



# 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. Proved'te srovnání jednotlivých typů kinematik. Navrhněte konstrukční řešení SCARA mechanismu a proved'te 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 nejčastěji používaných kinematikách FDM 3D tiskáren a porovnává jejich vlastnosti z hlediska složitosti konstrukce a tiskových vlastností. V oblasti konstrukce tiskárny vychází z open-source projektu x-scara. Cílem práce je navrhnout kompletní 3D tiskárnu využívající kinematiku SCARA a implementovat kinematiku pro Klipper firmware. Práce se dále zaměřuje na testování a kalibraci tiskárny pro dosažení vyšší kvality a zkrácení času tisku.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

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

## **ABSTRACT**

Překlad abstraktu (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

## **KEYWORDS**

Překlad klíčových slov (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)



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.



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské/diplomové/disertační práce panu doc. Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.



# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>21</b>
<b>1 Kinematika</b>	<b>23</b>
1.1 Souřadný systém . . . . .	23
1.2 Kinematická transformace . . . . .	23
1.2.1 Přímá transformace . . . . .	23
1.2.2 Nepřímá transformace . . . . .	23
1.3 Kinematiky používané v aditivní výrobě . . . . .	23
1.3.1 Kártézská . . . . .	23
1.3.2 Kinematika SCARA . . . . .	24
1.3.3 Kinematika Delta . . . . .	24
1.3.4 Polární kinematika . . . . .	24
<b>2 Praktická část</b>	<b>25</b>
2.1 3D model . . . . .	25
2.1.1 Základna . . . . .	25
2.2 Implementace kinematiky scara do Klippy . . . . .	25
2.2.1 Přímá a inverzní kinematika . . . . .	26
2.3 . . . . .	27
<b>Závěr</b>	<b>29</b>
<b>Literatura</b>	<b>31</b>
<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>33</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>35</b>



## Seznam obrázků





# Seznam tabulek



## Seznam výpisů



# Úvod

Tato práce se zabývá konstrukcí a řízením 3D tiskárny s kinematikou SCARA. Základní model vychází z open-source projektu x-scara

Test cilu

# 1 Kinematika

## 1.1 Souřadný systém

## 1.2 Kinematická transformace

### 1.2.1 Přímá transformace

### 1.2.2 Nepřímá transformace

[3]

## 1.3 Kinematiky používané v aditivní výrobě

FFF 3D tiskárny využívají především paralelní kinematiku

### 1.3.1 Kártézská

Tiskárny s kartézskou kinematikou jsou nejrozšířenější a zároveň nejjednodušším typem kinematiky FFF tiskáren. Kinematika vyžaduje tři krokové motory, jeden pro každou z os. Kartézská kinematika je v současné době nejroziřnější kinematika a to díky jednoduchosti konstrukce a jednoduchosti kinematické transformace.

#### Portálová kinematika (gantry)

Tato kinematika vyžaduje nejméně čtyři krokové motory, tedy jeden motor pro každou z os a jeden další motor pro jednu z os. Zpravidla to bývá osa Z. 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 využívající portálovou kinematiku je Prusa i3 navržena Josefem Průšou nebo cenově přívětivější Creality Ender 3.

#### Kinematika CoreXY

Tato kinematika umožňuje díky stacionárním motorům (v osách X a Y) dosáhnout vyšší rychlosti tisku

**Kinematika CoreXZ**

**1.3.2 Kinematika SCARA**

**1.3.3 Kinematika Delta**

**1.3.4 Polární kinematika**



## 2 Praktická část

### 2.1 3D model

Pro modelování dílů jsem se rozhodl použít CAD software FreeCAD. Pro tento CAD jsem se rozhodl proto, že je opensource 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 pluginů. FreeCAD též umožňuje psaní vlastních skriptů v jazyce Python a nahrávání vlastních maker. [1]

Mnou vytvářené modely vychází z projektu x-scara. [4] Model je rozdělen do tří dílčích částí. První je základna, druhou je rameno a třetí je samotná hlava nástroje. Další částí je sestava s vyhřívanou podložkou.

#### 2.1.1 Základna

Základna je složena ze hliníkových profilů 20x20mm a 20x40mm. Na základnu je upevněno rameno, které se díky lineárně valivým ložiskům pohybuje po vodící tyči o průměru 8mm. 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.

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

V zadní části základny je též prostor pro upevnění elektroniky. Za akrylovým panelem jsou přimontovány dvě DIN lišty, na které jsou pomocí adaptérů upevněny jednotlivé elektronické prvky.

### 2.2 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). [2]

## 2.2.1 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).

Pro další výpočty je potřebné znát Elbow Crosstalk Ratio (převodový poměr řemenice v ose ramene vůči řemenici v ose kloubu).

$$ECR = \frac{n_S}{n_E} \quad (2.1)$$

### Přímá kinematika

$$\phi_S = a \quad (2.2)$$

$$\phi_E = b - \frac{a}{ECR} \quad (2.3)$$

$$a\_sin = -\sin(\phi_S) \cdot L_1 \quad (2.4)$$

$$a\_cos = \cos(\phi_S) \cdot L_1 \quad (2.5)$$

$$b\_sin = -\sin(\phi_S + \phi_E) \cdot L_2 \quad (2.6)$$

$$b\_cos = \cos(\phi_S + \phi_E) \cdot L_2 \quad (2.7)$$

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

$$x = a\_sin + b\_sin + x_{offset} \quad (2.8)$$

$$y = a\_cos + b\_cos + y_{offset} \quad (2.9)$$

## Inverzní kinematika

Nejprve je třeba kompenzovat offset polohy TCP v osách x a y.

$$x = -(raw_x - x_{offset}) \quad (2.10)$$

$$y = (raw_y - y_{offset}) \quad (2.11)$$

Dalším krokem je výpočet vzdálenosti od počátku.

$$hypot = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.12)$$

Dále se vypočítají úhly ramen  $\phi_S$  (shoulder) a  $\phi_E$  (elbow).

$$\phi_S = \arctan2(x, y) - \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot hypot}\right) [\text{rad}] \quad (2.13)$$

kde  $L_1$  a  $L_2$  jsou délky ramen.

$$\phi_E = \frac{\phi_S}{ECR} + \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 + L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right) [\text{rad}] \quad (2.14)$$

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

Následně stačí převést úhel v radiánech na stupně.

$$\Phi_S = \phi_S \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad (2.15)$$

$$\Phi_E = \phi_E \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad (2.16)$$

## 2.3



# **Závěr**

Shrnutí studentské práce.



# Literatura

- [1] FreeCAD: About FreeCAD – FreeCAD Documentation. 2013.  
URL [https://wiki.freecad.org/About\\_FreeCAD](https://wiki.freecad.org/About_FreeCAD)
- [2] Klipper 3D: Klipper Code Overview. 2023, accessed: 2023-10-10.  
URL [https://www.klipper3d.org/Code\\_Overview.html](https://www.klipper3d.org/Code_Overview.html)
- [3] Kolíbal, Z.: *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIAM, první vydání. vydání, 2016, ISBN 978-80-214-4828-5.
- [4] madl3x: x-scara. 2023, gitHub repository.  
URL <https://github.com/madl3x/x-scara>





# Seznam symbolů a zkratek

**KolikMista** pouze ukázka vyhrazeného místa

**TCP** poloho koncového bodu – Tool Center Point

$f_{vz}$  vzorkovací kmitočet



## Seznam příloh