cm. Obe osi boli rozladené ale namerané hodnoty nám pomôžu prísť po správne hodnoty ktoré treba zadať do nastavenia stroju. Ak hodnota ktorá je zadaná v programe pre X os vynáša 250, dĺžka hrany štvorca v smere X osi ktorú sme nakreslili je 4cm a reálna dĺžka hrany bola iba 3.4cm. $stepx = \frac{250 \cdot 4}{3.4} = 294,12$ kde stepx predstavuje novú hodnotu krokov po milimetri pre X os. Rovnakým spôsobom prepočítame novú hodnotu pre Y os a zopakujeme postup až kým nebudeme úplne spokojný s výslednou presnosťou. Výsledné nastavenia stroja sú nasledovné

\$0=10 (step pulse, msec)	\$24=25.000 (homing feed, mm/min)
\$1=25 (step idle delay, msec)	\$25=1000.000 (homing seek, mm/min)
\$2=0 (step port invert mask:00000000)	\$26=250 (homing debounce, msec)
\$3=0 (dir port invert mask:00000000)	\$27=1.000 (homing pull-off, mm)
\$4=0 (step enable invert, boot)	\$30=1000 (max spindle speed, RPM)
\$5=0 (limit pins invert, boot)	\$100=104.879 (x, step/mm)
\$6=0 (probe pin invert, boot)	\$101=108.650 (y, step/mm)
\$10=1 (status report mask:00000001)	\$102=26.000 (z, step/mm)
\$11=0.010 (junction deviation, mm)	\$110=500.000 (x max rate, mm/min)
\$12=0.002 (arc tolerance, mm)	\$111=500.000 (y max rate, mm/min)
\$13=0 (report inches, boot)	\$112=500.000 (z max rate, mm/min)
\$20=0 (soft limits, boot)	\$120=200.000 (x accel, mm/secA2)
\$21=0 (hard limits, boot)	\$121=200.000 (y accel, mm/secA2)
\$22=0 (homing cycle, boot)	\$122=200.000 (z accel, mm/secA2)
\$23=0 (homing dir invert mask:00000000)	

Jeden z testov ktorý sme spravili bolo vyrezávanie štvorčekov do dýhy. V Inkscape sme nakreslili štvorčeky rôznych veľkostí a to 1x1mm, 2x2mm, 3x3mm, 4x4mm, 5x5mm a 6x6mm. Pri generovaní g kódu sme dali o niečo pomalší pohyb laseru na hodnotu 350 a výkon laseru na maximálnu hodnotu. Ako materiál na vyrezávanie sme použili 0,9mm dýhu ktorú laser pri daných nastaveniach nemal problém prerezať. Vyrezané štvorčeky sme zmerali posuvným meradlom a dostali sme nasledovné výsledky.

1,11 x 1,18mm

2,20 x 2,22mm

2,89 x 3,01mm

3,91 x 3,98mm

4,88 x 4,88mm

5,86 x 5,67mm

Prepočítali sme, že priemerná odchýlka od zadaných hodnôt bola 0,1375mm čo považujeme za výborný úspech, a pri bežnej práci so strojom sa táto nepresnosť vôbec neprejavovala. Jedeným z problémov na ktorý sme prišli pri tomto testovaní je aj to, že takéto malé štvorčky nie je možné celkom presne zmerať pomocou posuvného meradla. Rozhodli sme sa na rovnakej vzorke spraviť ešte jeden test a na meranie sme použili merací prístroj s mikroskopom. Tento prístroj dokáže merať s presnosťou 0,001mm ale kôli jednoduchosti sme čísla zaokrúhlili na dve čísla za desatinou čiarou. Výsledky ktoré sme získali sa líšili od tých s predchádzajúceho testu, ale zistili sme jednu z príčin nepresnosti a to boli veľmi malé vibrácie laseru ktoré boli spôsobené hliníkovým držiakom pre laser. Problém sa dá jednoducho odstrániť pomalším pohybom laseru v prípade, že by sme potrebovali rezať dve oblasti ktoré sú veľmi blízko a nemali by sa dotýkať. Výsledky ktoré sme namerali s mikroskopom sú nasledovné:

1,04 x 1,13mm

1,96 x 2,06mm

2,74 x 3,05mm

3,77 x 3,92mm

4,86 x 4,80mm

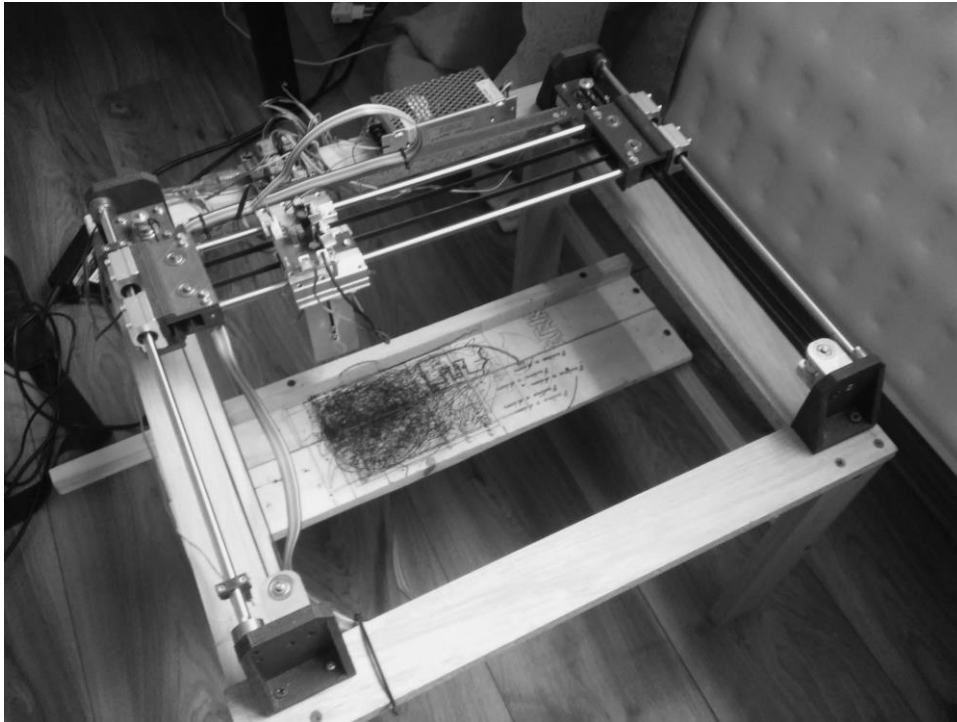
5,81 x 5,7mm

Tento test ukázal, že priemerná chybovosť bola 0,18166mm čo je o 0,0442mm viac ako sme namerali posuvným meradlom. Takže ako vidíme, presnejším meraním sa zväčšila aj priemerná chybovosť ale iba o zlomok milimetra. V podstate by nám stačilo prvé testovanie na vyhodnotenie výsledkov. Dosiahnutá presnosť je úplne postačujúca na účely gravírovania. Presunuli sme pozornosť zo stroja na tvorenie výkresov pre stroj čiže na program Inkscape. Keď kreslíme, musíme dávať pozor na to, aby všetky čiary boli zmenené na Path. Všetko čo na výkrese nebude path, plugin na generovanie g kódu odignoruje a nebude sa nachádzať na vygravírovanom obrobku. Na konvertovanie do Path používame Object to Path alebo Stroke to Path. V prípade, že chceme gravírovať

už existujúci obrázok, môžeme použiť vektorizáciu. Ide o proces konvertovania rastrového obrázku na vektorový, takýto obrázok potom vieme konvertovať na g kód a následne ho poslať na stroj. Táto technika sa používa prevažne pri jednoduchých obrázkoch. Ďalší spôsob ako konvertovať rastrový obrázok do g kódu je pomocou programu LaserGRBL, ktorý dokáže prekonvertovať ľubovoľný obrázok. Postup konvertovania je nasledovný, obrázok ktorý sme nahrali sa konvertuje na čierno-biely obrázok a rozdelí sa na určený počet riadkov. Počet riadkov určujeme podľa veľkosti obrázku požadovanej kvality. Táto technika vyžaduje podporu PWM čiže kontrolovanie výkonu laseru. Program prechádza riadkami a analyzuje odtieň šedej a podľa toho mení výkon. Pre čiernu je výkon maximálny a pri bielej je laser vypnutý, ostatné hodnoty sa generujú z pomeru bielej a čiernej. Vytvorený g kód môžeme odoslať na stroj ale najskôr ho musíme pripraviť aby bol obrázok presne na tom mieste kde aj chceme. Zapneme program Universal Gcode Sender pripojíme sa na stroj a preklikneme sa možnosť Commands, zadáme príkaz M3 S15. Prvá časť M3 znamená, že chceme zapnúť laser a druhá časť S15 je výkon laseru. Výkon Laseru sa zadáva od 0 po 1023, pri hodnote 15 má laser nadošťač napätia aby sa rozsvietil a vtedy pracuje na 1,5% svojho výkonu. Laser teraz nedokáže ublížiť človeku ale napriek tomu sa odporúča mať na sebe ochranné okuliare kôli žiareniu, rovnako nedokáže prepáliť žiadny materiál. Vložíme materiál pod laser a zaostríme bodku lasera pomocou šošovky. V programe sa prepneme na Machine Control a posunieme hlavu laseru tak, aby lúč laseru smeroval na ľavý dolný uhol dosky, čo je nulový bod. Tlačítkom Reset to zero potvrdíme nulový bod a sme pripravený gravírovať. Zapneme File mode kde stlačíme Browse a zvolíme g kód súbor ktorý chceme gravírovať. Predtým ako ho spustíme si hp môžeme aj vizualizovať aby sme si boli istí, že máme správny výkres a že je dobre vygenerovaný. Po stlačení Send stroj začne gravírovať podľa pokynov uložených v súbore a po skončení sa zobrazí čas ktorý uplynul počas gravírovania.

3.4 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Výsledkom praktickej časti diplomovej práce je fungujúci CNC stroj ovládaný Arduino pomocou grblShieldu ktorý je zobrazený na obrázku číslo x. Ako obrábací nástroj bol použitý 2W 445nm laser ktorý splňal všetko od gravírovania až po rezanie tenkých drevených dosiek.



Obrázok 10 CNC laserová gravírka ¹⁰

V prvej časti práce bol navrhnutý 3D model stroja podľa ktorého bol stroj vyrobený. Návrh stroja nebol dokonalý ale nedostatky sme riešili počas práce na stroji. Rám stroja sa líši od prvotného návrhu aby bolo možné laser umiestniť na stroj. Držiak na laser tiež prešiel úpravou, nový držiak bol vyrobený z hliníku a bol o trochu väčší a prispôsobený novému laseru. Namiesto laseru je možné namontovať elektromagnet ktorý bude posúvať pero a písať na papier. Dokáže obrábať pomerne veľkú plochu 210x290mm, s presnosťou na 0.2mm. Hrúbku čiary laseru môžeme nastavovať rýchlosťou pohybu stroja alebo zaostrovaním šošovky laseru. Jedným prechodom laser dokázal prerezať dyhu hrúbky 0.9mm, a opakovaným prechodom aj do 3 mm v závislosti od počtu opakovaní. Na ovládače motorov boli pridané malé hliníkové hladičky aby sa predišlo prehrievaniu stroja. Počas jedného testu stroj nepretržite pracoval 65 minút a neprišlo k žiadnym problémom. Stroj je možné používať aj na menšie výrobné procesy. Použitý

¹⁰ Zdroj: vlastná tvorba

bol na výrobu svadobných oznámení na drevenej doske 100x150 mm, celkovo ich bolo vyrobených 180 kusov. Mechanická časť stroja stála 142 eur a elektronické súčiastky namontované na stroj stáli dokopy 94 eur. Celková hodnota stroja ak počítame iba súčiastky stroja bez stráveného času na jeho vývoj je 236 eur. Podobné riešenie frézy stálo 140 eur bez frézovacieho zariadenia, takže sú v podobnej cenovej kategórii. V porovnaní CO2 40W Laserom s cenou od 1900 eur je naše riešenie niekoľkokrát lacnejšie ale oproti tomuto riešeniu má aj viaceré nedostatky. Prvé čo zistíme je nižší výkon oproti tejto zostave, zabudovanie vetrania a možnosť samostatnej práce stroja vďaka zabudovanej dotykovej obrazovke a rasperry pi minipočítača. Cena stroja nepresahovala plánovanú výslednú sumu 250 eur.



Obrázok 11 Logo UKF vyrobený CNC strojom ¹¹

¹¹ Zdroj: vlastná tvorba

ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo budovanie mechanického prototypu CNC laserového stroja, ktorý je schopný gravírovať plošný rozmer 210x290mm na danom pevnom povrchu. Najčastejšie sa používa drevo alebo pevný papier. Stroj má nízku spotrebu a pracuje s vysokou presnosťou vďaka presnému riadeniu krokových motorov. Je to nízko nákladový stroj v porovnaní s inými CNC zariadeniami. Je vyrobený z ľahko dostupných súčiastok tak, že nie je problém zohnať náhradné diely. Z časti je vytlačený na 3D tlačiarňi tak, že sa aj tieto časti v prípade poruchy môžu znovu vytlačiť. Stroj je určený prevažne na výrobu vlastných produktov, ale zvládne aj menšie zákazky. Neodporúča sa na komerčné používanie, môže sa využiť vo vzdelávacích inštitúciách. Stroj je navrhnutý veľmi jednoducho a môže byť prepravovaný kdekoľvek bez veľkého úsilia. Laser môže byť jednoducho nahradený iným nástrojom, napríklad perom. V riadiacej jednotke Arduino bol použitý open-source softvér. V projekte boli použité programy ako sú Inkscape na tvorenie obsahu spolu s pluginom na generovanie g kódu. Universal Gcode Sender umožňuje manuálne ovládanie stroja, vizualizáciu a nahrávanie g kódu. Plánované a odporúčané vylepšenia sú napríklad použitie dvoch laserov nízkeho výkonu, zobrazujúce dve na seba kolmé čiary a miesto, kde sa pretínajú bude predstavovať nulový bod stroja. Bezpečnostné vylepšenie, ktoré môžeme pridať je napríklad ochranný kryt, aby sme nemuseli používať ochranné okuliare pri práci so strojom. Použitie krytu by vyžadovalo aj zabezpečenie aktívneho vetrania. Prototyp CNC laserového stroja sa nám podarilo zostrojiť a ovládať bez veľkých komplikácií.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- Fanuc, 2017. Ako funguje CNC stroj? Fanuc vám prináša odpoveď. [Online]
Dostupné na: <http://dailyautomation.sk/cnc/> [Cit. 12.05.2018]
- synthetos.com, 2015. grblShield. [Online]
Dostupné na: <https://www.synthetos.com/project/grblshield/> [Cit. 16.01.2018]
- Michael, 2017. Make your own high quality CO2 lasercutter.[Online]
Dostupné na: <http://www.instructables.com/id/Make-Your-Own-High-Quality-CO2-Lasercutter-With-To/> [Cit 20.12.2017]
- Azielaan, 2015. Homebuilt (DIY) CNC Router - Arduino Based (GRBL). [Online]
Dostupné na: <http://www.instructables.com/id/Homebuilt-DIY-CNC-Router-Arduino-Based-GRBL/> [Cit. 22.11.2017]
- Khemani H., 2009. What is Numerical Control Machine? [Online]
Dostupné na: <https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/55670-what-is-numerical-control-machine/> [Cit. 05.12.2017]
- Khemani H., 2009. What is the CNC Machine? How CNC Machine Works? [Online]
Dostupné na: <https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/55787-what-is-the-cnc-machine-how-cnc-machine-works/>[Cit. 12.12.2017]
- arduino.cc, 2017. What is Arduino? [Online]
Dostupné na: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> [Cit.28.01.2018]
- Ivana, 2014, Laser a laserové technológie [Online]
Dostupné na: <https://www.zones.sk/studentske-prace/fyzika/7879-laser-a-laserove-technologie/> [Cit. 8.1.2018]
- nasa.gov, 2017. What is a laser? [Online]
Dostupné na: <https://spaceplace.nasa.gov/laser/en/> [Cit. 10.2.2018]

shapeoko.com, 2017, G-Code Interpreters [Online]

Dostupné na: https://www.shapeoko.com/wiki/index.php/G-Code_Interpreters
[Cit. 15.10.2017]

Hasse B., 2016 How to Install/use GRBL With Your Cnc Machine! [Online]

Dostupné na: <http://www.instructables.com/id/How-to-Installuse-GRBL-With-Your-Cnc-Machine/> [Cit. 11.11.2017]

robodoupe.cz, 2013. CNC jednoduše – 1. část: Co je Grbl? [Online]

Dostupné na: <http://robodoupe.cz/2013/cnc-jednoduse-1-cast-co-je-grbl/>
[Cit. 12.11.2017]

Oskay W., 2011. Hershey Text: An Inkscape extension for engraving fonts [Online]

Dostupné na: <https://www.evilmadscientist.com/2011/hershey-text-an-inkscape-extension-for-engraving-fonts/> [Cit. 6.1.2018]

Edman L. 2015. Inkscape version 0.91 [Online]

Dostupné na: <https://www.evilmadscientist.com/2015/inkscape-v-0-91/>
[Cit. 29.11.2017]

Grbl Team, 2017. Using Grbl [Online]

Dostupné na: <https://github.com/grbl/grbl/wiki/Using-Grbl> [Cit. 10.1.2018]

lasergrbl.com, 2016. What is LaserGRBL [Online]

Dostupné na: <http://lasergrbl.com/en/> [Cit. 7.2.2018]

majanbb.sk, 2016. Trieskové obrábanie [Online]

Dostupné na: <http://www.majanbb.sk/trieskove-obrabanie.html> [Cit. 12.2.2018]

gbfoam.co.uk, 2015 CNC Routing Foam [Online]

Dostupné na: <http://www.gbfoam.co.uk/foam-manufacturing-cutting-machines/cnc-routing-foam> [Cit. 3.3.2018]

edulearn.com.2014 What is AutoCAD? How is AutoCAD used? [Online]

Dostupné na: https://www.edulearn.com/article/what_is_autocad.html
[Cit 20.12.2017]

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A – Obrázky produktov vyrobených laserovou gravírkou.

PRÍLOHA A

Paulina
Šajben & Adam
Jonáš



Kto si počká ten sa dočká,
my sme sa už dočkali!
Oznamujeme svetú radosnú vetu:
12.05.2018 sa budeme brat.
Aj uďaka Vám sa tento deň
stane pre nás nezabudnuteľným,
preto Vás s úctou pozývame
na našu svadobnú slávnosť.

