



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

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Batelka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2024



Semestrální 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 provedte výběr komponentů, pro budoucí stavbu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího semestrální práce.

Termín zadání: 16.9.2024

Termín odevzdání: 7.1.2025

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

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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	15
1 Aditivní výroba a 3D tisk	17
1.1 Technologie FFF	18
2 Části 3D tiskárny	19
2.1 Tisková hlava	19
2.2 Tisková podložka	21
2.3 Rám	21
2.4 Krokové motory	22
2.5 Řídící deska	22
3 Kinematika	23
3.1 Rektilineární	23
3.1.1 Cantilever	23
3.1.2 Gantry	23
3.1.3 CoreXY	24
3.1.4 CoreXZ	24
3.2 Delta	25
3.3 Polar	25
3.4 SCARA	26
3.4.1 Morgan SCARA	27
3.5 Belt	27
4 Praktická část	29
4.1 3D model	29
4.1.1 Základna	29
4.1.2 Skříň s elektronikou	30
4.2 Tisk	31
4.3 Implementace kinematiky SCARA do Klippy	31
4.3.1 Přímá a inverzní kinematika	32
4.4 Konfigurace tiskárny	34
4.5 Kalibrace tiskárny	34
Závěr	35
Literatura	37
Seznam symbolů a zkratk	39

Seznam příloh	41
A Skripty	43
A.1 Skript pro generování 3MF souborů pro slicování	43

Seznam obrázků

1.1	Technologie FFF	18
1.2	Technologie SLA	18
1.3	Technologie SLS	18
2.1	Detailní pohled na tiskovou hlavu s přímým extruderem (direct-drive): (1) PTFE trubička, (2) Pasivní chladič (heatsink), (3) Ventilátor pro chlazení materiálu (part fan), (4) Ventilátor k chlazení extruderu, (5) Tepelný izolátor (heat break), (6) Topný blok (heat block) [14]	19
2.2	Detailní pohled na depozici vrstvy: (a) s ventilátorem pro chlazení materiálu a (b) bez ventilátoru [2]	20
3.1	Rektilineární kinematiky 3D tiskáren	23
3.2	Příklad tiskárny s kinematikou delta (3DBuilder DELTA XXL) (přev- zato a upraveno z [1])	25
3.3	Koncept tiskárny s polární kinematikou (převzato z [12])	26
3.4	Koncept tiskárny s polární kinematikou (převzato a upraveno z [6]) . .	27
4.1	Náhled konstrukce základny v programu FreeCAD (v zadní části zá- kladny je umístěna skříň s elektronikou)	30
4.2	Náhled konstrukce skříně s elektronikou v programu FreeCAD (po- hled ze stran)	30
4.3	Náhled konstrukce skříně s elektronikou v programu FreeCAD	31

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 před tím 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.

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.

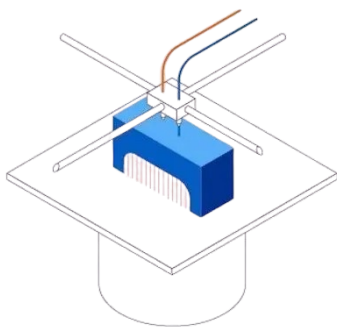
V porovnání s využitím subtraktivní výroby, má aditivní výroba řadu výhod. Velkou výhodou aditivního výrobního procesu je **flexibilita při návrhu a výrobě** komplexních tvarů, které by byly obtížně nebo vůbec nevyrobitelné konvenčními technologiemi. Při použití subtraktivních procesů jsou limitujícími 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. [5]

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.

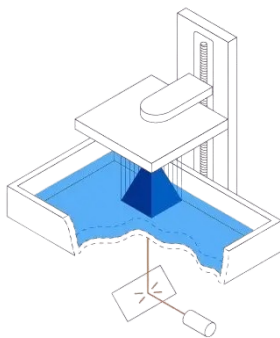
Velkou výhodou pak je **konstantní cena při výrobě dílů s komplexní geometrií**. Cena výroby u aditivní výroby není závislá na složitosti geometrie dílu, ale pouze na množství a typu materiálu použitého k výrobě a době tisku, resp. spotřebě elektrické energie.[5]

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. [5]

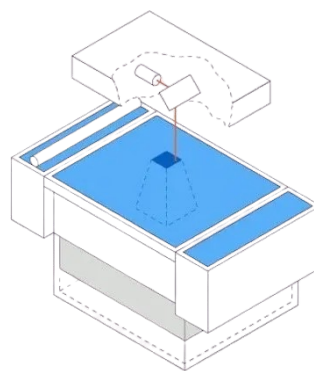
Limitací 3D tisku může být právě geometrická přesnost a omezená kvalita povrchu, která je navíc ovlivněna metodou výroby (tj. FFF, SLA, SLS, ...). 3D tiskárny využívají zejména k výrobě dílů o rozměrech v řádu několika milimetrů až desítek centimetrů a jejich tolerance se pohybuje v rámci několika desetin až setin milimetru. [5]



Obr. 1.1: Technologie FFF



Obr. 1.2: Technologie SLA



Obr. 1.3: Technologie SLS

1.1 Technologie FFF

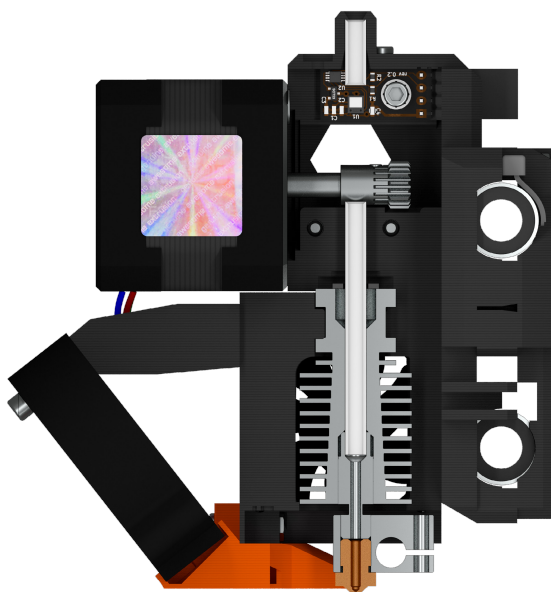
FFF (Fused Filament Fabrication) je zejména z důvodu nízké pořizovací ceny stroje i materiálu jednou z nejrozšířenějších technologií aditivní výroby. Tato technologie využívá plastové polymery, které mohou obsahovat příměsi jiných materiálů ve formě vláken nebo práškové příměsi. Tento materiál je prodáván ve formě tiskových strun o průměru 1,75 mm nebo 2,85 mm navinutých na cívku. Tato struna je odvíjena extruderem a vytlačena rozežřátou 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 vyhřívána, což zabraňuje deformaci tiskového výrobku a jeho případné oddělení od tiskové plochy. [15]

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. [14]

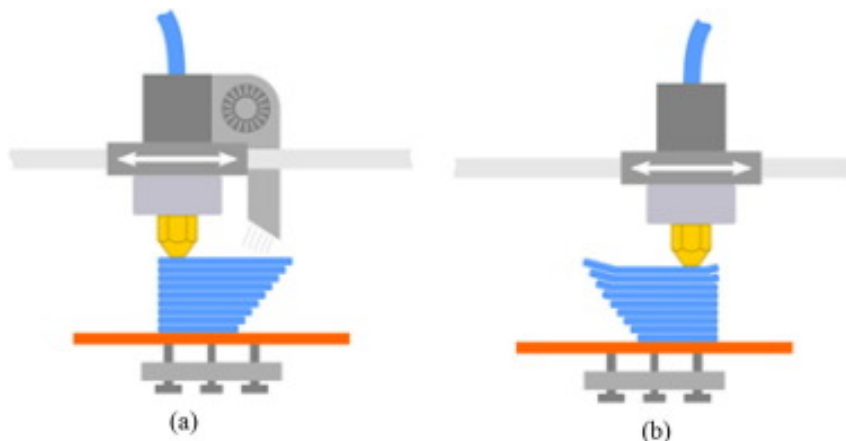


Obr. 2.1: Detailní pohled na tiskovou hlavu s přímým extruderem (direct-drive):

(1) PTFE trubička, (2) Pasivní chladič (heatsink), (3) Ventilátor pro chlazení materiálu (part fan), (4) Ventilátor k chlazení extruderu, (5) Tepelný izolátor (heat break), (6) Topný blok (heat block) [14]

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 podpůrných struktur. [2]



Obr. 2.2: Detailní pohled na depozici vrstvy: (a) s ventilátorem pro chlazení materiálu a (b) bez ventilátoru [2]

Direct-Drive extruder Extrudery typu direct-drive jsou integrovány v tiskové hlavě a tedy do něho strunu vtlačuje přímo. Oproti bowden extruderu má pak výhodu vytlačování přesnějšího množství materiálu. To je zapříčiněno 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 zapříčiňuje 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 neabsorbuje 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. [10] Dalšími poměrně rozšířenými povrchy jsou různé lepicí pásy. 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. [9]

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

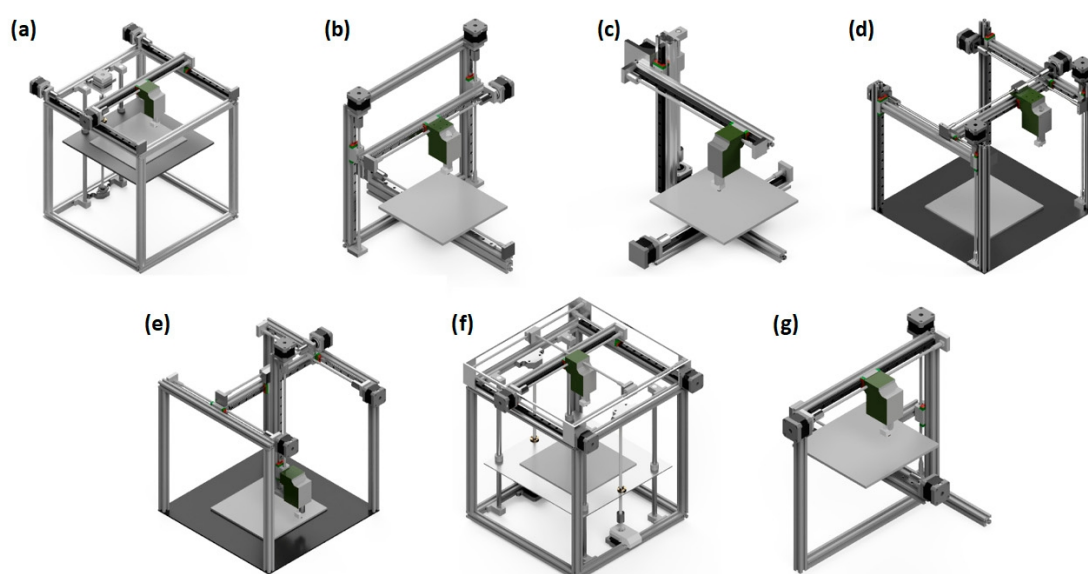
Slouží k propojení zdroje, všech elektricky řízených součástí a senzorů tiskárny. Slouží k napájení vyhřívané podložky (v případě použití vyhřívané podložky napájené síťovým napětím 230V 50Hz pouze řídí spínání relé). Dále se k ní připojují krokové motory a jejich drivery, nejsou-li integrované na řídící 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 BGCode – 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

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

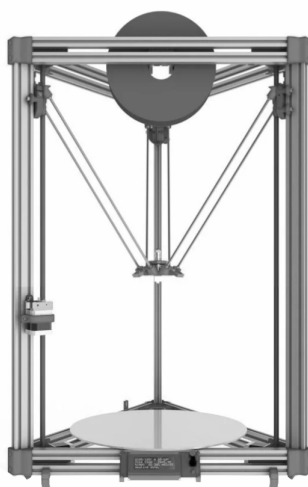
Tato kinematika se velice podobá uspořádání gantry. Rozdílem oproti tomuto upořádání je skutečnost, že pohyb v osách X a Y se zajišťují oba motory společně. Motory v ose z Z tak nemusí pohybovat portálem, ke kterému je upevněný motor pro osu X, který by tak přidával portálu na hmotnosti. Tato kinematika 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. [7]

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. [3]

3.2 Delta

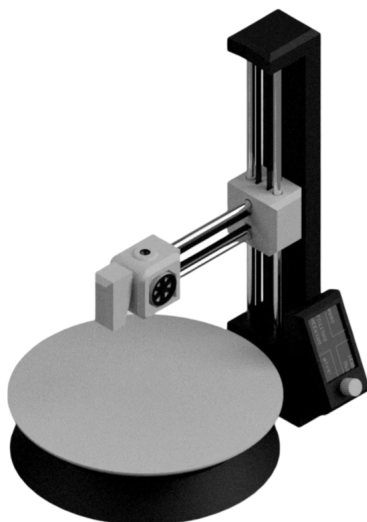
3D tiskárny s delta kinematikou též používají kartézský systém souřadnic, ale svojí konstrukcí se od ostatních rektilineárních tiskáren velice liší. V posledních letech se stávají cenově dostupnější a tedy i rozšířenější. Uspořádání delta má stacionární tiskovou podložku a v pohybu ve všech třech osách 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. [13]



Obr. 3.2: Příklad tiskárny s kinematikou delta (3DBuilder DELTA XXL) (převzato a upraveno z [1])

3.3 Polar

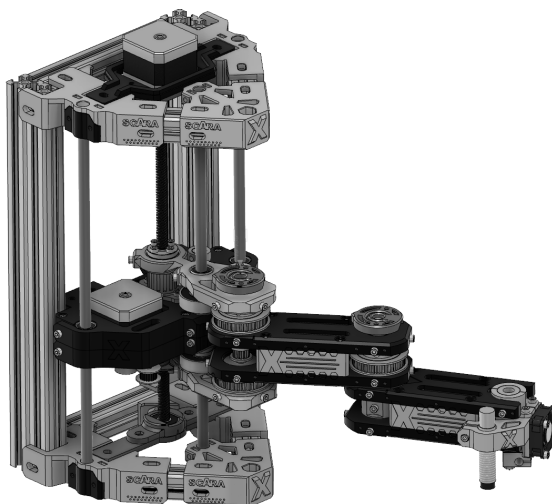
Toto uspořádání jak jedinné nevyužívá kartézských souřadnic, ale souřadnic polárních. Souřadnice jsou definovány vzdáleností od počátku, vzdáleností od počátku a úhel od zvolené osy ležící v rovině. Polární 3D tiskárny používají pro pohyb v polární rovině rotující tiskovou podložku, se kterou otáčí krokový 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. [13]



Obr. 3.3: Koncept tiskárny s polární kinematikou (převzato z [12])

3.4 SCARA

Kinematika SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) je v oblasti 3D tisku používána 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. [13]



Obr. 3.4: Koncept tiskárn s polární kinematikou (převzato a upraveno z [6])

3.4.1 Morgan SCARA

3.5 Belt

4 Praktická část

4.1 3D model

Pro modelování dílů jsem se rozhodl použít CAD software FreeCAD. Pro tento CAD jsem se rozhodl 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 jej rozšiřovat pomocí zásuvných modulů (pluginů). FreeCAD též umožňuje psaní vlastních skriptů v jazyce Python a nahrávání vlastních maker. [4]

Můj návrh tiskárny vychází z projektu x-scara [11]. Ve svém návrhu jsem použil 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.

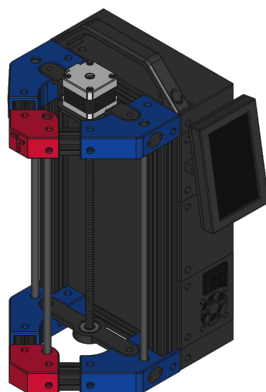
Model je rozdělen do tří dílčích částí. První je základna, druhou skříň s elektronikou, třetí je rameno a čtvrtou je nástroj – tisková hlava.

Soubory ve formátu FCStd (zdrojové soubory modelů) jsou organizovány podle části, do které spadají. Pro generování tiskových souborů ve formátu 3MF (3D Manufacturing Format) 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 3mf a soubory, které obsahuje.

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.

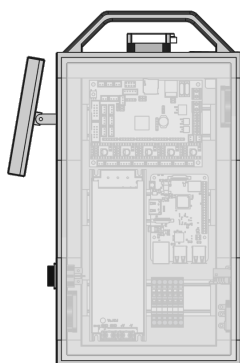
Pro spojení hliníkových profilů jsem zvolil metodu "Blind Joint", která umožňuje pevné spojení dvou hliníkových profilů. Tuto techniku jsem zvolil i z důvodů snadnější montáže akrylové desky a možnosti zapuštění elektroniky do rámu tiskárny.



Obr. 4.1: Náhled konstrukce základny v programu FreeCAD (v zadní části základny je umístěna skříň s elektronikou)

4.1.2 Skříň s elektronikou

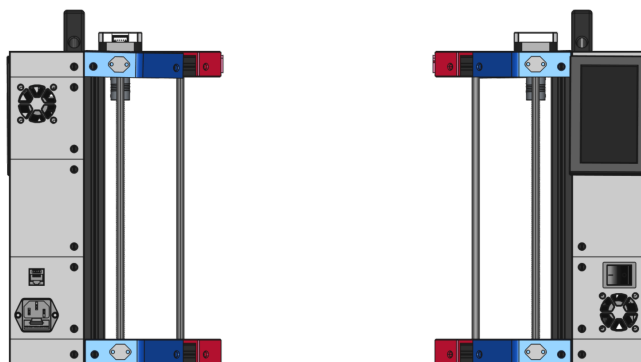
V zadní části základny je umístěna skříň s elektronickými komponentami tiskárny. Ta je od prostoru tiskárny oddělena akrylovou deskou, která je upevněna přítlačkem DIN lišt. Pro upevnění elektronických komponent slouží tři DIN lišty upevněné z vnitřní části bočních hliníkových profilů. Elektronika je 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.



Obr. 4.2: Náhled konstrukce skříně s elektronikou v programu FreeCAD (pohled ze stran)

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 M3x60. V přední části se také nachází kolébkový spínač pro spínání napájení celé tiskárny. Pod spínačem 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. Pod ním se ještě nachází napájecí konektor IEC 60320 C14 s tavnou pojistkou.



Obr. 4.3: Náhled konstrukce skříně s elektronikou v programu FreeCAD

4.2 Tisk

Nastavení sliceru vychází z nastavení 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 kubický
- Počet stěn: **4**
- Plných vrstev: **5 vrchních, 5 spodních**

4.3 Implementace kinematiky SCARA do Klippy

Klippy 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. [8]

4.3.1 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 n_S a počtu zubů řemenice v kloubu n_E .

$$ECR = \frac{n_S}{n_E} \quad (4.1)$$

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. Pro výpočet známe úhel motoru ramene Φ_{S_M} a úhel motoru kloubu Φ_{S_E} .

$$\Phi_S = \Phi_{S_M} \quad (4.2)$$

$$\Phi_E = \Phi_{E_M} - \frac{\Phi_{S_M}}{ECR} \quad (4.3)$$

Pro další výpočty potřeba převést úhly motorů Φ_{S_M} (shoulder) a Φ_E (elbow) na radiány, protože goniometrické funkce v knihovně `math` programovacího jazyka Python pracuje s úhly v radiánech. V kódu pak lze pro převod použít metodu `math.radians()`.

$$\phi_S = \Phi_S \cdot \frac{\pi}{180} [\text{rad}] \quad (4.4)$$

$$\phi_E = \Phi_E \cdot \frac{\pi}{180} [\text{rad}] \quad (4.5)$$

Poté je potřeba přičíst odsazení souřadného systému nástroje vůči souřadnému systému báze (konkrétně odsazení kloubu ramene vůči počátku tiskové podložky).

$$x = \sin(\phi_S) \cdot L_1 + \sin(\phi_S + \phi_E) \cdot L_2 \quad (4.6)$$

$$y = \cos(\phi_S) \cdot L_1 + \cos(\phi_S + \phi_E) \cdot L_2 \quad (4.7)$$

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

$$x_{raw} = -x + x_{offset} \quad (4.8)$$

$$y_{raw} = y + y_{offset} \quad (4.9)$$

Inverzní kinematika

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

$$x = -(x_{raw} - x_{offset}) \quad (4.10)$$

$$y = (y_{raw} - y_{offset}) \quad (4.11)$$

Dalším krokem je výpočet vzdálenosti od počátku.

$$hypot = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.12)$$

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

$$\phi_S = \arctan2(x, y) - \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot hypot}\right) [\text{rad}] \quad (4.13)$$

kde L_1 a L_2 jsou délky ramen.

$$\phi_E = \frac{\phi_S}{ECR} + \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 + L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right) [\text{rad}] \quad (4.14)$$

kde ECR je Elbow Crosstalk Ratio, L_1 a L_2 jsou délky ramen.

Následně stačí převést úhel v radiánech na stupně.

$$\Phi_S = \phi_S \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad (4.15)$$

$$\Phi_E = \phi_E \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad (4.16)$$

4.4 Konfigurace tiskárny

4.5 Kalibrace tiskárny

Závěr

V rámci semestrální práce jsem se v teoretické části věnoval principům a výhodám aditivních výrobních procesů, konstrukci 3D tiskáren a jejich komponentám. V praktické části jsem se zabýval návrhem základny a skříně s elektronikou. Také jsem vytvořil skript, který generuje automaticky tiskové soubory ve formátu 3MF (3D Manufacturing Format) vhodné pro slicer. Dále jsem se věnoval nastavení sliceru a implementaci kinematiky SCARA do firmware Klipper.

V bakalářské práci se budu věnovat návrhu ramene, tiskové hlavy a vyhřívané podložky. Dále implementuji kinematiku SCARA do firmware Klipper a nakonec tiskárnu sestavím, zkalibruji a otestuji.

Literatura

- [1] 3DsvetEU: 3DBuilder DELTA XXL 3D printer by 3Dsvet.eu. 2017, [Citováno 2025-1-5].
URL <https://www.thingiverse.com/thing:2571355>
- [2] 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>
- [3] CoreXZ: CoreXZ – Theory. 2018, [Citováno 2025-1-5].
URL <https://www.corexz.com/theory.html>
- [4] FreeCAD: About FreeCAD – FreeCAD Documentation. 2013.
URL https://wiki.freecad.org/About_FreeCAD
- [5] 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>
- [6] guicol: Received a ton of constructive criticism on my crude polar-3D Printer design. Redesigned it with improvements. 2023, [Citováno 2025-1-4].
URL https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/16dsugh/received_a_ton_of_con
- [7] Klipper, D.: Kompenzace rezonance. n.d., [Citováno 2025-1-5].
URL https://dangerklipper.io/Resonance_Compensation.html
- [8] Klipper 3D: Klipper Code Overview. 2023, [Citováno 2025-1-5].
URL https://www.klipper3d.org/Code_Overview.html
- [9] Kolíbal, Z.: *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, první vydání. vydání, 2016, ISBN 978-80-214-4828-5.
- [10] Materialpro3D: Typy povrchů tiskové podložky. 2021, [Citováno 2025-1-5].
URL <https://www.materialpro3d.cz/blog/typy-povrchu-tiskove-podlozky/>
- [11] Mircescu, A.: x-scara. 2020, [Citováno 2025-1-5].
URL <https://github.com/madl3x/x-scara>

- [12] Mircescu, A.: XSCARA V1 - Complete Assembly STEP files. 2021, [Citováno 2025-1-6].
URL <https://cults3d.com/en/3d-model/various/xscara-v1-complete-assembly-step-files/>
- [13] O'Connell, J.: Cartesian, Delta, Polar, and More: Types of 3D Printer Mechanics. 2023, [Citováno 2025-1-5].
URL <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
- [14] Stříteský, O.: *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research, 2019.
- [15] Systems, M.: FFF - Technologie aditivní výroby. n.d., [Citováno 2025-1-5].
URL <https://www.mcae.cz/technologie/fff/>

Seznam symbolů a zkratek

TCP	poloha koncového bodu – Tool Center Point
FFF	Fused Filament Fabrication
SLS	Selektivní spékání laserem – Selective Laser Sintering
SLA	Stereolitografie – Stereolithography
PEI	Polyetherimid
DPS/PCB	Deska plošných spojů – Printed Circuit Board
MCPCB	Metal Core PCB
IMS	Insulated Metal Substrate
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm

Seznam příloh

A Skripty	43
A.1 Skript pro generování 3MF souborů pro slicování	43

A Skripty

A.1 Skript pro generování 3MF souborů pro slicování

```
1  #!/usr/bin/freecadcmd
2
3  import os
4  import FreeCAD as App # type: ignore
5  import Mesh # type: ignore
6
7  # Define the project root directory
8  project_root = os.path.abspath(
9      os.path.join(os.path.dirname(os.path.realpath(__file__)), os.pardir)
10 )
11
12 # Define the directories for CAD files and 3MF export files
13 printed_cad_dir = os.path.join(project_root, "cad", "printed")
14 printed_3mf_dir = os.path.join(project_root, "3mf")
15
16 # Create the 3mf directory if it doesn't exist
17 os.makedirs(printed_3mf_dir, exist_ok=True)
18
19 # List to keep track of files that failed to export
20 failed_files = []
21
22 # Traverse the printed CAD directory and its subdirectories
23 for root, dirs, files in os.walk(printed_cad_dir):
24     for file in files:
25         if file.endswith(".FCStd"):
26             # Absolute path of the CAD file
27             file_path = os.path.join(root, file)
28
29             App.Console.PrintMessage(f"\nProcessing {file_path}\n")
30
31             # Open the FreeCAD document
32             doc = App.openDocument(file_path)
33             App.setActiveDocument(doc.Name)
34             App.ActiveDocument.recompute()
35
36             # Iterate over all objects in the document
37             for obj in doc.Objects:
```

```

38         # Check if the object is Std_Part
39         if obj.TypeId == "App::Part":
40             # Construct the output path for the 3MF file using the label
41             output_path = os.path.join(
42                 printed_3mf_dir,
43                 os.path.relpath(root, printed_cad_dir),
44                 f"{obj.Label}.3mf",
45             )
46             # Create the output directory if it doesn't already exist
47             os.makedirs(os.path.dirname(output_path), exist_ok=True)
48
49             try:
50                 # Export the part to a 3MF file
51                 Mesh.export([obj], output_path)
52                 App.Console.PrintMessage(
53                     f"Exported {obj.Label} to {output_path}\n"
54                 )
55             except Exception as e:
56                 App.Console.PrintError(f"Error exporting {obj.Label}: {e}\n")
57                 failed_files.append(file_path)
58
59         # Close the FreeCAD document
60         App.closeDocument(doc.Name)
61
62     # Print the result of the export process
63     if failed_files:
64         App.Console.PrintError("\nThe following files failed to export:\n")
65         for file in failed_files:
66             App.Console.PrintError(f" - {file}\n")
67     else:
68         App.Console.PrintMessage("\nAll files have been exported successfully.\n")

```