



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

3D TISKÁRNA TYPU SCARA

SCARA 3D PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Batelka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Tomáš Batelka

ID: 243511

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

3D tiskárna typu SCARA

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se a nastudujte kinematiku 3D tiskáren typu SCARA. Provedte srovnání jednotlivých typů kinematik. Navrhněte konstrukční řešení SCARA mechanismu a realizujte. Provedte výběr elektronických komponent a připravte firmware a rozhraní Klipper pro ovládání SCARA tiskárny. Zařízení otestujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 5.6.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyrůbal, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce pojednává o technologii FFF 3D tiskáren a popisuje jejich komponenty. Dále se věnuje nejčastěji používaných kinematikách a porovnává jejich vlastnosti z hlediska složitosti konstrukce a tiskových vlastností. Cílem práce je navrhnout a zkonstruovat kompletní 3D tiskárnu využívající kinematiku SCARA. Dále pak implementovat tuto kinematiku pro Klipper firmware. Práce se dále zaměřuje na kalibraci a testování tiskárny pro dosažení co možná nejvyšší kvality a zkrácení času tisku.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tiskárna, 3D model, 3D tisk, SCARA kinematika, Klipper, FFF, FreeCAD

ABSTRACT

The paper discusses the technology of FFF 3D printers and describes their components. It also discusses the most commonly used kinematics and compares their properties in terms of design complexity and printing properties. The aim of the thesis is to design and construct a complete 3D printer using SCARA kinematics. Then to implement this kinematics for Klipper firmware. The thesis also focuses on calibrating and testing the printer to achieve the highest possible quality and reduced printing time.

KEYWORDS

3D printer, 3D model, 3D printing, SCARA kinematics, Klipper, FFF, FreeCAD

BATELKA, Tomáš. *3D tiskárna typu SCARA*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Tomáš Batelka
VUT ID autora: 243511
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: 3D tiskárna typu SCARA

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

Obsah

Úvod	9
1 Aditivní výroba a 3D tisk	10
1.1 Technologie FFF	11
2 Části 3D tiskárny	12
2.1 Tisková hlava	12
2.2 Tisková podložka	14
2.3 Rám	14
2.4 Krokové motory	15
2.5 Řídící deska	15
3 Kinematika	16
3.1 Rektilineární	16
3.1.1 Cantilever	16
3.1.2 Gantry	16
3.1.3 CoreXY	17
3.1.4 CoreXZ	18
3.1.5 Belt	18
3.2 Delta	19
3.3 Polar	20
3.4 SCARA	20
3.4.1 Morgan SCARA	21
4 Praktická část	22
4.1 Části 3D tiskárny	22
4.1.1 Základna	23
4.1.2 Rameno	27
4.1.3 Tisková hlava	30
4.1.4 Extruder	32
4.1.5 Display	33
4.1.6 Držák cívky filamentu	34
4.1.7 Výroba dílů a konstrukce tiskárny	34
4.1.8 Kalibrace tiskárny	36
4.1.9 Implementace kinematiky SCARA do Klipperu	37
Závěr	40

Literatura	41
Seznam symbolů a zkratk	43
Seznam příloh	44
A Soupisy	45
A.1 Soupis materiálu	45
A.2 Soupis dílů	47
B Obsah elektronické přílohy	49

Seznam obrázků

1.1	Technologie FFF	11
1.2	Technologie SLA	11
1.3	Technologie SLS	11
2.1	Detailní pohled na tiskovou hlavu s přímým extruderem	12
2.2	Detailní pohled na depozici vrstvy	13
3.1	Rektilineární kinematiky 3D tiskáren	16
3.2	Mechanismus kinematiky CoreXY	17
3.3	Mechanismus kinematiky CoreXZ	18
3.4	3D tiskárna Creality CR-3	19
3.5	3D tiskárna 3DBuilder DELTA XXL	19
3.6	Koncept tiskárny s polární kinematikou	20
3.7	3D tiskárna x-scara	21
3.8	3D tiskárna Morgan Pro	21
4.1	Izometrický pohled na konstrukci tiskárny	23
4.2	Izometrický pohled na základnu	24
4.3	Pohled na skříň s elektronikou	25
4.4	Schéma zapojení	27
4.5	Izometrický pohled na základnu ramene	28
4.6	Izometrický Pohled na segment L1	29
4.7	Izometrický Pohled na segment L2	30
4.8	Izometrický pohled na tiskovou hlavu	31
4.9	Izometrický pohled na Extruder	33
4.10	Izometrický pohled na dotykový displej	33
4.11	Izometrický pohled na držák cívky s tiskovou strunou	34
4.12	Fotografie sestavené 3D tiskárny	36
4.13	Spuštění skriptu calibrate_shaper.py a výsledné doporučené hodnoty	37
4.14	Zobrazení závislosti výkonové spektrální hustoty na frekvenci	37

Úvod

Technologie aditivní výroby (3D tisku) se v posledních letech stává stále populárnější. Příchodem této technologie vznikla možnost vyrábět výrobky s komplexnější geometrií, než tomu bylo u metod subtraktivních a levnějším, než u technologií tvářecích. Tato technologie umožňuje ověřit návrh produktu ještě dříve, než jsou vyrobené nástroje pro velkosériovou výrobu. Naopak pro malé série je tato technologie velmi vhodná, protože nevyžaduje výrobu nástrojů a výrazně zkracuje dobu od návrhu po uvedení na trh.

Technologií aditivní výroby je nespočet. Jsou to například SLA (Stereolitography), která pomocí UV záření osvětluje a tím vytvrzuje pryskyřici, SLS (Selective Laser Sintering), která pomocí laseru spéká polymerní prášek nebo nejpopulárnější z nich FFF (Fused Filament Fabrication), která tiskne pomocí vytlačování roztaveného termoplastu z trysky. Tato technologie výroby je nejvíce rozšířená díky nízkým pořizovacím nákladům a jednoduché obsluze. Technologie FFF není pouze doménou průmyslu, ale i domácích uživatelů, kteří si mohou tisknout vlastní výrobky.

V oblasti 3D tisku se běžně používají různé typy rektilineárních kinematik a 3D tiskárny s kinematikou SCARA jsou spíše raritou. Autor v rámci této práce vysvětlí základní principy 3D tisku, provede porovnání různých kinematik. Navrhne kompletní řešení konstrukce a implementuje kinematiku SCARA do jednoho z nejpopulárnějších firmwarů 3D tiskáren – klipperu. Zařízení nakonfiguruje a uvede do provozu.

1 Aditivní výroba a 3D tisk

Aditivní výroba, též nazývaná 3D tisk, je technologie umožňující výrobu dílů pomocí nanášení materiálu ve vrstvách. Tato technologie našla uplatnění nejen ve výrobě prototypů a výrobě v malých sériích, ale i v medicínských aplikacích, architektuře, vesmírném průmyslu a mnoha dalších oblastech.

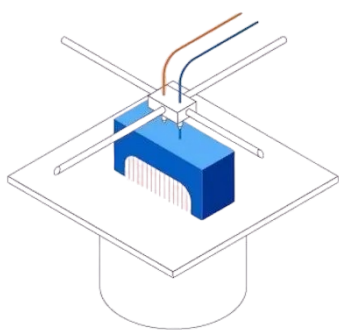
V porovnání s využitím subtraktivní výroby, má aditivní výroba řadu výhod. Velkou výhodou aditivního výrobního procesu je **flexibilita při návrhu a výrobě** komplexních tvarů, které by byly obtížně nebo vůbec nevyrobitelné konvenčními technologiemi. Při použití subtraktivních procesů jsou limitujícími faktory návrhu zejména potřeba přípravků, relativně velkého množství nástrojů a také možnost výskytu obráběného výrobku s nástrojem. V porovnání s tvářecími technologiemi (jakou jsou například vstřikování, přetlačování nebo třeba lisování), které vyžadují výrobu potřebných nástrojů a forem, což značně limituje geometrii výrobku. Technologie aditivní výroby umožňuje umístit materiál tam, kde je potřeba bez ohledu na nástroje potřebné k výrobě. To umožňuje například výrobu topologicky optimalizovaných dílů a výrobků. [1]

Další výhodou oproti subtraktivním technologiím je **malé množství odpadního materiálu**, protože je materiál nanášen pouze v oblastech, kde je potřeba. Oproti tvářecím technologiím je výhodou například využití neúplné výplně, která šetří materiál a zkracuje dobu tisku.

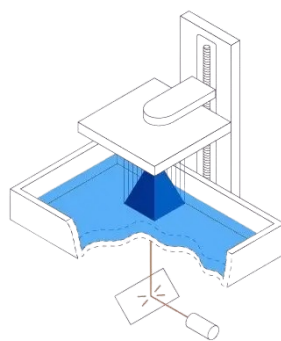
Velkou výhodou pak je **konstantní cena při výrobě dílů s komplexní geometrií**. Cena výroby u aditivní výroby není závislá na složitosti geometrie dílu, ale pouze na množství a typu materiálu použitého k výrobě a době tisku, resp. spotřebě elektrické energie.[1]

Při výrobě komplexních geometrií pomocí aditivní výroby **není často potřeba rozdělovat díl nebo výrobek na více částí**, které je následně potřeba spojit. To v praxi znamená nižší náklady na výrobu, menší riziko chyb při montáži a také nižší hmotnost výrobku. Při výrobě takových dílů vzrůstá potřeba tiskových podpor, které mohou komplikovat čištění a kompletaci výrobku. Při odstraňování podpor může způsobit geometrické nepřesnosti. [1]

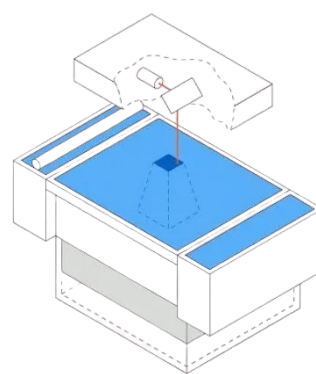
Limitací 3D tisku může být právě geometrická přesnost a omezená kvalita povrchu, která je navíc ovlivněna metodou výroby (tj. FFF – Filament Fabrication, SLA – Stereolithography, SLS – Selective Laser Sintering, ...). 3D tiskárny využívají zejména k výrobě dílů o rozměrech v řádu několika milimetrů až desítek centimetrů a jejich tolerance se pohybuje v rámci několika desetin až setin milimetru. [1]



Obr. 1.1: Technologie FFF [2]



Obr. 1.2: Technologie SLA [2]



Obr. 1.3: Technologie SLS [2]

1.1 Technologie FFF

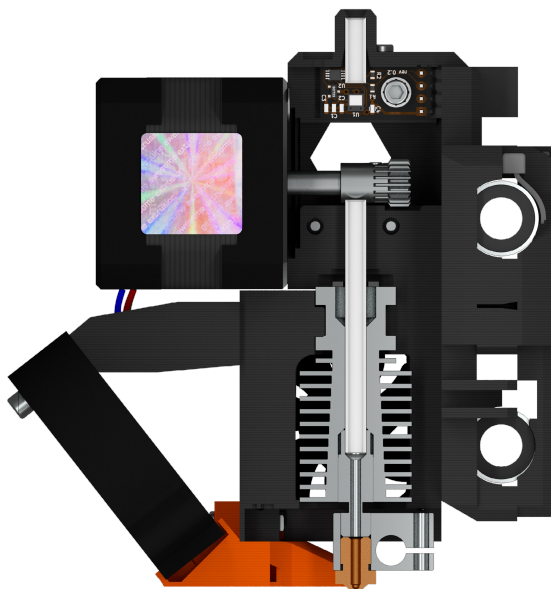
FFF (Fused Filament Fabrication) je zejména z důvodu nízké pořizovací ceny stroje i materiálu jednou z nejrozšířenějších technologií aditivní výroby. Tato technologie využívá plastové polymery, které mohou obsahovat příměsi jiných materiálů ve formě vláken nebo práškové příměsi. Tento materiál je prodáván ve formě tiskových strun o průměru 1,75 mm nebo 2,85 mm navinutých na cívku. Tato struna je odvíjena extruderem a vytlačena rozehřátou tryskou. Tryska způsobí tavení termoplastu a dojde tak k vytlačení přesného množství materiálu, které je řízeno průměrem otvoru trysky, rychlostí pohybu tiskové hlavy vůči tiskové podložce a rychlostí vytlačování materiálu. Tisková hlava nanáší materiál v definovaných vrstvách na tiskovou podložku. Tato podložka je většinou vyhřívaná, což zabraňuje deformaci tiskového výrobku a jeho případné oddělení od tiskové plochy. [3]

2 Části 3D tiskárny

2.1 Tisková hlava

Tisková hlava slouží k zahřátí a následnému vytlačení tiskového materiálu. Pohybem tiskové hlavy nebo podložky dochází k vytvoření tenké vrstvy materiálu na tiskovou podložku. Složením těchto vrstev vzniká tisknutý výrobek.

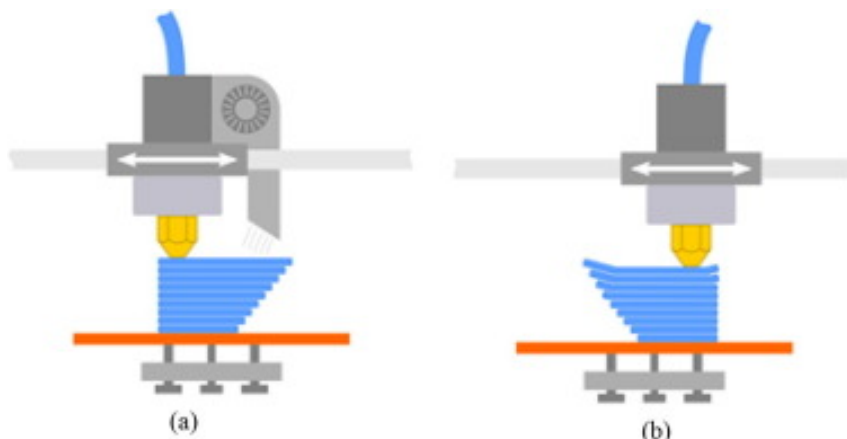
Filament je extruderem vtlačován do hotendu skládající se z PTFE trubičky, která je zavedena do pasivního chladiče, který je chlazen ventilátorem. Tento ventilátor zabraňuje tavení materiálu mimo hotend. Následně je filament protlačován tepelným izolátorem, který odděluje studenou a teplou zónu. Tepelný izolátor je kovová trubička na jejích koncích jsou vnější závity, a tak spojuje chladič a topný blok. Tepelný izolátor slouží hlavně k omezení přenosu tepla do předchozích částí hotendu. Posledními částmi jsou topný blok a tisková tryska. Topný blok má kromě průchozího otvoru pro materiál další dva otvory, jeden pro topnou patronu a druhý pro termistor, který slouží k monitorování aktuální teploty tepelného bloku potažmo trysky. Tryska se společně s krokovým motorem, tloušťkou tiskové struny podílejí na množství vytlačovaného materiálu. [4]



Obr. 2.1: Detailní pohled na tiskovou hlavu s přímým extruderem [4]

Podstatnou částí tiskové hlavy je ventilátor, který chladí tiskový materiál po jeho vytlačení z trysky. Tento ventilátor zabraňuje deformaci výtisku a redukuje stringing. Správné nastavení tohoto ventilátoru je relativně podstatné pro kvalitu

výtisku. Při správném nastavení je tiskárna schopna překlenout relativně velké mezery bez použití podpurných struktur. [5]



Obr. 2.2: Detailní pohled na depozici vrstvy: (a) s ventilátorem pro chlazení materiálu a (b) bez ventilátoru [5]

Direct-Drive extruder Extrudery typu direct-drive jsou integrovány v tiskové hlavě a tedy do něho strunu vtláče přímo. Oproti bowden extruderu má pak výhodu vytlačování přesnějšího množství materiálu. To je způsobeno velice krátkou vzdáleností extruderu od trysky. Využití tohoto typu extruderu má za důsledek méně stringování a odkapávání filamentu z trysky.

Reverse-Bowden extruder Tento typ má stejně jako direct-drive extruder integrovaný v tiskové hlavě. Rozdílem je, že od tiskové hlavy vede PTFE trubička, kterou je veden filament. Trubička pak zpravidla vyústí v pevném bodě tiskárny. Důsledkem toho je vyšší spolehlivost. Tisková struna se totiž nemůže nikde zaseknout ani shodit cívku z držáku. Další velkou výhodou je připojení na drybox.¹

Bowden extruder Tento typ má extruder oddělený od tiskové hlavy. Extruder je s tiskovou hlavou propojen PTFE trubičkou. Extruder tedy tlačí tiskovou strunu do trubičky, která je připojena k hotendu. Velkou výhodou tohoto řešení je snížená hmotnost tiskové hlavy. Důsledkem tohoto řešení je pak možnost použití vyšší hodnoty zrychlení a tak i rychlejší tisk. Nevýhodou tohoto řešení je právě velká vzdálenost trysky, která často způsobuje nepřesné vytlačení nebo retrakci materiálu. Důsledkem je stringování nebo odkapávání filamentu.

¹Drybox slouží k vysoušení hygroscopických filamentů. Drybox udržuje nízkou vlhkost filamentu a tak během tisku neabsorbují okolní vlhkost.

Remote Direct-Drive extruder Tento typ není vzhledem k pořizovací ceně a malému povědomí příliš běžný. Tento typ se snaží eliminovat nevýhody direct-drive a bowden extruderu. k vytlačení filamentu dochází i u tohoto typu v tiskové hlavě, ale krokový motor je upevněn na rámu tiskárny. Motor a ozubené kolečko extruderu jsou propojeny ohebnou hřídelí. Výhodou pak je přesná extruze a vyšší hodnota zrychlení než u direct-drive extruderu. Nevýhodou je relativně vysoká pořizovací cena, proto se spíše používají jiné varianty.

2.2 Tisková podložka

Tisková podložka je část 3D tiskárny, na kterou je nanášen materiál. Tato podložka je zpravidla vyhřívána, aby nedocházelo k deformaci výtisku a nedošlo tak k jeho oddělení od tiskové podložky.

Vyhřívání podložky je realizováno několika způsoby. Jedním z nich je například topná DPS (deska plošných spojů). Může jít například o běžně používaný kompozitní materiál FR-4 se skleněným jádrem nebo MCPCB (Metal Core PCB)/IMS (Insulated Metal Substrate) s jádrem hliníkovým. V tomto případě jako topné těleso slouží vodivá cesta ve tvaru meandru nebo spirály. Na DPS je poté připevněna tisková podložka případně jako tisková podložka slouží samotná DPS.

Dalším způsobem vyhřívání je hliníková deska se silikonovým topným tělesem, které je přilepeno k její spodní straně. Alternativou silikonového topného tělesa můžou být i topné patrony. Na tuto hliníkovou desku je připevněna tisková podložka.

Tiskových podložek existuje několik druhů. Tiskové podložky mohou být vyrobené z různých materiálů, jako je například PEI (polyetherimid) ve formě přířezu nebo pružinové oceli s práškově lakovaným PEI povrchem. Dalším materiálem je sklo, které se velice hladké, odolné a vlivem jeho nízké tepelné vodivosti dobře rozptyluje teplo. [6] Dalšími poměrně rozšířenými povrchy jsou různé lepicí pásky. Příkladem je například polyimidová páska nebo papírová páska.

Tiskové podložky se liší i svými povrchy. Například PEI podložky se prodávají v hladké, texturované i variantě se vzorem.

2.3 Rám

Rám 3D tiskáren je často realizován pomocí hliníkových profilů stejně jako jiné průmyslové stroje. Tyto profily jsou spojovány pomocí rohových spojek vyrobené z odlévaného hliníku případně tisknutými, tlakově odlévanými nebo vstřikovanými díly. Rámy komerčních 3D tiskáren mají nejčastěji rám zhotovený z tlakově litými

hliníkovými díly nebo řezáním, lisováním a tvářením hliníkových nebo ocelových přířezů.

Konstrukci rámu nelze podcenit. Má totiž přímý vliv na tisknuté výrobky. Málo pevné spoje můžou způsobovat vibrace a nepřesnosti, zatímco profily s nerovným koncem můžou způsobit deformace výtisku klidně i v několika osách.

2.4 Krokové motory

Krokové motory zajišťují veškerý pohyb tiskové hlavy vůči poloze na tiskové podložce. Krokové motory se též používají v extruderu pro vytlačování filamentu.

Krokový motor je ve své podstatě synchronní motor, který přeměňuje vstupní digitální elektrický signál na odpovídající mechanický pohyb. Krokové motory pracují v tzv. otevřené smyčce, tedy nepoužívají zpětnou vazbu. Pro nastavování polohy nebo rychlosti otáčení není totiž u krokových motorů potřeba. Po přivedení impulsu se motor pootočí o přesně definovaný úhel – krok. Počet těchto pulzů obvykle odpovídá počtu vykonaných kroků. [7]

Běžným úhlem jednoho kroku hybridního krokového motoru používaného v 3D tiskárnách je $1,8^\circ$. Přepočtem tak můžeme zjistit, že takový motor má 200 kroků. Takového úhlu lze docílit díky konstrukci hybridního krokového motoru.

2.5 Řídící deska

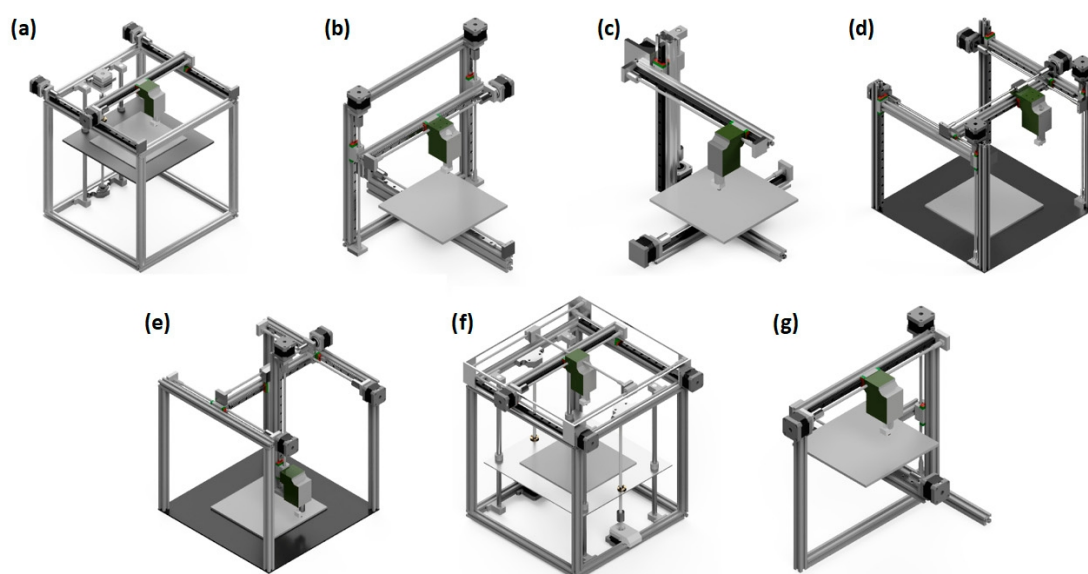
Slouží k propojení zdroje, všech elektricky řízených součástí a senzorů tiskárny. Slouží k napájení vyhřívané podložky (v případě použití vyhřívané podložky napájené síťovým napětím 230V 50Hz pouze řídí spínání relé). Dále se k ní připojují krokové motory a jejich drivery, nejsou-li integrované na řídící desce. k desce jsou připojeny i ventilátory, zejména ty se řízenými otáčkami (ventilátor hotendu a ventilátor pro chlazení materiálu). Dále k ní jsou připojeny koncové spínače, termočlánky a například i osvětlení tiskárny. Řídící desky též slouží k připojení displeje a ovládání uživatelského rozhraní tiskárny. V případě použití firmware Klipper je k desce připojen jednodeskový počítač. Nejčastěji se setkáme s počítačem Raspberry nebo jeho klony. Některé desky umožňují připojení do počítačové sítě rozhraním Ethernet nebo WiFi.

Řídící desky jsou nejčastěji řízené 8, 16 nebo 32 bitovými mikrokontrolerem. Mikrokontroler zajišťuje čtení z paměťového média, zpracování instrukcí tzv. G-kódu (GCode případně BGCCode – binární formát GCode).

3 Kinematika

3.1 Rektilineární

Tiskárny s rektilineární kinematikou jsou nejrozšířenějším typem kinematiky FFF tiskáren. V odborné i široké veřejnosti jsou spíše známé pod názvem kartézské. To ovšem může být zavádějící, protože firmwary 3D tiskáren používají kartézský systém souřadnic pro většinu kinematik (výjimkou je polární uspořádání). Rektilineární kinematika vyžaduje nejméně tři krokové motory, jeden pro každou z os. Rektilineární kinematika je v současné době nejrozšířenější kinematika a to díky jednoduchosti konstrukce a jednoduchosti kinematické transformace.



Obr. 3.1: Rektilineární kinematiky 3D tiskáren [8]

3.1.1 Cantilever

Tato kinematika vyžaduje tři krokové motory. Jeden pro každou z os. Motor osy Y je uložen pod úroveň tiskové podložky a slouží k její translaci v této ose. Zástupcem této kinematiky je například Bambu Lab A1 mini. Model takové konstrukce je na obrázku 3.1 (c).

3.1.2 Gantry

Kinematika typu gantry mohou být dvojího typu. Translaci ramene osy x zajišťují dva motory osy Y. V ose Z se v jednom z typů pohybuje tisková podložka (viz (a) na obrázku 3.1), v druhém případě se pohybuje sestava portálu tedy rovina XY (viz

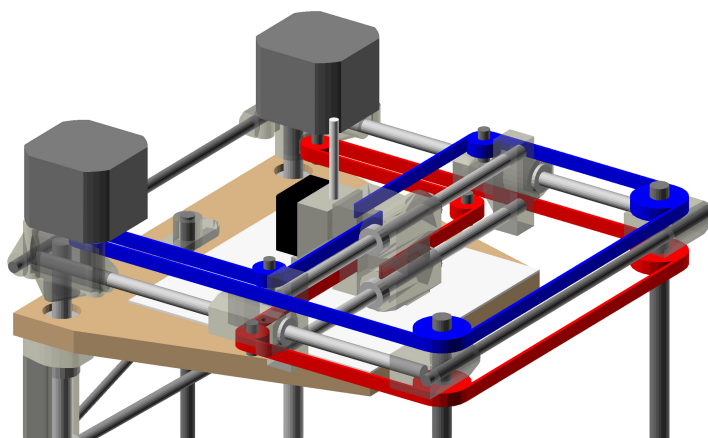
(d) na obrázku 3.1) a v třetím případě se v ose Z pohybuje samotný nástroj resp. tisková hlava (viz (e) na obrázku 3.1). Tato kinematika není v oblasti 3D tisku příliš často používaná. Uplatnění má však v oblasti gravírování nebo řezání (například řezání vodním paprskem).

Bed Slinger

Tato kinematika využívá čtyř motorů. Jeden pro osu X, dva pro osu Z a jeden, který pohybuje tiskovou podložkou v ose Y. Tím se eliminuje prověšení ramene osy X. Ačkoliv jsou tyto tiskárny kompaktní, tak při tisku vyžadují v ose Y větší prostor pro pohyb tiskové podložky. Nejpopulárnější tiskárnou kinematiku Bed Slinger je Prusa i3 navržena Josefem Průšou nebo cenově přívětivější Creality Ender 3. Tato tiskárna je vyobrazena na obrázku 3.1 (b).

3.1.3 CoreXY

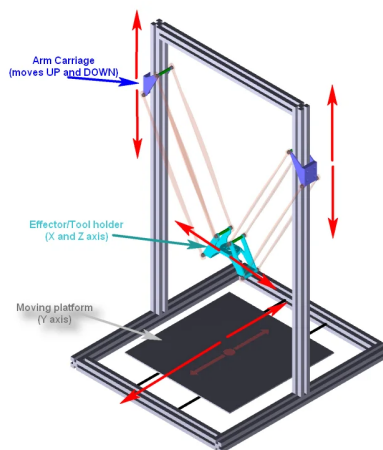
Kinematika CoreXY se velice podobá uspořádání gantry. Rozdílem oproti tomuto upořádání je skutečnost, že pohyb v osách X a Y se zajišťují oba motory společně. Motory v ose Z tak nemusí pohybovat portálem, ke kterému je upevněný motor pro osu X, který by tak přidával portálu na hmotnosti. Tato kinematika tak díky stacionárním motorům (vůči rovině XY) dosáhnout vyšší rychlosti tisku. Motory se tak sice musí s celou konstrukcí pohybovat v ose Z, ale vysoké rychlosti by v této ose měli zanedbatelný vliv na celkovou dobu tisku. V osách X a Y se tedy pohybuje pouze tisková hlava. Díky snížené hmotnosti se tak posouvá rezonanční frekvence k vyšším kmitočtům a tudíž lze dosáhnout vyšších hodnot maximálního zrychlení a tím pádem i ke kratším dobám tisku. Tato kinematika se v dnešní době stává více populární a to díky tiskárnám projektu Voron 2.4 a Bambu Lab X1. [9]



Obr. 3.2: Mechanismus kinematiky CoreXY [10]

3.1.4 CoreXZ

Tato kinematika řeší některé nevýhody tiskáren s gantry kinematikou. K pohybu na ose X není potřeba motor, tudíž dochází k redukci hmotnosti. Tuto kinematiku si lze představit jako hybrid dvou populárnějších kinematik – Delta a Bed Slinger. Z uspořádání Bed Slinger přebírá pohybující se tiskovou podložku a z delty nezávisle pohybující se ramena zajišťující pohyb v rovině XZ. Velkou výhodou je, že všechny motory jsou stacionární a tedy nepřidávají na hmotnosti jiné z os. [11]



Obr. 3.3: Mechanismus kinematiky CoreXZ [11]

3.1.5 Belt

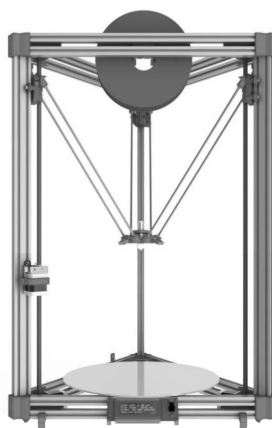
Tiskárny s upořádáním Belt se liší od ostatních 3D tiskáren s kartézským systémem souřadnic tím, že místo klasické tiskové podložky mají pohyblivý pás. Jejich největší výhodou je nepřerušovaný tisk a lze tak tisknout dlouhé předměty, které by nešlo vytisknout na jiných, stejně podbně, tiskárnách. 3D tiskárnu s touto kinematikou vyrábí například společnost Creality s modelový označením CR-30. [12]



Obr. 3.4: 3D tiskárna Creality CR-30 [13]

3.2 Delta

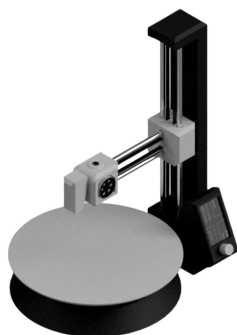
3D tiskárny s delta kinematikou též používají kartézský systém souřadnic, ale svojí konstrukcí se od ostatních rektilineárních tiskáren velice liší. V posledních letech se stávají cenově dostupnější a tedy i rozšířenější. Uspořádání delta má stacionární tiskovou podložku a v pohybu ve všech třech osách slouží 3 ramena (v některých případech i víc) upevněna k vozíku pohybující se v ose Z po lineárním vedení upevněného ke konstrukci tiskárny. Pohyb vozíku je často realizován řemenem a krokovým motorem. 3D tiskárny s touto kinematikou často používají Bowden extruder, aby se redukovala hmotnost a tím se redukovali artefakty a zvýšila rychlost tisku. Nevýhodou této kinematiky je poměr její výšky ku výšce oblasti tisku. [12]



Obr. 3.5: 3D tiskárna 3DBuilder DELTA XXL [14]

3.3 Polar

Toto uspořádání jak jedinné nevyužívá kartézských souřadnic, ale souřadnic polárních. Souřadnice jsou definovány vzdáleností od počátku, vzdáleností od počátku a úhel od zvolené osy ležící v rovině. Polární 3D tiskárny používají pro pohyb v polární rovině rotující tiskovou podložku, se kterou otáčí krokový motor umístěný pod ní. To komplikuje napájení vyhřívané podložky, proto ji některé 3D tiskárny vůbec vyhřívanou nemají. Tisková hlava je upevněna na pohyblivém rameni. Rameno se pohybuje v rovině kolmo vůči rovině polární. K tomuto pohybu jsou tak potřeba dva krokové motory. Jejich výhodou je nízká pořizovací cena. Její nevýhodou je pak nízká kvalita a relativně dlouhá doba tisku. Zástupcem tiskáren s polární kinematikou je například tiskárna Polar3D od stejnojmenné společnosti nebo Sculpto PRO2. [12]

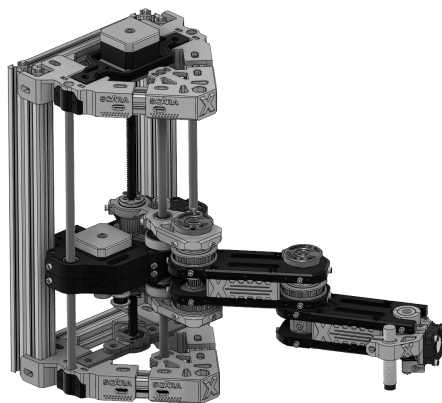


Obr. 3.6: Koncept tiskárny s polární kinematikou [15]

3.4 SCARA

Kinematika SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) je v oblasti 3D tisku používaná jen zřídka. Uspořádání typu SCARA používá kartézský souřadnicový systém. Svým tvarem i pohybem připomíná písíci paži. K pohybu v rovině XY využívá kinematika SCARA rameno rozdělené na dva segmenty, které jsou vzájemně spojeny kloubem (zvaný elbow – loket). Rameno je pak připojeno dalším kloubem (zvaným shoulder – rameno) k dílu, který je upevněn k základně tiskárny a zajišťuje pohyb v ose Z. Na tomto dílu jsou upevněny dva motory zajišťující pohyb ramene v rovině XY. K pohybu v ose Z pak stačí jeden krokový motor. Předností této kinematiky je relativně vysoká rychlost tisku a její vhodnost pro použití v průmyslu. Mezi její nevýhody patří relativně nízká kvalita tisku a absence podpory kinematiky v některých firmwarech. Příkladem tohoto uspořádání jsou tiskárny RepRap HELIOS a x-scara. [12]

O kinematice SCARA pojednává i praktická část této práce.



Obr. 3.7: 3D tiskárna x-scara [15]

3.4.1 Morgan SCARA

Kinematika Morgan SCARA je pojmenována podle stejnojmenné tiskárny RepRap Morgan. Od uspořádání SCARA se liší tím, že nemá jedno rameno, ale dvě protilehlá a konkrétně u této tiskárny se v ose Z namísto ramene pohybuje tisková podložka. K pohybu ramen používá dvě koncentrické hřídele, kterými otáčí dva motory umístěné ve spodní části tiskárny. [16]



Obr. 3.8: 3D tiskárna Morgan Pro [16]

4 Praktická část

4.1 Části 3D tiskárny

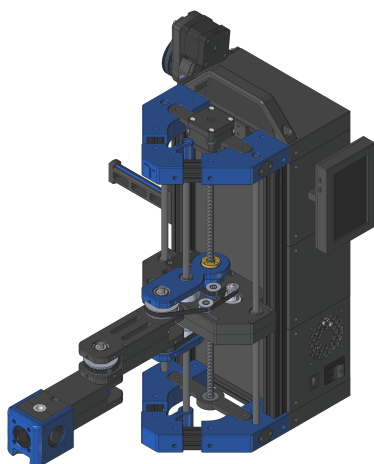
Pro modelování dílů byl použit CAD software FreeCAD. Tento CAD software byl zvolen proto, že je open source a tedy dostupný pro každého, kdo jej chce používat. Software FreeCAD byl nedávno vydán ve verzi 1.0, což ve světě open-source mj. znamená připravenost pro použití v praxi.

FreeCAD je univerzální parametrický modelovací systém vydaný pod licencí LGPL, tudíž jej lze libovolně šířit a modifikovat. FreeCAD je také multiplatformní, tudíž jej lze používat v operačních systémech Windows, Linux i MacOS. FreeCAD je napsán v jazyce C++ a pro manipulaci s geometrií využívá knihovny OpenCASCADE. FreeCAD lze rozšiřovat pomocí zásuvných modulů (pluginů). FreeCAD též umožňuje psaní vlastních skriptů v jazyce Python a nahrávání vlastních maker. [17]

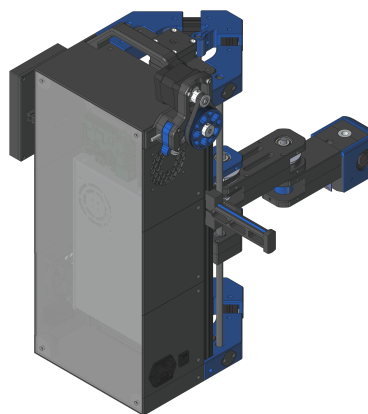
Můj návrh tiskárny vychází z projektu x-scara [18]. Ve svém návrhu byly použity shodné rozměry hliníkových profilů, trapézových a vodících tyčí. Vzhledem k tomuto faktu se můj návrh projektu x-scara velmi podobá, ačkoliv můj návrh nevyužívá žádný díl z tohoto projektu.

Model je rozdělen do sedmi částí. První je **základna**, druhou je **rameno**, třetí je **tisková hlava**, čtvrtou **extruder** (VORON M4), pátou **displej** a šestou **držák cívky filamentu**. Sestava obsahující všechny tyto zmiňované části je zobrazena na obrázcích níže 4.1.

Soubory ve formátu FCStd (zdrojové soubory modelů) jsou organizovány podle části, do které spadají. Pro generování souborů ve formátu STEP vhodného pro slicer slouží python skript, který využívá FreeCAD API. Tento skript postupně otevře, přepočítá a exportuje všechny díly. Skript exportuje pouze ty objekty, které jsou obsažené v kontejneru Std Part. Jako název souboru se volí název dílu, který obsahuje i počet výtisků konkrétního dílu. K výrobě tištěných dílů pak postačí adresář step a soubory, které obsahuje.



(a) Z přední strany



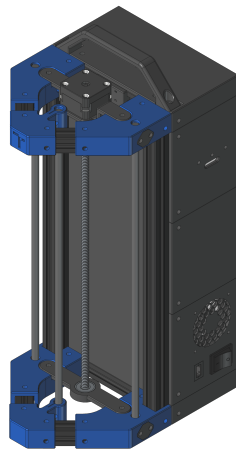
(b) Ze zadní strany

Obr. 4.1: Izometrický pohled na konstrukci tiskárny [19]

4.1.1 Základna

Základna je složena ze hliníkových profilů 20x20mm a 20x40mm. Na základnu je upevněno rameno, které se díky lineárně valivým ložiskům pohybuje po třech vodících tyčích o průměru 8mm. V horní části základny je upevněn krokový motor, který pomocí trapézové tyče o průměru 8mm pohybuje ramenem v ose Z. Druhá strana trapézové tyče je uložena v ložisku ve spodní části základny. Základna je zobrazena na obrázcích níže 4.2.

Pro spojení hliníkových profilů byla vybrána metoda "Blind Joint", která umožňuje pevné spojení dvou hliníkových profilů. Tato technika byla zvolena i z důvodů snadnější montáže akrylové desky a možnosti zapuštění elektroniky do rámu tiskárny.



(a) Z přední strany



(b) Ze zadní strany

Obr. 4.2: Izometrický pohled na základnu [19]

V zadní části základny je umístěna skříň s elektronickými komponentami tiskárny. Ta je od prostoru tiskárny oddělena akrylovou deskou, která je upevněna přitlakem DIN lišt. Pro upevnění elektronických komponent slouží tři DIN lišty ¹ upevněné z vnitřní části bočních hliníkových profilů. Elektronika je od okolí oddělena plastovými díly, které společně tvoří skříň, chránící před nechtěným dotykem. Uvnitř skříně najdeme upevněný zdroj, řídicí desku, jednodeskový počítač Raspberry Pi a sadu řadových svorek. Skříň s elektronikou je zobrazena na obrázcích níže 4.3.

¹DIN lišta je standardizovaný ocelový profil, který slouží k upevnění modulárních přístrojů v elektrických rozvaděcích



(a) Z levé strany

(b) Ze zadní strany

(c) Z pravé strany

Obr. 4.3: Pohled na skříň s elektronikou [19]

Po obvodu skříně jsou upevněny další části tiskárny. Jednou z nich je dotykový displej BTT PITFT43, který je ke konstrukci skříně upevněn na pohyblivém pantu. Tento pant je realizován pomocí dílu upevněného ke skříni, zadní části krytu displeje, vložky pro jeho dotažení a šroubu SHCS M3x55. Tento pant je upevněn pomocí tří šroubů k panelu v panelu se nachází otvor pro DSI kabel, který slouží pro připojení displeje k mikropočítači. V přední části se také nachází kolébkový přepínač pro spínání napájení celé tiskárny. Vedle něho se nachází slot pro USB konektor pro připojení akcelerometru. Nad spínačem a USB slotem se nachází jeden z ventilátorů jehož účelem je nasát chladný vzduch do skříně. Na opačné straně v horní části je též upevněn ventilátor, který naopak odsává teplý vzduch. Na opačné straně displeji je též upevněn keystone s RJ-45 konektorem pro připojení tiskárny do počítačové sítě. Vedle něho se ještě nachází napájecí konektor IEC 60320 C14 s pojistkou.

Zdroj

Elektroniku napájí AC-DC zdroj s výstupním napětím 12 V s modelovým označením SP-320-12 MV02 od společnosti MeanWell. Společnost MeanWell má ve světě zdrojů velmi dobré jméno. Vyrábí totiž na svou cenovou kategorii velice kvalitní

zdroje pro mnoho různých aplikací. 12V systémy mají největší výhodu v tom, že je kompatibilní s celou řadou komponent, které jsou ve své 12 V variantě levnější a dostupnější (toto platí zejména pro ventilátory). Nevýhodou pak je potřeba větších průřezů kabelů, které tak kompenzují nižší napětí vyšším proudem. Poměrně velkou nevýhodou 12V systému je hlučnější provoz krokových motorů. Kromě zvýšené hlučnosti může docházet k vyššímu zahřívání krokových motorů a jejich nižší točivý moment. Na druhou stranu dochází k menším ztrátám na MOSFETech. Primárním důvodem výběru tohoto zdroje bylo použití již dostupných 12 V krokových motorů z jiné 3D tiskárny.

Krokové motory

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, tak byly využity krokové motory z jiné 3D tiskárny. Jedná se o krokové motory 42HB40-401A od výrobce YUEQINGSHI DEXUAN MOTOR.

Řídící deska

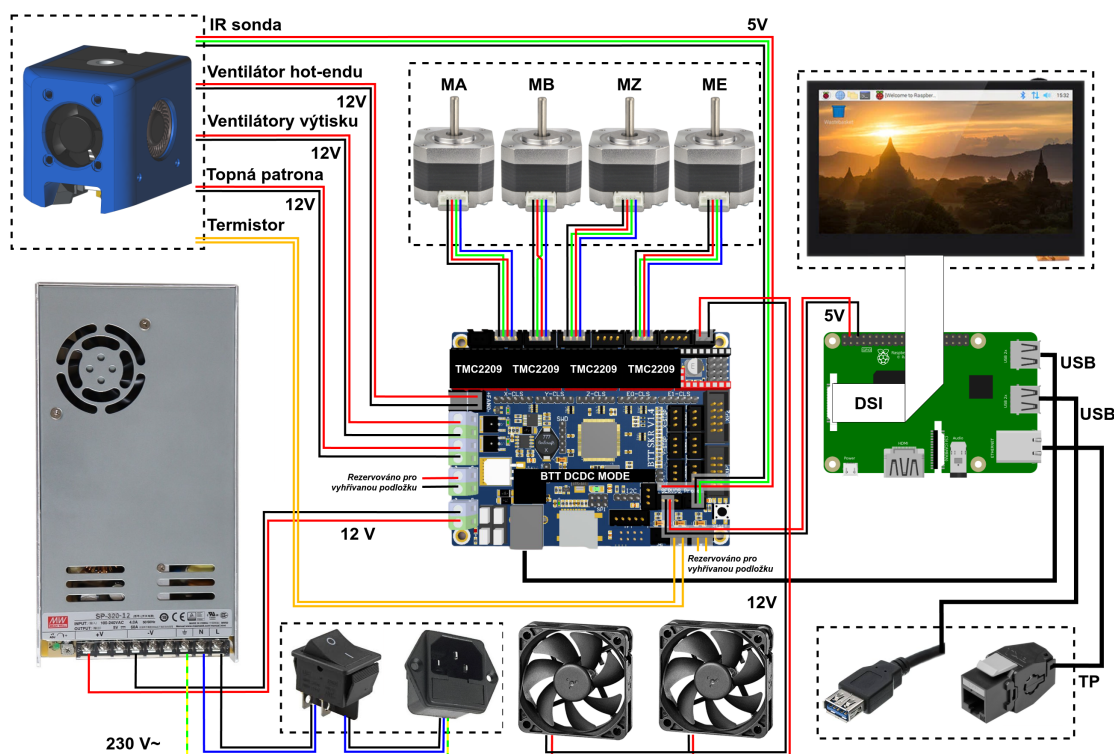
Řídící desku byla vybrána podle požadovaných parametrů a ceny. Deska, která odpovídala všem požadavkům. Ačkoliv by pravděpodobně stačila řídící deska s 8-bitovým mikrokontrolérem (MCU) byl vybrán mikrokontrolér 32-bitový. 32-bitové MCU má několik nesporných výhod. Oproti 8-bitovým MCU mají řádově vyšší kmitočty a pracují s většími registry, které umožňují uložení čísla v pohyblivé řádové řádce, ve formátu binary32. 8-bitové MCU tak musí s desetinnými čísly a registry pracovat výpočetně náročnějším způsobem. MCU s vyššími kmitočty také umožňuje větší rozlišení tisku (za stejný čas dokáže zpracovat více menších pohybů). U firmware Klipper to ovšem není zapotřebí, protože všechny výpočty se provádí v klippy, který je spuštěn na mikropočítači a mikrokontroléru data předává prostřednictvím RPC (Remote Procedure Call) mechanismu. Dalším požadavkem byla podpora "tichých" driverů TMC2209 se StallGuard. Vzhledem k těmto požadavkům nejlépe vyhovovala poměrně rozšířená řídící deska BTT SKR 1.4 v základní variantě.

Mikropočítač

S firmwarem klipper se nejčastěji používají mikropočítače Raspberry Pi nebo jeho klony. Některé desky dokonce umožňují přímé připojení Raspberry Pi Compute Module. Pro tuto tiskárnu byl použit již vlastněný mikropočítač Raspberry Pi 2b V1.1.

Zapojení

Důležitým poznatkem při připojování jednotlivých elektronických komponent 3D tiskárny k řídicí desce je to, že není nutné využívat konektory dle označení konektoru. Na druhou stranu je třeba si dávat pozor, zda je daný pin například analogový nebo řízený MOSFETem. Právě počet výstupů řízených MOSFETem bývá často omezený a proto lze připojit pouze omezený počet komponentů. MOSFETy se používají například pro řízení otáček ventilátoru pulzně kódovou modulací. Některé PINy na desce BTT SKR 1.4 neumožňují ani vypnutí výstupu, protože je napájecí konektor desky přímo propojen s daným pinem. Některé komponenty je tedy proto nutné zapojit do konektorů určené pro jiné použití a nebo připojit komponenty se stejnou funkcí na jeden výstup. Dobrým příkladem řešení tohoto problému, je připojení ventilátorů pro chlazení vytlačovaného filamentu a ventilátory pro chlazení skříně s elektronikou po dvojicích na stejný výstup řídicí desky.



Obr. 4.4: Schéma zapojení (komponenty v rámečku se nachází mimo skřín s elektronikou nebo jsou z vnější strany přístupné – bez použití nástroje)

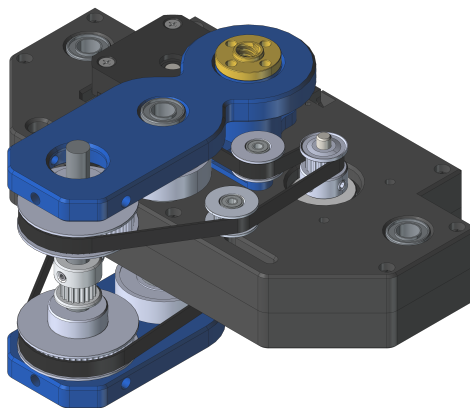
4.1.2 Rameno

Nejzajímavější částí celé tiskárny je právě rameno, které se právě v oblasti 3D tisku příliš neobjevuje. Tuto kinematiku používají spíše manipulátory nebo multifunkční

stroje. Rameno se skládá ze tří hlavních částí – základny ramene a dvou propojených segmentů.

Základna ramene

Základna ramene se skládá ze dvou téměř shodných dílů, které slouží k upevnění samotného ramene, upevnění k vodícím tyčím a trapézovému šroubu. K upevnění těchto dvou dílů je použito 8 šroubů M3x16. K pohybu po postranních vodících tyčích slouží lineárně valivá ložiska LM8UU s nepohyblivým uložením s přesahem (platí i pro další ložiska, řemenice i další díly). K pohybu po středové tyči slouží ložisko LM8LUU. Na obou stranách tohoto ložiska jsou upevněna k dílu spojující rameno a základnu ramena. Tyto ložiska mají shodné uložení jako ložiska předchozí. Rozdílem je, že jsou ještě zajištěna dvěma šrouby ke spojovacímu dílu. Tento díl je pak spojen s základnou ramene dílem Arm_Base_Hub_Top/Bottom. Základna ramene slouží i k upevnění dvou krokových motorů NEMA17 (motory A a B), které pohybuji ramenem v rovině XY. K hřídeli těchto motorů jsou upevněny dvě ozubené řemenice s 20 zuby.

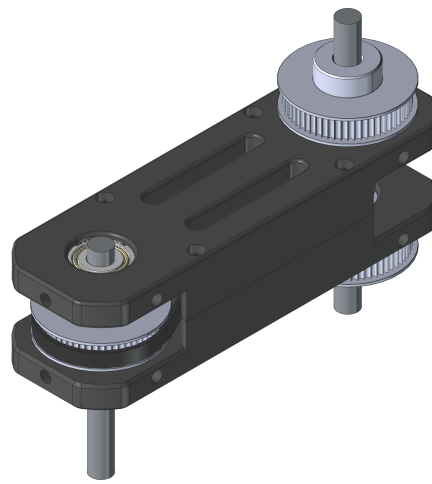


Obr. 4.5: Izometrický pohled na základnu ramene[19]

Segment L1

K výše popisované základně je připojen první segment ramene (shoulder/ L_1). Segment ramene se skládá ze dvou protilehlých dílů spojenými čtyřmi šrouby M3x20 SHCS. K pohybu tohoto ramene slouží dvě hřídele o průměru 8mm a délkách 60 mm (v horní části) a 40 mm (ve spodní části). Ve třech otvorech v těchto dílech jsou upevněna ložiska. Do otvoru ve spodním dílu je upevněna řemenice se 60 zuby, které je také upevněna k spodní hřídeli a slouží tak k pohybu prvního segmentu. Na hřídeli

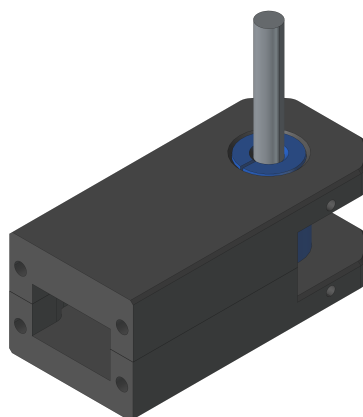
je nasazen řemen GT2 6 mm o délce 280 mm. Převodový poměr těchto hřídelí je tedy 3:1. K horní hřídeli jsou upevněny dvě ozubené řemenice. Ty slouží k pohybu druhého segmentu (elbow/ L_2). Řemenice v horní části má 60 zubů a tvoří tak společně s řemenicí na motoru převodový poměr 3:1. Druhá řemenice s 20 zuby upevněna ke spodní části hřídele (mezi díly prvního segmentu) a spolu s první řemenicí tvoří převodový poměr 3:1. Celkový převodový poměr druhého segmentu ramene tak je 9:1.



Obr. 4.6: Izometrický pohled na segment L1[19]

Segment L2

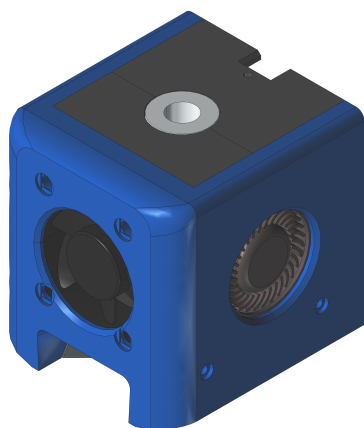
K hřídeli na opačné straně je ze spodní strany upevněný druhý segment ramene (elbow/ L_2). Tento segment je také tvořen dvěma protilehlými díly, které jsou spojeny čtyřmi šrouby M3x20 SHCS. Mezi těmito díly je i jeden další, který slouží k upnutí hřídele. Na konec tohoto segmentu je upevněna tisková hlava (toolhead), která je připevněna k segmentu ramene pomocí čtyř šroubů M3x10 SHCS. Oba konce tohoto segmentu mají otvor na odvádění teplého vzduchu od heatbreaku.



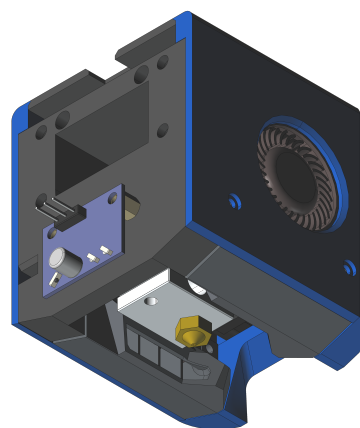
Obr. 4.7: Izometrický pohled na segment L1[19]

4.1.3 Tisková hlava

Toolhead se skládá z 5 tisknutých dílů. Prvním je díl sloužící k upevnění hotendu k rameni a tvarem tak odpovídá použitému hotendu – E3D V6. Ze zadní strany má otvor pro odvádění teplého vzduchu od chladiče hotendu. Tento díl slouží i k upevnění diferenciální infračervené sondy. Druhým dílem – protikusem – je díl, který upíná společně s první dílem upíná hotend. Po jeho stranách má prostor pro ventilátory a vedení kabeláže. Dalším dílem je kryt tiskové hlavy, ke kterému jsou pomocí čtyřech šroubů M2x10 SHCS upevněny dva radiální ventilátory 4010, jejichž účelem je chlazení vytlačovaného materiálu (důležité zejména pro převislé části výrobků). K ventilátorům jsou upevněny vzduchové kanály, které jsou navrženy tak, aby v nich nedocházelo k turbulencím a byly tak co nejvíce účinné. Tyto dva díly jsou převzaté z modelu od uživatele @morencyam_223889 na serveru Printables [20]. Třetí ventilátor je upevněn mezi krytem a retainerem. Dva z těchto šroubů procházejí celou tiskovou hlavou a upínají tak samotný hotend.



(a) Z přední strany



(b) Ze zadní strany

Obr. 4.8: Izometrický pohled na tiskovou hlavu [19]

Sonda

Ze zadní strany tiskové hlavy je upevněna sonda sloužící k nastavení referenční polohy v ose Z a kalibraci v ose Z. Sondou použitou na této tiskárně je diferenciální infračervená sonda OrmerodSensor V1.2 IR od společnosti Mellow. Tato sonda byla vybrána z několika podstatných důvodů. Jedním z nich je hmotnost, kterou je potřeba, zejména u SCARA kinematiky, co nejvíce redukovat. Tato sonda váží okolo 3g (výrobce neuvádí přesnou hmotnost). Dalším důvodem byla velikost (23,8 mm x 17,6 mm). Sondu lze upevnit ze zadní strany držáku pod 2. segment ramene a nedochází tak k překročení pracovní teploty a neomezuje výrobní prostor. Dalším kritériem byla kompatibilita s různými povrchy. Například oproti indukční sondě nevyžaduje kovovou tiskovou podložku nebo bed. Oproti mechanickým sondám není kompatibilní se zrcadly, lesklými hliníkovými a PEI podložkami (není reflektivní pro IR záření). Ovšem ani to není limitující, protože zrcadlo lze nahradit sklem, hliníkové podložky často bývají eloxované. Při použití PEI podložky pomůže hrubší povrch nebo obarvení spodní strany matnou černou barvou. Další výhodou je absence mechanických částí, to zvyšuje přesnost a opakovatelnost měření. Pro svoji funkci vyžaduje připojení napájecího napětí VCC 3,3 V nebo 5 V, GND a jeden kabel pro signál. Výrobce udává přesnost senzoru je 0.001 mm. Při detekování podložky ve vzdálenosti 2.5 mm je výstupní pin OUT nastaven na vysokou úroveň, tudíž je jeho rozhraní podobné mechanickým spínačům.

Termistor

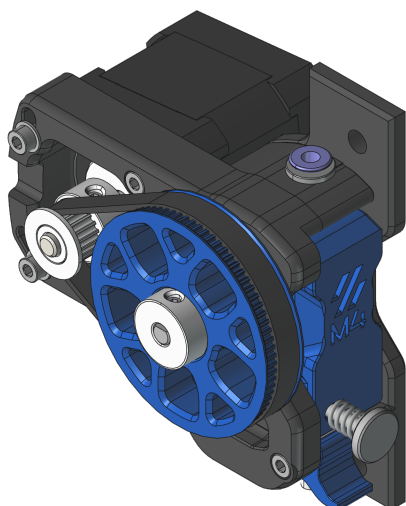
Jako termistor byl zvolen NTC 100K B3950 v pouzdře 3x15 mm. Tento termistor je vhodný po měření teplot od -50 °C až 280 °C, tudíž je vhodný pro tuto aplikaci. Zároveň je tento termistor velice levný (například oproti termočlánku PT100 nebo PT1000).

Hotend

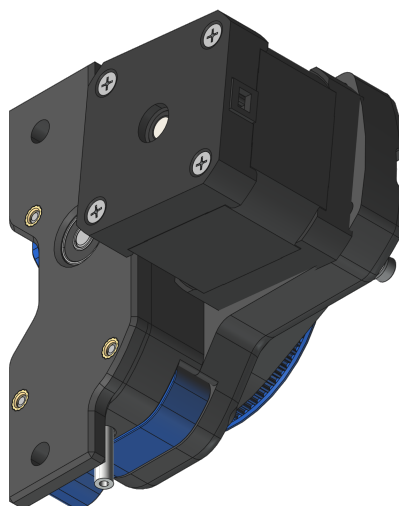
Hotend byl zvolen V6 od společnosti E3D. Jeho předností je nejspíše jeho cena a dostupnost trysek, protože V6 hotend je dnes jedním z nejrozšířenějších hotendů na trhu. V základní konfiguraci se řadí mezi tzv. all-metal hotendy. Jejich výhodou je vyšší teplota tisku než hotendy bez heatbreaku nebo heatbreakem s PTFE vložkou, které umožňují tisk materiálů s teplotou tání do 230°C. Nevýhodou zase může být častější ucpávání trysky vlivem jevu zvaným "heat creep", kdy dochází k ohřívání částí hotendu výše nad topným blokem. To způsobuje. Dnes se vyrábí bi-metalové a keramické heatbreaky, které do jisté míry redukují oba z těchto nedostatků. Dalším jistým nedostatkem je oproti jiným hotendům náchylnost poškození například nárazem do tiskové podložky. Některé hotendy mají upevněný topný blok k chladiči, které mimo vyšší mechanické odolnosti umožňují i jednodušší výměnu trysky a pevné upevnění k tiskové hlavě.

4.1.4 Extruder

Jako extruder byl zvolen VORON M4. Tento extruder je kombinací několika různých projektů VORON komunity, ať už extruderů předchozích generací nebo direct-drive extruderů. Výraznou komponentou tohoto extruderu je řemenice s 80 zuby, která je tištěna na 3D tiskárně. Společně s řemenicí na hřídeli motoru tvoří převodový poměr 4:1, který způsobuje větší točivý moment a tedy dokáže lépe překonat tření filamentu v PTFE trubičce a vytlačovat filament z trysky.



(a) Z přední strany

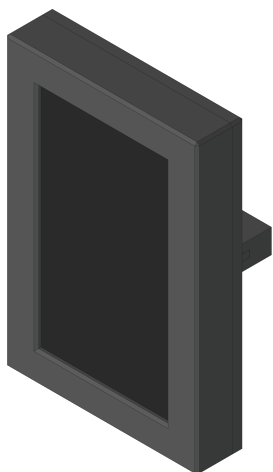


(b) Ze zadní strany

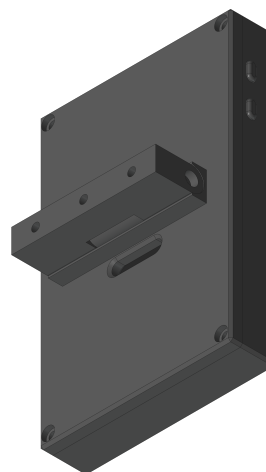
Obr. 4.9: Izometrický pohled na extruder [19]

4.1.5 Display

Kromě webového rozhraní fluidd lze 3D tiskárnu ovládat i pomocí dotykového displeje, kterým byla 3D tiskárna při návrhu vybavena. Displej je připojen k Raspberry Pi pomocí rozhraní, které přenáší nejen obraz, ale i



(a) Z přední strany

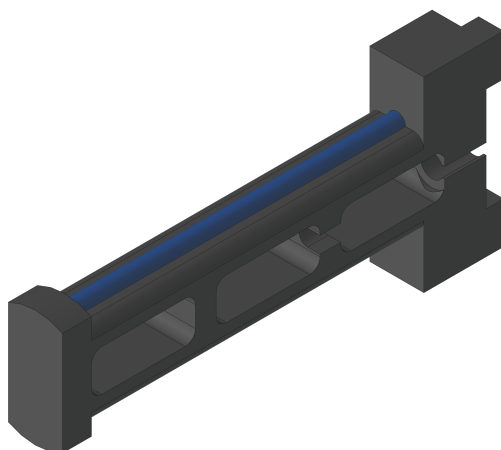


(b) Ze zadní strany

Obr. 4.10: Izometrický pohled na dotykový displej [19]

4.1.6 Držák cívky filamentu

Protože je držák cívky filamentu volitelnou částí tiskárny je uveden samostatně i přesto, že jej tvoří pouze jeden díl. Držák je inspirovaný neoficiálním držákem pro tiskárny VORON. Držák umožňuje použití cívky o šířce maximálně 80 mm. Před upevněním držáku k základně tiskárny se do dílu vkládají PTFE trubičky o vnějším průměru 4 mm, které napomáhají hladkému otáčení cívky, která se nemůže snadno zaseknout. To platí zejména pro kartonové cívky, které velice rychle degradují.



Obr. 4.11: Izometrický pohled na držák cívky s tiskovou strunou [19]

4.1.7 Výroba dílů a konstrukce tiskárny

Tisk

Nastavení tisku ve sliceru vychází z doporučení projektu Voron. Jedná se tedy následující nastavení:

- Výška vrstvy: **0,2mm**
- Šířka extruze: **0,4mm**
- Výplň: **40%**
- Typ výplně: mřížka, **gyroid**, plástev, trojúhelníky nebo kubická
- Počet stěn: **4**
- Plných vrstev: **5 vrchních, 5 spodních**

Doporučenými materiály pro tisk jsou: **ASA**, ABS nebo PETG. Použité nastavení pro tisk je vyznačeno tučně.

Tučně vyznačené jsou nastavení použita při tisku všech dílů této práce.

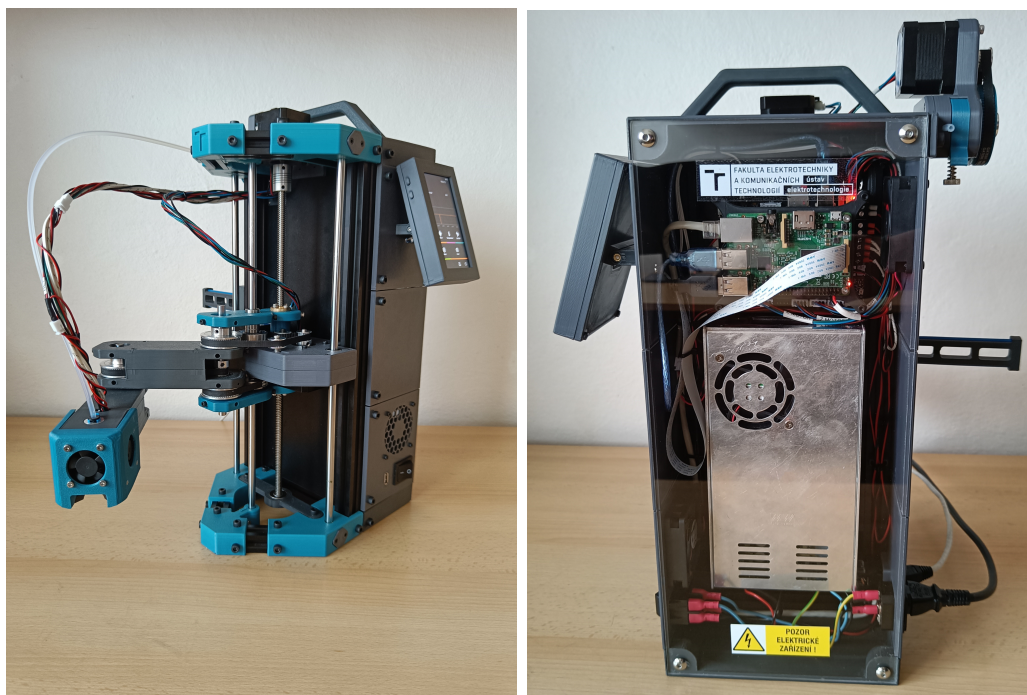
Na tisk dílů byly použity 3 cívky filamentu. Dvě základní – šedé – barvy a jedna doplňkové – modré – barvy. Materiál, ze kterého jsou díly zhotoveny, je ASA (Akrylonitril Styren Akrylát). Tento materiál se svými vlastnostmi velice podobá materiálu ABS (Akrylonitril Butadien Styren). Oproti němu má však lepší chemickou odolnost vůči olejům, kyselinám a dalším látkám. Mezi jeho největší přednost však patří odolnost vůči UV záření (oproti ABS).

Sestavení tiskárny

Prvním krokem ještě před zahájením stavby bylo odmaštění lineárně valivých ložisek od přepravního oleje v lázni s isopropyl alkoholem. Po odmaštění byla tato ložiska namazána mazivem. K tomuto účelu bylo použito plastické mazivo Mobilux EP2 o vizkoskozitě třídy 2 dle NLGI.

Jako první je se začalo s konstrukcí základny. V této části bylo potřeba si dát pozor na včasnou montáž DIN lišt. Nejprve byl smontován rám a poté díly, které kotví vodící tyče. V dalším kroku byl sestaven první segment ramene a na řemenice byl nasazen a napnut řemen. Druhý segment je konstrukčně mnohem jednodušší a nemá žádné pohyblivé části. Ten bylo potřeba nasadit na hřídel a dotáhnout kotvící díl. Poté byla sestavena základna ramene a k ní byly upevněny krokové motory. Poté bylo možné rameno a základnu ramene spojit. V tuto chvíli bylo potřeba přimontovat dělicí panel mezi prostorem tiskárny a skříní s elektronikou. V dalším kroku již bylo možné rameno nasadit na vodící tyče základny a zasunout vodící tyče do protilehlého dílu a vodící tyče ukotvit. Následovala konstrukce a montáž tiskové hlavy.

Následovala výroba kabelů k propojení jednotlivých elektronických komponent. Na řídicí desku byly připojeny drivery a DCDC měnič. Po zapojení elektroniky byly přimontovány krycí panely a celá skříň s elektronikou zakrytována PMMA deskou. Sestavená tiskárna je na obrázku 4.12.



(a) Z přední strany

(b) Ze zadní strany

Obr. 4.12: Fotografie sestavené 3D tiskárny

4.1.8 Kalibrace tiskárny

První kalibraci, která byla po sestavení tiskárny provedena byla kalibrace extruderu. Tato kalibrace se provádí vytlačení určité délky filamentu extruderem a následným porovnáním se skutečně vytlačenou délkou.

M83 ; Nastavení relativní vzdálenosti

G1 E100 F60 ; Vytlačení 100~mm při rychlosti 1~mm/s (60~mm/min)

Poté se nová hodnota vypočítá následujícím způsobem:

$$rotation_distance = rotation_distance * \frac{actual_extruded_length}{target_extruded_length} mm \quad (4.1)$$

Další kalibrací bylo měření rezonančních kmitočtů pomocí akcelerometru ADXL345 a nastavení input shaperu. Využití input shaperu umožňuje redukovat intenzitu rezonancí tak, aby při tisku nedocházelo k tzv. ghostingu. Ten se projevuje zvlněním v blízkosti ostrých hran výtisku. Po upevnění akcelerometru na tiskovou hlavu a nastavení v printer.cfg stačilo spustit následující příkaz:

SHAPER_CALIBRATE ; Spustí test

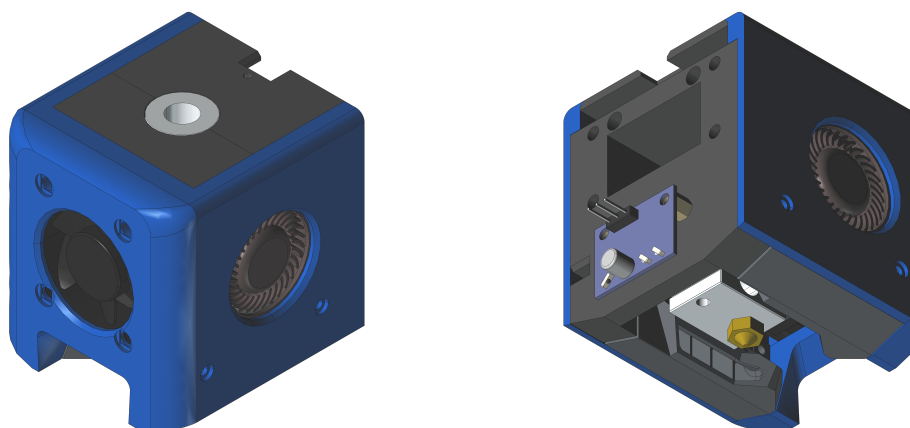
Výsledkem tohoto měření je pro každou z os (X a Y) rezonanční frekvence, doporučený filtr a případně grafy, které lze vygenerovat následujícím způsobem 4.13.

```

$ python3 ~/klipper/scripts/calibrate_shaper.py /tmp/calibration_data.x*.csv -o /tmp/shaper_calibrate.y.png
Fitted shaper 'zv' frequency = 34.8 Hz (vibrations = 38.2%, smoothing == 0.134)
To avoid too much smoothing with 'zv', suggested max_accel <= 4080 mm/sec^2
Fitted shaper 'zv' frequency = 31.2 Hz (vibrations = 16.0%, smoothing == 0.289)
To avoid too much smoothing with 'zv', suggested max_accel <= 2880 mm/sec^2
Fitted shaper 'ei' frequency = 31.8 Hz (vibrations = 11.5%, smoothing == 0.319)
To avoid too much smoothing with 'ei', suggested max_accel <= 1588 mm/sec^2
Fitted shaper 'zhump_ei' frequency = 38.0 Hz (vibrations = 8.3%, smoothing == 0.355)
To avoid too much smoothing with 'zhump_ei', suggested max_accel <= 1588 mm/sec^2
Fitted shaper 'zhump_ei' frequency = 42.8 Hz (vibrations = 8.2%, smoothing == 0.255)
To avoid too much smoothing with 'zhump_ei', suggested max_accel <= 1588 mm/sec^2
Recommended shaper is Zhump_ei @ 38.0 Hz
$ python3 ~/klipper/scripts/calibrate_shaper.py /tmp/calibration_data.y*.csv -o /tmp/shaper_calibrate.y.png
Fitted shaper 'zv' frequency = 67.8 Hz (vibrations = 37.0%, smoothing == 0.048)
To avoid too much smoothing with 'zv', suggested max_accel <= 1780 mm/sec^2
Fitted shaper 'zv' frequency = 48.4 Hz (vibrations = 11.3%, smoothing == 0.125)
To avoid too much smoothing with 'zv', suggested max_accel <= 4080 mm/sec^2
Fitted shaper 'ei' frequency = 57.8 Hz (vibrations = 15.0%, smoothing == 0.093)
To avoid too much smoothing with 'ei', suggested max_accel <= 6188 mm/sec^2
Fitted shaper 'zhump_ei' frequency = 58.2 Hz (vibrations = 8.3%, smoothing == 0.214)
To avoid too much smoothing with 'zhump_ei', suggested max_accel <= 2880 mm/sec^2
Fitted shaper 'zhump_ei' frequency = 48.8 Hz (vibrations = 8.3%, smoothing == 0.356)
To avoid too much smoothing with 'zhump_ei', suggested max_accel <= 1588 mm/sec^2
Recommended shaper is zv @ 48.4 Hz

```

Obr. 4.13: Spuštění skriptu calibrate_shaper.py a výsledné doporučené hodnoty [19]



(a) Z přední strany

(b) Ze zadní strany

Obr. 4.14: Izometrický pohled na tiskovou hlavu [19]

Z grafů 4.14 je patrné

4.1.9 Implementace kinematiky SCARA do Klipperu

Klipper je část firmwaru Klipper, která běží na počítači uvnitř 3D tiskárny, ke kterému je připojena řídicí deska. Kód je napsán převážně v jazyce Python, přičemž některé funkce jsou implementovány v jazyce C. Volání těchto funkcí je realizováno použitím rozhraní CFFI (C Foreign Function Interface). Klippy slouží k interpretaci výrobních instrukcí – GCode, které jsou přeloženy na volání interních metod. Tyto volání jsou odesílány po sběrnici USB do řídicí desky, která například generuje pulzy pro krokové motory nebo spíná topná tělesa. [21]

Přímá a inverzní kinematika

Kinematické transformace se používají k převodu natočení kloubů na souřadnice koncového bodu (přímá transformace) a naopak (inverzní transformace). Pro výpočet transformace je třeba znát délky ramen L_1 a L_2 , offsety ramen x_{offset} a y_{offset} a Elbow Crosstalk Ratio (ECR).

Elbow Crosstalk Ratio (převodový poměr řemenice v ose ramene vůči řemenici v ose kloubu) získáme dosazením počtu zubů řemenice ramene a počtu zubů řemenice v kloubu.

$$ECR = \frac{n_S}{n_E} \quad (4.2)$$

kde n_S je počet zubů řemenice ramene a n_E je počet zubů řemenice v kloubu.

Přímá kinematika

Protože rotace motoru v ose ramene ovlivňuje rotaci motoru v ose kloubu, je třeba tento vliv kompenzovat. Tím dostaneme úhel ϕ_E , který je potřeba pro výpočet skutečné polohy nástroje.

$$\phi_S = \phi_{S_M} \quad (4.3)$$

$$\phi_E = \phi_{E_M} - \frac{\phi_{S_M}}{ECR} \quad (4.4)$$

kde ECR je Elbow Crosstalk Ratio, ϕ_{S_M} je úhel motoru ramene a ϕ_{S_E} je úhel motoru kloubu.

Poté je potřeba vypočítat polohu v kartézském souřadnicovém systému.

$$x = L_1 \cdot \sin(\phi_S) + L_2 \cdot \sin(\phi_S + \phi_E) \quad (4.5)$$

$$y = L_1 \cdot \cos(\phi_S) + L_2 \cdot \cos(\phi_S + \phi_E) \quad (4.6)$$

Nakonec je potřeba přepočítat souřadnice nástroje vůči počátku tiskové podložky na souřadnice vůči počátku tiskárny.

$$x_{raw} = x + x_{offset} \quad (4.7)$$

$$y_{raw} = y + y_{offset} \quad (4.8)$$

Inverzní kinematika

Nejprve je potřeba převést absolutní souřadnice nástroje vůči počátku tiskárny na souřadnice vztažené k počátku tiskové podložky.

$$x = x_{raw} + x_{offset} \quad (4.9)$$

$$y = y_{raw} + y_{offset} \quad (4.10)$$

Dále se vypočítají úhly ramen ϕ_E (elbow) a ϕ_S (shoulder).

$$\phi_E = \arccos \left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 + L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2} \right) [\text{rad}] \quad (4.11)$$

kde x a y jsou souřadnice v kartézském systému a L_1 a L_2 jsou délky ramen.

$$\phi_S = \arctan2(x, y) - \arccos(L_2 \cdot \sin(\phi_E), L_1 + L_2 \cdot \cos(\phi_E)) [\text{rad}] \quad (4.12)$$

kde x a y jsou souřadnice v kartézském systému a L_1 a L_2 jsou délky ramen.

V poslední řadě je potřeba vykompenzovat ECR (Elbow Crosstalk Ratio). Tím získáme úhel krokových motorů ϕ_{S_M} a ϕ_{E_M} .

$$\phi_{S_M} = \phi_S \quad (4.13)$$

$$\phi_{E_M} = \phi_E + \frac{\phi_S}{ECR} [\text{rad}] \quad (4.14)$$

Závěr

V rámci teoretické části této bakalářské práce se autor zabýval 3D tiskem, přednostmi 3D tisku a vysvětlil základní principy technologie FFF. Důležitým tématem teoretické části bylo srovnání různých kinematik používaných v oblasti 3D tisku. Autor porovnal jejich výhody a nevýhody.

Tato práce se však věnuje návrhu a konstrukci 3D tiskárny s uspořádáním SCARA. Autor popsal použité komponenty a odůvodnil jejich výběr.

Autor navrhl všechny díly, ze kterých je tiskárna zkonstruována. Výjimku tvoří pouze extruder a vzduchové kanály pro chlazení dílu. Při návrhu autor vycházel z mechanismu použitého u tiskárny x-scara [18].

Za cíl si kladl její vylepšení. Tato vylepšení spočívala v tom, že navrhne skříň s elektronikou v zadní části tiskárny, která bude zakrytovaná a nebude tak přístupná dotyku. Zároveň umožní montáž jednotlivých komponent přímo k tiskárně. To umožní společně s madlem její snadný transport v případě potřeby. Dalším hlediskem je i design tiskárny. Autor při návrhu dílů dbal na to, aby byl design tiskárny co nejvíce elegantní. Protože se jedná o experimentální kinematiku autor zvolil průhledný kryt skříně s elektronikou tak, aby byly vidět všechny komponenty a zároveň jejich vzájemné zapojení.

Po konstrukci tiskárny autor nainstaloval operační systém Debian na jednodeskový počítač Raspberry Pi 2b, nainstaloval firmware Klipper a další softwarové komponenty potřebné k řízení a ovládání tiskárny.

V další části práce se autor věnoval dalšímu důležitému cíli práce – implementace kinematiky do firmware. Implementace zahrnovala implementaci inverzní kinematiky v jazyce C a implementaci přímé kinematiky v jazyce python.

Posledním krokem bylo otestování správné implementace kinematiky ve firmwaru, nastavení tiskárny, kalibrace kroků extruderu, PID kalibrace topného tělesa hotendu. Autor také provedl měření rezonančních frekvencí pomocí akcelerometru.

Literatura

- [1] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; aj.: The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, ročník 69, 2015: s. 65–89, ISSN 0010-4485, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448515000469>
- [2] Formlabs: Guide to Watertight 3D Printing. [cit. 2025-1-4].
URL <https://formlabs.com/eu/blog/watertight-3d-printing/>
- [3] MCAE Systems: FFF - Technologie aditivní výroby. [cit. 2025-1-5].
URL <https://www.mcae.cz/technologie/fff/>
- [4] Strítěský, O.: *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research, 2019.
- [5] Choudhary, M.; Mukherjee, S.; Kumar, P.: Analysis and optimization of geometry of 3D printer part cooling fan duct. *Materials Today: Proceedings*, ročník 50, 2022: s. 2482–2487, ISSN 2214-7853, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.444>, 2nd International Conference on Functional Material, Manufacturing and Performances (ICFMMP-2021).
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321069534>
- [6] Materialpro3D: Typy povrchů tiskové podložky. 2021, [cit. 2025-1-5].
URL <https://www.materialpro3d.cz/blog/typy-povrchu-tiskove-podlozky/>
- [7] Kolíbal, Z.: *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTĚ, první vydání. vydání, 2016, ISBN 978-80-214-4828-5.
- [8] Kašćak, J.; Kočíško, M.; Vodilka, A.; aj.: Adhesion Testing Device for 3D Printed Objects on Diverse Printing Bed Materials: Design and Evaluation. *Applied Sciences*, ročník 14, č. 2, 2024, ISSN 2076-3417, doi:10.3390/app14020945.
URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/2/945>
- [9] Danger Klipper: Kompenzace rezonance. [cit. 2025-1-5].
URL https://dangerklipper.io/Resonance_Compensation.html
- [10] Rouzeau, P.: Halenia CoreXY printer. 2016, [cit. 2025-1-6].
URL <https://github.com/PRouzeau/Halenia-CoreXY-printer/>

- [11] ALEDAN 3D Research Lab: CoreXZ – Theory. 2018, [cit. 2025-1-5].
URL <https://www.corexz.com/theory.html>
- [12] O’Connell, J.: Cartesian, Delta, Polar, and More: Types of 3D Printer Mechanics. 2023, [cit. 2025-1-5].
URL <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
- [13] Creality: CR-30 3D Printer. [cit. 2025-1-6].
URL <https://www.creality.com/products/creality-cr-30-3d-printer>
- [14] 3DsvetEU: 3DBuilder DELTA XXL 3D printer by 3Dsvet.eu. 2017, [cit. 2025-1-5].
URL <https://www.thingiverse.com/thing:2571355>
- [15] guicol: Received a ton of constructive criticism on my crude polar-3D Printer design. Redesigned it with improvements. 2023, [cit. 2025-1-4].
URL https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/16dsugh/received_a_ton_of_constructive_criticism_on_my/
- [16] Harley, Q.: RepRap Morgan. 2016, [cit. 2025-1-6].
URL https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan
- [17] The FreeCAD Team: About FreeCAD – FreeCAD Documentation. 2013.
URL https://wiki.freeecad.org/About_FreeCAD
- [18] Mircescu, A.: x-scara. 2020, [cit. 2025-1-5].
URL <https://github.com/madl3x/x-scara>
- [19] The FreeCAD Team: FreeCAD. software, 2002, [cit. 2025-1-6].
- [20] morencyam: Mini StealthBurner E3D v6 Bowden - Rook. 2023, [cit. 2025-6-2].
URL <https://www.printables.com/model/515195-mini-stealthburner-e3d-v6-bowden-rook>
- [21] Klipper 3D: Klipper Code Overview. 2023, [cit. 2025-1-5].
URL https://www.klipper3d.org/Code_Overview.html

Seznam symbolů a zkratek

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene – Akrylonitril-butadien-styren
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate – Arylonitril-styren-akrylát
DPS/PCB	Printed Circuit Board – Deska plošných spojů
FFF	Fused Filament Fabrication – Modelování tavným nanášením
IMS	Insulated Metal Substrate – Izolovaná deska plošných spojů s kovovým substrátem
MCPCB	Metal Core PCB – Deska plošných spojů s kovovým jádrem
MCU	Microcontroller Unit – Mikrokontrolér
RPC	Remote Procedure Call – Vzdálené volání procedur
PEI	Polyetherimide – Polyetherimid
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol – Polyethylentereftalát-glykol
PTFE	Polytetrafluoroethylene – Polytetrafluorethylen
PMMA	Polymethylmethacrylate – Polymethylmethakrylát
PLA	Polylactic Acid – Kyselina polymléčná
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SLA	Stereolithography – Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering – Selektivní spékání laserem
TCP	Tool Center Point – Poloha koncového bodu

Seznam příloh

A	Soupisy	45
A.1	Soupis materiálu	45
A.2	Soupis dílů	47
B	Obsah elektronické přílohy	49

A Soupisy

A.1 Soupis materiálu

Položka	Množství
Hliníkový profil eloxovaný 20x40 400mm	2 ks
Hliníkový profil eloxovaný 20x20 130mm	2 ks
Hliníkový profil eloxovaný 20x20 60mm	8 ks
Vodící tyč 8mm 400mm	3 ks
Trapézová tyč Tr8/2 350 mm	2 ks
T-Nut Tr8/2	2 ks
T-Nut 2020 M5	50 ks
Závitová vložka M3x5x4	150 ks
Závitová vložka M2x3x2	4 ks
Závitová vložka M5x7x8	4 ks
Šroub M5x10 BHCS (ISO 7380)	4 ks
Šroub M5x10 SHCS (ISO 4762)/BHCS (ISO 7380)	60 ks
Šroub M3x10 SHCS (ISO 4762)	85 ks
Šroub M3x12 SHCS (ISO 4762)	36 ks
Šroub M3x16 SHCS (ISO 4762)	20 ks
Šroub M3x20 SHCS (ISO 4762)	14 ks
Šroub M3x30 SHCS (ISO 4762)	14 ks
Šroub M3x55 SHCS (ISO 4762)	3 ks
Šroub M2x10 SHCS (ISO 4762)	4 ks
Flexible Shaft Coupling 8x5 mm	1 ks
Ocelová tyč 8 mm 40 mm	1 ks
Ocelová tyč 8 mm 60 mm	1 ks
Ocelová tyč 8 mm 80 mm	1 ks
Lineárně valivé ložisko LM8UU	4 ks
Lineárně valivé ložisko LM8LUU	1 ks
Radiální kuličkové ložisko 623 (OD10/ID3/T4)	6 ks
Radiální kuličkové ložisko 6002 (OD32/ID15/T9)	2 ks
Radiální kuličkové ložisko 608 (OD22/ID8/T7)	6 ks
2GT 280 mm uzavřený řemen (6mm)	3 ks
2GT ID 5 mm kladka 20 zubů	2 ks
2GT ID 8 mm kladka 20 zubů	1 ks
2GT ID 3 mm napínací kladka 20 zubů	2 ks
2GT ID 3 mm napínací kladka bez zubů	2 ks

2GT ID 8 mm kladka 60 zubů	3 ks
Termistor NTC 100k B3950	1 ks
Řídící deska BTT SKR 1.4	1 ks
Driver BTT TMC2209	4 ks
Displej BTT PiTFT43	1 ks
Motor krokový NEMA17 (extruder)	1 ks
Motor krokový NEMA17 (osy)	3 ks
Zdroj 12V 25A	1 ks
Ventilátor 3010	1 ks
Ventilátor 4010	2 ks
Topné těleso 12V 50W	1 ks
Hotend E3D V6	1 ks
Skleněná trubičková pojistka 2,5 A	2 ks
Kabel CYA 0,75 mm ² světle modrý	1 m
Kabel CYA 0,75 mm ² černý	1 m
Kabel CYA 0,75 mm ² zelenožlutý	1 m
Kabel UL1332 0.34 mm ² červený	10 m
Kabel UL1332 0.34 mm ² černý	10 m
Kabel UL1332 0.34 mm ² zelený	10 m
Kabel UL1332 0.34 mm ² modrý	10 m
Kabel UL1332 0.75 mm ² červený	10 m
Kabel UL1332 0.75 mm ² černý	10 m
Kabel UTP Cat5E	1 m
Konektor s pojistkou (IEC 60320 C13)	1 ks
Kolébkový vypínač	1 ks
Keystone RJ45 Cat5E	1 ks
Konektor RJ45 Cat5E	1 ks
Konektor JST XH2.5 F (2pin)	7 ks
Konektor JST XH2.5 M (2pin)	4 ks
Konektor JST XH2.5 F (3pin)	1 ks
Konektor JST XH2.5 F (4pin)	4 ks
Konektor JST XH2.5 F (6pin)	4 ks
Konektor DuPont 2.54mm F (1pin)	1 ks
Konektor DuPont 2.54mm F (2pin)	1 ks
Konektor DuPont 2.54mm F (3pin)	1 ks
Faston RF-F 608P	4 ks
Faston RF-F 408P	3 ks
Dutinky 0,5 mm ²	8 ks
Vidlice kabelová 0,75 mm ²	5 ks

Ventilátor 60x60x15 mm	2 ks
Distanční sloupek M3 (4mm)	10 ks
Distanční sloupek M3 (25mm)	4 ks
DIN lišta TS 35X7.5 1M/ST/ZN	1 ks
MicroSD karta (RPI + MCU)	2 ks
Nylonová struna	2 m
PTFE trubička (OD 4mm ID 2mm)	1 m
ASA 850g šedá	2 ks
ASA 850g modrá	1 ks
VORON M4 kit	1 ks

A.2 Soupis dílů

Část	Označení	Počet	Barva
Ramenno	Arm_Base_Bottom	1	Šedá
	Arm_Base_Hub_Bottom	1	Modrá
	Arm_Base_Hub_Top	1	Modrá
	Arm_Base_Mount	2	Modrá
	Arm_Base_Top	1	Šedá
	Arm_Elbow_Bottom	1	Šedá
	Arm_Elbow_Hub	1	Modrá
	Arm_Elbow_Top	1	Šedá
	Arm_Shoulder_Bottom	1	Šedá
	Arm_Shoulder_Top	1	Šedá
Základna	Base_Bearing_Holder	1	Šedá
	Base_Electronics_Mount_MCU	1	Šedá
	Base_Electronics_Mount_PSU	1	Šedá
	Base_Electronics_Mount_RPI	1	Šedá
	Base_Electronics_USB_Connector	2	Šedá
	Base_Handle	1	Šedá
	Base_Joint_Bottom_Left	1	Modrá
	Base_Joint_Bottom_Right	1	Modrá
	Base_Joint_Clamp	4	Šedá
	Base_Joint_Tip_Bottom	1	Modrá
	Base_Joint_Tip_Top	1	Modrá
	Base_Joint_Top_Left	1	Modrá
	Base_Joint_Top_Right	1	Modrá
	Base_Motor_Mount	1	Šedá

	Base_Panel_Blank	2	Šedá
	Base_Panel_Bottom	1	Šedá
	Base_Panel_Connectors	1	Šedá
	Base_Panel_Display	1	Šedá
	Base_Panel_Fan&Switch	1	Šedá
	Base_Panel_Fan	1	Šedá
	Base_Panel_Top	1	Šedá
	Base_Separator_Cable_Passthrough_Cap	1	Šedá
	Base_Separator_Cable_Passthrough	1	Šedá
	Base_Separator_Mount_Top	1	Šedá
	Electronics_DIN_Rail_Holder	6	Šedá
Displej	Display_Case_Back	1	Šedá
	Display_Case_Frame_Button	2	Šedá
	Display_Case_Frame	1	Šedá
	Display_Hinge_Panel_Lock	1	Šedá
	Display_Hinge_Panel	1	Šedá
Extruder	Extruder_End_Plate_Modified	1	Šedá
Držák cívky	Spool_Holder	1	Šedá
Tisková hlava	Toolhead_Cover	1	Šedá
	Toolhead_Duct_4010_Left	1	Šedá
	Toolhead_Duct_4010_Right	1	Šedá
	Toolhead_Mount	1	Šedá
	Toolhead_Retainer	1	Šedá

Pro konstrukci celé tiskárny jsou potřeba i díly extruderu VORON M4.

B Obsah elektronické přílohy

- `debian-config` - Nastavení operačního systému mikropočítače
- `klipper` - Nové nebo upravené soubory potřebné k implementaci SCARA kinematiky do firmwaru Klipper
- `klipper-config` - Nastavení tiskárny
- `prusaslicer-config-bundle` - Profil tiskárny pro PrusaSlicer
- `step` - Soubory ve formátu STEP
- `vykresova-dokumentace` - Výkresová dokumentace dílů