



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. Proveďte 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

Práce pojednává o nejčastěji používaných kinematikách FFF (Fused Filament Fabrication) 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, FFF, 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

Úvod	21
1 Aditivní výroba a 3D tisk	23
1.1 Technologie FFF	24
1.2 Části 3D tiskárny	24
1.2.1 Tisková hlava	24
2 Kinematika	25
2.1 Souřadný systém	25
2.2 Kinematická transformace	25
2.2.1 Přímá transformace	25
2.2.2 Nepřímá transformace	25
2.3 Kinematiky používané v aditivní výrobě	25
2.3.1 Kártézská	25
2.3.2 Kinematika SCARA	26
2.3.3 Kinematika Delta	26
2.3.4 Polární kinematika	26
3 Praktická část	27
3.1 3D model	27
3.1.1 Základna	27
3.2 Implementace kinematiky SCARA do Klippy	27
3.2.1 Přímá a inverzní kinematika	28
3.3	29
Závěr	31
Literatura	33
Seznam symbolů a zkratk	35
Seznam příloh	37

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 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 v prototypování, 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 obtížné 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. [2]

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 **konstatní 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.[2]

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. [2]

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. [2]

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 příměsy jiných materiálů ve formě vláken nebo práškové příměsy. 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 rozehřátou 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 vyhřívaná, což zabraňuje deformaci tiskového výrobku a jeho případné oddělení od tiskové plochy. [6]

1.2 Části 3D tiskárny

1.2.1 Tisková hlava

Podstatnou částí tiskové hlavy je ventilátor, který chladí tiskový materiál po jeho vytlačení z trysky.

2 Kinematika

2.1 Souřadný systém

2.2 Kinematická transformace

2.2.1 Přímá transformace

2.2.2 Nepřímá transformace

[4]

2.3 Kinematiky používané v aditivní výrobě

FFF 3D tiskárny využívají především paralelní kinematiku

2.3.1 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

2.3.2 Kinematika SCARA

2.3.3 Kinematika Delta

2.3.4 Polární kinematika

3 Praktická část

3.1 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. [5] 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.

3.1.1 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.

3.2 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). [3]

3.2.1 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).

$$ECR = \frac{n_S}{n_E} \quad (3.1)$$

Přímá kinematika

$$\phi_S = a \quad (3.2)$$

$$\phi_E = b - \frac{a}{ECR} \quad (3.3)$$

$$a_sin = -\sin(\phi_S) \cdot L_1 \quad (3.4)$$

$$a_cos = \cos(\phi_S) \cdot L_1 \quad (3.5)$$

$$b_sin = -\sin(\phi_S + \phi_E) \cdot L_2 \quad (3.6)$$

$$b_cos = \cos(\phi_S + \phi_E) \cdot L_2 \quad (3.7)$$

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

$$x = a_sin + b_sin + x_{offset} \quad (3.8)$$

$$y = a_cos + b_cos + y_{offset} \quad (3.9)$$

Inverzní kinematika

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

$$x = -(raw_x - x_{offset}) \quad (3.10)$$

$$y = (raw_y - y_{offset}) \quad (3.11)$$

Dalším krokem je výpočet vzdálenosti od počátku.

$$hypot = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.12)$$

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

$$\phi_S = \arctan2(x, y) - \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot hypot}\right) [\text{rad}] \quad (3.13)$$

kde L_1 a L_2 jsou délky ramen.

$$\phi_E = \frac{\phi_S}{ECR} + \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 + L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right) [\text{rad}] \quad (3.14)$$

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

Následně stačí převést úhel v radiánech na stupně.

$$\Phi_S = \phi_S \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad (3.15)$$

$$\Phi_E = \phi_E \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad (3.16)$$

3.3

Závěr

Shrnutí studentské práce.

Literatura

- [1] FreeCAD: About FreeCAD – FreeCAD Documentation. 2013.
URL https://wiki.freecad.org/About_FreeCAD
- [2] 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>
- [3] Klipper 3D: Klipper Code Overview. 2023, accessed: 2023-10-10.
URL https://www.klipper3d.org/Code_Overview.html
- [4] 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.
- [5] madl3x: x-scara. 2023, gitHub repository.
URL <https://github.com/madl3x/x-scara>
- [6] MCAE Systems: FFF - Technologie aditivní výroby. n.d., přístup k 5. lednu 2025.
URL <https://www.mcae.cz/technologie/fff/>

Seznam symbolů a zkratek

TCP	poloha koncového bodu – Tool Center Point
FFF	Fused Filament Fabrication
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering

Seznam příloh