



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 proveďte 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

Cílem práce je navrhnout kompletní 3D tiskárnu s kinematikou SCARA a implementovat kinematiku pro Klipper firmware.

KLÍČOVÁ SLOVA

Klíčová slova v originálním jazyce

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

Úvod	21
1 Kinematika	23
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
2 Praktická část	25
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
Závěr	29
Literatura	31
Seznam symbolů a zkratk	33
Seznam příloh	35

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 nejroziřenější 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 ϕ_S (shoulder) a ϕ_E (elbow).

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

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
- [2] Klipper 3D: Klipper Code Overview. 2023, accessed: 2023-10-10.
URL https://www.klipper3d.org/Code_Overview.html
- [3] Kolíbal, Z.: *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUT IUM, 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