

Návrh konstrukce a řízení manipulátoru s paralelní kinematikou

Diplomová práce

Vedoucí práce:

Ing. Vít Ondroušek Ph.D.

Bc. Jan Goňa

Brno 2016

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval zejména vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Vítu Ondrouškovi, Ph.D., za podporu, poskytnuté odborné rady a jeho čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marcelovi Vytečkovi za technickou podporu.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Návrh konstrukce a řízení manipulátoru s paralelní kinematikou** vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 20. května 2016

Jan Goňa

Abstract

This thesis describes the design and implementation of construction manipulator with a parallel kinematic chain. The design of control manipulator is a part of it.

In the theoretical part are described in detail the technology used in 3D press. There are also performed calculations and simulations trajectory endpoint.

The practical part is focused on the design 3D model, the implementation of design and design control of the delta manipulator.

Keywords

Theses, serial kinematics, parallel kinematics, robotics, 3D printing, delta manipulator

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací konstrukce manipulátoru s paralelním kinematickým řetězcem. Součástí je i návrh řízení manipulátoru.

V teoretické části jsou podrobněji popsány technologie používané při 3D tisku. Dále jsou provedeny výpočty a simulace trajektorie koncového bodu.

Praktická část je zaměřena na návrh modelu ve 3D, realizaci konstrukce a návrh řízení delta manipulátoru.

Klíčová slova

Závěrečná práce, sériová kinematika, paralelní kinematika, robotika, 3D tisk, delta manipulátor

Obsah

1	Úvod a cíl práce	10
1.1	Úvod	10
1.2	Cíl práce	10
2	Teoretická část	11
2.1	Analýza současného stavu	11
2.2	Rozdělení 3D tiskáren	11
2.2.1	Hobby tiskárny	11
2.2.2	Profi tiskárny	12
2.2.3	Delta 3D tiskárny	13
2.2.4	Sériové kinematické struktury strojů	14
2.2.5	Paralelní kinematické struktury strojů	15
2.2.6	Srovnání sériové a paralelní kinematiky	16
2.3	Technologie používané při 3D tisku	16
2.4	Sestavení kinematického popisu	19
2.4.1	Sestavení rovnic	20
2.4.2	Ověření rovnic	23
2.5	Řídicí jednotka	24
2.5.1	Hardware řídicí jednotky	24
2.5.2	Firmware Marlin	25
2.5.3	Software polohování manipulátoru	26
2.5.4	Získání dat pro řízení manipulátoru	26
2.5.5	SolidWorks	26
3	Metodika	27
4	Praktická část	28
4.1	Návrh modelu konstrukce ve 3D	28
4.2	Realizace konstrukce	33
4.2.1	Obecný popis	33

4.2.2	Výroba dílů	34
4.2.3	Kalibrace.....	39
4.3	Návrh řízení delta manipulátoru.....	42
4.3.1	G-kód	43
4.3.2	Návrh elektronických komponent	45
4.3.3	Návrh software.....	48
4.4	Vytvoření ukázkové úlohy.....	49
5	Shrnutí	52
6	Diskuze	53
7	Závěr	54
	Literatura	55

Seznam obrázků

Obr. 1	Hobby 3D tiskárna	12
Obr. 2	Profi tiskárna MakerBot Replicator	13
Obr. 3	Delta tiskárna Rostock	14
Obr. 4	Rozdělení pohybu kinematické dvojice	15
Obr. 5	FDM – princip nanášení materiálu	17
Obr. 6	Polyjet technologie	18
Obr. 7	LOM ořezávání	18
Obr. 8	Kinematický popis manipulátoru	19
Obr. 9	Kartézský souřadný systém manipulátoru	21
Obr. 10	Zjednodušený matematický model manipulátoru	22
Obr. 11	Arduino	25
Obr. 12	Prostředí solidworks – vytváření dílu	29
Obr. 13	Model celkové sestavy manipulátoru	30
Obr. 14	Základní deska manipulátoru (díl č. 17)	31
Obr. 15	Držák tyčí (díl č. 3)	31
Obr. 16	Tyč povrchově kalená (díl č. 6)	32
Obr. 17	Lineární vozík (díl č. 8)	32
Obr. 18	Závitová tyč (kuličková tyč) (díl č. 14)	33
Obr. 19	Kulový čep (díl č. 11)	33
Obr. 20	Roh pro spojení profilů	34
Obr. 21	Původní návrh vs. nový návrh	35
Obr. 22	Šroubový spoj desky s profilem	36
Obr. 23	Manipulátor – pohled ze spoda	37

Obr. 24	Sestavená konstrukce delta manipulátoru	38
Obr. 25	Závitová tyč, nepřesnost výroby závitu	39
Obr. 26	Kalibrace plochosti pohybu	41
Obr. 27	Měření odchylky v ose Z	42
Obr. 28	Zapojení řadiče krokového motoru	47
Obr. 29	Koncové spínače	48
Obr. 30	Software řízení manipulátoru	48
Obr. 31	Kreslení čtverce	50
Obr. 32	Kreslení čtverce, kružnic a loga PEF	51
Obr. 33	Výkres – úchyt tyčí	58
Obr. 34	Výkres – lineární ložisko	59
Obr. 35	Výkres – ložisko pevné	59
Obr. 36	Výkres – ložisko volné	60
Obr. 37	Výkres – matice kuličkové tyče, závitové stoupání 5 mm	60
Obr. 38	Výkres – motor	61
Obr. 39	Výkres – kuličková tyč, kalená tyč a hliníkový profil	62
Obr. 40	Výkres – díl koncového efektoru	63
Obr. 41	Výkres – pružná spojka	63
Obr. 42	Výkres – uchycení matice kuličkové tyče a čepů	64
Obr. 43	Výkres – rohový díl (uchycení profilů a ložiska)	65

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Srovnání sériových a paralelních manipulátorů	16
Tabulka 2 - G-kód	44
Tabulka 3 - M-kód	45

1 Úvod a cíl práce

1.1 Úvod

Kartézské konstrukce robotů jsou dodnes nejvíce používané typy manipulátorů. Hlavním cílem těchto robotů je zvýšit spolehlivost, přesnost a produktivitu výroby. Jsou používány převážně k obrábění, měření a posuvu součástí. Mají tři vzájemně kolmé osy X, Y a Z. Jejich výhoda spočívá ve snadné kalibraci, přesnosti v přímočarém pohybu a cenové dostupnosti těchto strojů. Mezi nevýhody patří jejich velká setrvačnost a tím i rychlost pohybu koncového efektoru (Renishaw, 2013).

Diplomová práce je zaměřena na stavbu 3D delta manipulátoru, což je robot s paralelní kinematickou strukturou. Tyto manipulátory se v dnešní době používají v mnoha odvětvích výroby zejména k 3D tisku pomocí postupného nanášení různých plastů, kovů nebo dokonce tekutého betonu. Mohou však najít uplatnění například v měřicí technice, stavebnictví, ve výrobní lince, nebo v lékařství pro přesouvání různých předmětů z bodu A do bodu B po předem určené trajektorii. Takové roboty patří mezi jedny z nejrychlejších co se polohování týče a proto se hodí tam, kde je rychlost vyžadována. Lze dosahovat přesnosti až na setinu milimetru podle velikosti a typu konstrukce manipulátoru. Záleží však na důkladnosti kalibrace celého stroje.

1.2 Cíl práce

Prvním cílem práce je analýza konstrukcí manipulátorů s paralelním kinematickým řetězcem včetně jejich řízení. Zaměření je především na konstrukce používané při 3D tisku.

Další cíl práce je návrh konstrukce delta robotu a sestavení 3D modelu. Z sestaveného modelu se vytvoří reálná konstrukce. Po realizaci konstrukce se navrhne a implementuje základní polohové řízení koncového efektoru. Vytvoří se reálné testy pohybu koncového efektoru.

2 Teoretická část

2.1 Analýza současného stavu

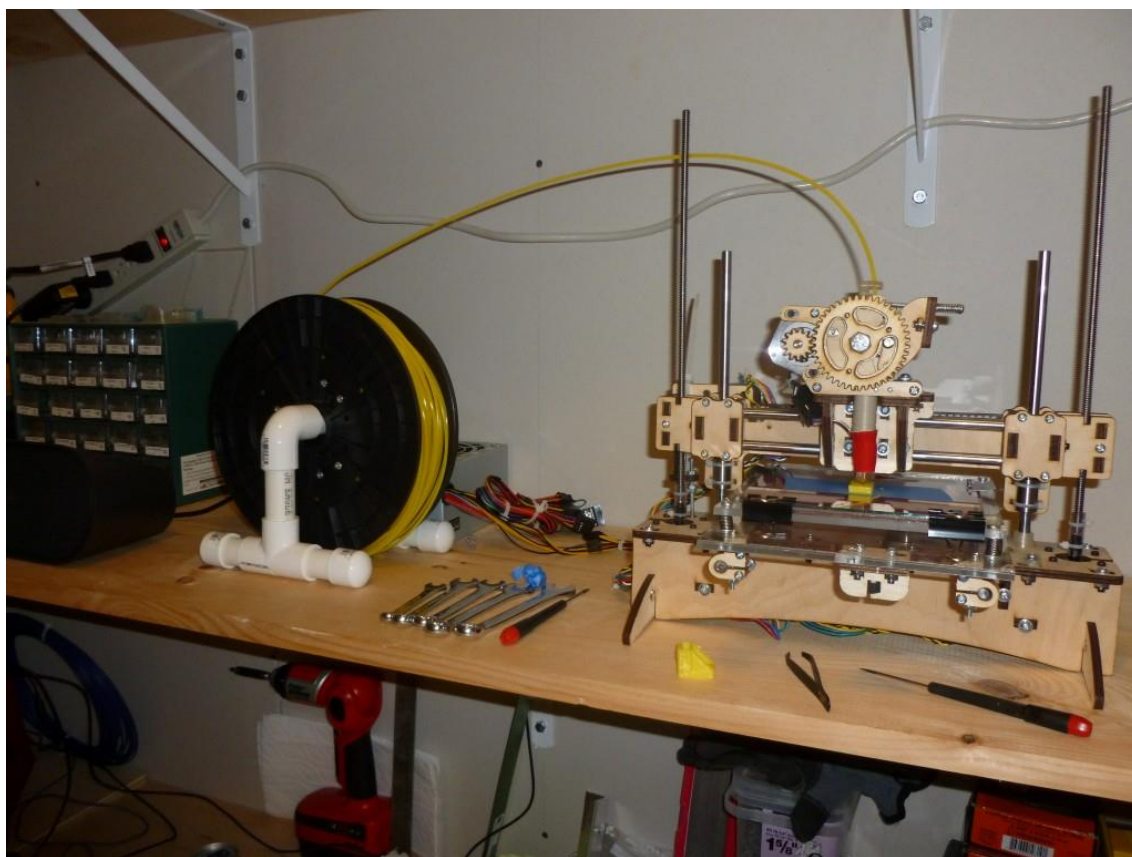
Robotika je důležitou částí v moderním strojírenství a vztahuje se ke skupinám oborů, jako jsou elektronika, počítače, matematika a mechanika. Zájem o robotiku se neustále zvyšuje v posledních desetiletích. Začínají se hodně prosazovat manipulátory s paralelní kinematickou strukturou díky zdokonalování elektronických součástí a vývoji softwaru pro jejich řízení.

2.2 Rozdělení 3D tiskáren

Základní dělení lze provést na hobby a profi tiskárny z hlediska použití. Podle typu konstrukce lze tiskárny dělit na kartézské, delta, nebo polární.

2.2.1 Hobby tiskárny

Tento typ tiskáren je většinou sestaven z materiálů, které jsou levné. Jejich výjimkou není ani dřevo, které bývá často používáno na podstavné plochy a jeho nevýhoda je zřejmá. Stačí takovou tiskárnu uskladnit na vlhkém místě a může dojít ke zkroucení materiálu a následně zvětšení nepřesnosti z původní odchylky 0,01 mm až na několik milimetrů. Cílová skupina uživatelů tedy bude složena z modelářů, kutilů ale i menších firem, kde je potřeba občas vytisknout nějaký díl. Od ceny tiskárny se odvíjí také přesnost, rychlost, velikost pracovního prostoru a schopnost využít některé materiály k tisku. Dalším faktorem rozpoznání, že se jedná o hobby tiskárnu může být absence krytu pracovního prostoru. Ten zajišťuje lepší ustálení teploty v celém prostoru a nanášení horkého materiálu na předchozí vrstvy je snazší. Zabraňuje také vniknutí prachu. Hobby tiskárny mají vyhřívanou pouze podstavnou plochu. Jako příklad bych uvedl takovou, která je sestrojena v domácím prostředí a jejíž díly jsou sestrojeny z volně dostupného materiálu, nebo z dílů vytisknutých na jiné 3D tiskárně viz. Obr.1. Cena těchto tiskáren nepřekračuje cenu 20000Kč.



Obr. 1 Hobby 3D tiskárna

Zdroj: (Lockwood, 2013)

2.2.2 Profi tiskárny

Profi tiskárny jsou sestaveny velmi precizně. Je kladen důraz na kvalitu zpracování a použité materiály dílů. Výsledkem jsou velmi přesné a zároveň rychlé tiskárny schopné tisknout větší rozměry výrobku oproti hobby kategorii. Mají možnost tisknout různými materiály, nebo tisknout dvěma tryskami zároveň a tím zrychlit celkovou dobu tisku. Některé dokonce podporují barevný tisk. Pracovní plocha je kompletně zakrytovaná a udržuje konstantní teplotu. Typickým příkladem může být průmyslová tiskárna, která pracuje téměř nepřetržitě a jsou kladeny požadavky na přesnost, spolehlivost a rychlost.



Obr. 2 Profi tiskárna MakerBot Replicator

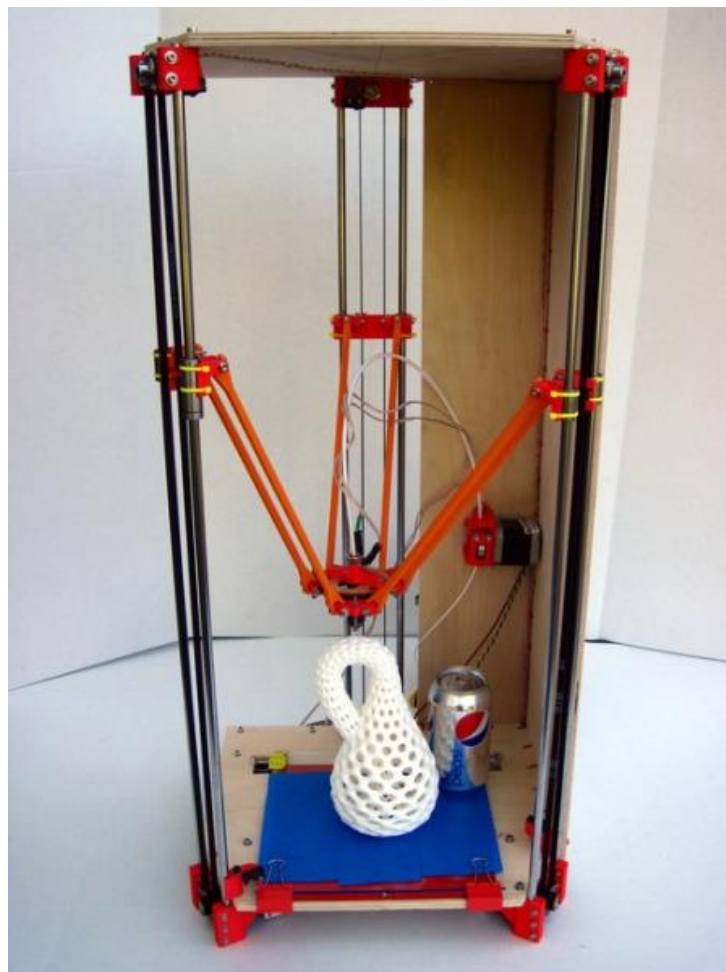
2.2.3 Delta 3D tiskárny

3D tiskáren typu delta, neboli s paralelním kinematickým řetězcem existuje v současnosti mnoho typů. Základním rozdílem od kartézských tiskáren se liší ve způsobu pohybu. Velkou nevýhodou kartézských tiskáren je jejich velká setrvačnost koncového efektoru daná sériovou kinematickou strukturou. Tuto nevýhodu značně eliminují delta tiskárny, protože koncový efektor je zavěšen uprostřed ramen, kde každé rameno je ovládáno samostatným motorem. Navíc pohyblivé součásti mohou být velmi lehké. Proto je možné provozovat rychlejší a přesnější tisk.

Delta tiskárny mohou lépe tisknout vyšší předměty jako vázy a podobně, protože mají pevnou základní desku a tím pádem se tisknutý objekt nepohybuje. Většina delta tiskáren má větší pracovní prostor v ose Z, než v osách X a Y. Pracovní prostor tiskárny lze zvolit podle rozměrů tiskárny, takže to může být i naopak. Další plus těchto tiskáren oproti kartézským je jejich pěkný vzhled, samotný pohyb koncového efektoru vypadá také dobře.

Mezi známý model delta tiskáren patří Rostock, jehož tvarem je částečně inspirován návrh manipulátoru. Stále jde o prototyp a kdokoli si může stáhnout výkresy a sám si vytisknout díly pro stavbu. Řídící elektronika je založena na platformě Arduino Mega a řadiče krokových motorů jsou Pololu. Tiskárna je vysoká 77 cm a má pracovní prostor o rozměrech 20x20x40cm. Lineární pojezdy jsou tvořeny 6-ti stejnými tyčemi, na nichž jezdí lineární ložiska. Rotační pohyb od motorů se převádí na lineární pojezdy pomocí slabých řemenů, které se často používají u běžných tiskáren na papír. Základny tvoří překližka a všechny další díly jsou vytisknuty na jiné 3D tiskárně. Rychlost tisku může být až 400 mm/s ve všech osách, přičemž rychlost samotného pohybu je omezena na 800 mm/s. Motor pro posuv materiálu je umístěn

na rámu konstrukce a materiál se dále tlačí přes plastovou trubičku až k trysce. To zajišťuje malou hmotnost koncového efektoru cca. 150g s použitím dvou extrudérů. Přesnost polohování je daná třiceti kroky na milimetr, což je přibližně 0,03 mm. Celá konstrukce je poskládána z méně než 200 dílů a to není mnoho. Uváděná pořizovací cena je méně než 500 dolarů. Po celkovém zhodnocení je vidět, že provedení tiskárny nepůsobí příliš robustním dojmem, nicméně dosahuje poměrně dobré přesnosti.



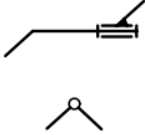
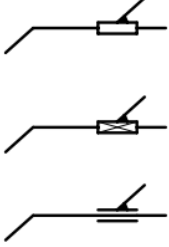
Obr. 3 Delta tiskárna Rostock

Zdroj: (Hackaday,2012)

2.2.4 Sériové kinematické struktury strojů

Manipulátory a roboty založené na sériové kinematice najdou uplatnění nejen jako průmyslové výrobní stroje, ale také v jednoúčelových aplikacích. V současnosti jde o nejvíce rozšířený typ strojů a to až z 90%. Typickým příkladem kartézské konstrukce jsou CNC stroje, které mají tři vzájemně kolmé osy posuvu. Dalším příkladem mohou být robotické ruky.

Od slova sériové je patrné, že půjde o stroje, které mají jednotlivé pohyblivé články postupně řazené za sebou. Každé dva články tvoří kinematickou dvojici a pohybují se mezi sebou pouze translačním, nebo rotačním pohybem. Takovému spojení se říká kinematický řetězec, který může být otevřený, nebo uzavřený v závislosti na způsobu připojení článků k rámu. Smíšené řetězce vzniknou kombinací otevřeného a uzavřeného kinematického řetězce.

Kinematická dvojice	Počet stupňů volnosti	Značení	Třída dvojice	Zobrazení
rotační	1	R	5	
posuvná	1	T	5	

Obr. 4 Rozdělení pohybu kinematické dvojice

Zdroj: (Skařupa, 2007)

Pokud chceme určit polohu tělesa v prostoru, je nutné znát 6 nezávislých souřadnic, 3 rotační R_x, R_y, R_z a 3 translační T_x, T_y, T_z (Skařupa, 2007).

Sériové manipulátory jsou složeny z pevné základny, ramen a kloubů a jsou ukončené koncovým efektozem. Tyto manipulátory nemají žádné uzavřené smyčky na rozdíl od paralelních (Skařupa, 2007).

2.2.5 Paralelní kinematické struktury strojů

První stroje s paralelní kinematikou byly navrženy v šedesátých letech 20. století. Později se změnila jejich stavba konstrukce a rozšířili se možnosti použití. Do výrobních linek se však původně neaplikovali kvůli řešení velkého množství technických problémů. Jelikož tyto stroje dosahují mnohonásobně vyšší rychlosti a zrychlení pohybu oproti robotům se sériovým kinematickým zapojením, bylo největším problémem vyřešení rychlého řízení akčních členů určených pro polohování koncového efektoru. V té době ještě nebyly dostatečně rozvinuté elektronické systémy a kvůli tomu nebylo možné maximálně využít výkon strojů. Rychlým rozvojem elektrotechniky se vylepšili počítače, které umožnili navrhování konstrukcí a jejich řídicích sys-

témů. Díky tomuto rozvoji se paralelní stroje dnes nachází v oblastech jako automobilový průmysl, astronomie, lékařství, stavebnictví, potravinářství a mnoho dalších (Plšek, Knoflíček, 2014).

U paralelního mechanismu jsou ramena řazena vedle sebe. Pohyb koncového efektoru vzniká pohybem všech ramen, tedy pohyb jednoho ramene ovlivní výsledný pohyb.

2.2.6 Srovnání sériové a paralelní kinematiky

Sériové manipulátory	Paralelní manipulátory
Jednoduchá mechanická struktura – jednoduché řešení přímé a inverzní kinematické úlohy	Složitá mechanická struktura – přímá kinematická úloha nelze řešit analyticky
Malá síla koncového efektoru – na každé rameno působí síla rovnající se výsledné síle působící na koncový efektor	Velká síla koncového efektoru – na koncový efektor působí síla rozložená na jednotlivá ramena
Nížší přesnost a opakovatelnost – vzniklé chyby při pohybu se sčítají	Vysoká přesnost a opakovatelnost – vzniklé chyby při pohybu jednotlivých ramen se průměrují
Umístění akčních členů – v každém kloubu manipulátoru musí být umístěn akční člen	Umístění akčních členů – akční členy mohou být umístěny na pevných statických místech manipulátoru
Velký pracovní prostor	Malý pracovní prostor – pracovní prostor nemusí být symetrický ani plynule na sebe navazující

Tabulka 1 - Srovnání sériových a paralelních manipulátorů

Zdroj: (Gouběj, 2012)

2.3 Technologie používané při 3D tisku

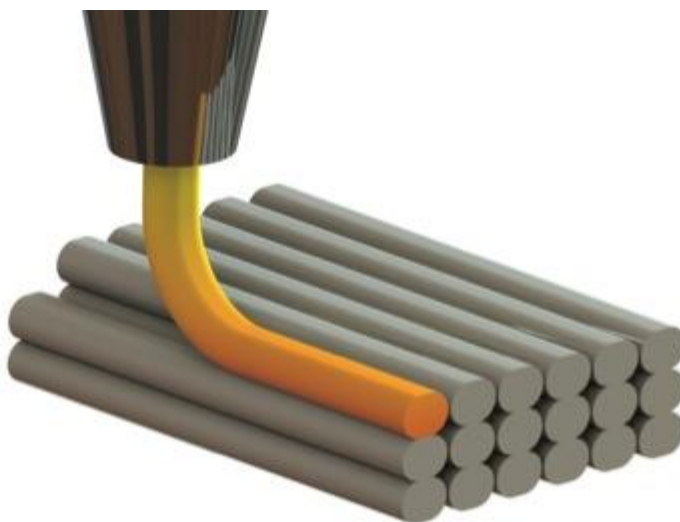
3D tisk úzce souvisí s obráběním předmětů a je v podstatě opakem soustružení, kdy se materiál neubírá, ale po vrstvách přidává. Funguje na principu rozložení počítačového 3D modelu do jednotlivých vrstev a ty se následně složí do reálného modelu v pracovním prostoru tiskárny. V praxi to funguje tak, že se nakreslí trojrozměrný model s reálnou velikostí v počítačovém programu např. SolidWorks. Model se uloží ve formátu *.stl. Takto se připraví model, který se následně musí převést do G-kódu, který bude obsluhovat manipulátor. Pro rozložení modelu na jednotlivé příkazy pohybu koncového efektoru se musí použít specializovaný software. Mezi nejčastěji používané patří např. Slic3r, nebo CuraEngine. Připravený model se rozloží do vodorovných vrstev a vypočítá se množství materiálu, které bude při tisku použito.

Pomocí 3D tiskárny se nemusí podařit vytisknout úplně všechno. To se týká hlavně součástí, které mají hodně členité plochy a není možné začít tisknout některou část ve vzduchu. Proto se používá mimo hlavního materiálu také podpurný, který částečně eliminuje tyto nedostatky. Podpurný materiál má jinou strukturu,

takže se pevně nepřilepí ke stávajícímu. Po dokončení tisku se tento materiál odstraní od hlavního.

Mezi základní metody používané při 3D tisku patří:

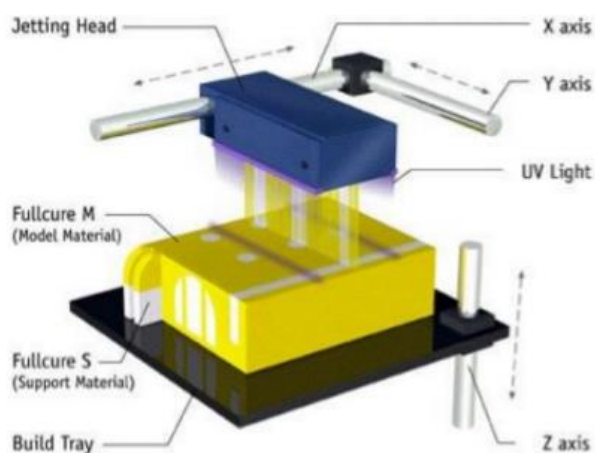
- **SLA** (Stereolithography apparatus) – Jde o nejstarší technologii používanou od roku 1986. Tato metoda je založena na postupném vytvrzování polymerů pomocí ultrafialového (UV) záření. Záření se zaměří pomocí laseru na dané místo a pak vzniká vrstva částečně vytvrzeného polymeru. Na tu se nanáší další vrstvy.
- **FDM** (Fusing Deposition Modeling) – Nejvíce používaná metoda, která je oblíbená hlavně u hobby 3D tisku díky výměně a dostupnosti přídatných materiálů na trhu. Nejčastěji používané materiály jsou ABS nebo PLA o průměru 1,75mm a 3mm filamentu. Objekt vzniká nanášením jednotlivých vrstev na sebe. Lze využít i druhý materiál jako support, který se po dokončení tisku odstraní.



Obr. 5 FDM – princip nanášení materiálu

Zdroj: (Ghose, 2014)

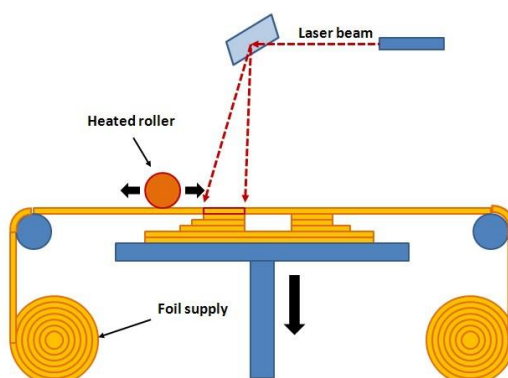
- **PolyJet** – Dvě nebo více trysek nanáší zároveň různé materiály s jejich vlastnostmi a na pracovní ploše je materiál vytvrzován ultrafialovým zářením.



Obr. 6 Polyjet technologie

Zdroj: (Dikovský, 2014)

- **SLM** (Selective Laser Melting) – Materiál se nanáší ve formě prášku v tenkých vrstvách a následně je natavován laserovým paprskem.
- **SLS** (Selective Laser Sintering) – Tato metoda má vyšší energetickou náročnost. Materiál se nanáší v práškové formě a zapéká se laserem. Tloušťka vrstvy může být 0,1mm.
- **LOM** (Laminated Object Manufacturing) – Jednotlivé vrstvy jsou tvořeny plátem materiálu a následně ořezány do požadovaného tvaru. Vrstvy jsou na sebe lepeny.

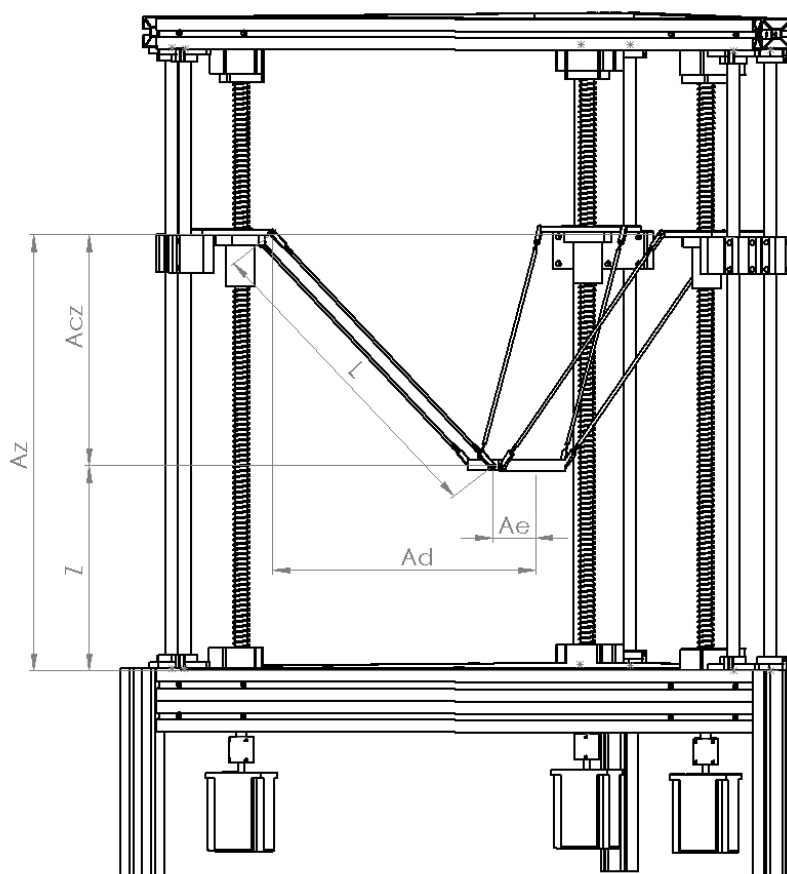


Obr. 7 LOM ořezávání

Zdroj: (Nelli, 2014)

2.4 Sestavení kinematického popisu

V prvním kroku při sestavování kinematického popisu lze zavést několik zjednodušujících předpokladů. Lze předpokládat, že umístění sloupů tvoří rovnostranný trojúhelník. Tím se částečně zjednoduší výpočet, protože je možné zavést jednu proměnnou pro vzdálenost mezi sloupy. Z toho je možné vybrat souřadnicový systém, protože všechny sloupy jsou ve stejné vzdálenosti od počátečního bodu. Dále je možné předpokládat, že všechny tři dvojice ramen mají mezi sebou stejnou délku. Dalším předpokladem je, že koncový efektor je umístěn přesně ve středu pracovní plochy manipulátoru a tudíž má stejné souřadnice jako střed základní desky (Graves, 2014).



Obr. 8 Kinematický popis manipulátoru

Pro výpočet souřadnic koncového efektoru je nutné znát výšku mezi horním čepem ramene a koncovým efektem označenou jako Acz , Bcz , Ccz . Dále délku ramen L , čemuž odpovídá konstanta ve firmwaru Marlin `DELTA_DIAGONAL_ROD`, délku Ae , Be a Ce od středu koncového efektoru k ramenu (`DELTA_EFFECTOR_OFFSET`) a vzdálenost od vozíku k efektoru označenou jako Ad , Bd a Cd (`DELTA_RADIUS`).

Výška vozíku od základní desky je A_z , B_z a C_z . Výška koncového efektoru nad základní deskou je Z (Graves, 2014). Nyní lze vyvodit soustavu tří rovnic.

$$\begin{aligned} A_z &= Z + A_{CZ} \\ B_z &= Z + B_{CZ} \\ C_z &= Z + C_{CZ} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Pro výpočet výšky Z potom platí:

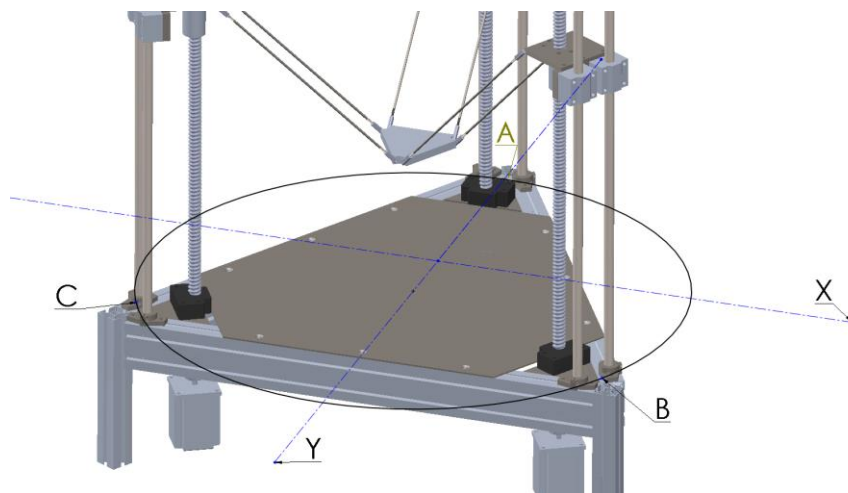
$$\begin{aligned} Z &= A_z - A_{CZ} \\ Z &= B_z - B_{CZ} \\ Z &= C_z - C_{CZ} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Ze vzorců je možné vyčíst přímou závislost. Pokud se hýbe alespoň jeden vozík, změní se výška efektoru Z . Jestli-že chceme zachovat výšku Z , musí se pohnout s více než jedním vozíkem. Z toho vyplývá, že vzdálenost Z přímo souvisí s A_z , B_z a C_z . Vyplývá z toho také, že A_{CZ} , B_{CZ} a C_{CZ} je přímo závislá na pohybu v ose X a Y (Graves, 2014).

Inverzní kinematika slouží jako základ pro definování vzorců používaných ve firmwaru Marlin pro ovládání a řízení manipulátoru. Inverzní kinematická úloha se použije tehdy, když známe současnou polohu koncového efektoru a je zadána nová souřadnice, kam by se měl efektor přesunout. Potřebujeme tedy zjistit, jak se mají pohnout jednotlivá ramena. Buď v přímočarém pohybu, nebo posunutí o určitý úhel.

2.4.1 Sestavení rovnic

Pro výpočet polohy koncového efektoru je nutné zavést souřadný systém. Zvolí se kartézský SS s počátečním bodem uprostřed základní a osa Y prochází středem věže A . Všechny věže leží na kružnici o poloměru R (DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET). Od počátečního bodu jsou věže A , B a C vzájemně rovnoměrně umístěny pod úhlem 120° (Graves, 2014).



Obr. 9 Kartézský souřadný systém manipulátoru

Rameno, koncový efektor a tyče lineárního pojezdu tvoří pomyslný pravoúhlý trojúhelník. Pomocí Pythagorovy věty lze vypočítat, jakou změnu A_d vykoná koncový efektor v rovině XY při známé dráze vozíku A_{cz} a obráceně. To vše za předpokladu, že se pohyb v ose Z nemění. Je možné sepsat soustavu rovnic vztahující se ke všem věžím.

$$\begin{aligned} A_d^2 + A_{cz}^2 &= L^2 \\ B_d^2 + B_{cz}^2 &= L^2 \\ C_d^2 + C_{cz}^2 &= L^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dále je potřeba určit souřadnice umístění věží v rovině XY popsané jako A_x, A_y ; B_x, B_y ; C_x, C_y . Umístění čepů je označeno jako A_{px}, A_{py} ; B_{px}, B_{py} a C_{px}, C_{py} . Dále je určena souřadnice místa, kde se spojuje rameno s koncovým efektem a to je popsáno A_{cx}, A_{cy} ; B_{cx}, B_{cy} a C_{cx}, C_{cy} . Ještě se určí souřadnice A_{ex}, A_{ey} ; B_{ex}, B_{ey} a C_{ex}, C_{ey} , což je místo středu koncového efektoru. Definují se vektory směřující od okraje ke středu koncového efektoru. Tím se redukuje velikost koncového efektoru do jednoho bodu (Graves, 2014). Pro souřadnice X a Y potom platí:

$$\begin{aligned} X &= A_{cx} - A_{ex} = B_{cx} - B_{ex} = C_{cx} - C_{ex} \\ Y &= A_{cy} - A_{ey} = B_{cy} - B_{ey} = C_{cy} - C_{ey} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Pro věž A platí vztah:

$$(A_{cx} - A_{px})^2 + (A_{cy} - A_{py})^2 = A_d^2 \quad (2.5)$$

Řešením pro A_{cx} a A_{cy} je:

$$\begin{aligned} A_{cx} &= X + A_{ex} \\ A_{cy} &= Y + A_{ey} \end{aligned} \quad (2.6)$$

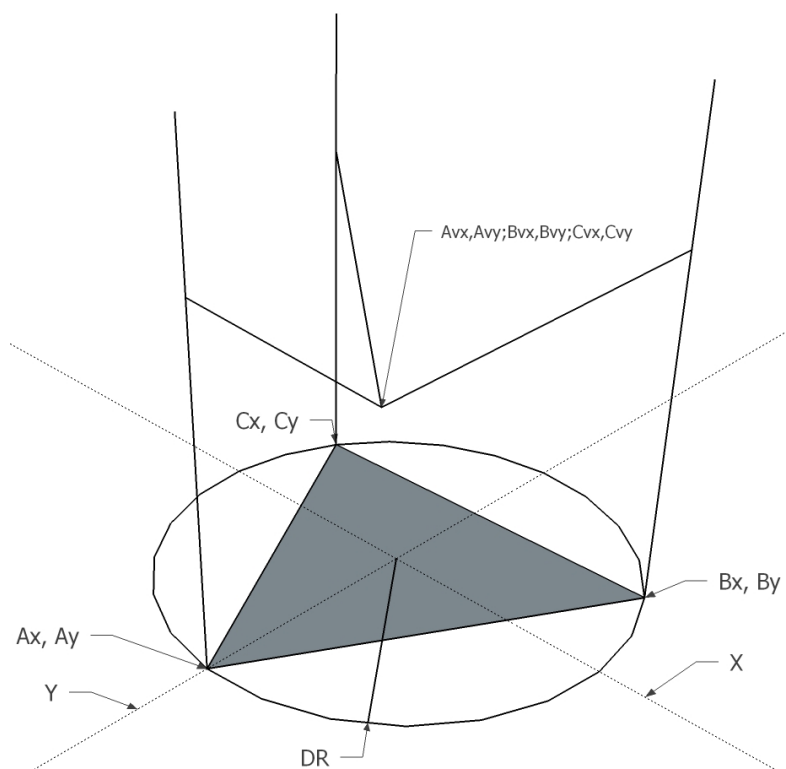
$$(X + A_{ex} - A_{px})^2 + (Y + A_{ey} - A_{py})^2 = A_d^2 \quad (2.7)$$

Po zjednodušení se zavedou souřadnice A_{vx}, A_{vy} apod. určující bod koncového efektoru.

$$\begin{aligned}
A_{vx} &= A_{px} - A_{ex} \\
A_{vy} &= A_{py} - A_{ey} \\
B_{vx} &= B_{px} - B_{ex} \\
B_{vy} &= B_{py} - B_{ey} \\
C_{vx} &= C_{px} - C_{ex} \\
C_{vy} &= C_{py} - C_{ey}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Tento výpočet platí pro zjednodušený matematický model. V tomto modelu se uvažuje místo dvou tyčí lineárního pojezdu pouze jedna osa, umístěná mezi nimi a ve firmwaru Marlin mají tyto osy označení DELTA_TOWER. Stejně tak místo dvou ramen se uvažuje pouze osa uprostřed a místo koncového efektoru, který má určitou šířku a výšku se zavádí pouze jeden bod (Graves, 2014).

Zjednodušený model je uveden na obrázku 10.



Obr. 10 Zjednodušený matematický model manipulátoru

Ze zjednodušeného modelu lze vyvodit rovnice popisující souřadnice koncového efektoru v osách X, Y a Z.

Pro věž A bude platit:

$$(X - A_{vx})^2 + (Y - A_{vy})^2 = A_d^2 = L^2 - A_{cz}^2 \tag{2.9}$$

Rovnice pro výpočet Acz je:

$$A_{cz}^2 = L^2 - (X - A_{vx})^2 - (Y - A_{vy})^2 \quad (2.10)$$

$$A_{cz} = \sqrt{L^2 - (X - A_{vx})^2 - (Y - A_{vy})^2}$$

Obdobně pro věže B a C:

$$B_{cz} = \sqrt{L^2 - (X - B_{vx})^2 - (Y - B_{vy})^2} \quad (2.11)$$

$$C_{cz} = \sqrt{L^2 - (X - C_{vx})^2 - (Y - C_{vy})^2} \quad (2.12)$$

Toto je výsledná soustava tří rovnic pro výpočet polohy koncového efektoru.

Zdroj textu a rovnic kap 2.4.1: (Graves, 2014)

2.4.2 Ověření rovnic

Do rovnic se dosadí konkrétní umístění os věží vzhledem k počátečním souřadnicím $[0;0;0]$. Věž A má souřadnice $[0;DR;0]$, proto platí:

$$\begin{aligned} A_{vx} &= 0, \\ A_{vy} &= DR \end{aligned} \quad (2.13)$$

Pro věž B a C platí:

$$\begin{aligned} B_{vx} &= DR * \cos(30) = DR * \sqrt{3/2} \\ B_{vy} &= -DR * \sin(30) = -DR/2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} C_{vx} &= -DR * \cos(30) = -DR * \sqrt{3/2} \\ C_{vy} &= -DR * \sin(30) = -DR/2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Po dosazení hodnot do rovnic 2.10, 2.11 a 2.12 vzniknou nové rovnice, kde si lze povšimnout určité vzájemné podobnosti.

$$A_{cz} = \frac{\sqrt{L^2 - (X - A_{vx})^2 - (Y - A_{vy})^2}}{\sqrt{L^2 - (X - 0)^2 - (Y - DR)^2}} \quad (2.16)$$

$$B_{cz} = \sqrt{L^2 - (X - DR * \sqrt{3/2})^2 - (Y + DR/2)^2} \quad (2.17)$$

$$C_{cz} = \sqrt{L^2 - (X + DR * \sqrt{3/2})^2 - (Y + DR/2)^2} \quad (2.18)$$

Délka ramen L a delta rádius DR jsou konstanty a rozdíl mezi rovnicemi A_{cz} , B_{cz} a C_{cz} vypadá takto:

$$\begin{aligned} &-(X - A_{vx})^2 - (Y - A_{vy})^2 \\ &-(X - B_{vx})^2 - (Y - B_{vy})^2 \\ &-(X - C_{vx})^2 - (Y - C_{vy})^2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Pokud se X a Y nastaví na 0 a vzorce se vynásobí -1, lze vztahy přepsat následovně:

$$\begin{aligned} A_{vx}^2 + A_{vy}^2 \\ B_{vx}^2 + B_{vy}^2 \\ C_{vx}^2 + C_{vy}^2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Po dosazení do jednotlivých vztahů se musejí výsledné hodnoty vzájemně rovnat.

$$\begin{aligned} A_{vx}^2 + A_{vy}^2 &= 0 + DR^2 = DR^2 \\ B_{vx}^2 + B_{vy}^2 &= (DR * \sqrt{3/2})^2 + (-DR/2)^2 = \frac{DR^2}{4} + \frac{DR^2 * 3}{4} = \frac{4 * DR^2}{4} = DR^2 \\ C_{vx}^2 + C_{vy}^2 &= (-DR * \sqrt{3/2})^2 + (-DR/2)^2 = \frac{DR^2}{4} + \frac{DR^2 * 3}{4} = \frac{4 * DR^2}{4} = DR^2 \end{aligned}$$

Rovnice 2.10, 2.11 a 2.12 jsou si rovny a tím je dokázána správnost výpočtu.

Zdroj textu a rovnic kap 2.4.2: (Graves, 2014)

2.5 Řídicí jednotka

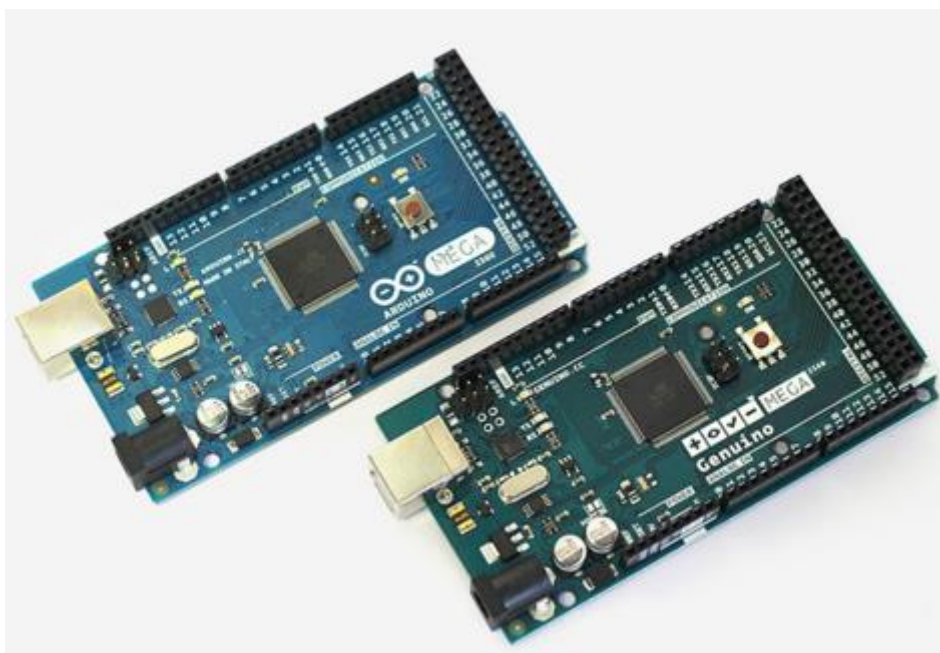
2.5.1 Hardware řídicí jednotky

Arduino je open-source platforma založená na uživatelsky jednoduchém hardware a software. Je určeno pro snadné vyvíjení menších projektů, jako jednoúčelové řídicí jednotky. Arduino je založené na mikroprocesorech firmy Atmel, konkrétně z řady ATmega. Používá svůj programovací jazyk založený na C, C++ a Wiring (nadstavba C++ umožňující jednoduché ovládání). Arduino IDE je vlastní vývojové prostředí obsahující zvýrazněnou syntaxi kódu a je volně stažitelné z oficiálních stránek. V prostředí IDE jsou přichystány ukázkové příklady pro rychlejší pochopení začínajících programátorů (VODA, 2011).

Cílem autorů bylo vytvořit vývojový kit, na kterém si začínající programátoři mohou vyzkoušet naprogramovat mikroprocesor i bez znalosti jeho datasheetu a jazyka assembler. S velkou oblibou však Arduino používají i pokročilí programátoři. Tento kit se obsahuje převodník USB -> RS232, krystalový oscilátor s frekvencí 16-20MHz, stabilizátor napětí 5V DC včetně odrušovacích kondenzátorů, mikroprocesor ATmega, oboustrannou desku plošných spojů a patice pro kolíky přímo připojené k mikroprocesoru. Výkonové prvky jako tranzistory nebo relé zde nejsou implementovány.

Modely se dají rozdělit na oficiální a neoficiální. Oficiální modely používají mikroprocesory ATmega 8,168,328,128 a 2560 (VODA, 2011). Jsou to 8-bitové procesory s rychlostí taktu 8-20MHz. Tato rychlost je velmi malá oproti platformě Raspberry Pi, který má čtyřjádrový procesor o frekvenci 1,6 GHz. Nicméně na základní operace jako je přepínání stavu pinů z log. 0 na 1, řízení PWM, nebo i vytvoření jednoduchého webového serveru postačuje.

Řízení delta manipulátoru je postaveno na kitu Arduino Mega. Obsahuje mikroprocesor ATmega 2560, který má 54 digitálních vstupně/výstupních pinů, 16 analogových vstupů, 4 UART hardwarové serial porty a frekvenci 16MHz (Arduino, 2006).



Obr. 11 Arduino

Zdroj: (Arduino, 2006)

Tento kit je rozšířen o modul RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) 1.4. Je to deska pro řadiče krokových motorů a lze ji přímo připojit na základní desku Arduino. Na desku je možné připojit až 5 krokových motorů, tři snímače teploty, tři topná tělesa a 6 koncových spínačů. Piny, které nejsou použity pro funkčnost modulu RAMPS jsou vyvedeny dále z Arduina, aby mohly být později využity k jiným účelům (AAHAZ, 2016).

Řadiče krokových motorů mohou být použity různé. Modul RAMPS má rozmístěné piny pro přímé připojení dvou typů řadičů. Těmi jsou A4988 a DRV8825. Uvedu zde několik předpokladů pro správnou funkčnost. Při zapojování je možné je otočit o 180, čímž by došlo ke zničení driveru a možná i desky RAMPS. Zrovna tak by došlo ke zničení, pokud by došlo k odpojení některého kabelu vedoucího k motoru za běhu. Při delším používání motorů se řadiče poměrně zahřívají, proto je vhodné je chladit přídatným ventilátorem. Samotný řadič ještě musí být kalibrován, aby se motor začal pohybovat. Oba typy mají tepelnou, zkratovou a přepětovou pojistku, takže jsou poměrně odolné proti chybné obsluze. Řadiče fungují takovým způsobem, že přivedením jednoho impulsu na pin SET se provede jeden mikro krok na motoru. Směr otáčení lze měnit přivedením logické 0 nebo 1 na pin DIR (AAHAZ, 2016).

2.5.2 Firmware Marlin

Marlin je firmware pro jednoprocessorovou konfiguraci stroje. Podporuje řízení manipulátoru z SD karty, takže není nutná přímá manipulace z pc. Toto je výhoda pou-

žitelná ve výrobních linkách, nebo tam, kde se jeden pohyb neustále opakuje. Pracuje na RAMPS 1.4, Rumba, Ultimaker, Sanguinololu, Generation_6_Elektronics a pravděpodobně na dalších kontrolérech založených na 8-mi bitové architektuře (BOWYER, 2005). Vytváří softwarové rozhraní mezi řadiči krokových motorů a programem v pc.

Firmware je upravitelný v každém jeho parametru, takže není problém ho napsat na kteroukoliv konfiguraci manipulátoru. Nastaví se v něm prvně, o jakou sestavu manipulátoru jde. V tomto případě delta robot. Dalším nastavením jsou konstanty jako délka jednotlivých ramen, počet ramen, směr otáčení motorů, počet kroků motoru za vteřinu, typ desky řadiče krokových motorů (RAMPS 1.4), nastavení dorazů koncových poloh a spoustu dalších detailů.

2.5.3 Software polohování manipulátoru

Součástí řízení delta robotu je softwarový program. Takových programů existuje celá řada, velmi povedený je např. Repertier-Host pro jeho intuitivní uživatelské rozhraní a snadnou manipulaci. Program je kompatibilní s velkým množstvím firmware. Byl navržen přednostně pro zadávání úloh k 3D tisku. Program disponuje manuálním ovládáním robotu a toho lze využít při jeho kalibraci a ověřování přesnosti. Dalším velmi podobným programem pro 3D je Pronterface.

2.5.4 Získání dat pro řízení manipulátoru

Způsobů, jak získat data pro řízení manipulátoru existuje mnoho. Výsledkem získávání dat je 3D digitální model, který by se měl svými rozměry vejít do pracovního prostoru delta manipulátoru. Takový model se může nahrát přímo do programu ovládajícího robot, nebo nahrát na SD kartu a z ní spustit polohování.

CAD systémy jsou nástroje sloužící pro vytváření technických výkresů a z nich modelování 3D objektů. Takto získaný model by měl být uzavřený.

Další možností, jak získat digitální model z reálných součástí je pomocí metody zpětného inženýrství (Reverse Engineering). Reverse Engineering je obecně používáno při rozkrývání principů fungování zkoumaného předmětu např. počítačového programu nebo mechanické součásti.

2.5.5 SolidWorks

SolidWorks je velmi komplexní modelovací nástroj určený pro počítačové projektování či navrhování, jehož součástí může být i projektová dokumentace. Výsledný projekt je možné simulovat a vytvářet např. zatěžovací testy.

Tvůrcem programu je společnost SolidWorks Corporation, která byla založena v roce 1993 a díky rozvoji počítačových technologií bylo možné vytvořit první verzi spustitelného programu na platformě Microsoft Windows až v roce 1995. Po dvou měsících byl software oceněn za jednoduchost použití umožňující 3D CAD modelování. Později byla společnost odkoupena firmou Dassault Systèmes S.A. za 310 milionů dolarů (DASSAULT SYSTÈMES S.A, 2003).

3 Metodika

Prvním krokem bude provedení analýzy současného stavu, kde se prozkoumají aktuálně používané roboty a manipulátory v průmyslu, ale i hobby prostředí. Na základě těchto poznatků se vybere přibližná konstrukce, která bude detailněji analyzována a následně zhotovena. Bude se pokračovat zodpovězením otázek, k jakým účelům manipulátor bude využíván, jakou rychlostí bude schopen pracovat a případně jak moc může být koncový efektor namáhán na tlak v případě obráběcí činnosti. Z těchto otázek potom vzniknou požadavky pro vytváření konstrukce.

Po zvolení konkrétního typu konstrukce se navrhnu jednotlivé prvky s ohledem na požadavky. Konkrétně se určí, jaké materiály budou použity, jakou budou mít tloušťku a jak budou vzájemně spojeny.

Dále se přistoupí k samotnému návrhu modelu manipulátoru ve 3D pomocí počítačového programu SolidWorks. Určí se přesné rozměry jednotlivých součástí. Ty se namodelují a vzájemně spojí. Tím se vytvoří komplexní model a zároveň první podoba celé konstrukce.

Další fází bude obstarání materiálu v podobě polotovarů, které budou postupně upraveny do požadovaného tvaru podle již vytvořeného modelu. Po upravení součástí následuje jejich sešroubování nebo zkompletování k sobě tak, aby se vytvořil výsledný tvar konstrukce robotu. Po zkompletování dílů ještě dojde ke zpětnému přeměření a případnému seřízení vzdáleností.

Tím vznikne komplexní konstrukce. Zde bude vhodné zaměřit se na oživení elektroniky. To se provede přeměřením napětí na zdroji napájení, zkoušky komunikace řídicí jednotky s počítačem, nahrání základní verze firmware a otestování otáčení motorů na základě odeslání příkazu k otáčení motorů. Po oživení elektroniky se provede kalibrace firmware na základě jednotlivých délek mezi díly manipulátoru. Při této kalibraci se také určí typ základní desky, LCD displeje, endstopů, dále směr otáčení motorů, počet kroků motoru na milimetr a velikost pracovního prostoru. Po zadání těchto parametrů následuje vytvoření vlastního software, který bude komunikovat s manipulátorem pomocí G-kódu. To se provede ve vývojovém prostředí Eclipse a pomocí programovacího jazyka Java. Po vytvoření software se provede zkouška pohybu koncového efektoru a podrobnější kalibrace, kde se ověří zadaná vzdálenost se skutečnou. Po úspěšné kalibraci se vytvoří ukázková úloha pomocí reálných testů. Budou nakresleny různé obrazce a přeměřena přesnost.

4 Praktická část

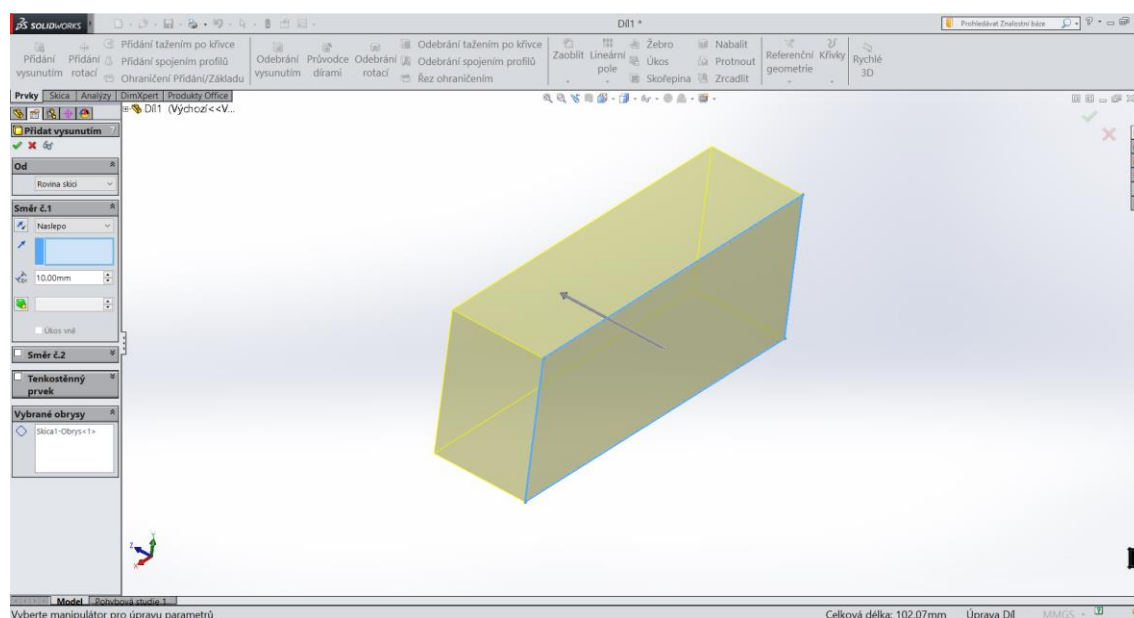
Praktická část se zabývá samotnou stavbou 3D manipulátoru od návrhu konstrukce, přes výpočty polohy efektoru až po zhodnocení vlastností robotu.

4.1 Návrh modelu konstrukce ve 3D

Při návrhu konstrukce je vhodné ujasnit si, k jakému účelu bude manipulátor využívan a jaké klíčové vlastnosti jsou vyžadovány. Primární vlastností, na kterou se zaměřit bude rychlost polohování. Delta manipulátory obecně nabízí rychlosti přibližně 3x vyšší, než stroje se sériovou kinematickou strukturou. Současně používané 3D delta tiskárny dosahují rychlosti pohybu koncového efektoru okolo 300 mm/s. Takové rychlosti by měl dosáhnout i tento manipulátor. Další neméně důležitou vlastností je přesnost polohy koncového efektoru. Tato vlastnost zase vychází z toho, k čemu se bude manipulátor používat a jaké přesnosti je potřeba dosáhnout. Dá se předpokládat, že pokud bude pracovní prostor manipulátoru velký v jednotkách metrů, bude postačovat přesnost na několik málo milimetrů. Rozdílne bude, když velikost pracovní plochy bude dosahovat desítek centimetrů, potom by přesnost mohla být i v setinách milimetrů, což je právě tento případ konstrukce. Samozřejmě velmi záleží na přesnosti kalibrace, ale také na použitých komponentách stroje a kvalitě jejich zpracování. Požadavek bude kladen také na tuhost jak celé konstrukce, tak jednotlivých dílů. Je rozdíl, zda stroj bude využíván např. k 3D tisku, nebo k frézování kovových součástí. Pokud by šlo o 3D tisk, stroj může být sestaven z poměrně slabých materiálů a je možné použít i dřevěné součásti, pokud by byl kladen důraz na cenu výroby stroje. Stroj určený k frézování naopak musí mít součásti, které poskytují vysokou tuhost a jsou použity tomu odpovídající materiály. Je možné využít profilování, čímž lze dosáhnout podobné tuhosti s podstatně menším množstvím použitého materiálu. Tím klesne i celková váha a koncový efektor bude mít při změně polohy menší setrvačnost a dosáhne tak vyšší rychlosti přesunu do cíle.

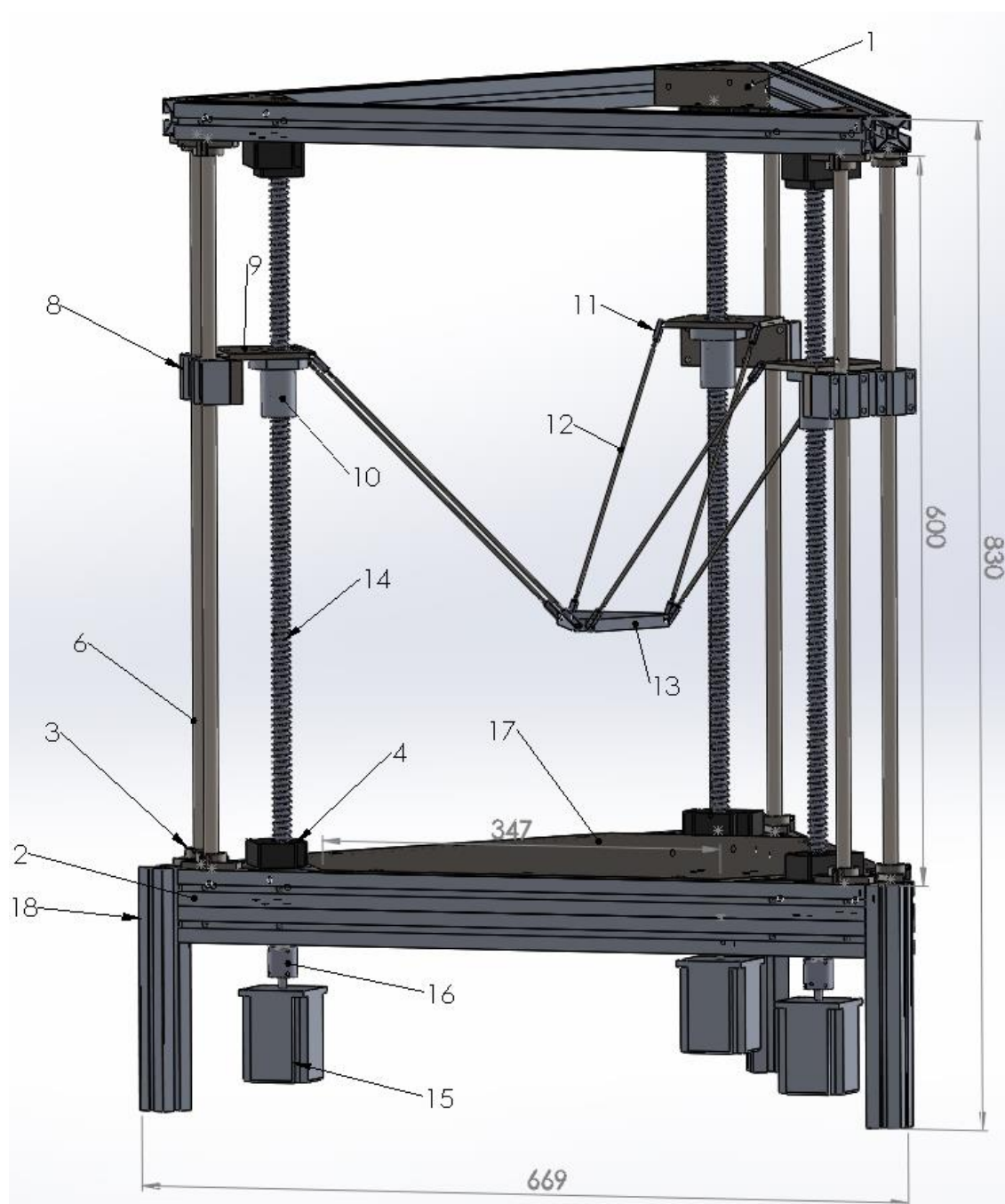
Manipulátor je určen k přesnému polohování s tím, že později ho bude možné snadno doplnit o komponenty 3D tiskárny a využít ho tak k 3D tisku. S ohledem na tento předpoklad je vyžadována maximální odchylka polohy koncového efektoru od zadaných souřadnic do 0,1 mm. Při této odchylce je stále možné vytisknout celou součást bez problémů, protože tryska na tavící hlavě má průměr 0,2 mm a více. Nánášený materiál se nalepí na předchozí vrstvu i s touto odchylkou a je možné tak pokračovat dále v tisku. Rozměry manipulátoru by měly být 600x600x700 mm. Podle velikostí jednotlivých dílů např. ramen, tyčí pojezdu apod. se určí přibližná velikost pracovního prostoru 150x150x300 mm.

Návrh modelu byl proveden pomocí počítačového programu SolidWorks, konkrétně ve verzi 2014. Tento program slouží pro technické kreslení tvarových součástí. Vytvoří se jednotlivé výkresy dílů, které jsou vzájemně spojeny a tvoří celek. Ukázka vytváření dílu je zobrazena na obrázku 12.



Obr. 12 Prostředí solidworks – vytváření dílu

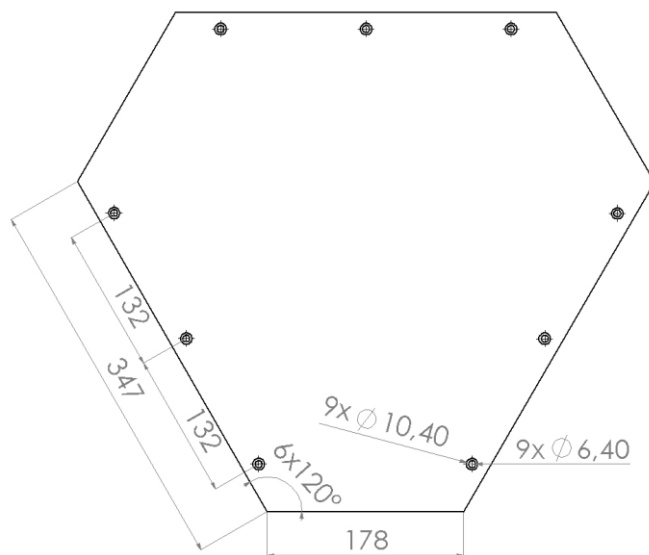
Celá sestava potom vzniká spojením několika dílů k sobě. Pro tyto účely má SolidWorks speciální režim „Sestava“, který umožňuje a usnadňuje práci s díly jako celky. Práce v tomto režimu stále umožňuje úpravu jednotlivých dílů, ale také je možné nad celou sestavou provádět zátěžové testy.



Obr. 13 Model celkové sestavy manipulátoru

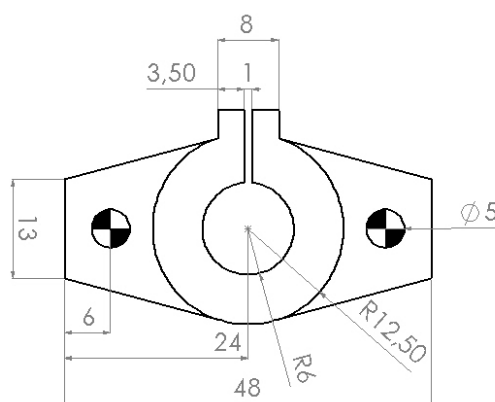
Po zvolení přibližného tvaru kompletní sestavy následoval návrh jednotlivých dílů. Základním stavebním prvkem je určité podstavná deska (díl č. 17), od které se později odvíjí i celková přesnost a tuhost konstrukce. Je proto vhodné zvolit kovový materiál, konkrétně ocelový válcovaný plech o tloušťce 2mm, jenž by měl po podélném vyztužení hliníkovým profilem dosahovat dostatečné rovinnosti. Z dostupného

materiálu, který byl už dříve naskladněn se určily přibližné velikosti jednotlivých dílů. Základní deska tvaru rovnostranného trojúhelníku má rozměry jedné strany 670 mm, rohy jsou dále zkoseny a délka strany má potom 347 mm. Dále jsou na desce vyvrtány a zahloubeny otvory sloužící pro uchycení podpůrných hliníkových profilů (díl č. 2).



Obr. 14 Základní deska manipulátoru (díl č. 17)

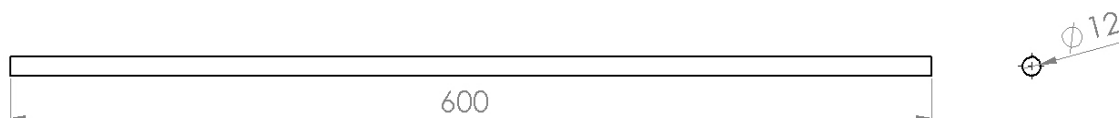
K této základní desce jsou našroubovány také úchyty vodících tyčí (díl č. 3). Ty jsou vyrobeny z duralu, a jejich úkolem je uchytit tyče kolmo k ploše. Vzhledem k rozměrům celé konstrukce jsou tyto úchyty poměrně malé (47x36x13 mm) a samostatné uchycení nezaručuje dostatečnou kolmost. To se ale rapidně zlepší po sešroubování druhé strany tyče.



Obr. 15 Držák tyčí (díl č. 3)

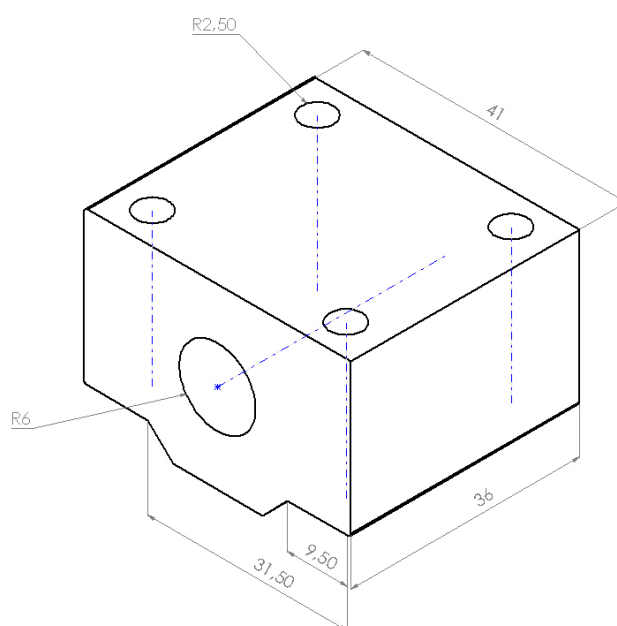
V těchto úchytech jsou vsazeny ocelové tyče průměru 12 mm (díl č. 6), povrchově kalené pro zajištění dostatečné pevnosti a schopnosti odolávat tření od lineárních

ložisek. Další pozitivní vlastností je zvýšená odolnost proti korozi. Tyče mají délku 600 mm. Jeden roh manipulátoru je osazen párem tyčí, které jsou umístěny symetricky od rohu se vzájemnou vzdáleností 50 mm od středů tyčí.



Obr. 16 Tyč povrchově kalená (díl č. 6)

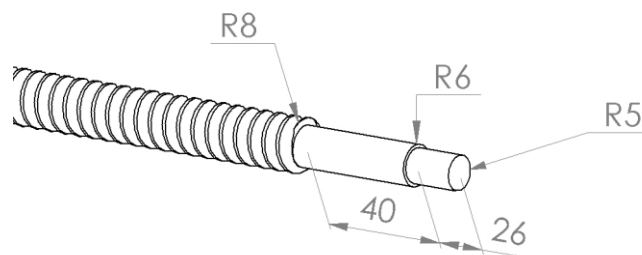
Po vodicích tyčích jezdí tzv. lineární vozíky (díl č. 8). Jsou to ložiska uložená v hliníkovém pouzdru a mají možnost uchycení k dalšímu dílu pomocí čtyř dír.



Obr. 17 Lineární vozík (díl č. 8)

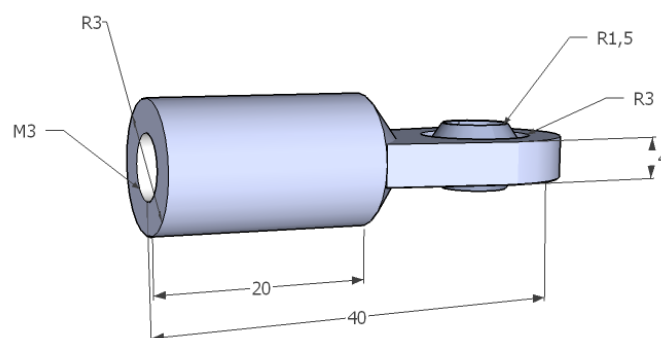
Tyto vozíky jsou napevno sešroubovány dílem č. 9, ke kterému je ještě uchycena matice kuličkového šroubu (díl č. 10) a čepy (díl č. 11). Ramena se skládají ze závitové tyče M3 (díl č. 12) a čepů. Na druhé straně ramen je středový díl č. 13, který má uprostřed díru o průměru 22 mm a okolo ní symetricky rozmístěné 3 díry s průměrem 5 mm vhodné pro uložení nástroje.

Pohyb lineárních vozíků ve vertikálním směru je zajištěn pomocí kuličkové závitové tyče (díl č. 14). Tato tyč je vyrobena z materiálu dosahující tvrdosti podobné kuličkám v ložiskách. Konce tyče jsou upraveny na požadovaný tvar, aby bylo možné je uchytnout do ložisek (díl č. 4) a přes pružnou spojku (díl č. 6) také přímo k motorům (díl č. 15). Jeden konec je opatřen závitem M12x1, proto je možné tuto tyč pevně uchytnout pomocí matice skrz axiálně-radiální ložisko, druhý konec je pouze osoustružený na průměr 10 mm a volně uložen v radiálním ložisku.



Obr. 18 Závitová tyč (kuličková tyč) (díl č. 14)

Aby bylo možné ramena vychýlit do stran, musí být konce ramen ukončené kulovými čepy. Při průzkumu různých druhů kulových čepů byly vybrány malé klouby používané v modelářství např. pro převod pohybu se serva RC modelů. Čepy mají vnitřní závit M3 pro uchycení ramene a v kuličce je otvor o průměru 3 mm.



Obr. 19 Kulový čep (díl č. 11)

4.2 Realizace konstrukce

4.2.1 Obecný popis

Zhotovení konstrukce vychází z technických výkresů. Ty byly vytvořeny v počítačovém programu Solidworks a jsou popsány v předchozí kapitole. Přes snahu dodržet rozměry a tvar namodelovaných součástí došlo k mírným úpravám při realizaci.

Celá konstrukce je postavena z jednotlivých součástí, které jsou vzájemně propojeny šroubovými spoji zajišťující dostatečnou pevnost. Tyto šrouby jsou téměř všechny s imbusovou hlavou a závity mají metrické stoupání M5. Základním dílem je pracovní deska z ocelového válcovaného plechu o tloušťce 2mm, která slouží jako referenční díl celku. Má tvar rovnostranného trojúhelníku.

Jsou na ni přišroubovány rámové výztuhy z profilovaného hliníku, držáky tyčí z duralu i podstavné nohy. Deska nemá povrchovou úpravu, je pouze vyleštěna a potřena tenkou vrstvou vosku, aby nepodléhala korozi. Hlavním důvodem této úpravy byla možnost rozšíření manipulátoru na 3D tiskárnu a u 3D tisku je někdy nutné vyhřívat podstavnou desku až na 200° C, aby nanášený materiál přilnul k po-

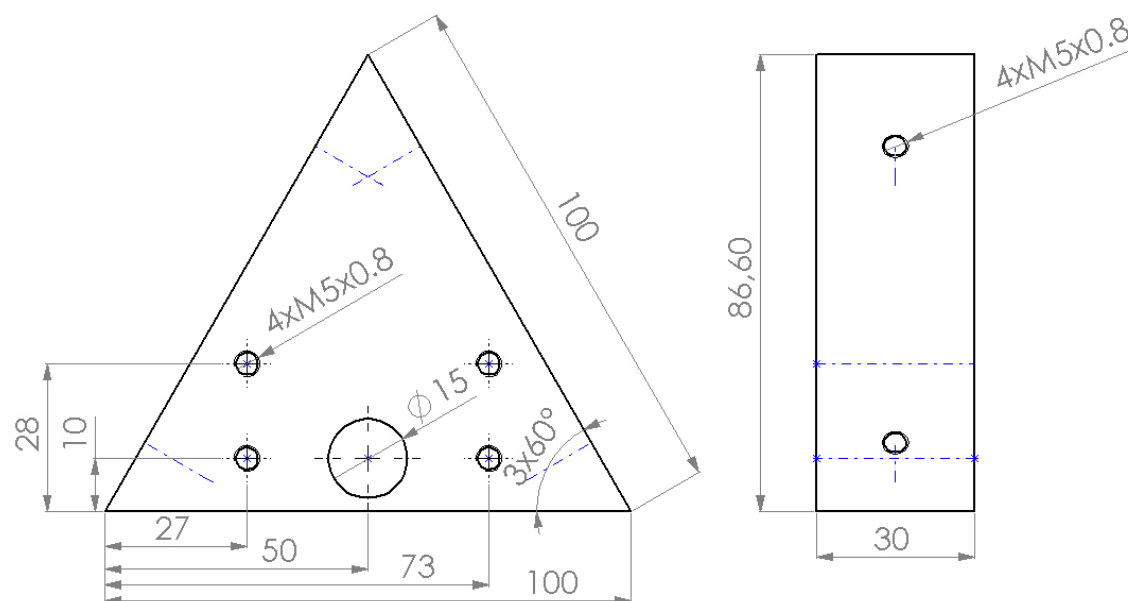
vrchu. Nicméně po další úvaze byla tato možnost vyloučena, protože by došlo k prohřívání celé konstrukce. To znamená ložisek a výztuh, které by konstrukci chladily a bylo by potřeba mnohem vyššího příkonu k dosažení nastavené teploty. Klesla by také životnost pohyblivých dílů, zejména ložisek. Tyče uložené v pouzdru na základní desce slouží jako dráha pro lineární pojezd. Mají povrchovou úpravu ve formě kaleného materiálu, takže je zajištěna nízká pružnost a dlouhá životnost při přímém kontaktu s kuličky ložiska, mající stejnou tvrdost materiálu.

Posuv lineárních vozíků zajišťuje kuličková závitová tyč, jejíž konce jsou obrobena do předem stanoveného tvaru.

Pojezd je tvořen dvěma lineáresety vzájemně sešroubovanými a nese na sobě kulové čepy a matici kuličkového šroubu.

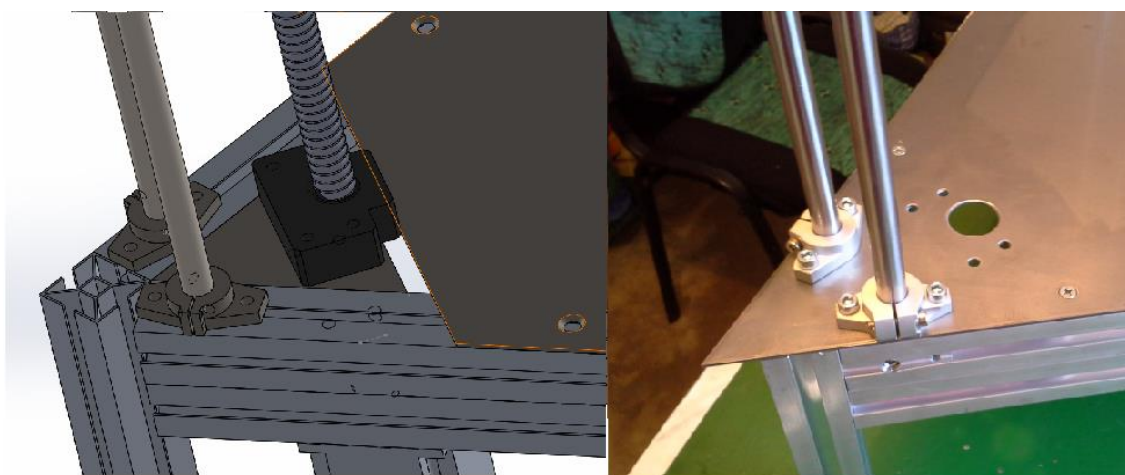
4.2.2 Výroba dílů

Prvními díly při zhotovení konstrukce byly rohové trojúhelníky, které mají za úkol pevně spojit všechny hliníkové profily.



Obr. 20 Roh pro spojení profilů

Od tohoto dílu se dále odvíjí přesnost celé konstrukce, proto bylo nutné vyrobit tento díl co nejpřesněji. Úkol byl zadán firmě zabývající se zpracováním a obráběním kovů. Ta zakázku vrátila s tím, že nejsou schopni frézovat úhel 60° s požadovanou přesností. Zbývalo tedy vymyslet jiné řešení konstrukce bez použití tohoto dílu. Nejlepším řešením se ukázalo použití základní desky přes celou plochu konstrukce a tím pádem se stala hlavní nosnou součástí. Musely se tedy dodělat díry pro uložení ložiska a uchycení podpory tyčí.



Obr. 21 Původní návrh vs. nový návrh

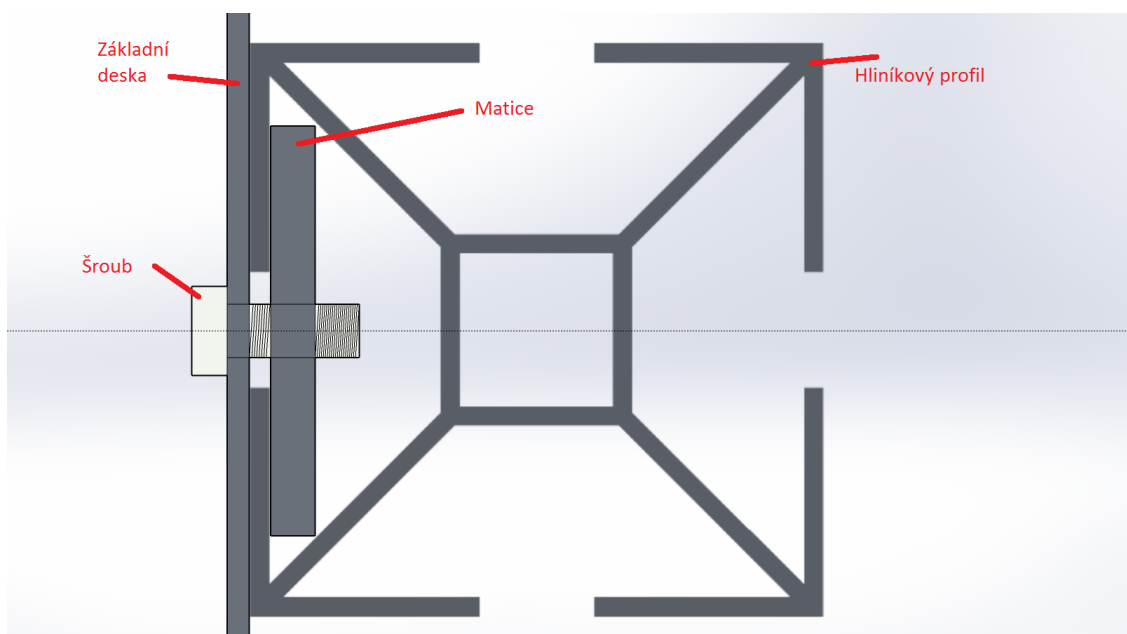
Následovala výroba základní pracovní desky. Tento díl byl vytvořen z válcovaného plechu o tloušťce 2 mm, který měl původní velikost 100x100 cm. Byl tedy čtvercového tvaru, proto bylo možné využít pouze jednu rovnou stranu pro dosažení tvaru rovnostranného trojúhelníka. Trojúhelník o rozměrech strany 70 cm byl narýsován pomocí pravítka, přičemž vznikl průsečíkem vrchol. Narýsovaný trojúhelník se vyřezal úhlovou bruskou. Tím vznikly pouze drobné nerovnosti v řezu, které se následně vyrovnaly brusným kotoučem. Po pozdější úvaze jsem usoudil, že by bylo lepší místo řezání úhlovou bruskou využít tabulové nůžky na plech. Trojúhelník měl ostré hrany ve svých vrcholech, proto bylo nutné je zkosit o další 3 cm. Tato úprava byla provedena až po konečném sešroubování, protože ostré špičky byly použity jako referenční body k odměřování. Další fází bylo vrtání děr a jejich zahlubování. V kombinaci šroubů se zapuštěnou hlavou a prac. desky potom vznikla rovina, což bylo žádoucí, protože při manipulaci s díly v pracovním prostoru by mohlo docházet k zasekávání o tyto šrouby. Díry byly původně navrženy tři na jednu hranu, které byli od sebe rovnoměrně vzdálené. To zajišťovalo dostatečnou sílu přitlaku desky s podpěrnými hliníkovými profily a tím nedocházelo ke zkroucení desky. Bylo potřeba vytvořit díry pro uchycení tyčí lineárního vedení. Jejich rozmístění bylo dané výkresem, nicméně velikost díry byla zvětšena o 1 mm, aby se případné budoucí odchylky dali eliminovat pohybem šroubů v této rezervě. To znamená, že pro šroub velikosti M5 byly vrtány díry 6 mm.

Radiálně-axiální ložisko je uloženo v pouzdru, které je možné uchytit pomocí čtyř šroubů velikosti M5. Aby závitová tyč prošla skrz desku až k motorům, bylo nutné vytvořit díru minimálně tak velkou, jako průměr závitové tyče plus rezerva alespoň 1 mm. Závitová tyč má v místě uložení průměr 12 mm, proto se musela vytvořit díra alespoň 15 mm v průměru. Existují vrtáky i s mnohem většími průměry, ale v domácích podmínkách byla možnost upnout vrták do vrtačky s maximálním průměrem 13 mm, což nepostačovalo. Byla zvolena varianta vykrýžování. Nástavec o průměru 22 mm se jevil jako optimální. Po vytvoření díry a jejím přeměření

vznikla odchylka 2 mm, výsledná díra tedy měla průměr 24 mm. To ale stále vyhovovalo, co se týká funkčnosti. Tím byla pracovní deska připravená k použití, zbývalo pouze vyřešit povrchovou úpravu materiálu, aby nedocházelo ke korozi.

Hliníkové profily byly objednány nařezané na 1 m. Bylo nutné je zkrátit na požadovanou velikost podle výkresu. Tato práce mohla být zadána jako zakázka do nějaké strojírenské firmy, aby tyto profily nařezaly např. na pásové pile. Kvůli časové prodlevě spojené se zpracováním zakázky byla zvolena vlastní úprava. Narýsovalo se místo, kde má být řez. Jako nástroj byla zvolena ruční pilka na kov, protože při použití úhlové brusky by řez pravděpodobně nebyl kolmý. Drobné nerovnosti a otřepy byly vyrovnány pilníkem.

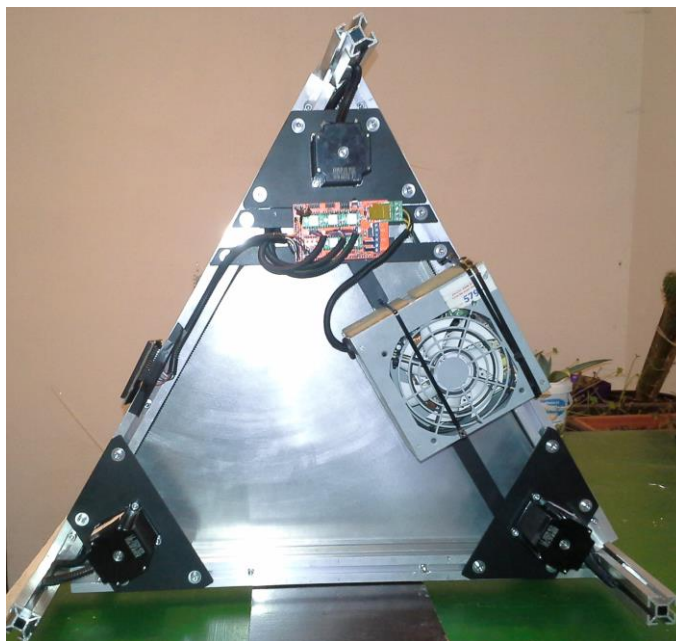
Po zkrácení profilů se naskytl problém, jakým způsobem je spojit se základní deskou. Profily mají dosti atypický tvar a proto přímé prošroubování není tou nejlepší volbou. Jednou možností je svrtání díry s profilem a vytvoření závitu přímo v hliníkové části. S tímto řešením ale odpadá pozdější možnost kalibrace posouváním jednotlivých součástí, proto se tato možnost příliš nehodí. Napadlo mě, že by se použily klasické matice. S tím se ale narazí na další problém, jak matice uchytit, aby se neprotáčely při šroubování. Byli tedy navrženy vlastní matice, které jsou obdélníkového tvaru a při šroubování se hranou zaprou přímo o vnitřní část hliníkového profilu. Toto řešení se ukázalo jako velmi dobré.



Obr. 22 Šroubový spoj desky s profilem

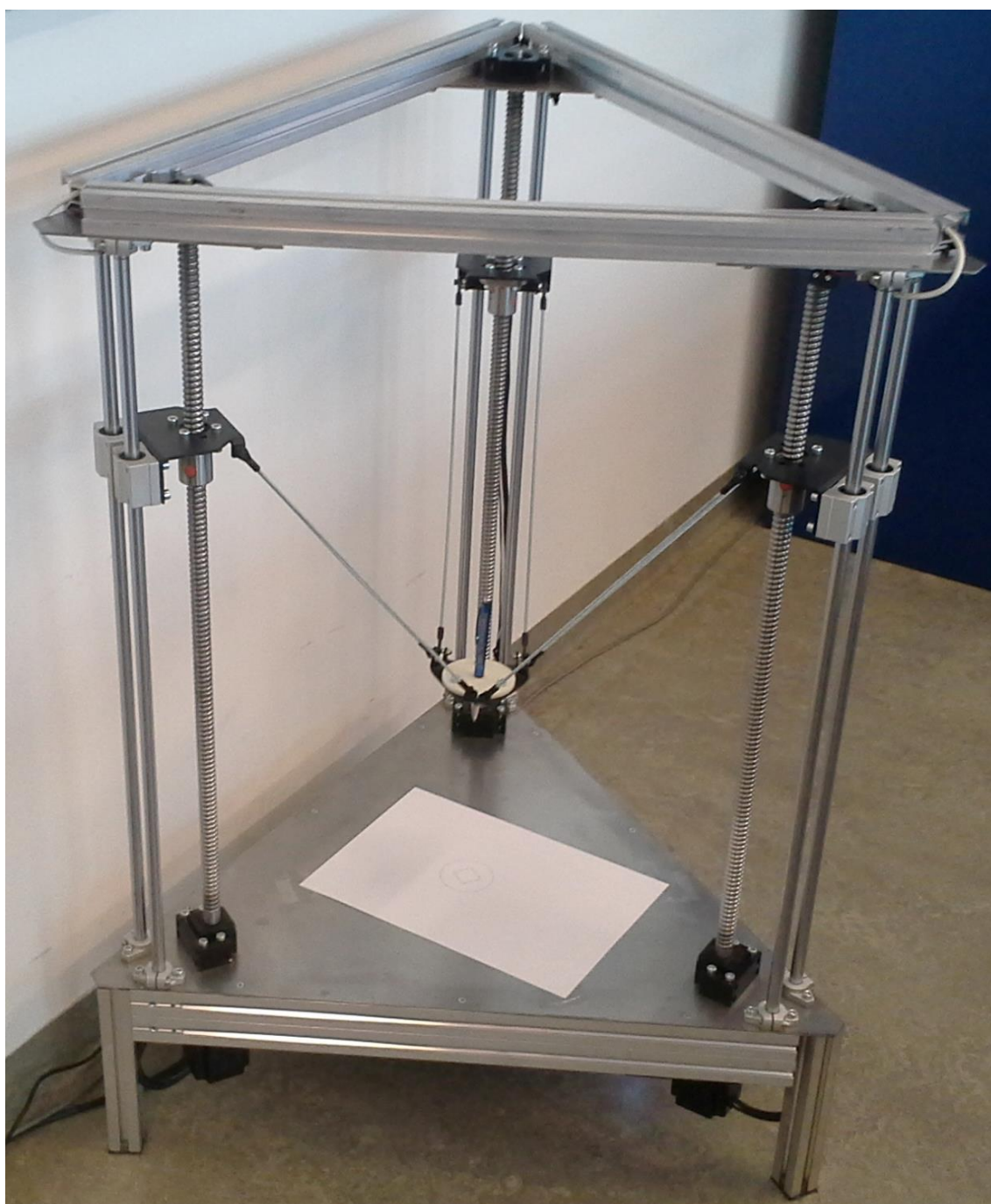
Matice mají rozměr cca. 20x15x3 mm. Jako základ matic byla použita pásovina vyrobená z běžně používané oceli s rozměrem 20x3 mm. Uprostřed byla vyvrtána díra o průměru 4 mm, do které byl vyřezán závit M5 klasickým ručním závitníkem.

Hliníkové profily se používají zejména pro vzájemně snadnou montáž, a proto spojení podstavných noh s rámem konstrukce do pravého úhlu nebyl problém. Používají se k tomu speciální úchyty, které se zajistí šroubem M8 s imbusovou hlavou a případně ještě hliníkovými nýty.



Obr. 23 Manipulátor – pohled ze spoda

Na spodní straně manipulátoru jsou pevně uchyceny motory ke konstrukci, a proto jsou použity ke spojení hřídele motoru a kuličkové tyče pružné spojky. Jejich účelem je vymezení úhlové nerovnosti mezi osami hřídele a k ní spojované závitové tyče.



Obr. 24 Sestavená konstrukce delta manipulátoru

Po sestavení konstrukce se vyskytnul problém, který se jevil jako zkroucená kuličková tyč. Tuto nerovnost nebylo možné původně odhalit pouhým okem. Při otáčení tyče pomocí motoru byla uprostřed tyče viditelná odchylka od osy cca. 2 mm, proto jsem se rozhodl tento díl demontovat a určit příčinu této nerovnosti. Napadlo mě, že tyč bude pravděpodobně zkroucená ve sváru spojující kuličkovou tyč a navařené konce tyče. Po základní zkoušce rovinnosti kutálením po rovné desce se ukázalo, že

Mezi první úpravy firmwaru patří základní nastavení konfigurace stroje. Určí se, jakou rychlostí bude Arduino komunikovat přes sériové rozhraní. Tato rychlost potom musí být nastavena i na straně počítače, aby se data přenášela korektně. Dále se nastaví, jaká deska je připojena k Arduinu. Je zde na výběr přibližně ze 40 typů základních desek. V tomto případě je to RAMPS 1.4. Vybere se typ napájecího zdroje ATX, protože je použit napájecí zdroj s původním použitím v osobních počítačích. Následuje sekce nastavení rozměrů jednotlivých částí manipulátoru. Zadává se délka ramen, vzdálenost čepů od tyčí lineárního vedení, velikost středového dílu u koncového efektoru. Jelikož jde o firmware primárně určený pro 3D tisk, jsou zde možnosti nastavení teploty vyhřívané podložky, nebo konfigurace tiskového extruderu. Tyto možnosti tedy byli vypnuty. Důležitým parametrem je také určení směru otáčení motorů.

Dále se určí, zda je manipulátor osazen dorazy v koncových polohách lineárního pojezdu. Je možné zvolit horní i spodní dorazy, nicméně u delta manipulátorů se používají pouze ty horní. Spodní jsou definovány softwarově. Vybere se, jakého typu jsou. Je možné použít buď jednoduché mechanické přepínače, což je tento případ, nebo optické laserové závory. Přepínače mohou být defaultně sepnuté, nebo rozepnuté a tuto rozdílnost je možné vyřešit změnou hodnoty ve firmware.

Rozsah pracovního prostoru manipulátoru se zadává pro každou osu zvlášť, přičemž je možné to udělat dvěma způsoby. Prvním je nakonfigurovat firmware a omezit tak pohyb koncového efektoru mimo pracovní prostor. Zároveň je možné využít koncové přepínače k zabránění vyjetí lineárního vozíku z dráhy. Toto nastavení je řekl bych nutné, aby nedošlo k poškození některých součástí. Nejvíce by trpěli pravděpodobně čepy, které mají plastové pouzdro a nemuseli by nápor vydržet. Druhou možností je zadat velikost pracovního prostoru v softwaru ovládání manipulátoru. Pak by se dosáhlo toho, že by se do Arduina posílaly příkazy se souřadnicemi nepřesahující okraje pracovního prostoru. Myslím, že nejlepší ochranou je kombinace obou případů.

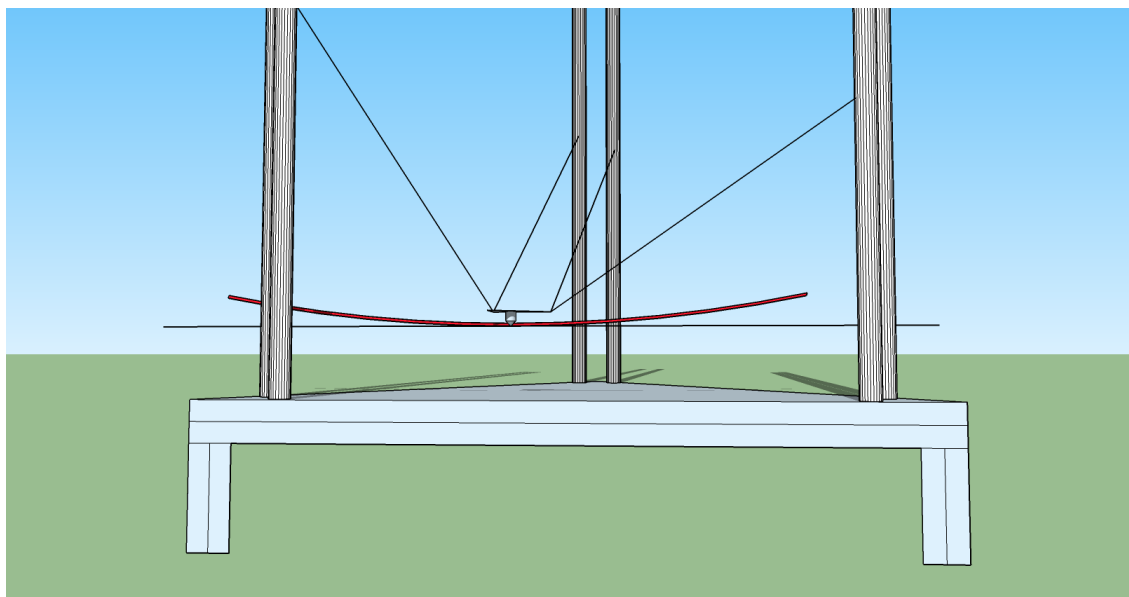
Firmware podporuje i automatické najetí koncového efektoru do referenční polohy. Funguje to takovým způsobem, že lineární vozíky vyjedou do koncové pozice dráhy. Tam sepnou přepínač koncového dorazu. Až poté, co jsou všechny vozíky v koncových bodech, je možné zvolit, kam se má automaticky přesunout koncový efektor. Nastavení tohoto bodu záleží hlavně na tom, k čemu manipulátor bude využíván. Pokud by se využil k 3D tisku, bylo by žádané napozicovat koncový efektor do bodu $[0,0,0]$ vzhledem k pracovní desce. Reálně by tomuto bodu odpovídal bod $[0,0,-360]$, protože je nutné sjet z horního nulového bodu do spodního pouze v ose Z. Takové nastavení se provede vždy po stisku tlačítka „Domů“ v ovládacím softwaru, neboli po odeslání příkazu G28 do řídicí elektroniky.

Poslední fází kalibrace bylo seřízení rozměrů. Cílem bylo, aby odpovídaly zadané rozměry s reálnými. Začínalo se s kalibrací v ose Z. Manipulátor najel do referenčního bodu $[0,0,0]$, odměřila se aktuální pozice vzhledem k základní desce a zadal se posun v ose Z o 100 mm směrem dolů. V g-kódu to znamená příkaz G01 X0 Y0 Z-100. Rozdíl v obou vzdálenostech činil cca 28 mm. Proto se musel změnit parametr

DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT v souboru configuration.h. Tento parametr určuje přepočít kroků motoru na jednotku milimetru, v tomto případě je to 640. Motor má v poměru děliče 1:1 úhel kroku $1,8^\circ$. Na jedno otočení, tedy 360° je potřeba $360/1,8 = 200$ kroků. Jedno otočení zajistí posun pomocí kuličkové tyče o 5 mm. Proto na jeden milimetr posuvu je potřeba $200/5 = 40$ kroků. Pro zvýšení přesnosti se zvolen dělicí poměr 1/16, potom na jeden milimetr posuvu je potřeba $40 \times 16 = 640$ kroků. Tento výpočet odpovídá naměřeným hodnotám, kdy na 340 mm posuvu je možné naměřit odchylku max. 0,1 mm. Při tomto ladění je vhodné stanovit také rychlost posuvu pomocí parametru DEFAULT_MAX_FEEDRATE udávaný v milimetrech za vteřinu.

Po nastavení posuvu v ose Z následuje kalibrace vzdálenosti „do stran“, to znamená v ose X a Y. Lze měnit parametr DELTA_DIAGONAL_ROD, který se týká délky ramen umístěných mezi čepy. Opět se zadá příkaz k pohybu v ose X o 100 mm, čemuž odpovídá instrukce G01 X100 Y0 Z-360. Měření se provádí téměř u pracovní desky, aby bylo dosaženo nejvyšší přesnosti v často používané pracovní oblasti. Změnou parametru se zkonvergují obě vzdálenosti.

Po kalibraci přímočarého pohybu v osách X, Y a Z se zdá, že kalibrace je hotova. Není tomu tak. Pokud se vykonává přímočarý pohyb v ose X nebo Y a nastavený parametr v ose Z zůstává neměnný, je možné naměřit zvětšující se odchylku právě v ose Z. Ta je znázorněna na obrázku 26.

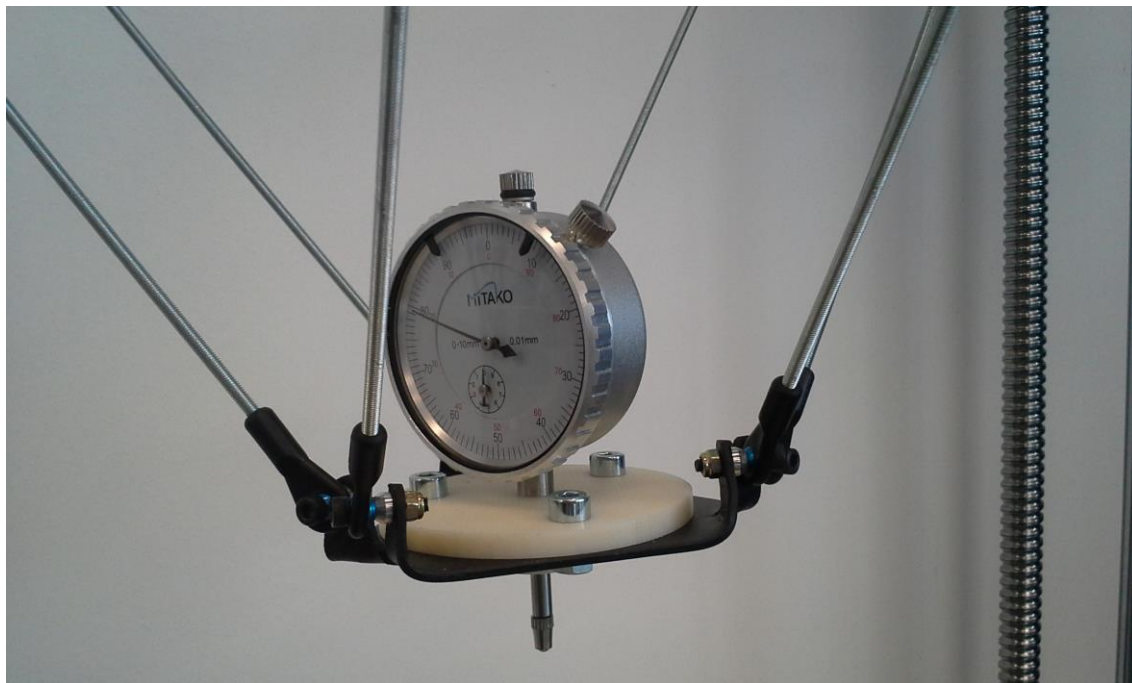


Obr. 26 Kalibrace plochosti pohybu

Je nutné změnit ještě jeden parametr udávající plochost pohybu v ose Z. Ten má označení DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET. Tento parametr je možné změnit jedním z více složek týkajících se delta radiusu. Delta radius se vypočítá následovně.
$$\text{DELTA_RADIUS} = \text{DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET} - \text{DELTA_EFFECTOR_OFFSET} -$$

DELTA_CARRIAGE_OFFSET. Tyto parametry jsou zadány z původního měření vzdáleností podle manuálu. To znamená, že je možné změnit jakýkoliv parametr z těchto tří a výsledek bude stejný.

K měření této odchylky byl použit mechanický úchylkoměr, kterým je možné měřit rozsah přímočarého pohybu od 0,01 mm po 12 mm, přičemž nejmenší možný krok je možné změřit s přesností právě na 0,01 mm. Měřidlo bylo nutně pevně uchytit do pozice koncového efektoru. Proto byl navržen díl pomocí programu SolidWorks a následně vytisknut na školní 3D tiskárně.



Obr. 27 Měření odchylky v ose Z

Po celkové kalibraci je vhodné fyzicky zkontrolovat nastavení velikosti pracovního prostoru. Koncový efektor se přesune do krajních poloh, a pokud jsou některé součásti nadměrně namáhány, musí se změnit ohraničení pracovního prostoru ve firmwaru. Totéž platí i v případě, kdy v krajní poloze budou mít součásti rezervu, je možné pracovní prostor zvětšit a efektivněji využít manipulátor. Největší omezení v tomto případě jsou čepy s plastovým pouzdrem, které mají poměrně malou variabilitu pohybu do stran a výrazně proto omezují velikost pracovního prostoru v osách X a Y. Následkem překročení mezní vzdálenosti je zaseknutí čepu v krajní poloze a prohýbání ramen (tyčí mezi čepy).

4.3 Návrh řízení delta manipulátoru

Řízení manipulátoru je v podstatě možné realizovat dvěma způsoby. První možností je navrhnout kompletní řešení od základu, kde by se navrhla deska plošných spojů, osadila součástkami jako mikroprocesor, stabilizátory napětí, výkonové tranzistory

a podobně. Tím bychom získali hardware. Lepším řešením je sáhnout po hotovém řešení v podobě platformy Arduino a příslušném modulu RAMPS, včetně řadičů krokových motorů. Je to výhodnější zejména kvůli úspoře času, ale dnes už také kvůli pořizovací ceně. Díky čínskému trhu je možné dostat se na polovinu pořizovacích nákladů, než při vlastní výrobě.

Návrh vlastního firmware (program do mikroprocesoru) je možné implementovat např. v programu AVR Studio pro mikrokontroléry značky ATMEL s použitím odvozených vzorců paralelní kinematiky stroje. Odvozování vzorců je ale velice komplikované a myslím, že toto téma by svým rozsahem mohlo být navrženo pro další diplomovou práci. Opět je výhodnější vyhledat už částečně hotové řešení a upravit ho pro konkrétní konfiguraci stroje. Pro tento manipulátor byl vybrán firmware Marlin, který je postaven jako open-source projekt a je tedy možné ho zdarma využít.

4.3.1 G-kód

Komunikace softwaru s manipulátorem probíhá přes sériový port v podobě G-kódu. G-kód je typ programovacího jazyka daný ISO normou. Tento typ kódu se používá u velké většiny průmyslových NC a CNC strojů pro jejich ovládání. Vytvořením tohoto kódu byla snaha sjednotit ovládání strojů, nicméně spousta výrobců používá i nadále svůj programovací jazyk, který bývá často velmi podobný. Výhodou je možnost komunikace přes USB a přenositelnost mezi různými systémy i v různých verzích. G-kód má svoje omezení a to, že není možné pracovat s rotačními osami. Jinak řečeno je možné pracovat pouze ve třech osách souřadného systému x, y a z. Dalším omezením může být jednoduchost kódu a to se projeví, pokud je potřeba obrábět velmi složité tvary (MOZDŘEŇ, 2008).

K 3D tisku se využívají různé firmwary a ne všechny podporují G-kód. V našem případě je používán Marlin, který podporuje G-kód pouze částečně. Tím je myšleno, že je možné využít přibližně $\frac{1}{2}$ z kompletní sady instrukcí. Uvedu zde základní příkazy, které se nejvíce používají a k nim podporu firmwaru Marlin pro delta stroje.

Kód	Funkce	Marlin
G00	Rychlé polohování	✓
G01	Lineární interpolace	✓
G02	Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček	x
G03	Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček	x
G04	Pauza (až 6 sekund)	✓
G10	Programovatelný zápis parametrů	x
G17	Volba pracovní roviny X-Y	✓
G18	Volba pracovní roviny X-Z	✓
G19	Volba pracovní roviny Y-Z	✓
G20	Nastavení jednotek souřadného systému na palce (inch)	x
G21	Nastavení jednotek souřadného systému na milimetry	x
G28	Nájezd do referenční polohy	✓
G28.1	Nastavení souřadnic referenční polohy	✓
G30	Nájezd do další referenční polohy	✓
G30.1	Nastavení souřadnic další referenční polohy	x
G53	Nastavení souřadného systému stroje	x
G54 až G59	Volba souřadného systému obrobku	x
G80	Ukončení cyklu	✓
G90	Absolutní programování	✓
G91	Inkrementální (přírůstkové) programování	✓
G92	Nastavení lokálního počátku souřadného systému (od aktuální pozice)	✓
G92.1	Zrušení lokálního počátku souřadného systému	✓
G93	Posuv v jednotkách času	x
G94	Posuv v délkových jednotkách	x

Tabulka 2 - G-kód

Zdroj: (MOZDŘEŇ, 2008)

G-kód slouží hlavně pro zadávání a nastavování polohy. Proto je potřeba ho doplnit ještě M-kódem, který se stará o obsluhu programu a periférií stroje. Příkazy M-kódu končí až u čísla 999, proto je zde uvedeno jen pár základních příkazů.

Kód	Funkce	Marlin
M0	nepodmíněné zastavení programu	✓
M1	podmíněné zastavení programu (obsluhou)	✓
M2	konec programu	x
M3	zapnout řezání (ve směru hodinových ručiček)	x
M6	výměna nástroje	x
M8	chlazení (postřik)	x
M9	vypnout chlazení	x
M10	zasvorkovat paletu	x
M11	uvolnit paletu	x
M17	Zapnout všechny krokové motory	✓
M18	Vypnout všechny krokové motory	✓
M20-34	Funkce pro obsluhu SD karty	✓
M80	Spuštění zdroje napájení	✓

Tabulka 3 - M-kód

Zdroj: (MOZDŘEŇ, 2008)

Typická ukázka kódu, který je poslán do stroje může vypadat takto.

```

N1 G90                //zapne absolutní pozicování
N2 G28                //rychlý přesun do referenční pozice
N3 G00 Z-10           //koncový efektor rychle sjede po ose Z o 10 mm dolů
N4 G01 X5 Y2 Z-10 F5 //pohyb do bodu [5; 2; -10] rychlostí 5mm/s
N5 G01 X1 Y1 Z1       //pohyb do bodu [1; 1; 1] standartní rychlostí
N6 G28                //přesun do referenční pozice
N7 M18                //vypnutí všech motorů
N8 M0                 //zastavení programu

```

Písmeno N zde určuje pouze očíslování řádků kódu a není nutné ho zadávat, aby stroj byl schopný pracovat. Písmenem F se označuje rychlost pohybu nástroje. Stejně jako se označuje absolutní souřadnice X, Y, Z tak může být zadáno U, V, W pro relativní souřadnice vzhledem k předchozí (MOZDŘEŇ, 2008).

4.3.2 Návrh elektronických komponent

Manipulátor je sestaven kombinací mechanických a elektronických součástí a tvoří tak jeden celek. Proto je nezbytně nutné vhodně navrhnout elektronickou část, aby stroj fungoval bezproblémově.

Nároky na zdroj napájení jsou dány součtem maximálních proudů jednotlivých dílů. Každým motor má omezený proud na 2,8 A. Motory jsou 3, proto $3 \times 2,8 = 8,4$ A. Vlastní spotřeba Arduina je cca. 20 mA, RAMPS shield je pouze pasivní prvek až na

indikační SMD diody, proto lze proud odhadnout na 30 mA. Proud nutný pro běh driverů krokových motorů se mění na teplo a je dán účinností driverů. Pokud by byla účinnost modulu 90%, bude při průchodu proudem 2A ztrátový proud 200 mA. Moduly jsou tři, proto $3 \times 0,2 = 0,6$ A. Lcd displej má spotřebu 30 mA. Součtem všech proudů je tedy $8,4 + 0,02 + 0,03 + 0,6 + 0,025 = 9,1$ A. Proto musí být vybrán zdroj napájení poskytující alespoň tuto hodnotu proudu. Byl vybrán zdroj z osobního počítače, který disponuje proudem 16 A a zaručuje tedy dostatečnou rezervu. Všechny napájené komponenty jsou určeny pro napětí 12 V.

Pro stavbu delta manipulátoru se výborně hodí řídicí jednotky, které lze nalézt v současně používaných 3D tiskárnách. Ty využívají stejný, nebo velmi podobný princip pohybu a zároveň řídí průtok materiálu přes trysku. Byla zvolena platforma Arduino pro její jednoduchost. Výstupní piny dosahují napětí 5 V, proto se této hodnotě musí přizpůsobit další přímo připojené komponenty. Piny jsou přímo připojené k mikroprocesoru ATmega 2560, z toho plyne, že výstupní proud je omezen na hodnotu 20 mA. Rozšiřující modul RAMPS 1.4 je v podstatě deskou, na kterou lze přímo připojit krokové motory, LCD displej, snímače koncové polohy, nebo do slotu SD kartu.

Samotná deska neumí řídit krokové motory, ještě je nutné ji doplnit řadiči krokových motorů. Byl vybrán typ A4988, který disponuje maximálním výstupním proudem 2A. Řadič krokového motoru převádí dva signály ve formě log. 1 nebo 0, na pinu STEP se spustí kroky a na pinu DIR se určí směr otáčení motoru. Tyto vstupní signály se mění na velikost napětí vedoucí přímo na jednotlivá vinutí motoru, přičemž je možné zvolit dělicí poměr kroků fyzickým přepojením jumperu na desce RAMPS. Možné poměry jsou 1/1, 1/2, 1/4, 1/8 a 1/16. Poměr byl zvolen na 1/16, aby bylo dosaženo vysoké přesnosti. Proud procházející do vinutí motoru lze ovlivnit otáčením odporového trimru, na kterém se měří napětí. Proud se dá vypočítat podle vzorce

$$I_{max} = \frac{V_{ref}}{(8 * R_s)} \quad (4.1)$$

přičemž

I_{max} = proud procházející do jednotlivého vinutí

V_{ref} = napětí měřené na trimru

R_s = konstanta vnitřního odporu řadiče, v tomto případě 0,1 Ohm

Hodnota maximálního proudu je stanovena výrobcem motoru na 2,8 A, nicméně jedná se o hodnotu maximální a při dlouhodobém používání by se zkracovala životnost motoru. Proto je vhodné stanovit proud na 70% z maxima.

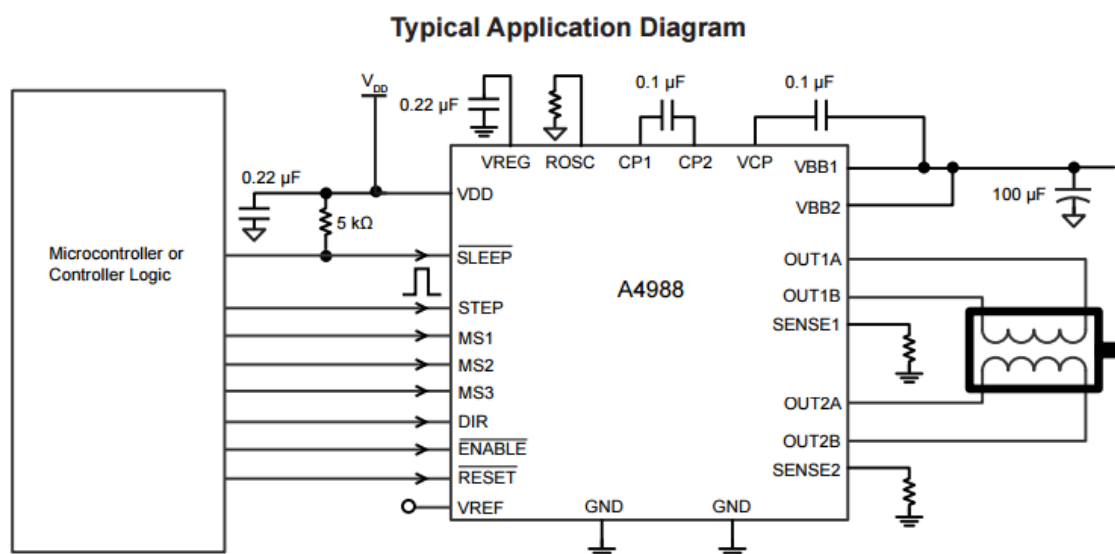
$$I_{max} = 2,8 * 0,7 = 1,96 \text{ A}$$

Řadič proto bude pracovat 100% vytížený. Napětí na trimru tedy bude

$$V_{ref} = I_{max} * 8 * R_s = 1,96 * 8 * 0,1 = 1,568 \text{ V}$$

Při kalibraci bylo naměřeno nejvyšší možné napětí 1,288 V, což se rovná proudu na vinutí 1,61 A. Řadič motorů tedy nedisponuje maximálním proudem 2A a specifikace výrobce neodpovídá naměřeným hodnotám.

Konkrétní zapojení řadiče je zobrazeno na obrázku 28.



Obr. 28 Zapojení řadiče krokového motoru

Zdroj: (Pololu Corporation, c2001-2016)

V tomto případě se řadiče musí doplnit chladičem z důvodu jejich plné vytížitelnosti. U hobby 3D tiskáren se často používají krokové motory s označením nema 17, typu SX17-0905. Vzhledem k velikosti manipulátoru a převodu rotačního pohybu na translační (kuličková tyč) se tyto motory zdají jako nedostatečně výkonné. Proto byli zvoleny větší a výkonnější krokové motory nema 23, které mají vstupní napětí na vinutí 3,8 V a proud 2,8A. Tím se vytvořila výkonová rezerva pro případné budoucí použití, pokud by měl manipulátor přemísťovat těžké předměty, nebo kdyby se měl využít k frézování dílů.

Dalším dílem, který se musel zvolit je spínač koncové polohy dráhy. Manipulátor by mohl fungovat i bez něj. Tím by ale ztratil možnost automatické kalibrace referenčního bodu koncového efektoru. V podstatě je možné zvolit ze tří typů spínačů, které firmware Marlin podporuje. Prvním je mechanický, to znamená jakýkoliv přepínač, do kterého narazí pojezd a tím se sepne. Ten byl také zvolen kvůli jednoduchosti zapojení i montáže. Další může být optický snímač (laserová závora), nebo magnetický snímač.

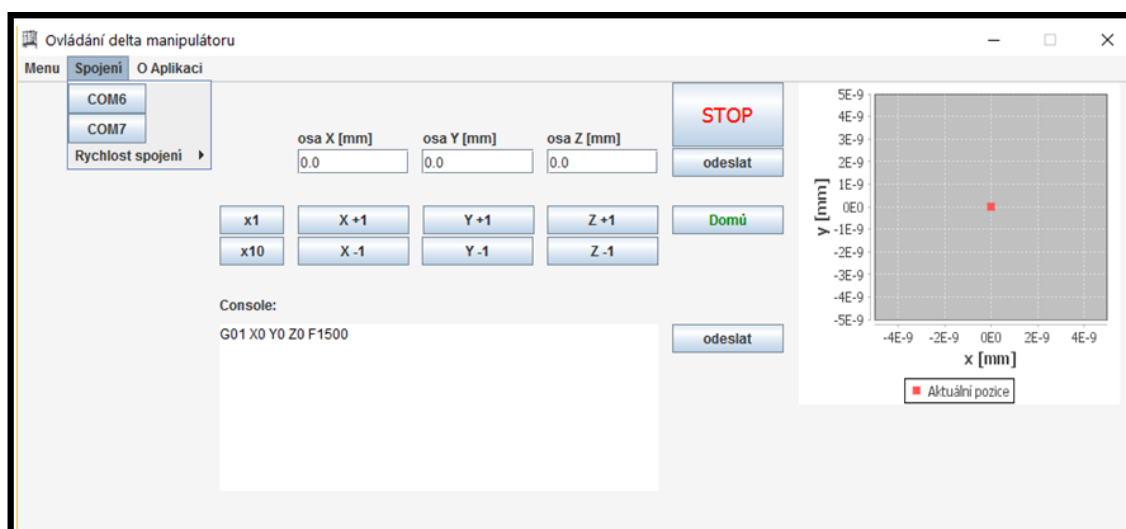


Obr. 29 Koncové spínače

4.3.3 Návrh software

Software pro určování polohy jsem se rozhodl vytvořit vlastní. Prvním problémem bylo vybrat vhodný programovací jazyk. Aplikace by měla mít grafické uživatelské rozhraní pro jednoduchost používání. Tento předpoklad splňuje poměrně dobře programovací jazyk Java, který je objektově orientovaný a má implementovanou řadu knihoven pracujících s grafickými prvky.

Další postup spočíval ve výběru vývojového prostředí. Pro jazyk Java existuje několik možností. Jedním je vývojové prostředí Netbeans IDE, které je primárně určeno pro programování v jazyce Java. Podporuje zvýraznění syntaxe a má možnost použití jednotkových testů sloužících pro testování částí kódů. Testovat je možné celé třídy, nebo jen metody. Velmi podobný program je Eclipse, který byl zvolen pro psaní kódu. Také podporuje zvýraznění syntaxe a nabízí velké množství nástrojů pro psaní kódu.



Obr. 30 Software řízení manipulátoru

Aplikace umožňuje ovládání manipulátoru buď krokově po milimetrech, desítkách milimetrů pomocí tlačítek, nebo lze přímo zadat absolutní (relativní) hodnotu souřadnic koncového efektoru. Jsou zde k dispozici tlačítka pro zvolení velikosti

kroku, návrat do referenčního bodu, nebo tlačítko stop pro nouzové zastavení motorů. Ve vysouvacím menu lze nalézt nastavení, kde je možné zvolit velikost pracovního prostoru, nebo nastavit rychlost posuvu koncového efektoru pro každou osu zvlášť. Další záložkou je „Spojení“, ve které je možné vybrat číslo sériového komunikačního portu COM včetně rychlosti spojení. Tato záložka má barevně odlišený nadpis podle stavu připojení. V odpojeném stavu je nápis zobrazen červeně a v případě úspěšného spojení svítí zeleně. V poslední záložce je návod k použití aplikace, nicméně orientace v aplikaci je poměrně intuitivní.

Struktura programu obsahuje dvě třídy. První je třída `Manipulator.java`, ve které je vytvořeno grafické uživatelské rozhraní aplikace. Do hlavního okna jsou vloženy textová pole, popisky, tlačítka a graf znázorňující zadané souřadnice pohybu. Jsou zde vytvořené vzájemné vazby, takže např. pokud stisknu tlačítko odeslat, zavolá se metoda `odesliData()` a jako parametr dostane data načtená z textových formulářů. Metoda `odesliData()` potom vytvoří novou instanci třídy `PortCom.java` a přes tuto instanci se odesílají data na zvoleném portu COM. Ve třídě `PortCom.java` je implementována komunikace přes sériový port COM. Obsahuje inicializaci spojení a umožňuje odesílání dat.

4.4 Vytvoření ukázkové úlohy

Pro vyzkoušení správné funkčnosti manipulátoru byla vytvořena testovací úloha. Cílem této úlohy by mělo být nakreslení různých obrazců pomocí propisovací tužky. Tužka je uchycena v držáku určeném původně pro úchylkoměr. V podstatě jde o těsné vsunutí tužky do díry. Náplň ani celá tužka není nijak chráněna pružinou proti nabourání do desky.

Prvním obrazcem, který byl vytvořen je nakreslení čtverce o velikosti 40x40 mm. Kreslení se provádí tak, že se najede koncovým efektozem, tedy tužkou do pozice lehkého kontaktu s papírem pouze v ose Z. Tato souřadnice v ose Z se již dále měnit nebude. Pokud se nastaví příliš malý přítlak tužky s papírem, při kreslení může dojít k vynechávání kresby. Opačným případem s velkým přítlakem může docházet k trhání papíru. V obou případech k tomu může dojít vlivem nerovnosti základní desky, případně vlivem špatné kalibrace stroje. Kreslení potom probíhá tak, že se zadávají souřadnice v osách X a Y a manipulátor provádí přímočarý pohyb mezi nimi. Je možné zadat celou sadu odřádkovaných příkazů do textového pole v softwaru a potom jen počkat na výsledek. Tento postup nebyl zvolen, protože např. v polovině programu se může něco pokazit a zbytek programu už nemá význam provádět dál. Bylo zvoleno ruční zadávání v podobě G-kódu a použili se absolutní souřadnice. Sada příkazů je zobrazena na obrázku 31 včetně směru pohybu z počátečního bodu.

Ukázka kódu pro čtvercový pohyb koncového efektoru:

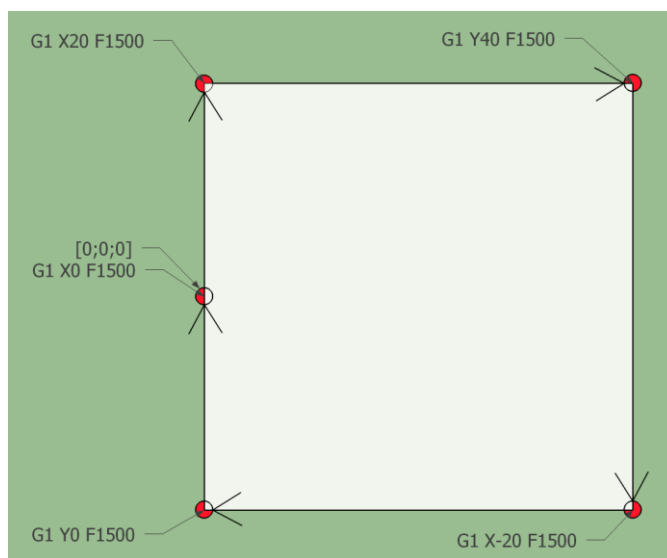
G1 X20 F1500

G1 Y40

G1 X-20

G1 Y0

G1 X0



Obr. 31 Kreslení čtverce

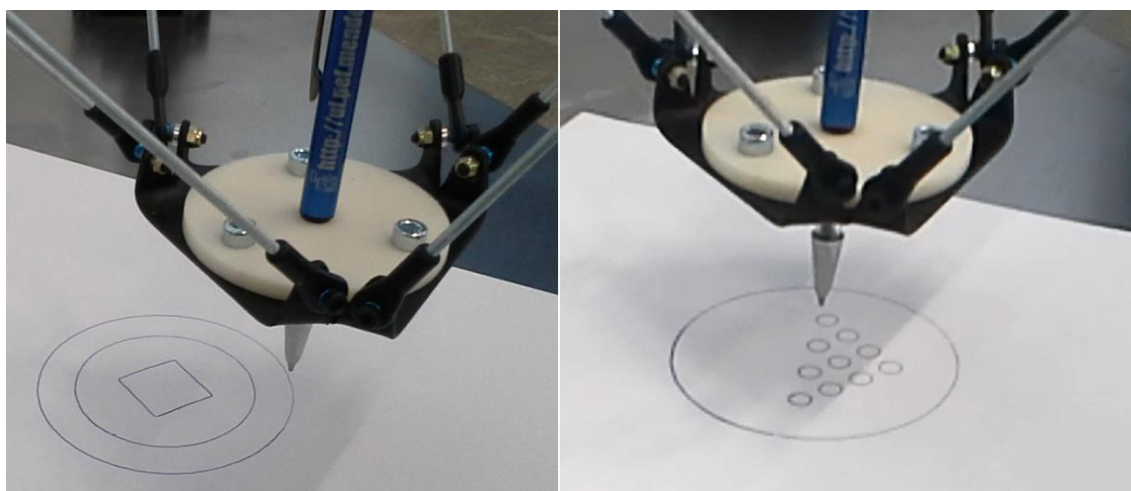
Při pohledu na příkazy si lze povšimnout, že při zadávání absolutních souřadnic není nutné zadávat všechny souřadnice, ale jen ty, které se aktuálně mění. Po úspěšném nakreslení obrazce na papír se změřily rozměry jednotlivých úseček a byla zjištěna odchylka přibližně 0,5 mm při pohybu v ose Y. Tento náčrtek byl použit jako součást kalibrace, proto došlo k opětovné kalibraci a odchylka byla eliminována.

Jako ilustrativní ukázková úloha byla zvolena kresba čtverce umístěného uvnitř kružnice. Čtverec má délku strany 20 mm a kružnice má průměr 32 mm. Protože firmware Marlin pro delta roboty nepodporuje příkaz G02 a G03, pomocí kterého se automaticky generuje dráha pohybu po kružnici, nebo části kružnice se zadaným radiusem, bylo nutné vygenerovat rozsáhlý skript příkazů G01, což je lineární pohyb na souřadnicích X,Y a Z.

Postup generování G-kódu vypadá takto. Vytvoří se nový díl v počítačovém software SolidWorks. Narýsuje se kružnice s průměrem 32 mm. Dále ještě jedna se stejným středem o průměru 31,7 mm. Rozdíl mezi kružnicemi je určen tloušťkou čáry propisovací tužky 0,3 mm. Tím vznikne plocha mezi kružnicemi, která se vytáhne do prostoru o 1 mm. Takto vytvořený 3D díl se dále exportuje do souboru ve formátu .stl. Nyní je potřeba ze souboru vygenerovat souřadnice. K tomu se využije program Slic3r přednastavený pro 3D tiskárny. Musí se tedy změnit výška vrstvy a průměr trysky. Cílem je vygenerovat kód pro jeden tah do výšky a zároveň jeden tah

do šířky. Výška vrstvy se nastaví na 1 mm a průměr trysky na 0,3 mm. Takto se vygeneruje kód pro 3D tiskárnu s tiskovou hlavou, proto se musí dále upravit, aby manipulátor kreslil. 3D tiskárna nezvedá koncový efektor po každém tahu, ale pohybuje se v jedné výšce a tam, kde má nanášet materiál se pouze spustí motor extruderu. Protože se kreslí dva obrazce, které jsou od sebe oddělené a nelze je nakreslit jedním tahem, je nutné po každém dokončeném tahu zvednout koncový efektor tak, aby nedocházelo k přímému kontaktu tužky s papírem. V kódu se vyhledají místa, kde je extruder nečinný tzn. příkaz G1 E0 a nahradí se posunem v ose Z o 2 mm směrem nahoru. Dále se polohuje do místa, kde se začíná kreslit a sjede se zpět do kontaktu s papírem.

Pro další kresbu bylo nachystáno logo Mendelovy univerzity, Provozně ekonomické fakulty, na které se tato diplomová práce realizovala.



Obr. 32 Kreslení čtverce, kružnic a loga PEF

5 Shrnutí

V teoretické části práce je vypracována analýza robotů a manipulátorů aktuálně používaných ve 3D tisku. Dále je popsáno rozdělení 3D tiskáren. Následuje část týkající se 3D tisku, ve které je zpracován krátký přehled technologií používaných ve 3D tisku. V teorii je také sestaven kinematický popis manipulátoru, ve kterém jsou sestaveny rovnice a následně ověřeny. V další podkapitole teoretické části je zpracován přehled o platformě Arduino, firmwaru Marlin a softwaru týkající se řídicí jednotky. V metodice je uveden postup, od kterého se odvíjí zpracování této práce.

Praktická část se zabývá stavbou konstrukce podle zvolené metodiky od návrhu, přes realizaci až po kalibraci a vytvoření reálných testů. V návrhu modelu konstrukce je stanoven účel používání manipulátoru, následuje vytvoření modelů jednotlivých dílů a nakonec vytvoření celkového modelu ve 3D. Model je zpracován v softwaru SolidWorks. V kapitole realizace konstrukce je vysvětleno, jakým způsobem se vyráběli jednotlivé součásti a jak jsou následně spojeny, aby tvořili celek. Další část popisuje průběh kalibrace. V části „Návrh řízení delta manipulátoru“ je uvedeno, jakým způsobem probíhá komunikace počítače s manipulátorem. V této podkapitole je také uveden postup vytváření vlastního software pro ovládání stroje pomocí programovacího jazyka Java a prostředí Eclipse. S řízením stroje souvisí také návrh elektronických součástí tj. řídicí jednotky apod.. Poslední podkapitolou praktické části je „Vytvoření ukázkové úlohy“, kde je vysvětleno, jakým způsobem probíhá nakreslení vybraného obrazce propisovací tužkou.

V závěrečné části práce je uvedena diskuze, ve které jsou řešeny různé problémy při stavbě manipulátoru. V samotném závěru je vysvětleno splnění cílů práce. V přílohách je uvedena zjednodušená výkresová dokumentace jednotlivých dílů.

6 Diskuze

Cílem diplomové práce bylo analyzovat současně používané manipulátory a pokusit se navrhnout vlastní prototyp včetně celkové realizace a vytvoření softwaru pro ovládání.

Manipulátor má univerzální použití. Je možné na koncový efektor usadit např. vyhřívanou trysku a manipulátor využít jako 3D tiskárnu. Toto řešení by ještě vyžadovalo doplnění vyhřívání pracovní desky, aby první vrstva materiálu přilnula k desce a bylo možné dále pokračovat v tisku. Samozřejmě by měl být podavač tiskového materiálu (extruder). Zbývalo by seřízení průtoku materiálu a nastavení teplot změnou parametrů ve firmwaru Marlin. Další využití manipulátoru by mohlo být k frézování měkkých materiálů jako dřevo, polystyren či jiné plasty. Při umístění elektromagnetu, nebo pneumatické přísavky lze manipulátor využít k přemísťování předmětů a tím např. zvýšit efektivnost na výrobní lince.

Návrh modelu konstrukce byl inspirován různými modely 3D tiskáren. Byl brán částečně ohled na dostupnost materiálu. Pro modelování konstrukce se využil software SolidWorks, ve kterém se povedlo vytvořit všechny díly bez větších obtíží.

Při realizaci konstrukce se vyskytly problémy nejdříve s výrobou rohového dílu, u kterého nebylo možné sestavit úhel hrany s dostatečnou přesností. Proto bylo navrženo jiné vhodné konstrukční řešení. Další problém se vyskytl na konci kuličkové tyče, kde nebyl vyříznutý závit pod pravým úhlem. Tento závit slouží k pevnému uchycení tyče do ložiska pomocí matice. Problém se vyřešil umístěním pérové podložky pod matici, čímž se vymezila vůle.

Po kalibraci má manipulátor následující vlastnosti. Velikost jednoho kroku je 0,01 mm ve všech osách. Při pohybu koncového efektoru v ose X, nebo Y je maximální odchylka v ose Z $\pm 0,05$ mm. Pracovní plocha je kruhová s průměrem 160 mm a do výšky 340 mm. Omezení pracovní plochy do šířky plyne z kulových čepů, které neposkytují dostatečný úhel pro využití plného potenciálu manipulátoru. Výměnou za jiný typ by byla pracovní plocha s průměrem přibližně 250 mm. Rychlost pohybu efektoru dosahuje 200 mm/s. Omezení je dané hlavně zvolením poměru mikro-krokování. Při zvolení menšího poměru se dosáhne vyšší rychlosti, ale nižší přesnosti, protože jeden krok na motoru bude znamenat otočení o větší úhel.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce je návrh konstrukce delta robotu s paralelním kinematickým řetězcem včetně návrhu polohového řízení koncového efektoru.

Cíl diplomové práce byl splněn, což dokazují vytvořené testy.

Literatura

SICILIANO, B. *Robotics: modelling, planning and control*. London: Springer, 2009. ISBN 1-849966-34-6.

PŘÍKRYL, Karel. *Kinematika*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1994, 142 s. ISBN 80-214-0535x

BOWYER, Adrian. *RepRap* [online]. 2005 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/>

DASSAULT SYSTÈMES S.A. Solidworks. [online]. 1993 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.solidworks.cz/>

Paralelní kinematika. *Renishaw* [online]. Praha: Renishaw s.r.o., c2001-2016 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/paralelni-kinematika--15213>

Should I buy a 3D printer? *Dotnetworkaholic* [online]. Denver: Lockwood, 2013 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <https://dotnetworkaholic.com/2013/04/08/should-i-buy-a-3d-printer/>

3D printing with a delta robot that seems to simplify the concept. *Hackaday* [online]. Mike Szczys, 2012 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://hackaday.com/2012/07/13/3d-printing-with-a-delta-robot-that-seems-to-simplify-the-concept/>

SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

PLŠEK, Ladislav a Radek KNOFLÍČEK. *Kinematika paralelních mechanismů* [online]. Brno, 2004 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.engineeringmechanics.cz/pdf/11_2_097.a.pdf

GOUBEJ, Martin, Martin ŠVEJDA a Miloš SCHLEGEL. *Úvod do mechatroniky, robotiky a systémů řízení pohybu* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~msvejda/URM/materialy/Uvod%20do%20mechatroniky.pdf>. Skriptum. Západočeská univerzita v Plzni, Katedra Kybernetiky.

How to Design for 3D Printing Success. *Shuvom Ghose* [online]. CAPUniversity, 2014 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://blog.capinc.com/2014/12/design-for-3d-printing-success/>

Multi-material 3D Printing [online]. Daniel Dikovský, 2014 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/radtechuveb/multimaterial-3d-printing>

NELLI, Fabio. Rapid Prototyping. In: *Meccanismo Complesso* [online]. 2014 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.meccanismocomplesso.org/en/rapid-prototyping/>

VODA, Zbyšek. Arduino I. In: MAREK, Vlastimil. *Linux Software* [online]. 2011 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z WWW: <http://www.linuxsoft.cz/article.php?id_article=1881>.

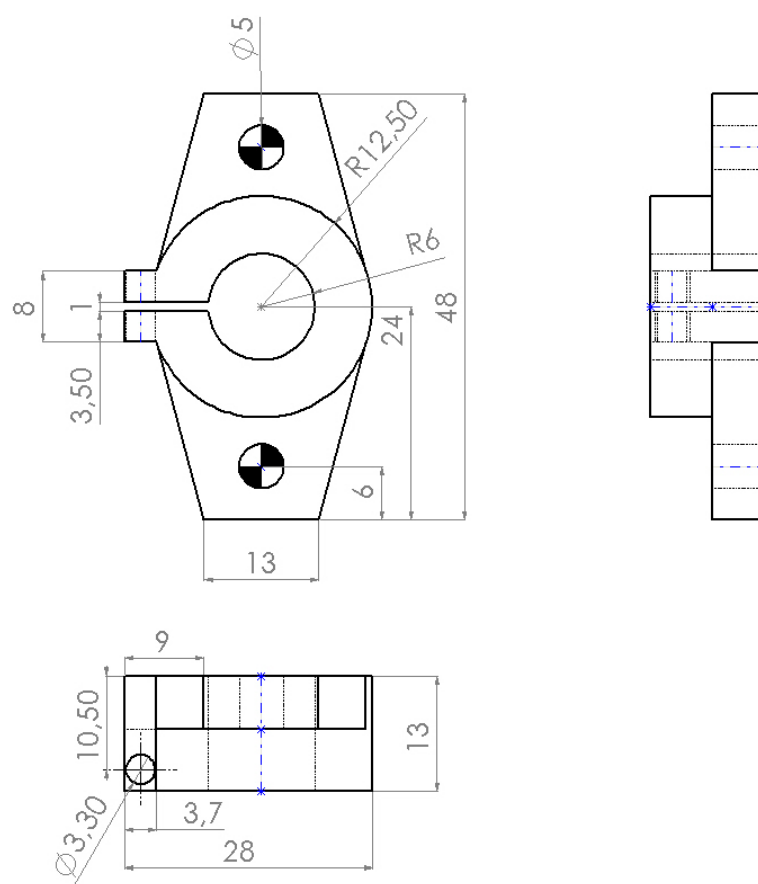
AAHAZ. RAMPS 1.4. In: *Robodoupe* [online]. c2016 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2012/ramps-1-4/>

MOZDŘEŇ, Karel. G-kód. In: *Media Research Lab* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~moz017/G-code/>

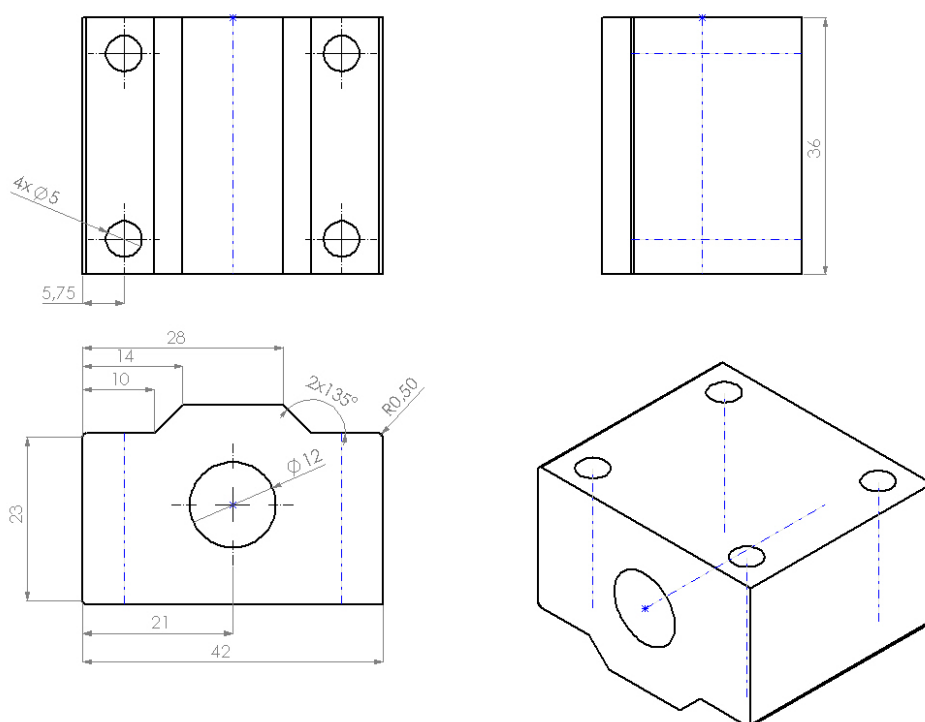
DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection. *Pololu A4988* [online]. Pololu Corporation, c2001-2016 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: https://www.pololu.com/file/download/A4988.pdf?file_id=0J450

GRAVES, Steve. Delta Robot Kinematics: Johann C. Rocholl (Rostock) Style. In: *Reprap* [online]. 2014 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: http://reprap.org/media-wiki/images/b/b5/Rostock_Delta_Kinematics_3.pdf

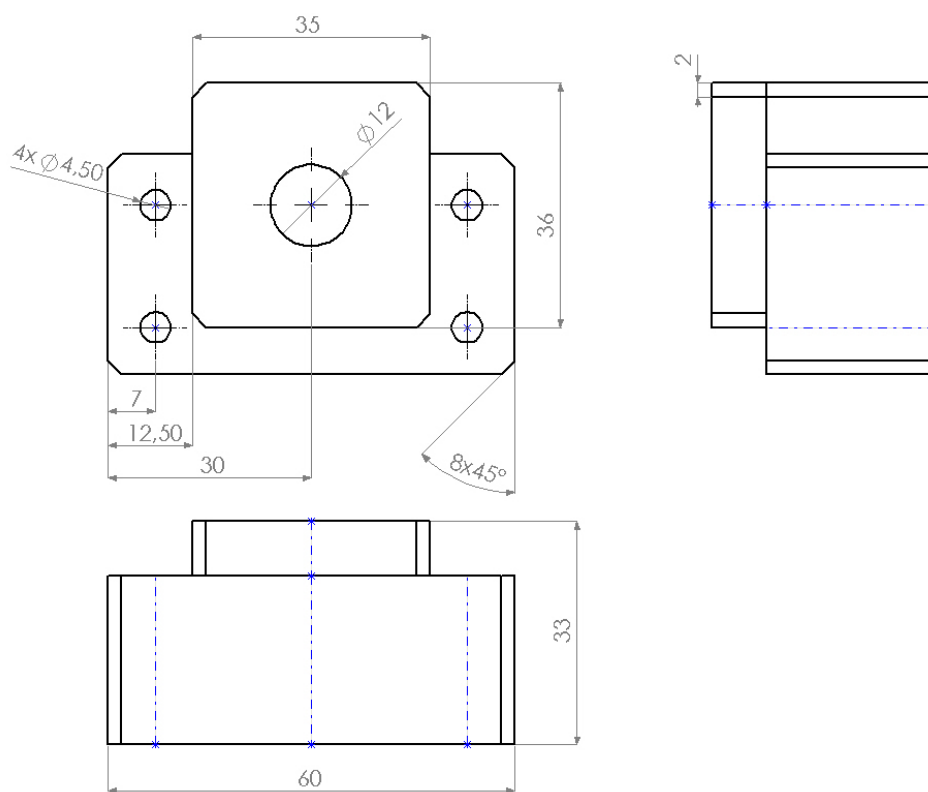
Přílohy



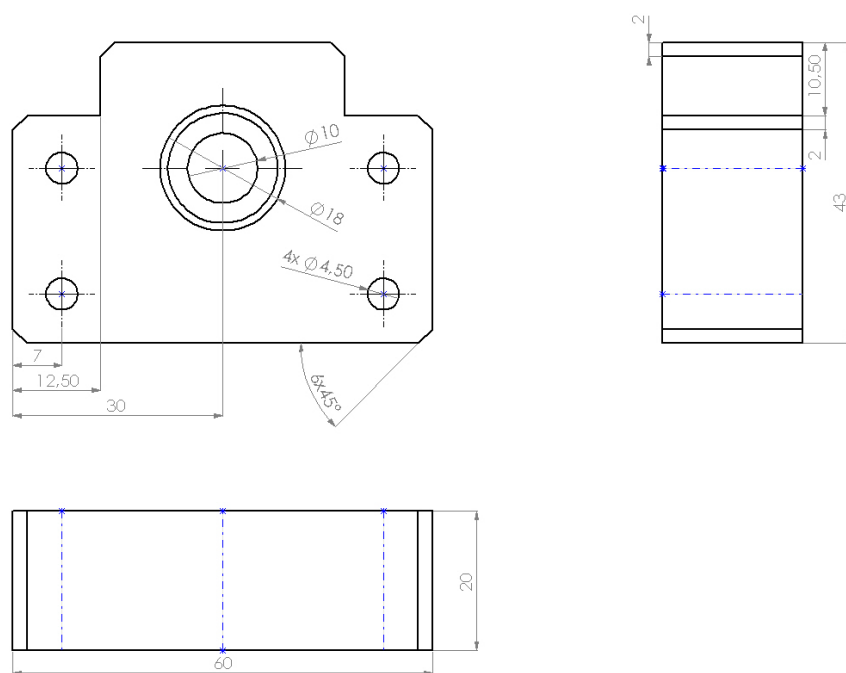
Obr. 33 Výkres – úchyt tyčí



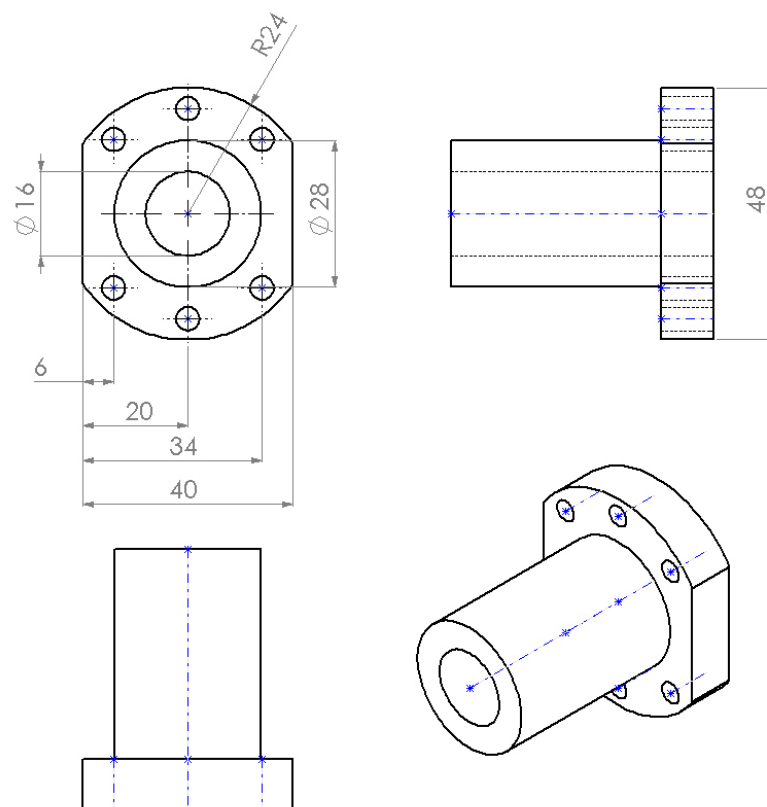
Obr. 34 Výkres – lineární ložisko



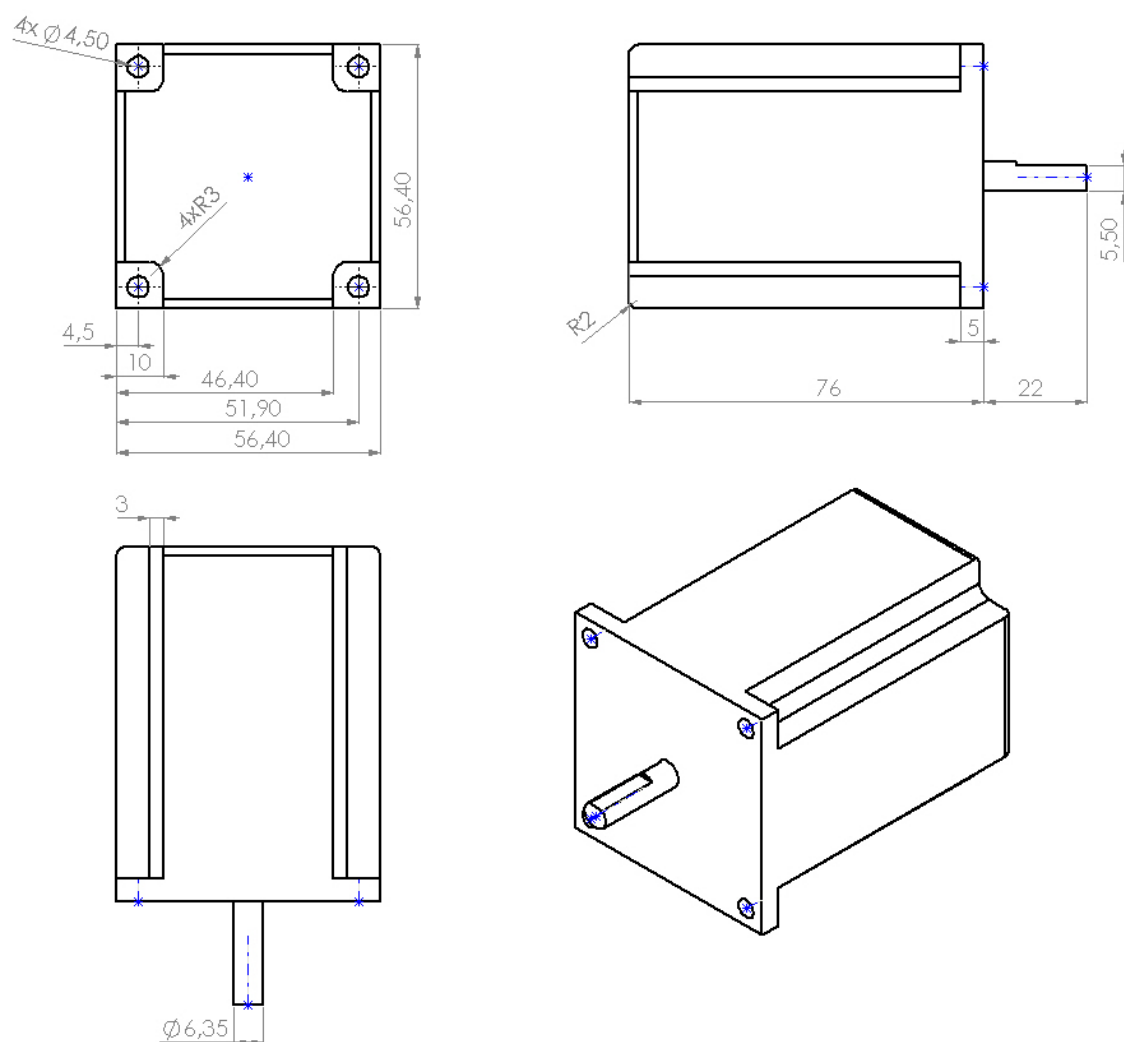
Obr. 35 Výkres – ložisko pevné



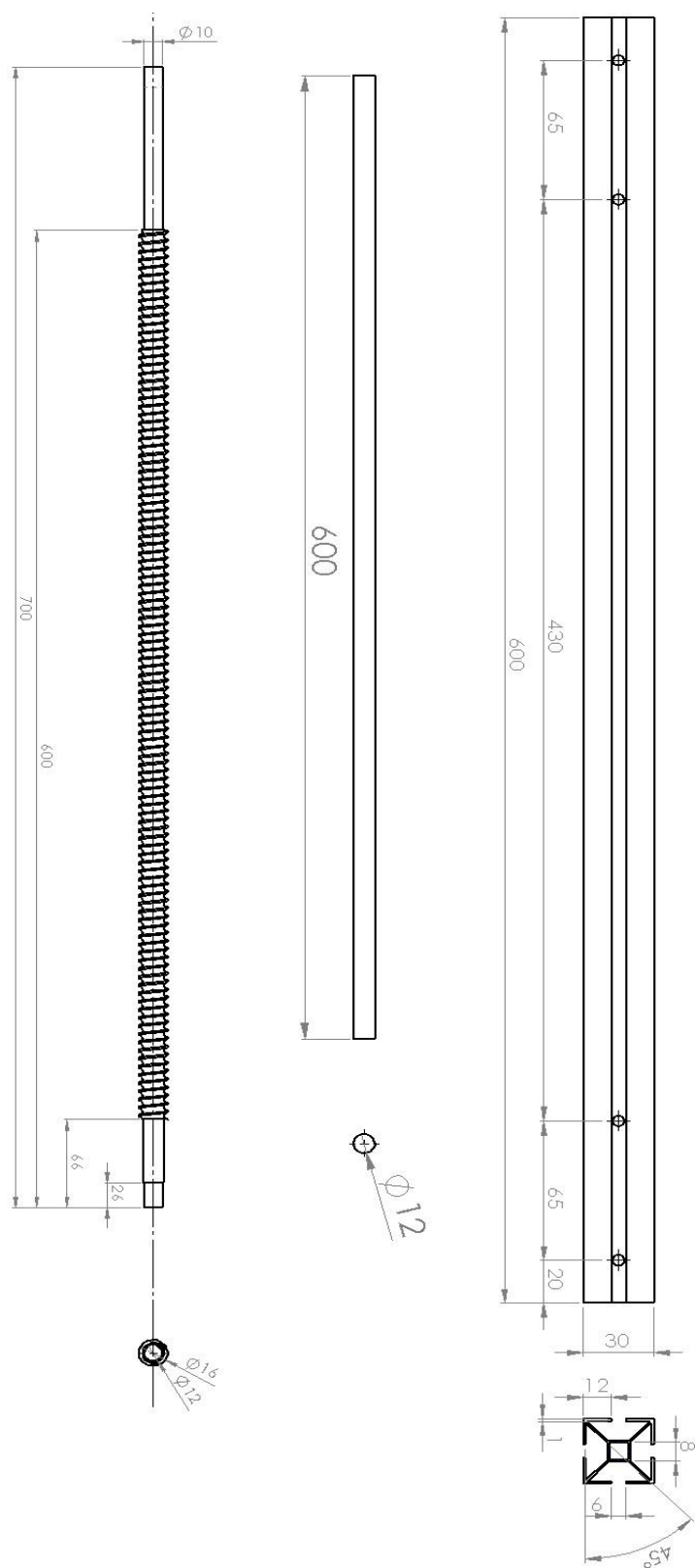
Obr. 36 Výkres – ložisko volné



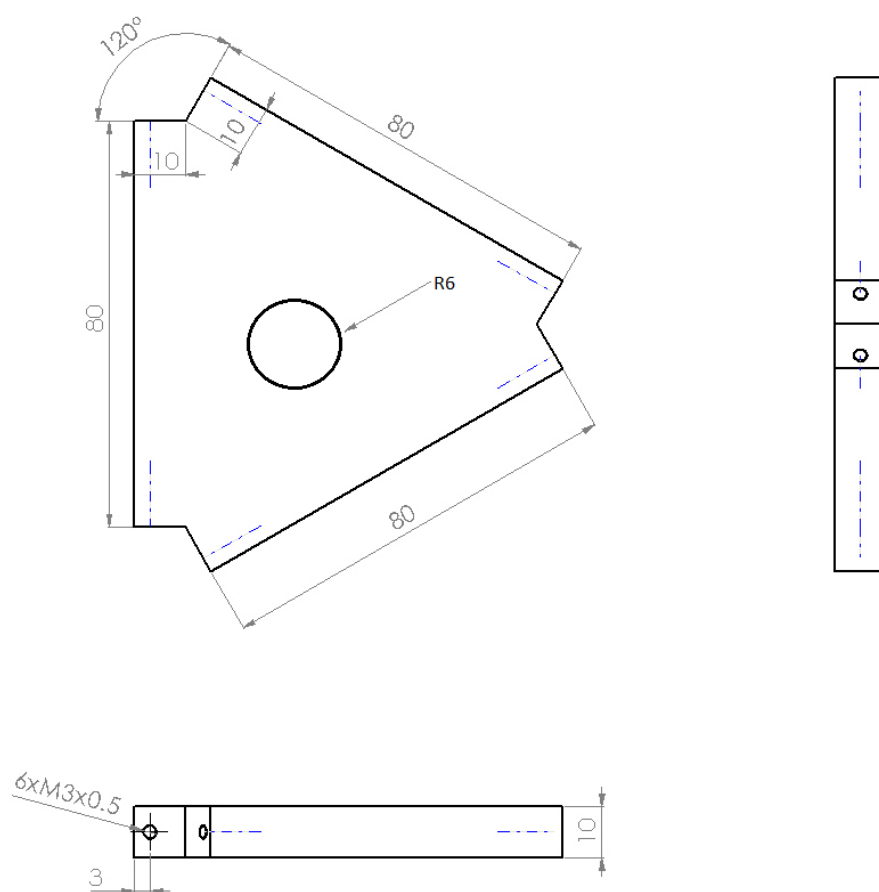
Obr. 37 Výkres – matice kuličkové tyče, závitové stoupání 5 mm



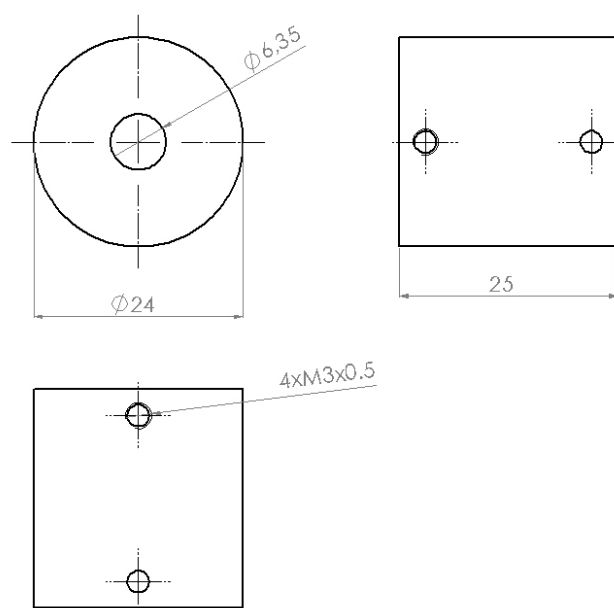
Obr. 38 Výkres – motor



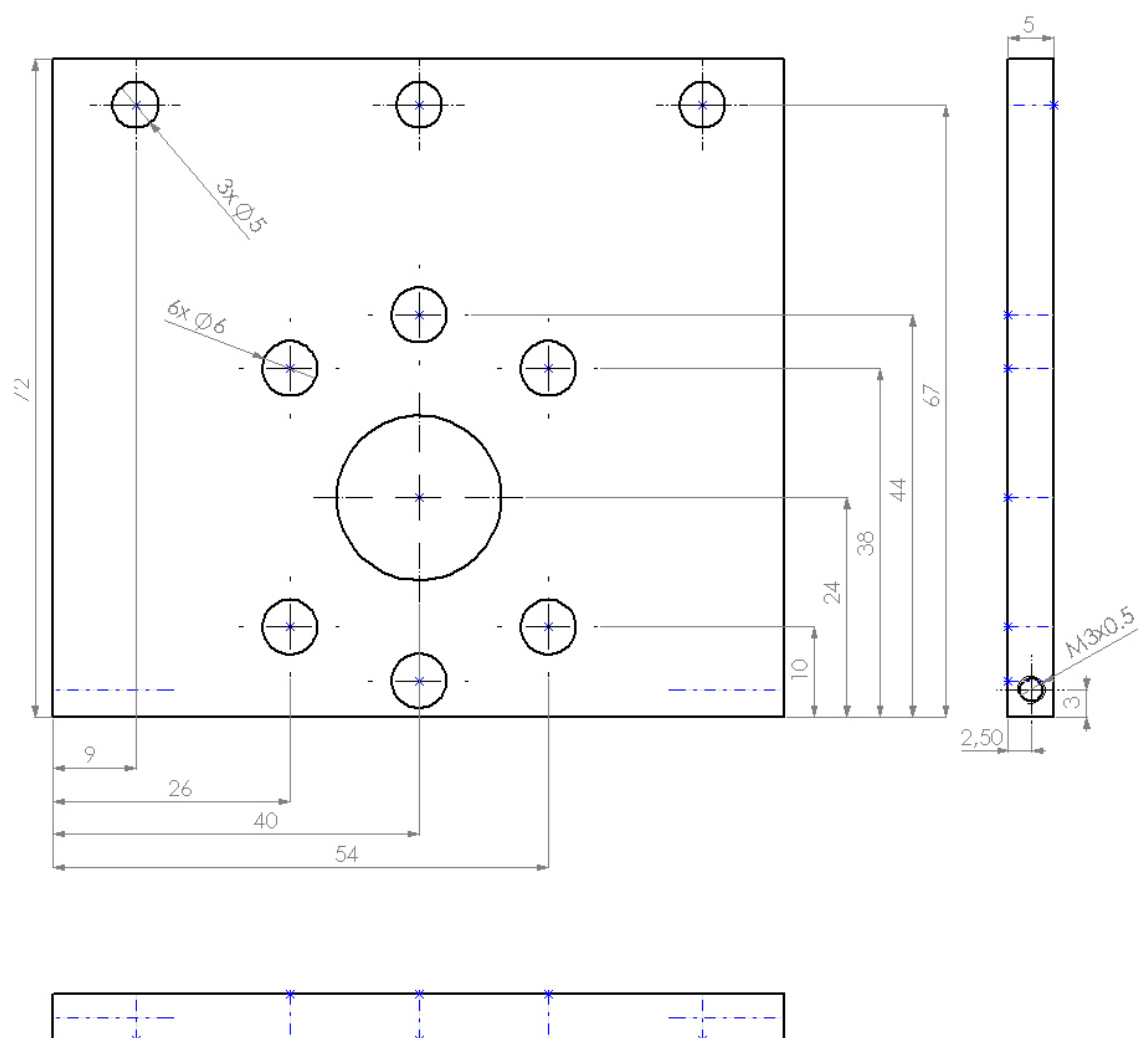
Obr. 39 Výkres – kuličková tyč, kalená tyč a hliníkový profil



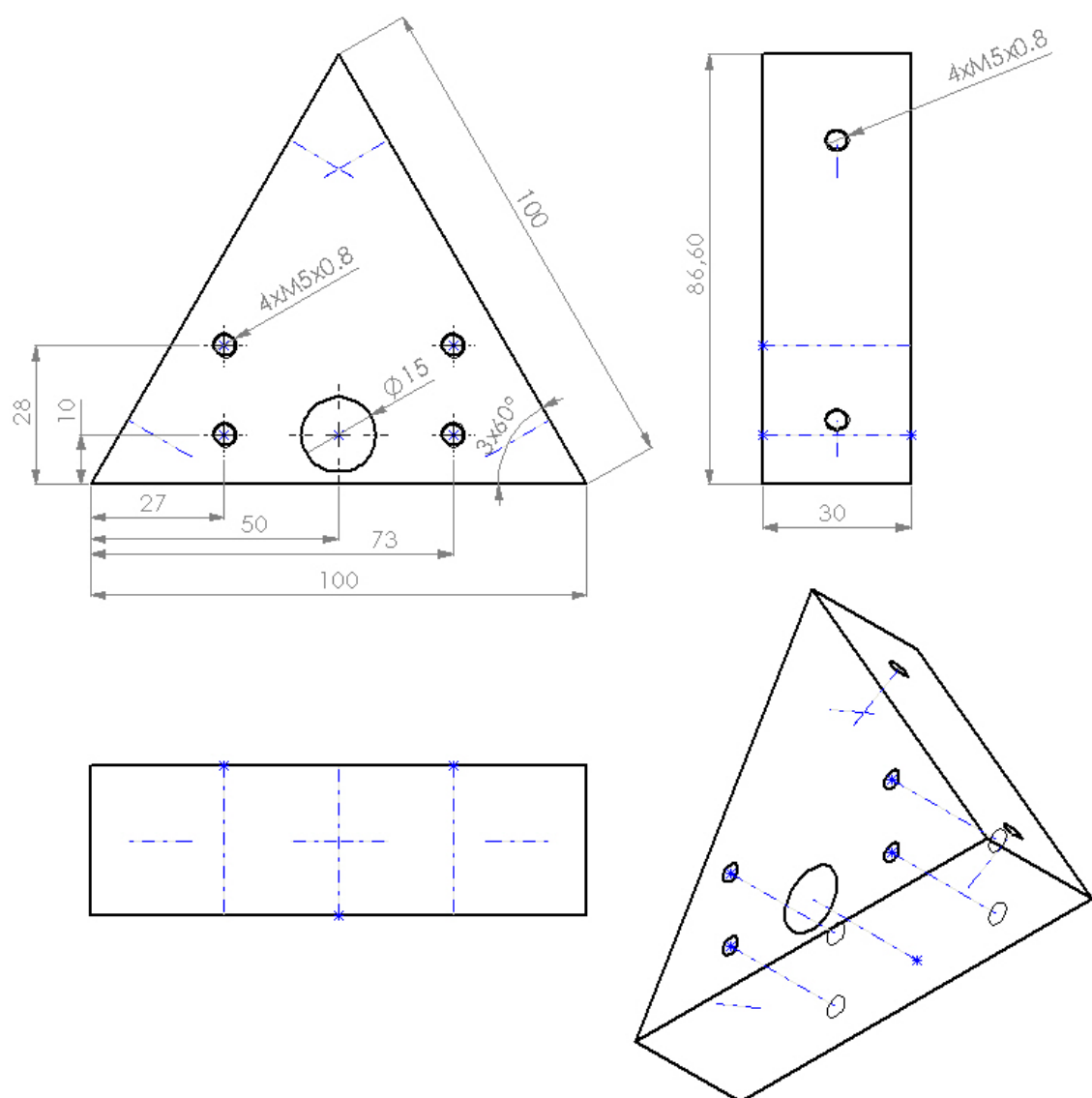
Obr. 40 Výkres – díl koncového efektoru



Obr. 41 Výkres – pružná spojka



Obr. 42 Výkres – uchycení matice kuličkové tyče a čepů



Obr. 43 Výkres – rohový díl (uchycení profilů a ložiska)