

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY

Odbor mechaniky a mechatroniky



Bakalářská práce

3D tisk pomocí robotického ramene uArm Swift Pro

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mašata** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **491186**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

3D tisk pomocí robotického ramene uArm Swift Pro

Název bakalářské práce anglicky:

3D printing using the uArm Swift Pro robotic arm

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s robotickým ramenem uArm Swift Pro.
2. Seznamte se s aditivní technologií FDM.
3. Osadte robotické rameno modulem pro 3D tisk FDM.
4. Ověřte možnosti a kvalitu tisku.
5. Porovnejte vzniklou 3D tiskárnu s FDM tiskárnami tradiční koncepce.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Stejskal, V., Valášek, M.: Kinematics and Dynamics of Machinery, Marcel Dekker, Inc., New York 1996.
- [2] Stráteský, O., Průša, J., Bach, M.: Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online], Praha: Prusa Research, 2019
- [3] Jílek, M.: Zprovoznění a kalibrace robota uArm Swift Pro, bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, 2019

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Beneš, Ph.D. odbor mechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Petr Beneš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) konzultanta(ky)

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Matěj Mašata
Název bakalářské práce:	3D tisk pomocí robotického ramene uArm Swift Pro
Anglický název:	3D printing using the uArm Swift Pro robotic arm
Akademický rok:	2021/2022
Obor studia:	Teoretický základ strojího inženýrství
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor Mechaniky a mechatroniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Petr Beneš, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 38 Počet obrázků: 24 Počet tabulek: 2
Klíčová slova:	uArm Swift Pro, 3D tisk, robotické rameno
Keywords:	uArm Swift Pro, 3D printing, robotic arm

Anotace:

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s robotickým ramenem uArm Swift Pro a s aditivní technologií (3D tisk). Dále ověření možnosti a kvality tisku ramene s modulem pro 3D tisk.

Abstract:

The aim of the bachelor thesis is getting acquainted with the uArm Swift Pro robotic arm and with additive technology (3D printing). Then test capability and quality of printing with the robotic arm equipped with 3D printing module.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze, dne

Podpis.....

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za cenné rady a vstřícnost při konzultacích.

Obsah

Anotační list	- 3 -
Prohlášení	- 4 -
Poděkování	- 5 -
Obsah	- 6 -
Seznam obrázků.....	- 8 -
Seznam tabulek	- 9 -
Úvod.....	- 10 -
Cíle	- 11 -
1. Aditivní technologie	- 12 -
1.1. Stručná historie	- 13 -
1.2. Princip	- 13 -
1.3. Metoda FDM	- 14 -
1.3.1. Materiály používané u FDM metody	- 15 -
1.4. Konstrukce FDM tiskáren	- 17 -
1.4.1. Kartézského typu	- 17 -
1.4.2. Typu delta	- 18 -
1.4.3. Typu scara	- 19 -
1.4.4. Robotická ramena.....	- 20 -
2. Robotické rameno uArm Swift Pro.....	- 22 -
2.1. Konstrukce	- 22 -
2.2. Modul pro 3D tisk	- 23 -
3. Kinematický model ramene	- 23 -
3.1. Maticová metoda	- 25 -
3.2. Popis ramene maticovou metodou	- 26 -
3.3. Pracovní prostor ramene	- 27 -
4. Zprovoznění robotického ramene	- 29 -
4.1. Montáž modulu pro 3D tisk	- 29 -
4.2. Kalibrace ramene	- 30 -
5. Tisk.....	- 32 -
5.1. Příprava tisku	- 32 -

5.2. Průběh Tisku.....	- 34 -
6. Porovnání vytištěných součástí na robotickém ramenu a na klasických tiskárnách-	35 -
7. Závěr.....	- 37 -
Bibliografie.....	- 38 -

Seznam obrázků

Obrázek 1 Vytištěné brzdové třmeny – převzato z www.bugatti.com	- 12 -
Obrázek 2 Princip FDM technologie – převzato z [6]	- 14 -
Obrázek 3 Povrch součásti z ABS vyhlazený acetonem – převzato z [8]	- 16 -
Obrázek 4 Příklad kartézské tiskárny Prusa i3 – převzato z [5]	- 18 -
Obrázek 5 Příklad delta tiskárny Tevoup – převzato z [10]	- 19 -
Obrázek 6 Příklad SCARA tiskárny Dobot M1 – převzato z [10]	- 20 -
Obrázek 7 Kooperace dvou robotických ramen – převzato z [10]	- 20 -
Obrázek 8 Příklad součásti a pracoviště při bezpodporovém tisku – převzato z [9]	- 21 -
Obrázek 9 a) Rovinné vrstvení materiálu, b) Kombinace rovinného a nerovinného vrstvení – převzato z [9]	- 22 -
Obrázek 10 a) Extruder b) Tisková hlava – převzato z [15]	- 23 -
Obrázek 11 Schéma mechanismu robota zajišťující pohyb	- 24 -
Obrázek 12 Zjednodušené schéma ramene – pohled z boku	- 25 -
Obrázek 13 Zjednodušené schéma ramene – pohled ze shora	- 25 -
Obrázek 14 Pracovní prostor ramene	- 28 -
Obrázek 15 Pracovní prostor ramene – řez rovinou Y-Z	- 28 -
Obrázek 16 Pracovní prostor ramene – řez rovinou X-Y	- 29 -
Obrázek 17 Průběh montáže modulu pro 3D tisk	- 30 -
Obrázek 18 Propojení extruderu s ramenem	- 30 -
Obrázek 19 Sériový monitor a jeho nastavení pro komunikaci s ramenem	- 31 -
Obrázek 20 Kalibrace ramene v bodě B	- 32 -
Obrázek 21 Prostředí CuraForuArm	- 33 -
Obrázek 22 Nastavení nulového bodu v tiskovém monitoru	- 33 -
Obrázek 23 Vytištěná součást – problém s tiskem	- 34 -
Obrázek 24 Vzhled vytištěných součástí	- 36 -

Seznam tabulek

Tabulka 1 Naměřené hodnoty pro model kvádrů - 35 -

Tabulka 2 Naměřené hodnoty pro model válce - 35 -

Úvod

Robotizace i aditivní technologie jsou v poslední době velmi aktuální témata. Robotická ramena a manipulátory v řadě odvětví nahradila pracovníky v repetitivních a manuálně náročných úkonech. Vyznačují se vysokou přesností, opakovatelností, rychlostí, zvládnou pracovat bez přestávky a jsou pro majitele firem finančně výhodná. Aditivní technologie umožňují tvorbu tvarově velmi složitých součástí během relativně krátkého času. Tyto technologie se využívají pro tvorbu prototypů, malosériovou výrobu, kde se nevyplatí investice do strojů a přípravků, nebo pro výrobu součástí, které nejsou jinými technologiemi možné vyrobit. Spojením obou témat, tedy osazením robotických ramen tiskovými hlavami, získáme další možnosti pro výrobu. Robotická ramena disponují více stupni volnosti, to umožňuje tisk v různých polohách a směrech. Pro tisk rozměrných dílů mohou být ramena namontována na kolejnicích. Díky možnosti poměrně snadného přemístění se mohou využívat i ve stavebním průmyslu pro tisk betonových struktur.

Robotické rameno uArm Swift Pro je, díky možnosti osazení 3D tiskovým modulem, skvělou volbou pro seznámení se s jak principy robotiky, tak i aditivními technologiemi. Je cenově dostupné, malé a je vhodné jak pro začátečníky, tak i pro pokročilé.

Cíle

Mezi cíle této bakalářské práce patří seznámení se s robotickým ramenem uArm Swift Pro a možností využití ramene pro výrobu součástí aditivní technologií. Konkrétně technologií FDM a to pomocí modulu pro 3D tisk, kterým se rameno osadí. Dále pak ověření kvality tisku a porovnání s tiskárnami klasické koncepce.

1. Aditivní technologie

Aditivní neboli přírůstkové technologie, také známé jako 3D tisk, jsou druhem výroby, pomocí kterých se dají vytvořit tvarově velmi složité trojrozměrné objekty. Na rozdíl od klasického obrábění, kde se materiál ubírá, u 3D tisku je tomu právě naopak. Materiál je na sebe postupně vrstven, dokud požadovaná součást nevznikne.

Často je spojována s takzvaným *rapid prototypingem* (česky *rychlé prototypování*), to jest možnost rychlého vytváření reálných modelů a prototypů, často během několika dní či dokonce hodin. Tato vlastnost je hojně využívána například k validaci designu strojních součástí nebo sestav a ověření jejich smontovatelnosti, pro reklamní a marketingové účely, nebo k vytváření modelů a forem ve slévárenství.

3D tisk v průmyslu není ale využíván pouze k prototypování, ale i jako plnohodnotná součást výrobních postupů. Jeho hlavní výhodou, je schopnost výroby součástí, které by byly za použití konvenčních výrobních metod drahé, nebo dokonce nevyrobitelné. Za zmínku stojí například brzdové třmeny na sportovním automobilu Bugatti (Obrázek 1), nebo kompletně vytištěná raketa Terran R firmy Relativity Space, která má odstartovat v roce 2024.

Aditivní technologie se nevyužívají pouze v průmyslu, ale i na hobby úrovni. Rozdíly mezi profesionálními a hobby tiskárnami jsou zejména v pořizovací ceně (ceny profesionálních tiskáren se pohybují v řádech stovek tisíc, až několika miliónů korun), v kvalitě tisku a materiálech, kterými lze tisknout. [1] [2]



Obrázek 1 Vytištěné brzdové třmeny – převzato z www.bugatti.com

1.1. Stručná historie

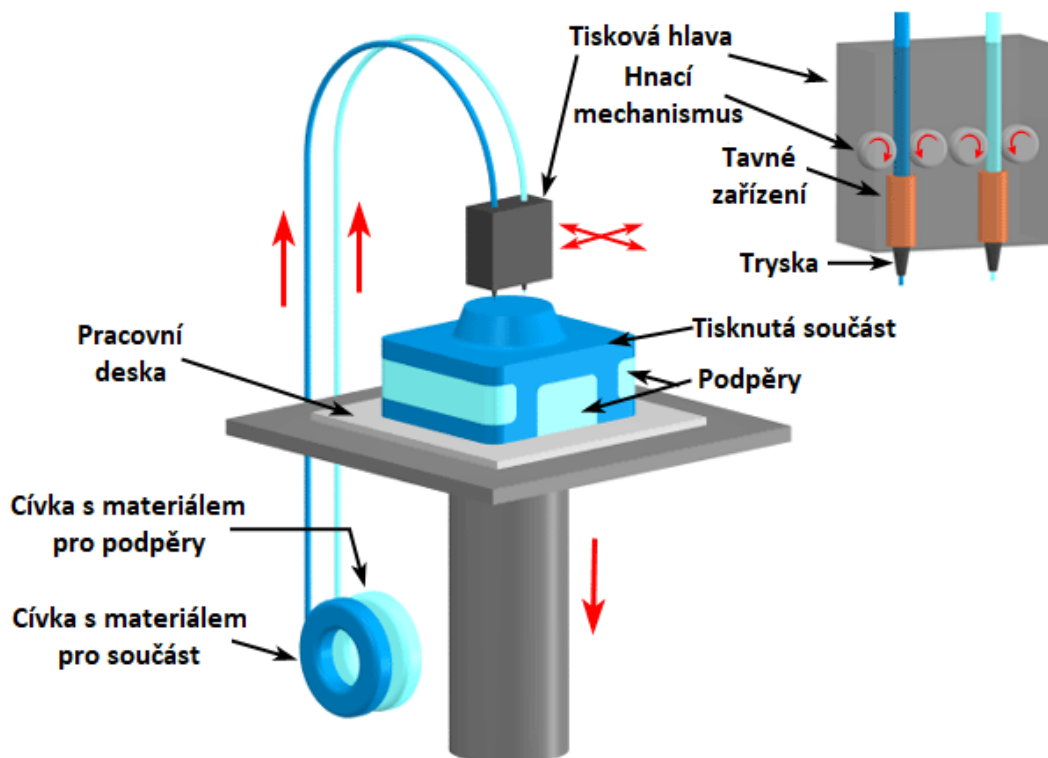
První komerční využití této technologie sahá do 80. let 20. století, kdy si Charles Hull nechal patentovat technologii stereografie. Ta spočívá v použití UV laserového paprsku, ten je vrhán na vrstvu fotopolymerů, která se následně vytvrdí. Tímto způsobem se po jednotlivých vrstvách vytváří cílený objekt. Postupem času se začaly prosazovat další aditivní technologie. V roce 1987 to byla technologie BPM (*Ballistic Particle Manufacturing*), o rok později přišla firma Helysis s technologií LOM (*Laminated Object Manufacturing*), kde jsou na sebe vrstvené tenké folie například nylonu, polyesteru nebo papíru. V roce 1989 byla na Texaské univerzitě v Austinu vyvinuta metoda SLS (*Selective Laser Sintering*), při které se práškový materiál v požadovaných bodech slinuje pomocí laseru. V roce 1992 firma Stratatys představila metodu FDM (*Fused Deposit Modeling*). Tato metoda spočívá v postupném nanášení vrstev roztaveného materiálu. Následující rok vznikla na Massachusetts Institute of Technology metoda 3DP, která pracuje podobně jako inkoustový tisk. [1] [3]

1.2. Princip

Aditivní výroba začíná u virtuálního modelu součásti. Ten je buď vytvořen ve specializovaném CAD programu (z anglického *Computer-Aided Design*, česky *počítačem podporované projektování*) nebo za pomoci prostorového skeneru. Tento model se následně převede do požadovaného formátu, nejčastěji do stereolitografického (STL). Tento druh souboru pomocí trojúhelníku aproximuje tvar vytvořeného modelu, popisuje však pouze geometrii povrchu součásti, a ne její velikost, barvu, materiál, ze kterého má být vyrobena, či jiné atributy součásti. Následně je model rozdělen na jednotlivé vrstvy, buď přímo v CAD programu nebo v takzvaných slicerech (z anglického *to slice* – česky *krájet*). Dále se nastaví parametry tisku (v CAD programu, sliceru nebo v softwaru tiskárny) jako je například teplota, rychlost tisku, druh tištěného materiálu nebo výška jednotlivých vrstev (z ní se odvíjí dosažený detail vytištěné součásti). Nakonec se z těchto informací vytvoří G-kód. Jedná se o programovací jazyk určený pro CNC stroje, pomocí něj se vykonávají jednotlivé pohyby motorů, tiskových hlav a jiných mechanismů tiskárny. Následuje samotný tisk. Jednotlivé vrstvy materiálu jsou nanášeny na sebe, dokud není výsledný fyzický model hotov. Tisk může podle velikosti součásti a metody tisku trvat jen pár minut nebo několik dní. U některých metod musí po dokončení tisku nastat ještě takzvaný *postprocessing*, může se jednat o odstranění podpůrného či nevyužitého materiálu (oplach, vysátí) nebo vytvrzení dílu pomocí UV záření. Vytištěná součást může být dále obráběna, povrchově upravována nebo jinak zpracována. [3] [4] [5]

1.3. Metoda FDM

FDM je velmi populární zejména na poli hobby tiskáren. Často se využívá pro účely rychlého prototypování. Jedná se o proces, ve kterém je tiskový materiál (filament) buďto ve formě struny odvíjen z cívky, kde tisková struna má zpravidla průměr 1,75 mm nebo 2,85 mm nebo je ve formě granulátu/prášku. Materiál je hnacím mechanismem veden do tiskové hlavy, zde se nataví a následně je skrze trysku nanášen na pracovní desku (viz Obrázek 2). Na desce se následně materiál nataví na předchozí vrstvu a pak ztuhne. Tloušťka jednotlivých vrstev je určována průměrem trysky, ve většině případů se pohybuje v rozmezí 0,1 - 0,3 mm. Tloušťka vrstvy ovlivňuje detail výsledné součásti, čím nižší vrstva tím vyšší detail, ale delší čas tisku. U některých součástí je, kvůli jejich geometrii, nutné vytisknout podpěrnou strukturu. Jedná se hlavně o různé převisy, přemostění a nesamonosné součásti. Podpěry mohou být vytištěné ze stejného materiálu jako samotná součást nebo, pro jejich snazší odstranění, z jiného materiálu, který se s původním materiálem nemísí nebo například z materiálu rozpustného ve vodě. [2] [4] [6]



Obrázek 2 Princip FDM technologie – převzato z [6]

1.3.1. Materiály používané u FDM metody

Materiály dostupné pro FDM metodu prošly od počátků této technologie dlouhým vývojem. Nyní existuje široká škála různých typů materiálů a forem ve kterých jsou dodávány (prášek, granulát, pelety, cívky apod.). Ve většině případů jsou vyvíjeny přímo pro konkrétní případy jejich využití (příkladem může být zdravotnický sektor). Převážnou část tvoří polymery, ale existují i například možnosti tisku skla, betonu, keramiky, kompozitních materiálů nebo dokonce čokolády. [7] V kontextu této práce jsou zde uvedeny nejčastěji používané materiály:

a) PLA

Polyactic Acid (*polymléčná kyselina*) neboli PLA je nejrozšířenějším druhem filamentu. Vyrábí se z přírodních materiálů jako je kukuřice, cukrová třtina nebo řepa. Lze biologicky rozložit, ale pouze v průmyslových kompostárnách, kde teplota přesahuje 80°C. Tento materiál je využíván hlavně díky rychlosti tisku a nízkým nákladům. Tištěné modely se kvůli nízkým teplotám tisku (okolo 180°C) téměř nesmršťují, a proto je možné tisknout i větší součásti. Je vhodný na rychlé prototypování, tisk modelů a hraček. Nevýhody tohoto materiálu jsou nízká teplotní odolnost (60°C), nízká odolnost vůči UV záření a relativně špatné mechanické vlastnosti. Není proto vhodný pro namáhané součásti a součásti, které jsou vystaveny slunečnímu záření nebo vyšším teplotám. [6] [8]

b) PET/PETG

Polyethylentereftalát (PET) je další hojně využívaný materiál. Jeho nejznámější využití je při výrobě plastových lahví, obalových materiálů nebo oblečení. Je snadno recyklovatelný téměř bez ztráty kvality. Pro 3D technologie je častěji využívána jedna z jeho variant, kde se PET modifikuje glykolem během výrobního procesu. Glykol zlepšuje jak tiskové, tak i mechanické vlastnosti. Výhody oproti PLA jsou lepší tepelné vlastnosti, vyšší teplotní odolnost (80°C) a nenáchylnost na UV záření. Často je zmiňována i zdravotní nezávadnost PETG, přesto není doporučováno využívat modely pro tyto účely. Hlavní důvod jsou bakterie a plísně, které se, vzhledem k technologii 3D tisku, mohou

usazovat mezi jednotlivými vrstvami. Hlavní nevýhodou je vyšší obtížnost tisku, zejména detailních částí. [6] [8]

c) **ABS**

Akrylonitril butadienstyren (ABS) je díky svým mechanickým vlastnostem využíván k výrobě odolných a levných dílů (LEGO, automobilové součástky atd.). Je to teplotně a mechanicky velmi rezistentní materiál. Během tisku se uvolňují zdravotně nebezpečné výpary (styren), proto je nutné tisknout v dobře větraných prostorech nebo na tiskárnách s uzavíratelnými kryty s filtračními systémy. Další nevýhody jsou vyšší teplota tisku, náchylnost na UV záření a vlhkost. Zajímavou vlastností je rozpustnost v acetonu. Pomocí něj jde spojit více částí dohromady nebo pomocí acetonových výparů vyhladit povrch součásti a tím získat hladký povrch (viz Obrázek 3). [6] [8]



Obrázek 3 Povrch součásti z ABS vyhlazený acetonem – převzato z [8]

d) **Kompozitní materiály**

Základní složkou kompozitních materiálů je plast (obvykle PLA, PETG, ABS nebo nylon) do něj se přidává sekundární složka ve formě vláken, drobných částíček nebo prachu. Mohou to být uhlíková, kevlarová nebo

skelná vlákna, částechky různých kovů a jejich slitin (bronz, měď) nebo například dřeva. Příměsi společně se základní složkou ovlivňují jak výsledný vzhled součásti, tak i mechanické, teplotní a tiskové vlastnosti. U některých příměsí (kevlarové, uhlíkové) je kvůli jejich abrazivním vlastnostem zapotřebí použít speciální tvrzenou trysku. [8] [9]

e) Další materiály

Kromě výše uvedených materiálů stojí za zmínku flexibilní materiály (TPU, TPE), které se vyznačují skvělou ohebností a houževnatostí, ale vysokou náročností tisku. Dále pak polykarbonáty (PC), které jsou charakteristické skvělou odolností v tahu a vůči vysokým teplotám. Na druhou stranu je jejich nevýhodou hygroskopicitu, neboli schopnost materiálu pohlcovat vlhkost. A v neposlední řadě nylon (polyamid), jenž také disponuje vysokou mírou odolnosti a je rovněž vhodný pro tisk namáhaných dílů. [8]

1.4. Konstrukce FDM tiskáren

Samotná technologie FDM zahrnuje mnoho typů tiskáren, nejběžněji se používají následující typy:

1.4.1. Kartézského typu

Tiskárny tohoto typu jsou nejrozšířenější. Tiskové pohyby probíhají ve třech ortogonálních osách X, Y a Z. Existuje několik možných způsobů, jak docílit pohybu tiskové hlavy a tiskové plochy:

- a) Tisková plocha se pohybuje v horizontálním směru (osa X nebo Y) a tisková hlava ve dvou zbývajících směrech
- b) Tisková plocha se pohybuje ve vertikálním směru (osa Z) a tisková hlava v obou horizontálních směrech (X a Y)
- c) Tisková plocha se pohybuje v obou horizontálních směrech (X a Y) a tisková hlava vertikálně (osa Z)
- d) Tisková plocha se pohybuje vertikálně (osa Z) a v jednom horizontálním směru (osa X nebo Y) a tisková hlava ve zbývajícím druhém
- e) Tisková plocha se nepohybuje a tisková hlava se pohybuje ve všech osách

Využívají jednoduchých lineárních pohybů, kde každá z os je poháněna vlastním motorem. Pohyb je zprostředkováván pomocí pohybového šroubu (většinou s trapézovým nebo kuličkovým závitem) nebo pomocí řemenů. U řemenů hrozí riziko vzniků nepřesností kvůli pružení, špatnému napnutí nebo stárnutí řemene a jeho materiálu. U pohybových šroubů je přesnost dána stoupáním šroubu a počtem kroků motoru. Systém je tužší a přesnější než řemenový, ale dražší. Některé tiskárny kombinují oba systémy, například Prusa i3 (Obrázek 4) [9] [10]



Obrázek 4 Příklad kartézské tiskárny Prusa i3 – převzato z [5]

1.4.2. Typu delta

Tiskárny typu delta (Obrázek 5) se od kartézských liší zejména tím, že tisková hlava se může pohybovat ve všech směrech. Skládá se z kruhové tiskové plochy a tří paralelních ramen, které jsou připevněny k svislým kolejnicím. Tisková hlava je pomocí závěsů připevněna ke všem třem ramenům. Aby se nastavila požadovaná poloha tiskové hlavy tak spolu musí všechna ramena spolupracovat. Hnací členy jsou umístěny v základně tiskárny. Díky tomu je celý mechanismus lehčí a tiskárna může pracovat při vyšších rychlostech. Jejich nevýhoda oproti kartézským tiskárnám je nižší přesnost. To z důvodu již zmíněné spolupráce všech ramen a jejich motorů při pohybu, což vede k chybám v souřadnicovém polohování. Tiskárna zabírá menší plochu než kartézské, ale je vyšší a často dražší. [10]



Obrázek 5 Příklad delta tiskárny Tevoup – převzato z [10]

1.4.3. Typu scara

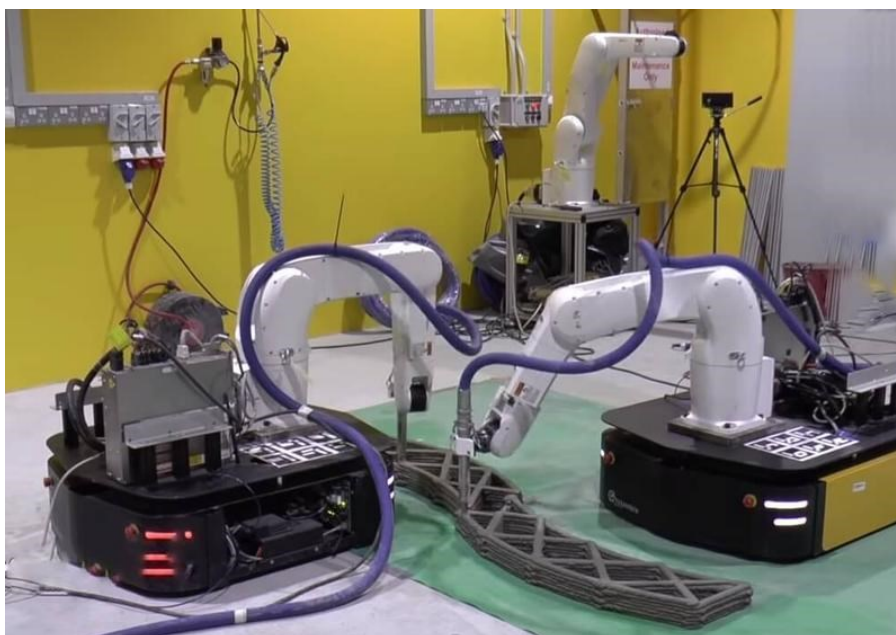
SCARA 3D tiskárny (Z anglického *Selective Compliance Assembly Robot Arm*, česky *kloubové robotické rameno se selektivním přizpůsobením*) jsou kompaktní, rychlé a mají vysokou přesnost a opakovatelnost. Jsou ale značně dražší než kartézské a delta tiskárny. Skládají se z robotického ramene se třemi stupni volnosti, které je osazeno tiskovou hlavou. Jednotlivá ramena jsou řazena paralelně. Dva motory řídí části v rovině X-Y a jeden potom v ose Z. Motor v ose Z obvykle zvedá celý systém ramene s tiskovou hlavou (viz Obrázek 6). [10]



Obrázek 6 Příklad SCARA tiskárny Dobot M1 – převzato z [10]

1.4.4. Robotická ramena

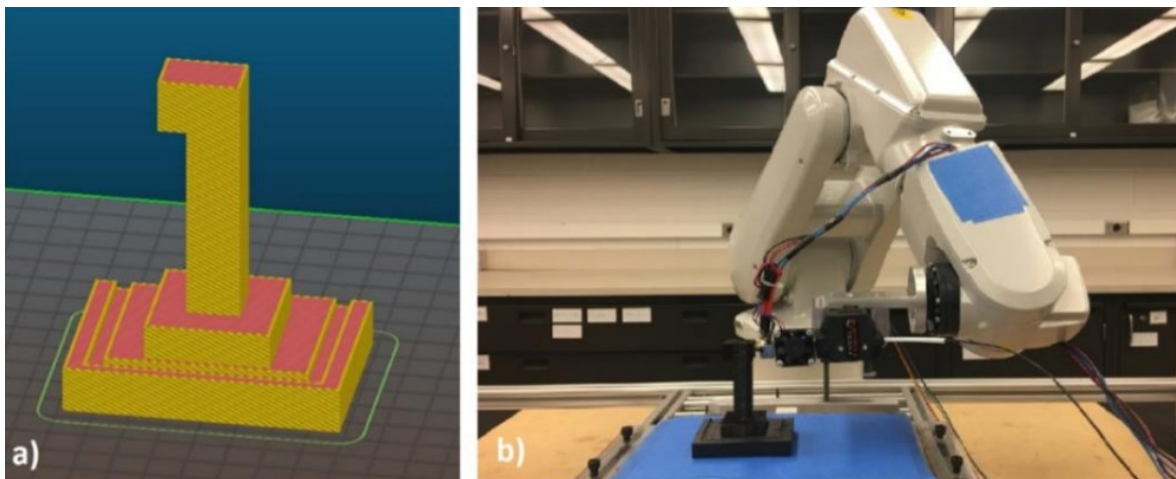
Robotická ramena mají menší zástavbový prostor oproti kartézským tiskárnám, většinou mají více stupňů volnosti, dají se snáz přemísťovat a na jednom výrobku jich může pracovat víc najednou (viz Obrázek 7). Hlavní výhodou představuje možnost pohybu tiskové hlavy po komplexních trajektoriích s různými úhly natočení. Těchto vlastností lze využít například u bezpodporového tisku nebo u tisku nerovinným vrstvením materiálu. [9] [10]



Obrázek 7 Kooperace dvou robotických ramen – převzato z [10]

a) Bezpodporový tisk

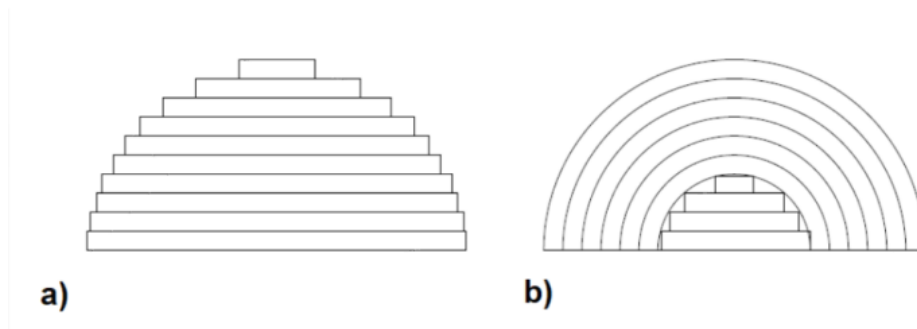
Klasické 3D tiskárny vytlačují a nanášejí materiál v pouze jednom směru. U složitějších modelů, kde není vždy zajištěna návaznost jednotlivých vrstev na sebe, je zapotřebí tisknout podpurné struktury. To však zvyšuje čas tisku a množství použitého materiálu. Podpurné struktury se rovněž musí po dokončení tisku odstranit. Díky tomu, že robotická ramena disponují více stupni volnosti lze tiskovou hlavu nebo podložku natáčet pod různými úhly a tím docílit správného propojení vrstev a rozdílnému silovému působení, což má za následek možnosti tisku větších převisů bez potřeby podpor (viz Obrázek 8). Během tisku je zapotřebí zajistit, aby nedošlo ke kolizi ramene a tiskové hlavy s tištěnou součástí nebo okolním prostorem. [9] [11]



Obrázek 8 Příklad součásti a pracoviště při bezpodporovém tisku – převzato z [9]

b) Tisk nerovinným vrstvením materiálu

U většiny aditivních technologií se materiál vrství v jedné rovině. Řídící G-kód je sice jednoduchý na vygenerování, ale výsledná součást má anizotropní vlastnosti a při malých úhlech stoupání se vytváří schodovitá struktura na povrchu součásti. Tyto negativní vlastnosti lze eliminovat použitím takzvaného nerovinného vrstvení materiálu. Při použití této metody tisková hlava kopíruje povrch součásti (viz Obrázek 9). Tuto technologii lze využít i na konvenčních 3D tiskárnách. Vzhledem k jejich konstrukci ale hrozí kolize tiskové hlavy s tištěným modelem, a proto je vhodné použít robotické rameno s více stupni volnosti. [9]



Obrázek 9 a) Rovinné vrstvení materiálu, b) Kombinace rovinného a nerovinného vrstvení – převzato z [9]

2. Robotické rameno uArm Swift Pro

Robotické rameno uArm Swift Pro bylo vyvinuto firmou uFactory. Jedná se o stolní robotický manipulátor, který je určený převážně pro hobby a vzdělávací účely. Začátečníci se na něm mohou seznámit se základními principy robotiky. Lze k němu dokoupit řadu doplňků jako například přísavku, gripper, laser nebo 3D tiskovou hlavu. [12] [13]

Lze ovládat několika způsoby. Nejjednodušší způsob je režim učení offline, který nevyžaduje žádné zkušenosti s programováním. Stačí rameno zapnout, stisknout tlačítko pro nahrávání a manuálně rameno táhnout do požadovaných poloh. Rameno si všechny pohyby zapamatuje a je schopné je následně samo opakovat. Dále jsou vyvinuté dvě aplikace uArmStudio pro operační systémy Windows, Linux a Mac OS a uArmPlay pro chytré telefony. V nich jde rameno programovat pomocí blokových schémat. Podporuje i programování v jazycích Arduino, Python, GrabCad a ROS. [12] [13]

Rameno ovládá deska Arduino Mega 2560, což je větší verze celosvětově populární desky Arduino UNO. Se svými 54 digitálními a 16 analogovými vstupy, USB rozhraním a snadným propojením s počítačem a programováním je vhodná pro větší robotické projekty, 3D tiskárny apod. [5] [13]

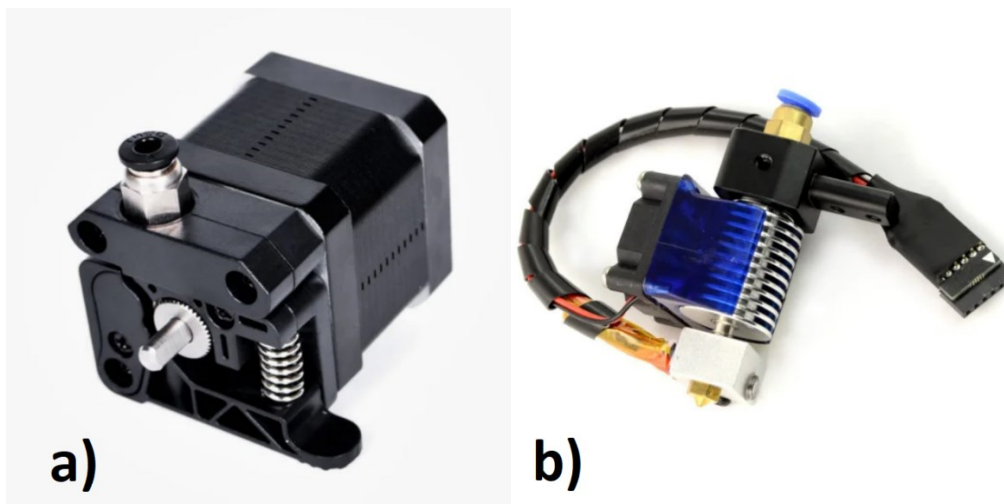
2.1. Konstrukce

Jedná se o robotické rameno se čtyřmi stupni volnosti, kde jeden z těchto stupňů je koncový efektor (např. gripper). Díky sekundárnímu přepákování a přidáním paralelogramu je koncový bod s doplňkem vždy vodorovný. Dle výrobce má maximální zatížení 500g a opakovatelnost 0,2mm. Díky tomu je rameno vhodné, pro již výše zmíněný 3D tisk nebo laserové gravírování. Rameno je vyrobeno z hliníku a váží 2,2kg. Je osazeno krokovými motory (kroutící moment přibližně 1,2Nm) s převodovkou z tvrzené oceli. Na převodovce je navíc 12-bitový enkodér, který zajišťuje zpětnovazebné určování polohy. V současnosti

již rameno není výrobcem dále podporováno a nevychází pro něj updaty firmwaru. [12] [13] [14]

2.2. Modul pro 3D tisk

Jak již název napovídá, tak tento modul umožňuje přeměnit robotické rameno uArm Swift pro na 3D tiskárnu. Skládá se ze dvou hlavních částí, jedna je tisková hlava a druhá je krokový motor (extruder) osazený ozubenými kolečky (Obrázek 10), která ženou filament skrze plastovou trubičku do tiskové hlavy. Tisková hlava využívá populární hotend E3D V6, na kterém je namontována mosazná tryska o průměru 0,4 mm. Podporován je pouze PLA filament o průměru 1,75mm, maximální teplota tisku je 270°C, nejvyšší rychlost 20 mm/s a tisková oblast 100x100x100 milimetrů. [15]



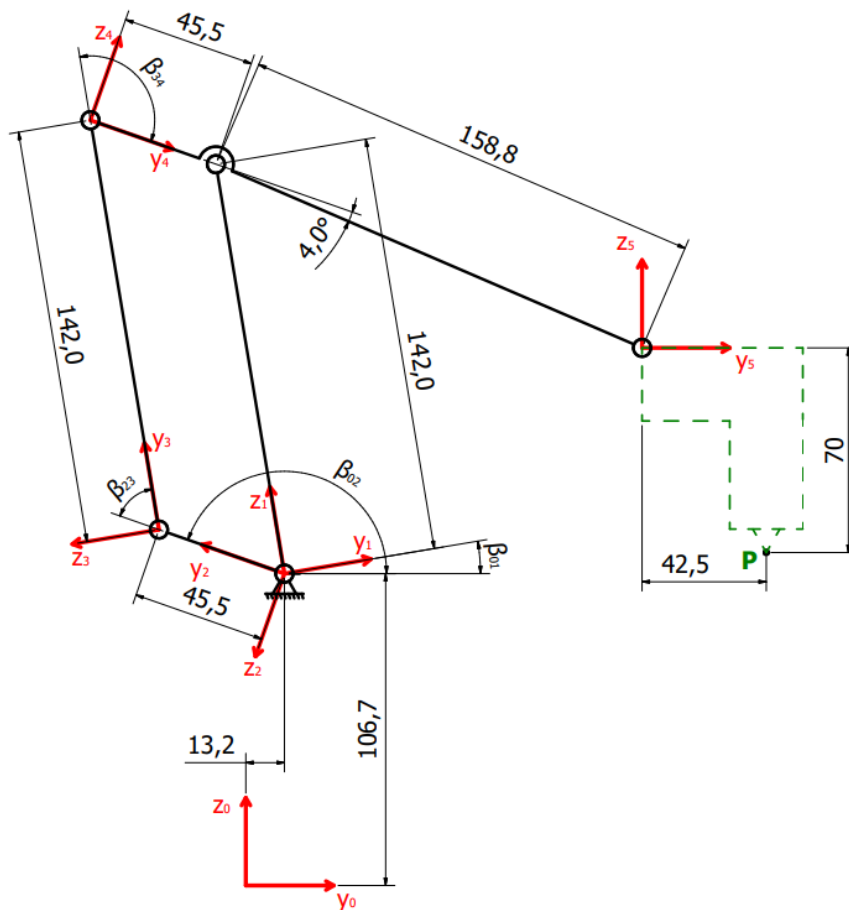
Obrázek 10 a) Extruder b) Tisková hlava – převzato z [15]

Rameno osazeno tímto modulem se ovládá skrze speciálně upravený software pro slicování CuraForuArm. Tento software je založen na známém sliceru Ultimaker Cura 2.4.0. V tomto programu lze nastavit veškeré parametry tisku, od základních jako jsou například teplota, rychlost, druh výplně nebo počet perimetrů, přes pokročilé jako průtok, rychlosti ventilátorů nebo zrychlení ramene, až po upravování vygenerovaného G-kódu. Samotný tisk probíhá přes monitor tisku, což je rozšíření programu, které přes sériovou linku komunikuje přímo s Arduinem Mega, které je v namontované v rameni. [13] [15]

3. Kinematický model ramene

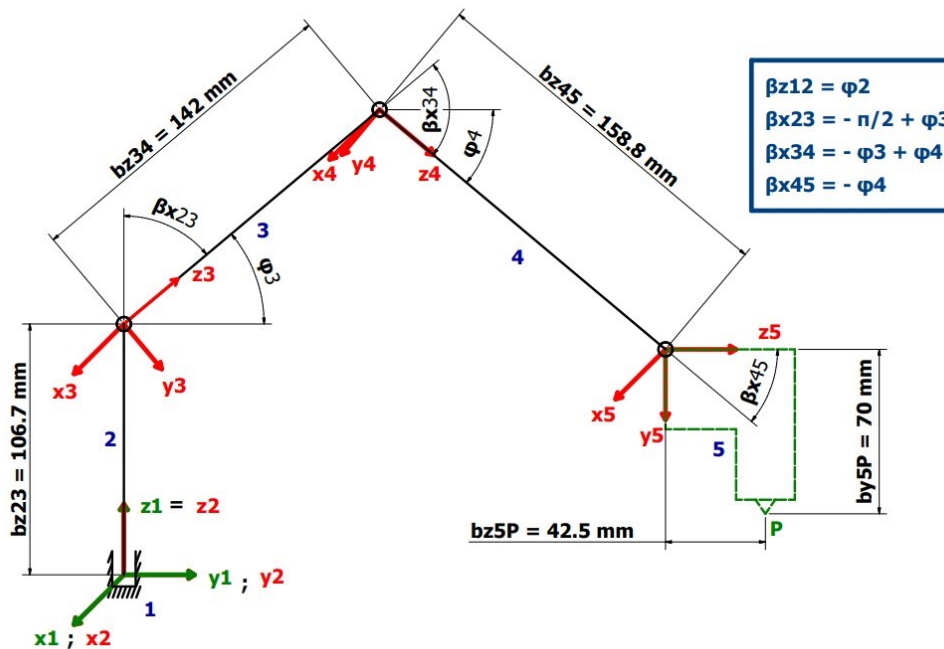
Konstrukce robota byla již popsána v kapitole 2.1. Kinematický model je matematický popis mechanismu, pomocí kterého lze popsat jeho polohu, rychlost a zrychlení v

kterémkoli bodu. Pro naše účely bylo zapotřebí vyřešit dopřednou kinematiku, konkrétně pro koncový bod tiskové hlavy (trysky). Známy jsou souřadnice jsou tedy úhly natočení motorů a rozměry ramene. Mechanismus ramene se skládá ze dvou částí. Jedna část zajišťuje pohyb ramene, zatímco druhá zajišťuje vodorovnost koncového efektoru. Pro nás bylo výhodné popisovat pouze část zajišťující pohyb (Obrázek 11), s přidanou podmínkou vodorovnosti koncového efektoru.

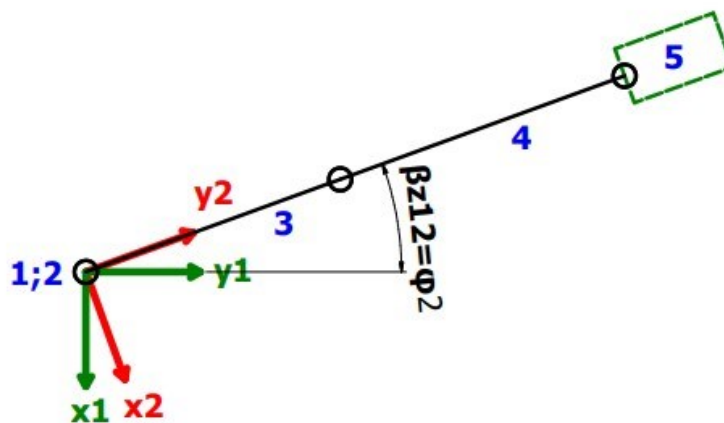


Obrázek 11 Schéma mechanismu robota zajišťující pohyb

Pro snazší popis a výpočet lze schéma dále zjednodušit. Proměnné úhly jsou φ_1 , φ_2 a φ_3 , ty reprezentují natočení jednotlivých motorů (viz Obrázek 12 a Obrázek 13). Pro popis byla zvolena maticová metoda.



Obrázek 12 Zjednodušené schéma ramene – pohled z boku



Obrázek 13 Zjednodušené schéma ramene – pohled ze shora

3.1. Maticová metoda

Tato metoda je vhodná pro řešení rovinných i prostorových úloh. Maticová metoda spočívá v transformacích souřadnicových systémů jednotlivých těles mechanismu vůči základnímu souřadnicovému systému. Toho je docíleno pomocí transformačních matic T . U obecného prostorového pohybu se jedná o šest matic. Tři z nich popisují rotační pohyb kolem jednotlivých os x , y a z a tři z nich translační pohyb podél os x , y a z . Dále se zavádí vektor r , který popisuje polohu hledaného bodu v daném souřadnicovém systému mechanismu. [16]

3.2. Popis ramene maticovou metodou

Nejprve je zapotřebí vypočítat počet stupňů volnosti rovnicí (3.1) a počet nezávislých smyček rovnicí (3.2). Rameno se skládá pouze z rotačních vazeb, proto jsme v rovnic (3.1) vynechali členy s ostatními vazbami. Stupně volnosti z rovnice vyšly čtyři, jeden stupeň je ale pro koncoví efektor a ten má být vždy vodorovný. Stupně volnosti jsou tedy tři.

$$n = 6 \cdot (u - 1) - 5 \cdot (rot) \quad (3.1)$$

$$n = 6 \cdot (5 - 1) - 5 \cdot (4) = 4$$

$$l = d + m - (u - 1) \quad (3.2)$$

$$l = 4 + 1 - (5 - 1) = 1$$

n – počet stupňů volnosti soustavy

u – počet těles

rot – počet rotačních vazeb

l – počet nezávislých smyček

d – počet kinematických dvojic

m – počet předepsaných pohybů

Dále jsme dle schématu (Obrázek 12 a Obrázek 13) popsali polohu bodu P v souřadnicovém systému základny ramene (x_1, y_1, z_1). Získali jsme maticovou rovnici (3.4) a po dosazení rovnicí (3.5).

$$r_{1P} = T_{12} \cdot T_{23} \cdot T_{34} \cdot T_{45} \cdot r_{5P} \quad (3.3)$$

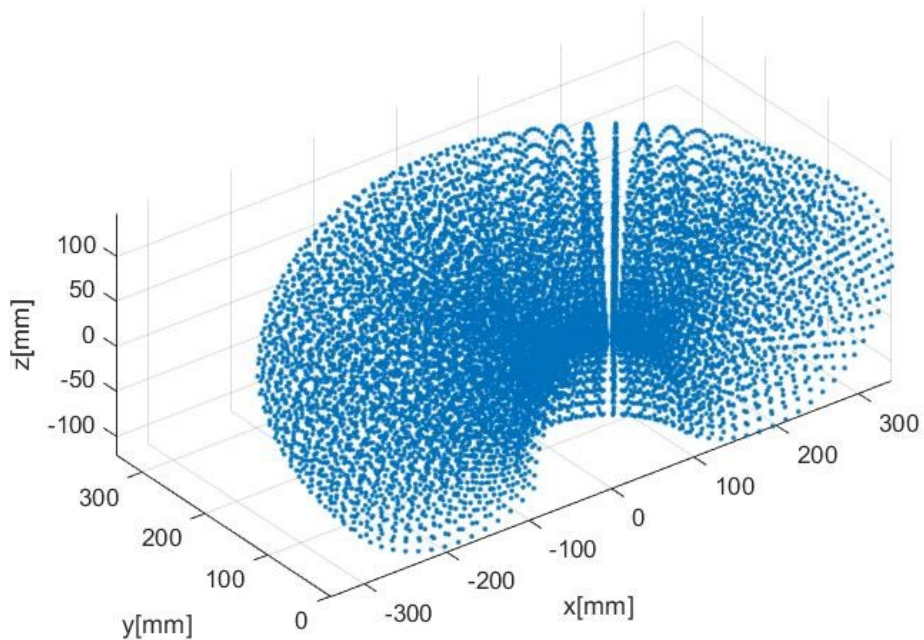
$$r_{1P} = T_{\varphi z}(\beta_{z12}) \cdot T_z(b_{z23}) \cdot T_{\varphi x}(\beta_{x23}) \cdot T_z(b_{z34}) \cdot T_{\varphi x}(\beta_{x34}) \cdot T_z(b_{z45}) \cdot T_{\varphi x}(\beta_{x45}) \cdot r_{5P} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
r_{1P} = & \begin{bmatrix} \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 106,7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
& \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \varphi_3\right) & -\sin\left(-\frac{\pi}{2} + \varphi_3\right) & 0 \\ 0 & \sin\left(-\frac{\pi}{2} + \varphi_3\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \varphi_3\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
& \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 142 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
& \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\varphi_3 + \varphi_4) & -\sin(-\varphi_3 + \varphi_4) & 0 \\ 0 & \sin(-\varphi_3 + \varphi_4) & \cos(-\varphi_3 + \varphi_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
& \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 158,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
& \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi - \varphi_4) & -\sin(\pi - \varphi_4) & 0 \\ 0 & \sin(\pi - \varphi_4) & \cos(\pi - \varphi_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 70 \\ 42,5 \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

3.3. Pracovní prostor ramene

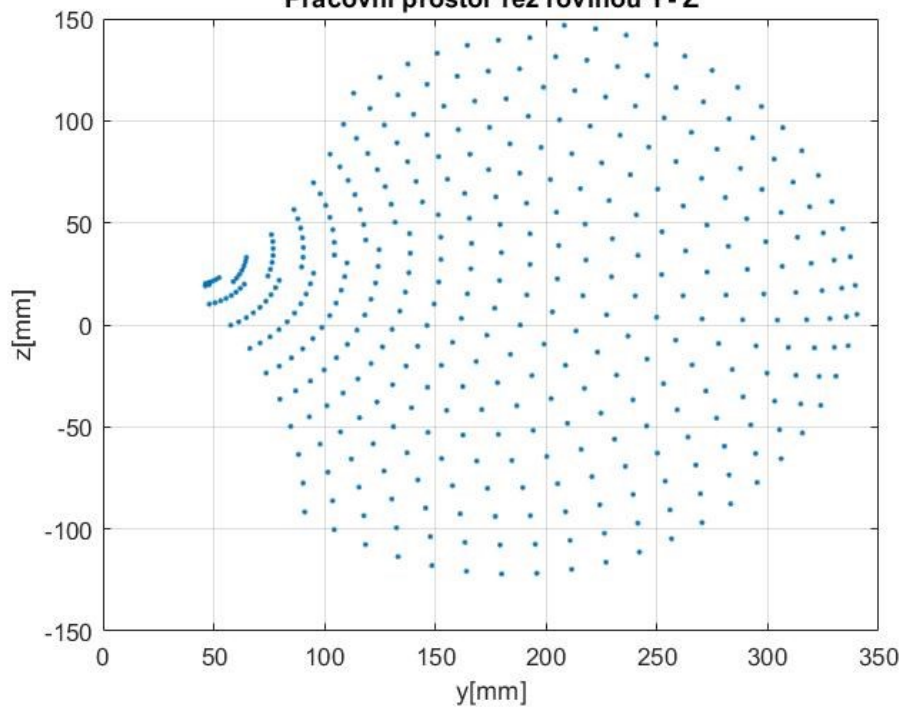
Pracovní prostor jsme vygenerovali v programu Matlab R2021b. Rovnici (3.5) jsme iterovali pro všechny možné kombinace úhlů natočení motorů φ_1 , φ_2 a φ_3 , které konstrukce robota umožňuje. Hodnoty úhlů jsme vytvořili pomocí třech vnořených for cyklů s krokem 0,1 radiánu. Ze získaných poloh jsme vytvořili grafy pracovního prostoru robotického ramene (Obrázek 14, Obrázek 15, Obrázek 16). Z grafů je patrné, že tisková oblast by mohla být značně větší než výrobcem dovolených 100x100x100 mm. Možný důvod tohoto omezení je například nedostatečná nosnost ramene v některých polohách nebo složitější generace G-kódu.

Pracovní prostor robotického ramene UArm

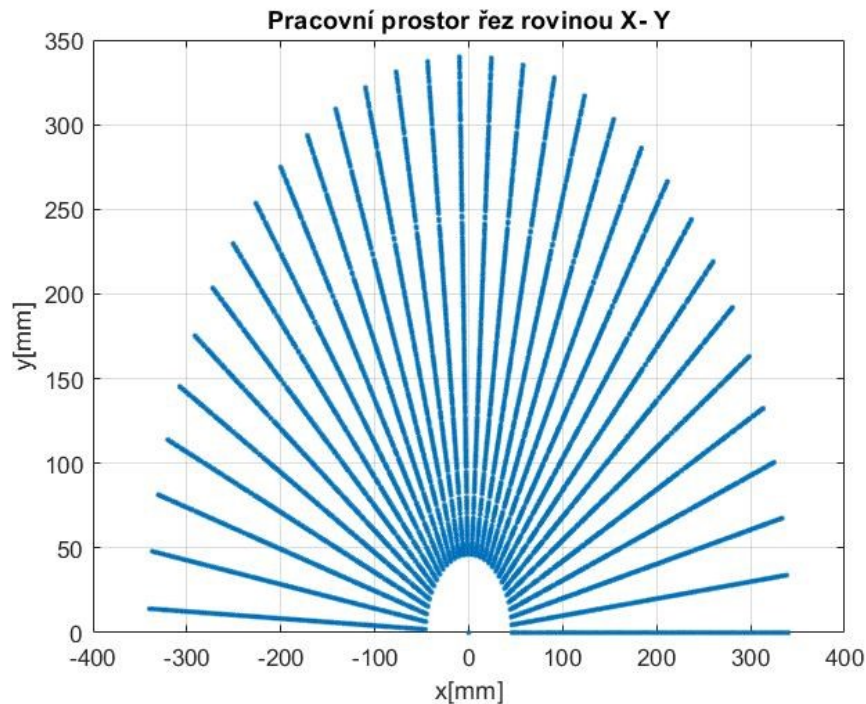


Obrázek 14 Pracovní prostor ramene

Pracovní prostor řez rovinou Y-Z



Obrázek 15 Pracovní prostor ramene – řez rovinou Y-Z

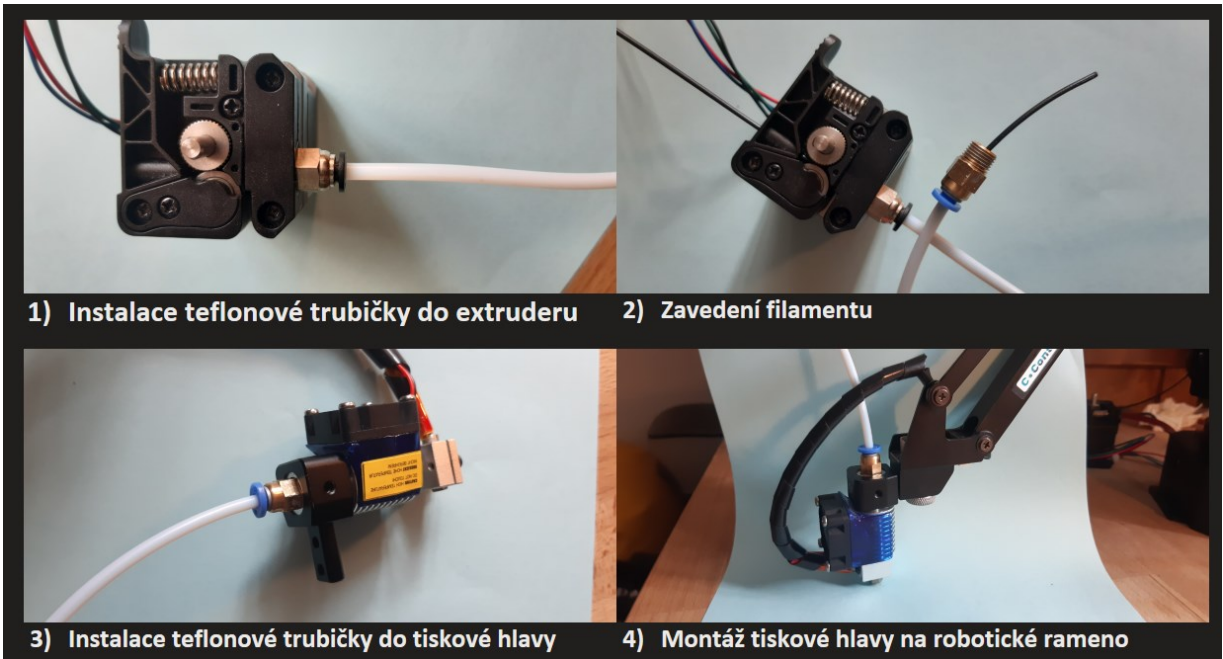


Obrázek 16 Pracovní prostor ramene – řez rovinou X-Y

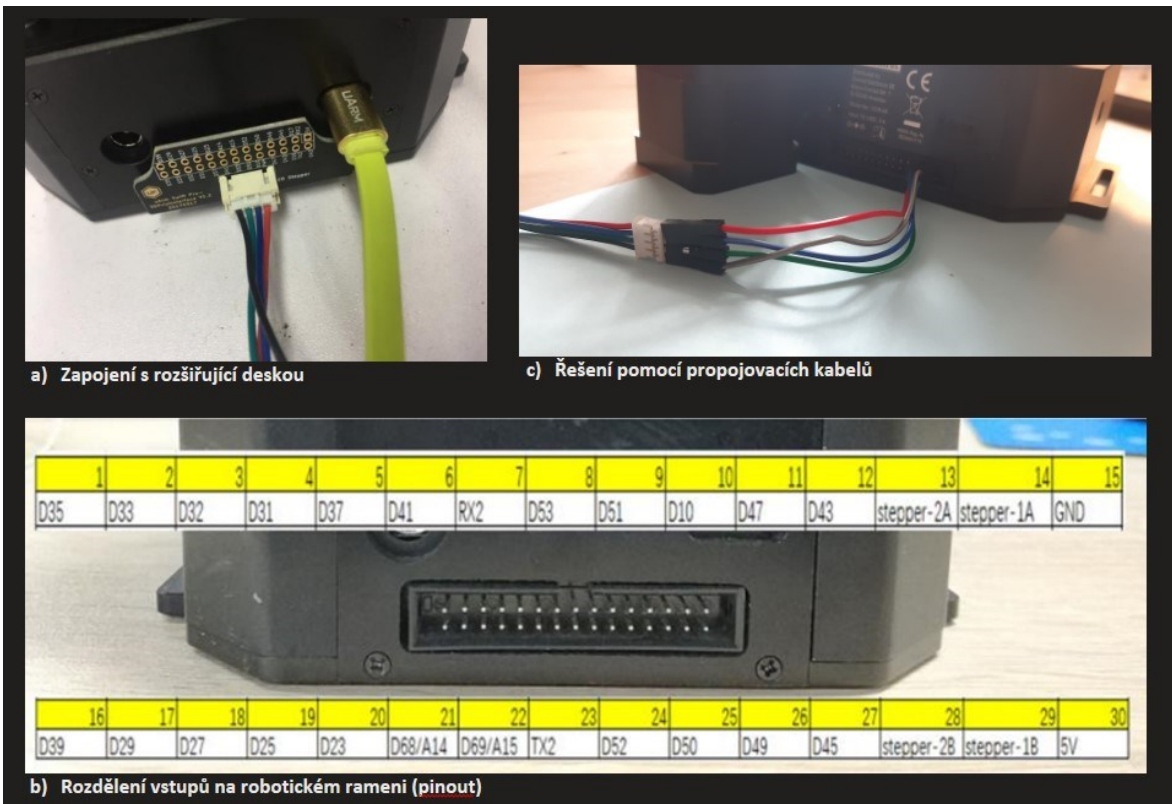
4. Zprovoznění robotického ramene

4.1. Montáž modulu pro 3D tisk

Instalace nevyžadovala žádné speciální nástroje a probíhala dle online návodu od výrobce. Nejprve byla ke krokovému motoru (extruderu) připojena teflonová trubička o délce 1 m, vnějším průměru 4 mm a vnitřním průměru 2 mm. Následně byl zaveden 1,75mm PLA filament skrze vodící mechanismus v extruderu a teflonovou trubičku, dokud na druhé (volné) straně trubičky nevyčníval o přibližně 60 mm. Vyčnívající filament byl zasunut do tiskové hlavy a trubička k ní byla poté našroubována. Tisková hlava byla uchycena pomocí fixačního šroubu ke koncovému bodu ramene. Dále byl k rameni připojen napájecí konektor tiskové hlavy (Obrázek 17). K propojení krokového motoru s ramenem byla zapotřebí rozšiřující deska, do které lze připojit konektor XH-2.54 z krokového motoru. Bohužel tato deska nebyla výrobcem dodána. Po komunikaci s technickou podporou výrobce nám byl poskytnut obrázek rozdělení vstupů (pinout) přímo na základně ramene. Následně byl krokový motor připojen pomocí propojovacích kabelů (viz Obrázek 18). Po připojení ramene k síti a k počítači pomocí USB kabelu byl 3D tiskový modul plně funkční.



Obrázek 17 Průběh montáže modulu pro 3D tisk

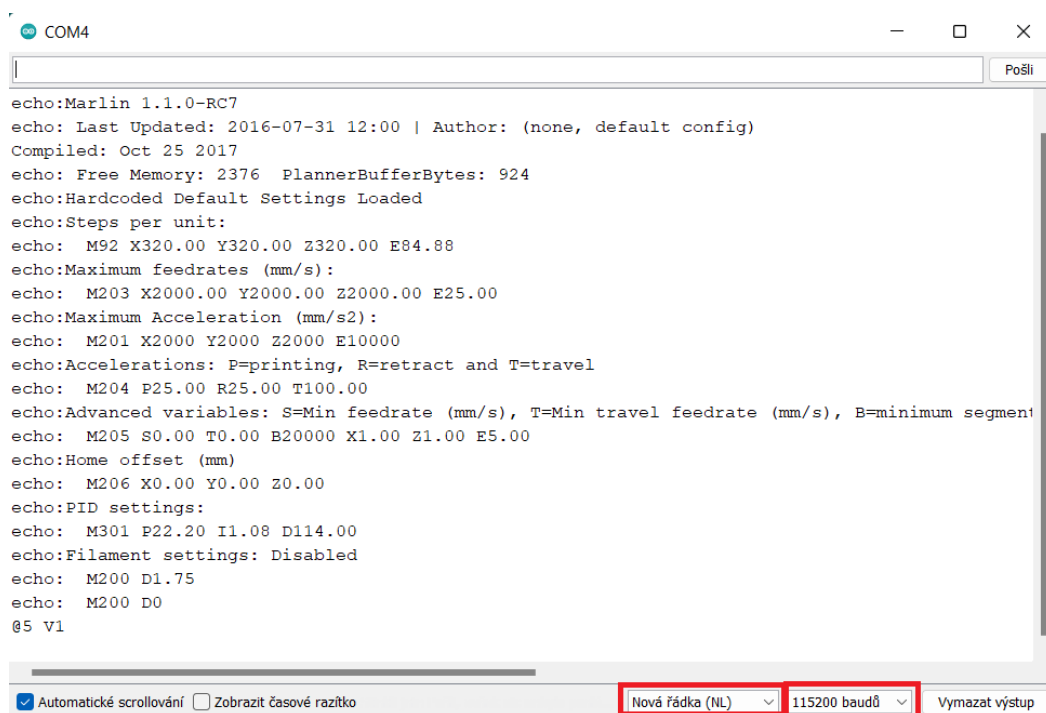


Obrázek 18 Propojení extruderu s ramenem

4.2. Kalibrace ramene

Po spuštění se rameno nepohybovalo tak jak jsme předpokládali. Koncový bod nedržel výšku v ose Z a v zbylých směrech byl pohyb nepřesný a trhavý. Bylo tedy nutné rameno zkalibrovat.

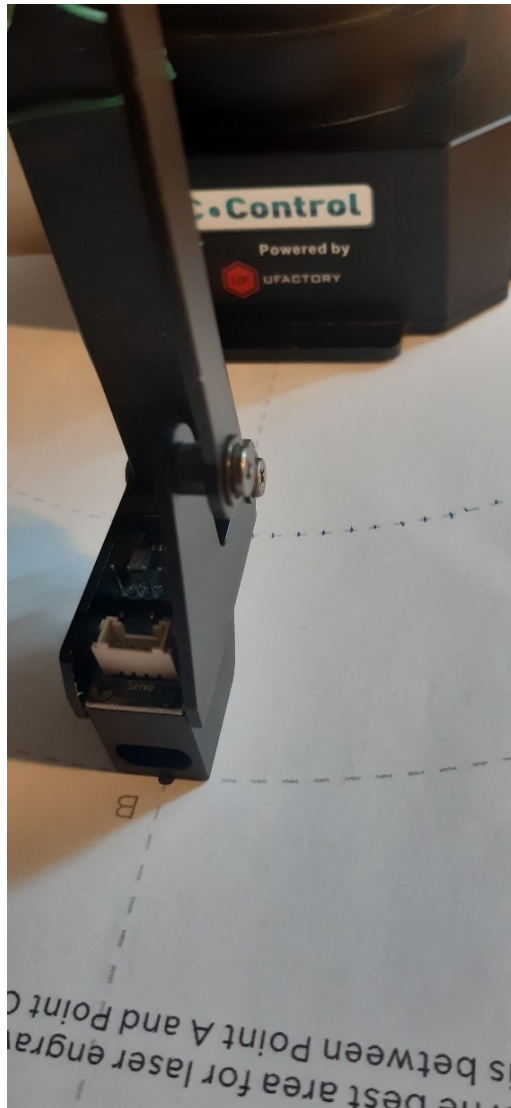
Z ramene musí být odmontovány veškeré moduly, jako je v našem případě ten 3D tiskový. Na kalibrační list ve formátu A4 se na vyznačená místa umístila základna robotického ramene. Rameno se připojilo k počítači a spustil se program Arduino IDE, pro sériovou komunikaci se zabudovaným Arduinem Mega 2560. Po ověření, že je rameno připojeno k správnému USB portu jsme spustili sériový monitor. V něm jsme nastavili modulační rychlost na 115200 baudů a psaní nového řádku (Obrázek 19). Následně jsme pomocí příkazového řádku poslali příkaz „M2019“, kterým se deaktivují veškeré krokové motory ramene. Tento krok byl potvrzen vypsáním „OK“ na monitoru. Po vypnutí pohonů bylo ramenem možné volně hýbat a koncový bod byl přesunut na místo na kalibračním listu vyznačeným písmenem „B“ (viz Obrázek 20). Poté byl poslán potvrzovací příkaz „M2401 B“. Tento krok byl znovu potvrzen vypsáním „OK“ na monitoru. Tímto byla celá kalibrace dokončena.



```
COM4
echo:Marlin 1.1.0-RC7
echo: Last Updated: 2016-07-31 12:00 | Author: (none, default config)
Compiled: Oct 25 2017
echo: Free Memory: 2376  PlannerBufferBytes: 924
echo:Hardcoded Default Settings Loaded
echo:Steps per unit:
echo:  M92 X320.00 Y320.00 Z320.00 E84.88
echo:Maximum feedrates (mm/s):
echo:  M203 X2000.00 Y2000.00 Z2000.00 E25.00
echo:Maximum Acceleration (mm/s2):
echo:  M201 X2000 Y2000 Z2000 E10000
echo:Accelerations: P=printing, R=retract and T=travel
echo:  M204 P25.00 R25.00 T100.00
echo:Advanced variables: S=Min feedrate (mm/s), T=Min travel feedrate (mm/s), B=minimum segment
echo:  M205 S0.00 T0.00 B20000 X1.00 Z1.00 E5.00
echo:Home offset (mm)
echo:  M206 X0.00 Y0.00 Z0.00
echo:PID settings:
echo:  M301 P22.20 I1.08 D114.00
echo:Filament settings: Disabled
echo:  M200 D1.75
echo:  M200 D0
@5 V1
```

Automatické scrollování Zobrazit časové razítko Nová řádka (NL) 115200 baudů

Obrázek 19 Sériový monitor a jeho nastavení pro komunikaci s ramenem

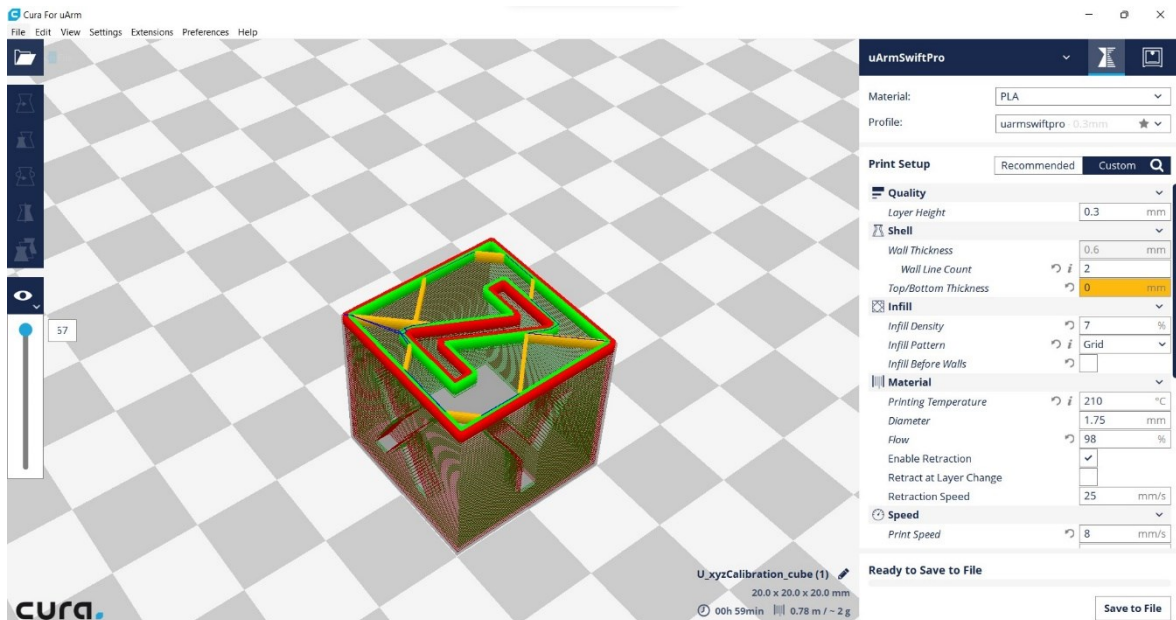


Obrázek 20 Kalibrace ramene v bodě B

5. Tisk

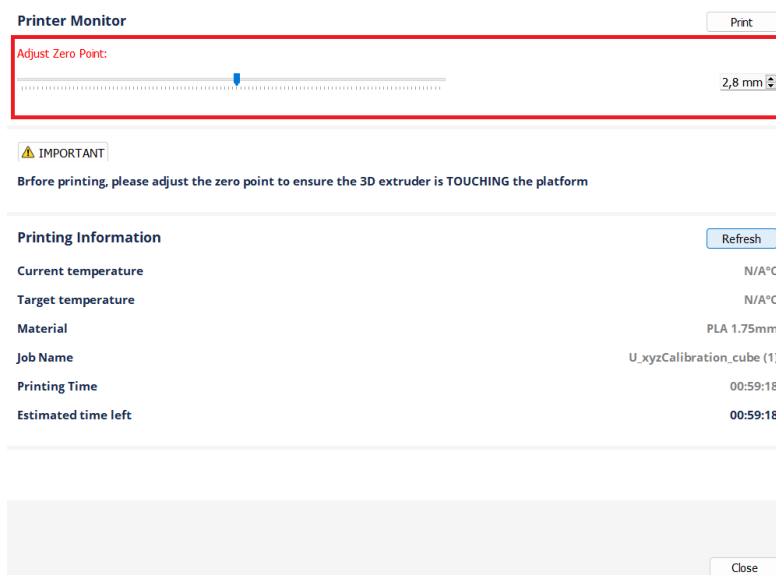
5.1. Příprava tisku

Příprava začínala vymodelováním součásti a jejím převedením do formátu STL. Dále se s modelem součásti pracovalo ve sliceru CuraForuArm (Obrázek 21). Zde musel být nastaven správný profil pro tisk robotickým ramenem. V prostředí programu jsme nastavili vhodné parametry tisku. Jelikož jsme tisknuli materiálem PLA tak byla nastavena teplota tisku na 210°C, a protože se jednalo o mechanicky nenamáhanou součást, bylo možné procento výplně nastavit na nízkou hodnotu. Oproti klasické verzi Cura je ale výběr mnoha nastavení parametrů zablokován výrobcem. Veškerá důležitá nastavení jsou ale zachována.



Obrázek 21 Prostředí CuraForuArm

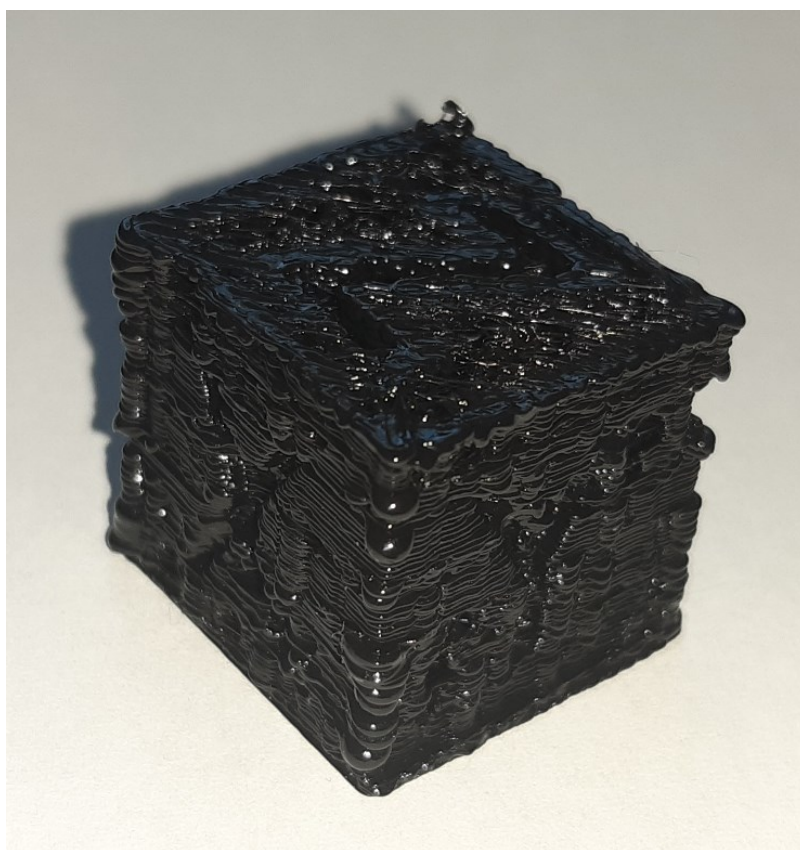
Po dokončení nastavení tisku je třeba kartě Extensions spustit monitor tisku. V monitoru tisku se musí před každým tiskem nastavit nulová poloha pro správné nanesení a přilnutí první vrstvy k podložce (Obrázek 22). Ta se nastaví tak, že postupně měníme hodnoty v příslušném okně a pozorujeme kdy se robotické rameno dotkne tryskou námi zvolené tiskové plochy (speciální podložka, oboustranná lepicí páska apod.). Po dokončení tohoto nastavení je třeba zkontrolovat, jestli je filament správně zaveden a jestli je tisková plocha čistá. Rameno je po zahřátí trysky na požadovanou teplotu připraveno k tisku.



Obrázek 22 Nastavení nulového bodu v tiskovém monitoru

5.2. Průběh Tisku

Bohužel rameno se během tisku nechovalo dle očekávání. Dělo přibližně pěti vteřinové pauzy v místech připojení výplně, v oblastech drobných detailů na perimetru součásti a při změně vrstvy. Zahřátá tryska během pauzy natavovala okolní již vytištěný materiál, ten se deformoval, a to způsobilo jak značně zhoršenou kvalitu povrchu, tak i sníženou pevnost součásti (viz Obrázek 23). Vygenerovaný G-kód se skládal převážně z lineárních pohybů a neměl v sobě žádné příkazy o pauzách. Problém tedy nebyl v nastavení sliceru, tomu by odpovídal i fakt, že předpokládaný čas tisku byl výrazně kratší než skutečný čas tisku. Vyzkoušeli jsme různé kabely pro přenos dat, v nich problém také nebyl. Obrátili jsme se tedy na technickou podporu výrobce, ale ani ta nám nebyla schopna s problémem pomoci. Z těchto důvodů jsme se v následující kapitole porovnávali pouze jednoduché součásti bez výplně.



Obrázek 23 Vytištěná součást – problém s tiskem

6. Porovnání vytištěných součástí na robotickém ramenu a na klasických tiskárnách

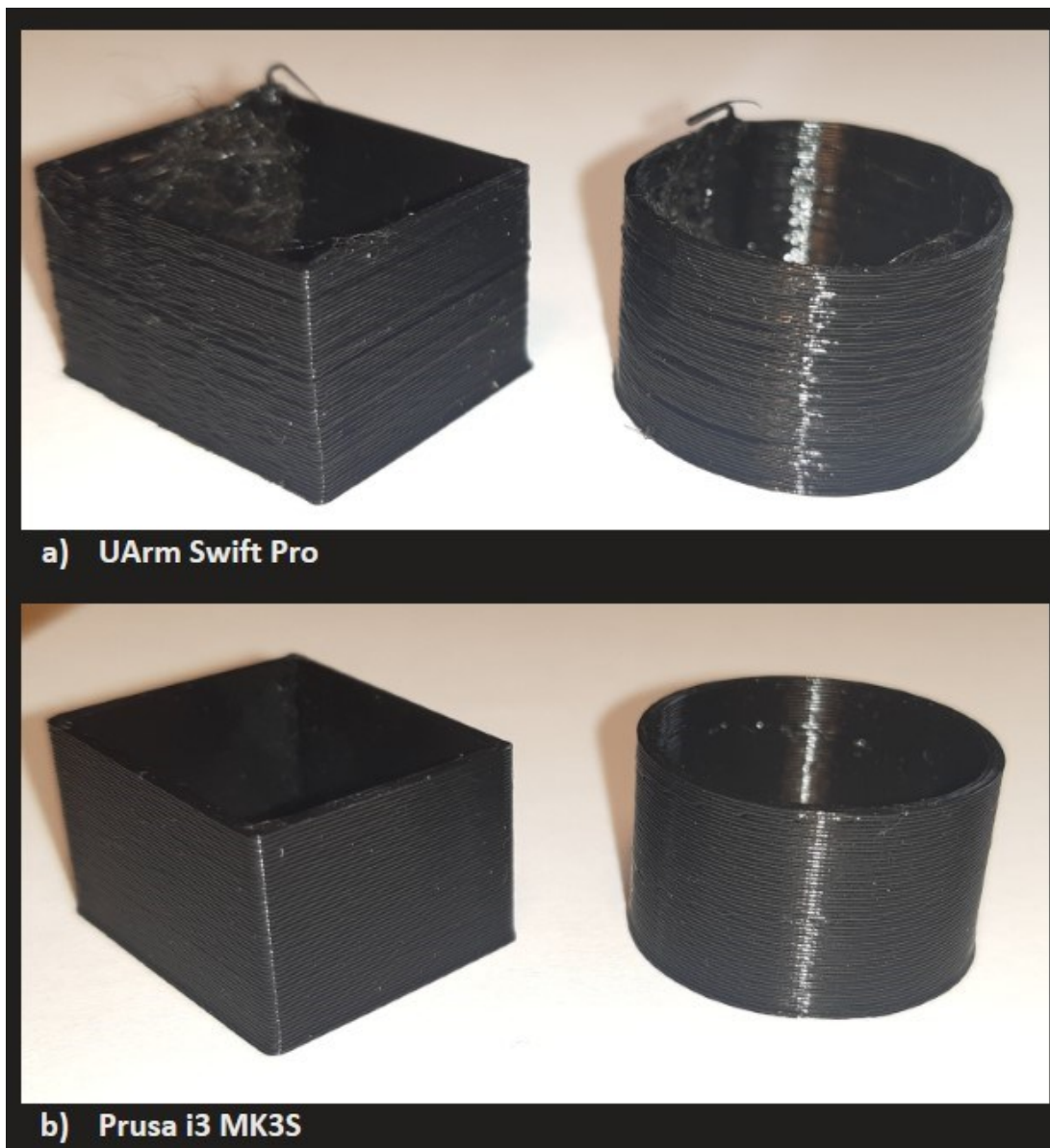
Pro porovnání jsme zvolili tiskárnu kartézského typu Prusa i3 MK3S. Porovnávali jsme rozměry, tiskový čas a optický vzhled modelu krychle a válce. Pro každý model jsme vytiskli tři vzorky na každé z tiskáren. Následně jsme změřili hlavní rozměry každé součásti ve třech místech a získané hodnoty jsme pro danou součást zprůměrovali. Veškeré takto získané hodnoty jsme zadali do tabulky 1 a 2.

KVÁDR								
Teoretické rozměry			uArm Swift Pro			Prusa i3 MK3S		
a [mm]	b [mm]	h [mm]	a [mm]	b [mm]	h [mm]	a [mm]	b [mm]	h [mm]
20	25	15	19,90	24,30	14,80	20,15	25,10	14,95
			20,25	24,25	14,85	20,00	25,05	14,90
			20,15	24,3	14,8	19,95	25,05	14,95
Čas tisku [min]			23			5		

Tabulka 1 Naměřené hodnoty pro model kvádrů

VÁLEC					
Teoretické rozměry		uArm Swift Pro		Prusa i3 MK3S	
d [mm]	h [mm]	d [mm]	h [mm]	d [mm]	h [mm]
25	15	24,25	14,75	24,90	14,90
		24,90	14,90	25,00	14,90
		24,75	14,85	25,05	14,95
Čas tisku [min]		26		5	

Tabulka 2 Naměřené hodnoty pro model válce



Obrázek 24 Vzhled vytištěných součástí

Z tabulek 1 a 2 je patrné, že robotické rameno má menší přesnost a opakovatelnost než klasická tiskárna. Čas tisku je mnohonásobně větší. Součásti vytištěné na rameni se vyznačují horší kvalitou povrchu, jednotlivé vrstvy na sebe přesně nenasazují a některé ani nejsou spojené (viz Obrázek 24). Tiskárna Prusa je ale zařízení určené a navržené přímo pro 3D tisk, z důvodu jeho konstrukce má vyšší tuhost a nosnost. To mu umožňuje například vyšší rychlosti a zrychlení během tisku, osazení tiskové hlavy senzory pro přesné nastavení nulové výšky a dodatečným chlazením tištěné součásti.

7. Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo oživení robotického ramene uArm Swift Pro. Jeho osazení modulem pro 3D tisk, a porovnání ramene a jeho výtisků s tiskárnami klasického typu.

První částí práce se zabývá seznámením s aditivními technologiemi, jejich historií, principem a druhy. Dále se věnuje pouze metodě FDM. U ní jsou popsány nejčastěji používané materiály a konstrukce tiskáren, detailněji se zabývá využití robotických ramen.

Další část obsahuje popis robotického ramene uArm Swift Pro, jeho technické specifikace, konstrukci a obsluhu. Následně se věnuje modulu pro 3D tisk, principu jeho použití a softwaru spojeným s jeho řízením.

V praktické části byl proveden matematický popis ramene. Zjednodušené schéma ramene bylo popsáno maticovou metodou. Získaná rovnice se využila pro generaci pracovní oblasti ramene s tiskovou hlavou v programu Matlab R2021b.

Robotické rameno s tiskovým modulem bylo sestaveno. Dále byla nutná kalibrace ramene, která odstranila nepřesnosti v jeho pohybech.

Poté se práce věnuje ověření možnost tisku a jeho kvality. Výtisky byly porovnány s tiskárnou klasického typu Prusa i3 MK3S. Toto srovnání dopadlo dle očekávání, Prusa i3 je stroj vyrobený přímo pro účely 3D tisku, kdežto robotické rameno má mnoho dalších využití.

Rameno uArm Swift Pro je rozhodně správnou volbou pro pochopení principu robotiky, přestože není již výrobcem podporováno. Díky desce Arduino Mega se dá do robota snadno nahrát vlastní řídicí program. 3D tiskový modul je dobrý doplněk, rychlostí a přesností ale klasickým tiskárnám konkurovat nemůže.

Bibliografie

1. N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*. 14. Srpen 2019, stránky 1286-1296.
2. Tomáš, Havlan. *3D prototyping mechanismů*. Praha : ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, 2016.
3. Slovák, Vojtěch. *Metody rychlého prototypování (RP) použitelné ve slévárenství*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009.
4. Wong, Kaufui V. a Hernandez, Aldo. A Review of Additive Manufacturing. *International Scholarly Research Notices*. 2012, ID 208760.
5. RepRap. *www.reprap.org*. [Online] 4. 6 2019. [Citace: 28. 7 2022.] <https://reprap.org/>.
6. fs.cvut.cz. *Fakulta Strojní ČVUT v Praze*. [Online] ©2014-2022. [Citace: 28. 7 2022.] <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/fdm-3dtisk/>.
7. Swetham, Thirunahary and Reddy, Ketham Madhana Mohan and Huggi, Akhil and Kumar, MN. A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. 2017, 3, stránky 353-361.
8. prusa3d.com. *Prusa research - průvodce materiály*. [Online] 2022. [Citace: 30. 7 2022.] https://help.prusa3d.com/cs/category/pruvodce-materialy_220.
9. Krůpa, Jiří. *APLIKACE PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ VE 3D TISKU*. Brno : VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2022.
10. Creality3D.shop. *Creality3D*. [Online] 2022. [Citace: 2. Srpen 2022.] <https://creality3d.shop/blogs/choose-your-3d-printer/core-xy-vs-cartesian>.
11. Krejčík, Petr. *Bezpodporový 3D tisk na 6-ti osém robotickém rameni*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2018.
12. sparkfun.com. *Sparkfun Start Something*. [Online] 2022. [Citace: 31. 7 2022.] <https://www.sparkfun.com/products/14342>.
13. ufactory.cc. *uFactory*. [Online] 2022. [Citace: 31. 7 2022.] <https://www.ufactory.cc/>.
14. Sparkfun.com. *uArm Quick-Start Guide*. [Online] Červenec 2017. [Citace: 31. 7 2022.] <https://cdn.sparkfun.com/assets/3/d/3/a/8/uArm-Swift-Pro-Quick-Start-Guide.pdf>.
15. www.botland.store. *3D Printer Kit for uArm Swift Pro*. [Online] Botland, 2022. [Citace: 8. 8 2022.] <https://botland.store/withdrawn-products/13553-3d-printer-kit-for-uarm-swift-pro.html>.
16. M. Valášek, V. Bauma a Z. Šika. *Mechanika B*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2006.