

3D tiskárna typu SCARA

Bakalářská práce

Autor práce: TOMÁŠ BATELKA
Vedoucí práce: doc. Ing. PETR VYROUBAL, Ph.D.
Oponent: Ing. MAREK SEDLAŘÍK

Brno, 17. 6. 2025

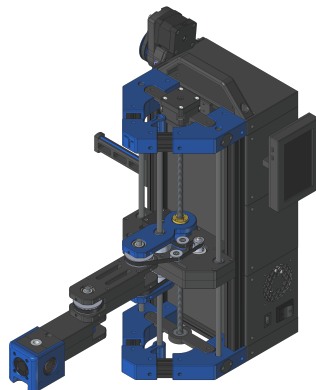
■ Teoretická část

- Seznámit se s kinematikou SCARA ✓
- Provést srovnání kinematik FFF 3D tiskáren ✓

■ Praktická část

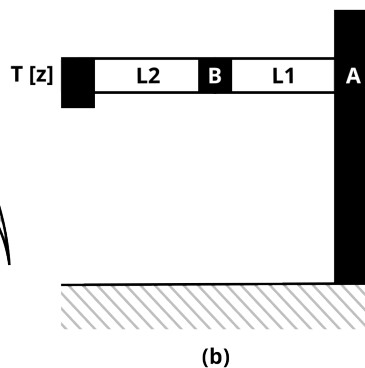
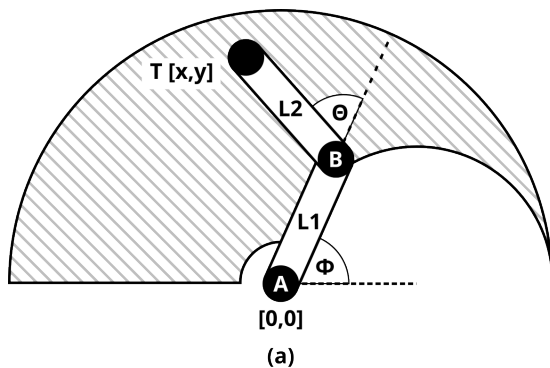
- Navrhnout konstrukční řešení SCARA 3D tiskárny ✓
- Vybrat komponenty pro stavbu 3D tiskárny ✓
- Implementovat kinematiku do firmwaru Klipper ✓
- Sestavit 3D tiskárnu, zkalibrovat a otestovat ji ✓

- V oblasti 3D tisku je SCARA kinematika málo používaná
- Chybějící implementace v Klipperu a dalších firmwarech
- 3D tiskárny s kinematikou SCARA sice již existují, ale jsou nekompletní
- Můj vlastní zájem o 3D tisk a touha po kompletním návrhu vlastní tiskárny



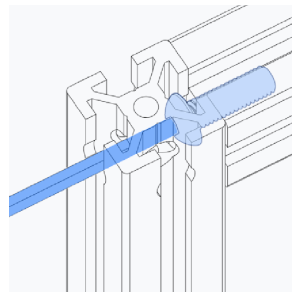
Obr. 1: 3D tiskárna FEKT-SCARA

SCARA kinematika

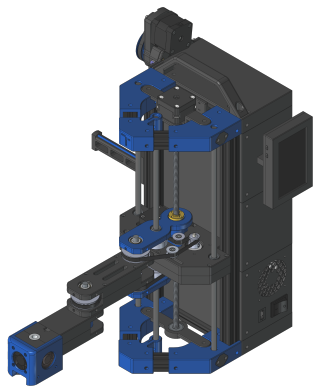


Obr. 2: Pracovní prostor SCARA robotu

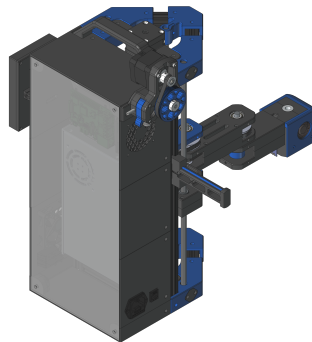
- 45 navržených modelů
- Celkem 66 tisknutých dílů (z toho 9 převzatých)
 - Rameno: 11 dílů
 - Základna: 35 dílů
 - Displej: 6 dílů
 - Extruder: 8 dílů (7 převzatých)
 - Držák tiskové struny: 1 díl
 - Tisková hlava: 5 dílů (2 převzaté)
- 12 hliníkových profilů V-slot
 - 2×2040 (\leftrightarrow 400 mm)
 - 2×2020 (\leftrightarrow 130 mm)
 - 8×2020 (\leftrightarrow 60 mm)



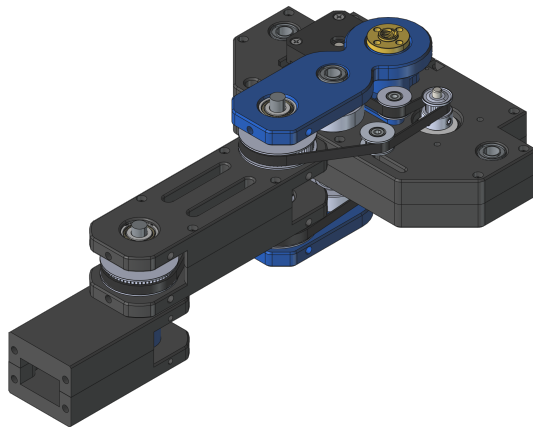
Obr. 3: Blind joint



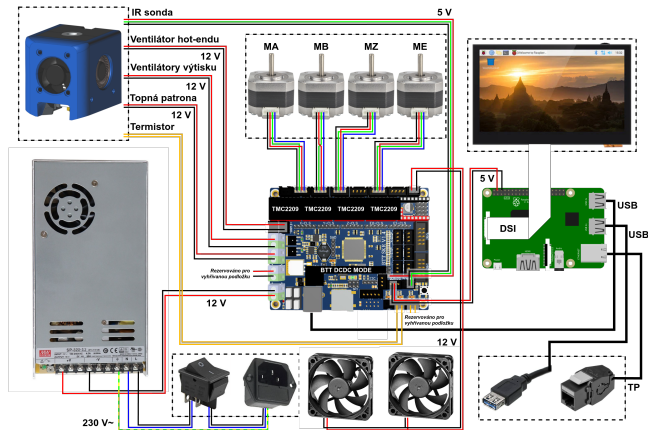
Obr. 4: Izometrický pohled z
přední strany



Obr. 5: Izometrický pohled ze
zadní strany

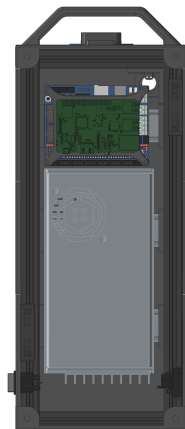


Obr. 6: Izometrické zobrazení sestavy ramene



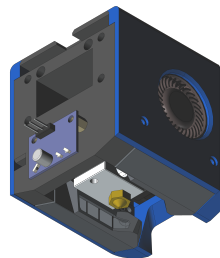
Obr. 7: Schéma zapojení

- Řídící deska: **BTT SKR 1.4 + BTT DCDC MODE**
- Řadiče: 4×**BTT TMC2209**
- Mikropočítač: **Raspberry Pi 2b**
- Displej: **BTT PiTFT43**
- Zdroj: **MeanWell SP-320-12**
- Ventilátory: 2×**SUNON MF60151V1-1000U-A99**
- Napájecí konektor: **JR-101-1F**
- Kolébkový spínač: **RS2013C3BK**
- RJ45 keystone: **Datacom 4003**
- Kabeláž:
 - **UL1332 0,34 mm² a 0,75 mm² (FEP)**
 - **CYA 0,75mm² H05V-K (PVC)**



Obr. 8: Pohled na skříň s elektronikou

- Hotend: **E3D V6**
- Topné těleso: **12V 50W**
- Termistor: **NTC100K B3950**
- Sonda: **Mellow OrmerodSensor**
- Ventilátory:
 - Radiální: **2 × 12V 4010**
 - Axiální: **1 × 12V 3010**
- Bowden trubička: **PTFE** (ID 2 mm, OD 4 mm)
- Teplovodivá pasta: **Nitrid Boritý**

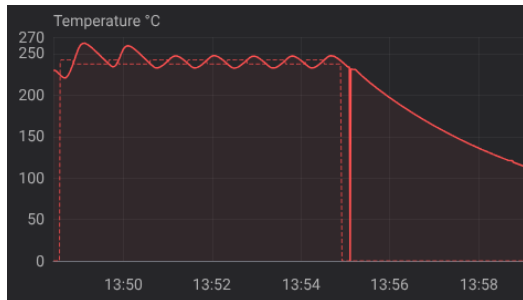


Obr. 9: Izometrický pohled ze zadní strany

- `klipper/klippy/chelper/__init__.py`
 - Slouží jako wrapper pro kód implementovaný v jazyce C
 - Obsahuje mj. hlavičky metod a nastavení překladače
- `klipper/klippy/chelper/kin_scara.c`
 - Implementace inverzní kinematiky
- `klipper/klippy/kinematics/scara.py`
 - Implementace přímé kinematiky
 - Inicializace kinematiky
 - Validace pohybu
 - Homing procedura
 - ...

Jednorázové kalibrace:

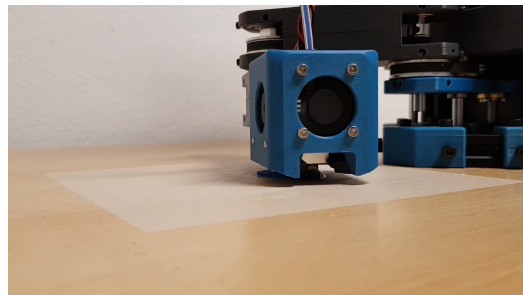
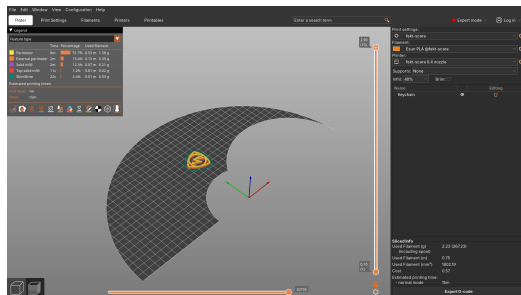
- PID kalibrace topného tělesa extruderu
- Kalibrace kroku extruderu
- Kalibrace první vrstvy (Z Offset Calibration)
- Měření rezonančních frekvencí (Shaper Calibration)



Obr. 10: Průběh PID kalibrace topného tělesa

Při každém tisku je součástí PRINT_START makra:

- Automatická kalibrace podložky (Bed Mesh Leveling)



Obr. 11: Testovací výrobek v PrusaSliceru

Obr. 12: Video na platformě YouTube

V rámci zpracovávání bakalářské práce jsem:

- zpracoval teorii,
- navrhl některé díly 3D tiskárny,
- vybral vhodné elektronické komponenty,
- dokončil návrh všech dílů,
- sestavil finální seznam materiálu a nakoupil jej,
- implementoval kinematiku SCARA do firmwaru Klipper,
- sestavil tiskárnu, nakonfiguroval tiskárnu a otestoval ji,
- připravil profil pro PrusaSlicer.

Výstup dostupný na github.com/fekt-scara.

- 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.
- 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>
- Kaščák, J.; Kočiško, M.; Vodilka, A.; aj.: Adhesion Testing Device for 3D Printed Objects on Diverse Printing Bed Materials: Design and Evaluation. Applied Sciences, ročník 14, č. 2, 2024, ISSN 2076-3417, doi:10.3390/app14020945. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/2/945>
- Klipper 3D: Klipper Code Overview. 2023, [cit. 2025-1-5]. URL https://www.klipper3d.org/Code_Overview.html

Děkuji za pozornost!

Jaký vliv má délka ramen SCARA mechanismu na přesnost a stabilitu pohybu?

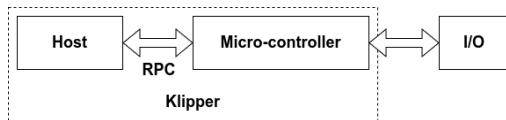
- Čím je délka ramen (segmentů) větší, tím větší může být moment setrvačnosti celého ramene. Důsledkem toho může při vyšších hodnotách zrychlení docházet k zákmitům ramene, který způsobuje jev zvaný Ringing nebo Ghosting.



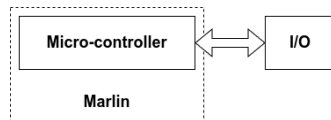
Obr. 13: Ringing/Ghosting

Jaké další alternativy je možné pro řízení SCARA tiskárny použít jiný firmware než Klipper a v čem se liší?

- Lze použít firmware Marlin. Firmware se liší zejména v jazycích implementace a architektuře firmwaru.



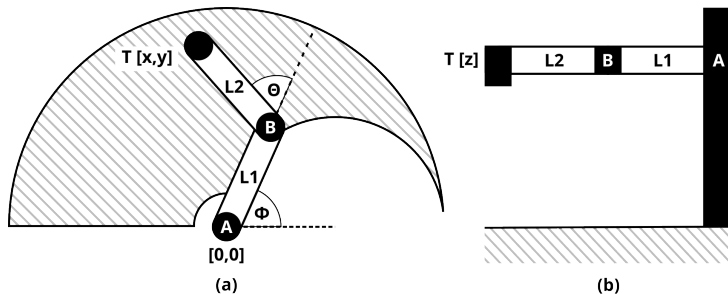
Obr. 14: Architektura firmwaru Klipper



Obr. 15: Architektura firmwaru Marlin

Jaký parametr má největší vliv na přesnost inverzní kinematiky?

- Největší vliv mají délky segmentů ramene – zejména délka segmentu L1. Délka segmentu L1 proto, že přesnost délky prvního segmentu ovlivní přesnost druhého segmentu.



Obr. 16: Pracovní prostor SCARA robotu