

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky

## 3D tisková farma - řídicí aplikace

Petr Lendvorský

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.

Obor: Kybernetika a Robotika

Květen 2023



## Poděkování

Děkuji především svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Zemánkovi, Ph.D. za vedení práce, pravidelné konzultace a zejména za možnost tento projekt vůbec uskutečnit. Dále pak také Ing. Křištofu Pučejdlovi za výbornou technickou podporu a pomoc. Nemalý dík patří také týmu, který v Prusa Research pracuje na jejich řešení podobného problému, za možnost návštěvy a některé podněty a nápady.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 25. května 2023

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí automatické 3D tiskové farmy, konkrétně návrhem řídicí aplikace a uživatelského rozhraní. Pomocí manipulátoru jsou obsluhovány jednotlivé tiskárny tak, aby nebyl nutný fyzický zásah uživatele a tisk mohl probíhat kontinuálně.

**Klíčová slova:** 3D tisková farma, Octoprint, robotický manipulátor

**Vedoucí:** Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.  
Katedra řídicí techniky,  
Karlovo náměstí 13,  
120 00 Praha 2

## Abstract

Goal of this thesis is design and implementation of control software and web user interface of automatic 3D printer farm. Printers in this farm are served by manipulator and should be able to start and run continuously for some time without human intervention.

**Keywords:** 3D printing farm, Octoprint, robotic manipulator

**Title translation:** 3D printing farm - control software



## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	4.4 Řízení skladu.....	21
1.1 Cíl práce .....	2	4.5 Webové rozhraní.....	22
<b>2 Existující řešení</b>	<b>3</b>	<b>5 Implementace a Testování</b>	<b>25</b>
2.1 Farma s ruční obsluhou .....	3	5.1 Implementace .....	25
2.2 Sundávání tisků s využitím tiskové hlavy.....	4	5.1.1 Webové rozhraní .....	25
2.3 Využití robota k sundání výtisků	4	5.1.2 Řídící aplikace.....	25
2.4 Prusa Pro AFS .....	5	5.2 Testování .....	27
<b>3 Konstrukce</b>	<b>7</b>	5.2.1 Testování manipulátoru .....	27
3.1 Mechanická konstrukce .....	7	5.2.2 Testování farmy.....	27
3.1.1 Konstrukce farmy .....	7	<b>6 Závěr</b>	<b>29</b>
3.1.2 Manipulátor.....	8	6.1 Možná rozšíření .....	30
3.1.3 Skladiště plátů .....	10	<b>A Literatura</b>	<b>31</b>
3.1.4 Manipulace s tiskovým plátem	10	<b>B Seznam příloh</b>	<b>33</b>
3.2 Elektronická konstrukce .....	12	B.1 Zdrojové kódy .....	33
3.2.1 Ovládání pohonů .....	12	<b>C Zadání práce</b>	<b>35</b>
3.2.2 Napájení.....	13		
3.2.3 Ovládání tiskáren .....	14		
3.2.4 Řízení manipulace .....	14		
<b>4 Řídící aplikace</b>	<b>15</b>		
4.1 Koncepty řídicí aplikace .....	15		
4.1.1 Čtení stavů jednotlivých tiskáren .....	15		
4.1.2 Využití Octofarm serveru ...	16		
4.1.3 Vlastní octoprint plugin ....	17		
4.1.4 Využití continuous print pluginu.....	17		
4.1.5 Kompletní řízení v hlavní aplikaci .....	17		
4.2 Zvolené řešení .....	18		
4.2.1 Skripty .....	19		
4.3 Režimy provozu manipulátoru ..	19		
4.3.1 Automatický režim .....	19		
4.3.2 Manuální režim .....	21		

## Obrázky

2.1 Manuální farma v Prusa Research [20]. . . . .	3
2.2 Automatická tiskárna Formlabs s košem na výtisky [8]. . . . .	5
2.3 Automatická farma Prusa Pro AFS [13]. . . . .	6
3.2 Hliníkový rám farmy s manipulátorem a jednou tiskárnou. . . . .	8
3.1 Tiskárna Prusa i3 MK3S+ [11]. . . . .	8
3.3 Pohon osy X s koncovým spínačem. . . . .	9
3.4 Vozík pro manipulaci s pláty. . . . .	9
3.5 Skladiště plátů. . . . .	10
3.6 Tiskový plát upravený pro farmu. . . . .	11
3.7 Zasunutí piny manipulátoru pro pohyb s plátem. . . . .	11
3.8 Topologie zapojení jednotlivých částí farmy. . . . .	12
3.9 Driver Pololu Tic 36v4 [19]. . . . .	13
3.10 Raspberry Pi 4 [15]. . . . .	14
4.1 Webové rozhraní Octofarm serveru pro monitoring a správu tiskáren. . . . .	16
4.2 Rozhraní tiskové fronty. . . . .	18
4.3 Gcode skript na vyjmutí tiskového plátu. . . . .	19
4.4 Stavový automat pro přepínání režimů. . . . .	20
4.5 Zobrazovaný stav jednotlivých tiskáren a skladovacích pozic. . . . .	22
4.6 Aktuálně vykonávaná úloha a fronta úloh. . . . .	22
4.7 Rozhraní pro manuální ovládání manipulátoru. . . . .	23
5.1 Schéma komunikace mezi částmi aplikace a farmy. . . . .	26
5.2 Pláty s nápisem připravené ve skladu k odebrání. . . . .	28
5.3 Výsledek testovacího běhu farmy byl nápis "AHOJ LIDI" s každým písmenem na vlastním tiskovém plátu. . . . .	28



# Kapitola 1

## Úvod

V posledních letech zaznamenal 3D tisk výrazný rozmach a to díky širokému záběru v nejrůznějších odvětvích a jeho integraci do výrobních procesů, školních učeben nebo dokonce i domácností. Nicméně, tradiční 3D tiskárny mají společnou jednu významnou vlastnost - vyžadují přítomnost operátora, který se stará o jednotlivé fáze tisku. Těmito fázemi mohou být například příprava tiskového plátu, ovládání tiskárny, odstraňování hotových objektů a další úkony. Tento proces je časově náročný a závislý na lidské péči, což může omezovat možnosti masového a efektivního využití 3D tisku.

V reakci na tyto výzvy vznikají automatické 3D tiskové farmy, které se snaží některé tyto problémy vyřešit. Takové automatické tiskové farmy přinášejí mnoho výhod. Jsou schopny provádět řadu úkolů spojených s 3D tiskem samostatně, od přípravy tiskového plátu až po odstraňování hotových objektů. Díky tomu je možné provozovat tiskovou farmu nepřetržitě a s minimálním lidským zásahem, což vede k významnému zvýšení produktivity a snížení nákladů na pracovní sílu nejen v případě použití zde na fakultě, ale například i při prototypování nebo malosériové výrobě.

## ■ 1.1 Cíl práce

Cílem této práce je navrhnout a vytvořit řídicí aplikaci pro farmu s manipulátorem, která bude schopna před provedením tisku do tiskárny založit nový tiskový plát a po dokončení ho odejmout uložit do skladu. Každá z tiskáren by pak měla mít svou tiskovou frontu, ze které se budou tisky postupně automaticky provádět. Ovládání aplikace by pak mělo být realizováno přes webové rozhraní.

Mechanická část manipulátoru byla již vytvořena v rámci jiné práce, proto zde bude nutné provést jen některé nezbytně nutné změny. Dále pak bude nutné dokončit některé elektronické části farmy a konfiguraci těchto zařízení. Nakonec je cílem dokončit skladiště tiskových plátů a vyřešit jeho monitorinig.

Výsledkem práce by tak měla být automaticky fungující tisková farma, která bude schopna bez nutnosti obsluhy provést několik tisků z pohodlí počítače. V konečném stavu by tak měl uživatel pouze vzdáleně zadat tisk do fronty a po dokončení ho vyzvednout ve skladišti.

## Kapitola 2

### Existující řešení

Idea na automatizaci procesu 3D tisku není zcela novou. Projektů zabývajících se touto problematikou již vzniklo několik, využívající různé principy fungování. V této části rozeberu několik různých způsobů, jak je možné realizovat automatizovanou nebo poloautomatizovanou tiskovou farmu [1].

#### 2.1 Farma s ruční obsluhou

Tento způsob tiskové farmy lze jen těžko zařadit mezi automatické. Jde pouze o větší množství tiskáren na jednom místě, která slouží pro tisk většího počtu výrobků. Veškerá obsluha, vkládání nových plátů nebo jejich odebírání řeší obsluha ručně. Toto řešení tak nenabízí žádnou úroveň automatizace, je pouze možné např. monitorovat stavy tiskáren a zobrazovat je obsluze. Takovou farmu využívá například Prusa Research pro masovou produkci některých částí jejich tiskáren.



Obrázek 2.1: Manuální farma v Prusa Research [20].

## 2.2 Sundávání tisků s využitím tiskové hlavy

Jde o již poloautomatický koncept farmy, která počítá s využitím tiskové hlavy (extruderu) k sundání výtisku. Věnují se mu projekty jako je například 3D Queue [2]. S využitím tiskové hlavy je výtisk sundán z podložky nárazem do něj. Ten je pak hlavou odtlačen do prostoru před tiskárnu, kde se nachází sklad výtiskovaných dílů například v podobě krabice.

Tento koncept tedy nepočítá s odnímáním tiskového plátu z vyhřívané podložky tiskárny po každém tisku ale každý další tisk je proveden na stejný plát. To může vytvořit problém například v podobě nedokonale odejmutého výtisku. V případě, že by část výtisku zůstala na podložce, při dalším tisku by došlo ke kolizi s tiskovou hlavou a tím k jeho poškození, v horším případě i k poškození tiskárny. Opačný problém by mohl nastat, pokud by podložka nebyla zbavena mastnoty, jak je to běžné provádět před každým tiskem. V takovém případě by se první vrstva výtisku nemusela dokonale přilepit k plátu a v průběhu tisku pak mohla odlepit, čímž by byl výtisk opět zmařen.

Tento typ farmy je vhodný pro několik opakování větších tisků. Avšak ve větším měřítku se jedná o velmi nespolehlivý způsob a rozhodně není vhodné tento způsob provozovat bez dozoru člověka, což značně maří ideu tisku bez obsluhy. Toto řešení také nebude fungovat univerzálně pro jakýkoliv výtisk, ten musí mít vyhovující rozměry tak, aby bylo možné jej nárazem tiskové hlavy sundat.

## 2.3 Využití robota k sundání výtisků

K sundávání výtisku z tiskového plátu však nemusí být využita pouze tisková hlava, ale pro to přímo určený robot, jak toho využívá projekt Formlabs [8]. V jejich automatické SLA tiskárně je tisk sundáván zatlačením na výtisk pomocí speciální desky pro sundávání. Díky vhodnějšímu tvaru než je běžná tisková hlava je tak vyřešen problém se sundáváním netypických výtisků, avšak problém s čištěním tiskové plochy zde přetrvává. Výtisky jsou po sundání skladovány v koši u tiskárny.



**Obrázek 2.2:** Automatická tiskárna Formlabs s košem na výtisky [8].

## ■ 2.4 Prusa Pro AFS

Projekt automatické tiskové farmy od renomovaného českého výrobce 3D tiskáren Prusa Research byl představen při příležitosti výstavy Dubai EXPO 2020. Tento systém dostal název AFS (Automated Farm System) [13] a využívá podobný princip fungování a strukturu manipulátoru jako naše farma. Automatizaci tisků tedy zajišťuje výměnou celých magnetických tiskových plátů. Každý tisk je proveden na nový a čistý tiskový plát. V rámci přípravy této práce jsem mohl navštívit pracoviště, kde probíhá vývoj této farmy a měl jsem možnost se seznámit podrobněji s jejím fungováním.

Základem jsou tiskárny umístěné v několika sloupcích nad sebou a vedle sebe. Na ose X se nachází vozík pohybující se v ose Z, na kterém je manipulátor zajišťující vyndávání a zandávání plátů z/do tiskáren, případně skladovacích slotů.

AFS na rozdíl od našeho řešení používá speciální 3D tiskárny, které jsou určené pouze pro účely farmy a jsou tak pro tento účel speciálně uzpůsobené. Například větším prostorem kolem vyhřívané podložky tak, aby bylo možné ho při vysouvání a zasouvání plátu ho celý manipulátorem obejmout. Naše farma využívá běžné tiskárny MK3s+, které byly původně provozovány samostatně mimo farmu, což značně snížilo náklady na konstrukci.

Systém vyndávání a zandávání plátů pracuje se speciální verzí tiskových plátů, které jsou širší než vyhřívaná podložka s magnety, tudíž je možné





**Obrázek 2.3:** Automatická farma Prusa Pro AFS [13].

manipulátorem obejmout plát z obou stran a tím zajistit jeho rovnoměrné sundání z podložky tak, aby nedošlo k jeho ohybu. Tento ohyb by mohl v ojedinělých případech u některých tisků způsobit odlepení z podložky. Výtisk by tak mohl spadnout a kolidovat s jinými tiskárnami nebo částmi farmy. Zároveň je tiskový plát, podobně jako náš plát, vybaven dvěma sloty pro hroty, kterými jej manipulátor zachytí a pohybuje s ním při procesu vysouvání a zasouvání v ose Y.

3D tiskárny v AFS nejsou pevně přišroubovány k rámu, mohou se pohybovat ve směru osy Y. Tento systém je zde z důvodu snadné výměny tiskáren a pro jejich snadnou údržbu. Z toho důvodu je nutné zajistit při každé manipulaci s tiskovým plátem zjištění aktuální pozice tiskárny. To je zajištěno kamerovým systémem pomocí dvojice QR kódů, které jsou umístěny na tiskových plátech. Kamera umístěná na manipulátoru pak dokáže díky nim zjistit přesnou polohu tiskárny vzhledem k manipulátoru, což umožní manipulaci s plátem provést nezávisle na poloze tiskárny. Kamera by v budoucnosti měla sloužit i k rozpoznání vad v průběhu tisku, podobně jako kamery, které jsou umístěné nad tiskárnami v našem řešení. Dále pak QR kód umístěný na tiskovém plátu slouží také k jeho identifikaci v systému. Systém skrze něj dokáže sledovat, zda již byl daný tiskový plát použit nebo ne.

Systém skladu je obdobný jako u naší farmy, těsně nad sebou jsou umístěné poličky, do kterých je možné zakládat pláty. Způsob zjištění obsazenosti mají prozatím implementovaný obdobně jako u naší farmy v softwarové podobě, kdy si pouze řídicí program hlídá, do kterých polic založil použitý plát, ale vložení nepoužitého plátu musí zadat uživatel ručně.



## Kapitola 3

### Konstrukce

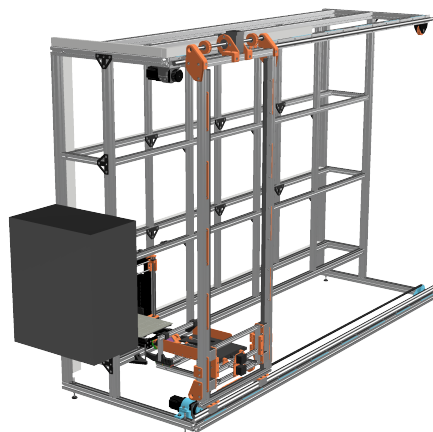
V této části práce rozeberu mechanickou a elektrickou konstrukci tiskové farmy. Popsána bude mechanika manipulátoru, konstrukce skladu na tiskové pláty a umístění 3D tiskáren. Dále pak také zapojení elektronických a řídicích komponentů.

Návrh a realizace převážné většiny této konstrukce nebyla náplní této práce, je dílem zejména Ing. Krištofa Pučejdla a dalších. V rámci této práce jsem provedl pouze nezbytné změny, úpravy, opravy a dokončení některých mechanických částí, jako bylo například rozšíření skladu nebo výroba tiskových plátů. U elektrické konstrukce jsem pak provedl například zapojení druhého sloupce tiskáren, úpravu rozvaděče přidáním bezpečnostního tlačítka a většinu softwarové konfigurace prvků.

### 3.1 Mechanická konstrukce

#### 3.1.1 Konstrukce farmy

Na hliníkovém rámu znázorněném na obrázku 3.2 jsou umístěny 3D tiskárny Prusa MK3s+ do sloupců po třech nad sebou. Rám je připraven na instalaci čtyř sloupců vedle sebe, z toho jeden sloupec je určen pro skladiště. Celkem tedy farma může mít až devět tiskáren. V době tvorby této práce byly však tiskárnami osazeny pouze první dva slouce, tedy celkem šest tiskáren. Tyto tiskárny používají běžný vyměnitelný tiskový plát, který je magneticky uchycen k vyhřívané podložce (heatbedu).



**Obrázek 3.2:** Hliníkový rám farmy s manipulátorem a jednou tiskárnou.



**Obrázek 3.1:** Tiskárna Prusa i3 MK3S+ [11].

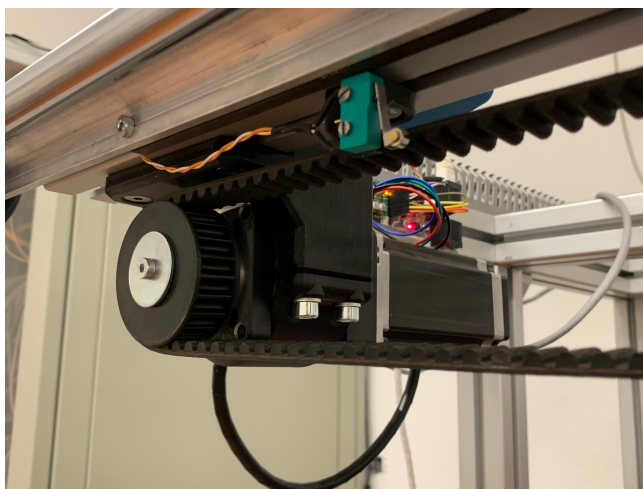
Každá tiskárna je pevně přišroubována k hliníkovému rámu tak, aby neměnila svou pozici. Manipulátor totiž není vybaven žádným nástrojem, pomocí kterého by mohl zjistit případné změny v poloze tiskárny. Tuto polohu je nutné zadat do programu manuálně a upravit v případě, že by se poloha tiskárny změnila.

### ■ 3.1.2 Manipulátor

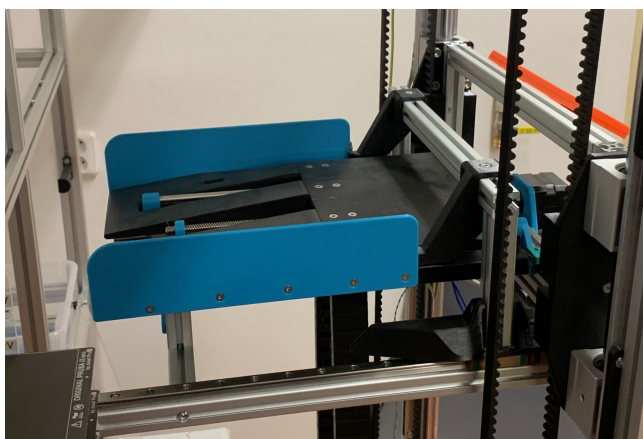
Před rámem s tiskárnami se nachází samotný manipulátor. Ten se může pohybovat v ose X po celé délce rámu a nahoru/dolu v ose Z tak, aby bezpečně dosáhl do všech pozic určených pro tiskárny. V ose Y pak je možné nezávisle pohybovat s vozíkem na plát a trny pro uchycení plátu. Celkově jde tedy o manipulátor, který má čtyři stupně volnosti a každý má pro pohyb

vlastní pohon.

Pohony všech jsou řešeny pomocí krokových motorů. V případě pohybu X se motor nachází na rámu a nepohybuje se (na obrázku 3.3). Síla z něj je přenášena řemenem na vozík pohybující se v ose X. Na tomto vozíku je pak umístěn motor s převodovkou pro vertikální pohyb v ose Z, kde je opět síla přenášena tentokrát přes převodovku řemenem na vozík pro manipulaci s pláty, který je zobrazen na obrázku 3.4. Pohyb tohoto vozíku v ose Y na plát s trny je pak realizován motory s trapézovou tyčí. Všechny osy jsou vybaveny koncovými spínači pro zjištění výchozí (home) pozice.



**Obrázek 3.3:** Pohon osy X s koncovým spínačem.



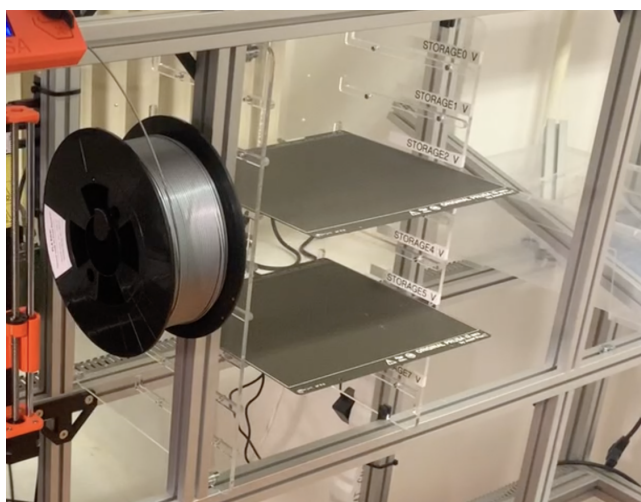
**Obrázek 3.4:** Vozík pro manipulaci s pláty.

### 3.1.3 Skladiště plátů

V prostoru mezi druhým a třetím sloupcem tiskáren je umístěno skladiště tiskových plátů. To slouží pro uskladnění prázdných plátů a plátů s hotovými výtisky. Skladovací pozice jsou široké přesně na šířku plátu a mají na svém konci doraz. Je tak možné plát umístit do stejné fixní polohy, jak manipulátorem, tak ručně obsluhou. Díky tomu se plát nachází ve skladu vždy ve stejné poloze. Toto je klíčové, neboť manipulátor zná pouze polohu pozice, nikoliv samostného plátu.

Výška skladovacích pozic je zvolena tak, aby manipulátor při zakládání nebo vyzvedávání měl dostatečný prostor a nenarazil do plátu umístěného o pozici níže nebo výše. Avšak v případě, že je zakládán plát s tiskem, je potřebná výška k uskladnění větší, v závislosti na výšce výtisku. Je nutné ošetřit, aby nedošlo ke kolizi výtisku s pláty v ostatních pozicích.

Sklad je připraven na celkově 16 pozic s pláty, ve dvou sloupcích, kde každý má osm pozic nad sebou. Avšak v rámci této práce byl dokončený pouze první sloupec, který byl však oproti původnímu stavu rozšířen o další skladovací pozice. Pozice nejsou zatím vybaveny žádnými senzory monitorujícími obsazenost, tu je proto nutné hlídat softwarově v rámci řídicí aplikace.



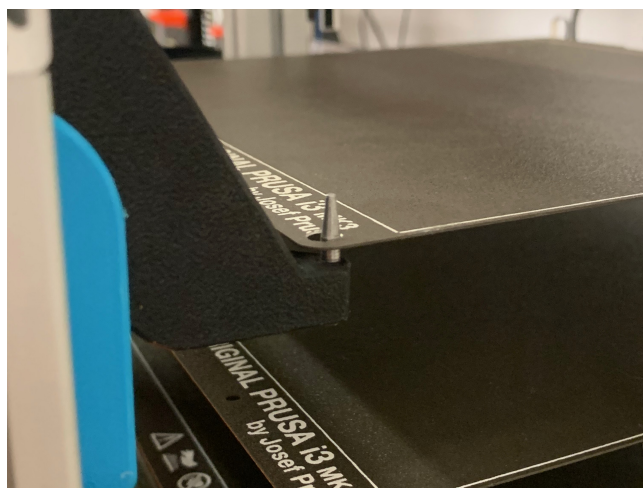
Obrázek 3.5: Skladiště plátů.

### 3.1.4 Manipulace s tiskovým plátem

Pro farmu jsou použity běžné tiskové pláty se zrnitým povrchem, dodávané standardně k tiskárnám. Pro potřeby farmy na ně byly doplněny dvě díry (viz obrázek 3.6) tak, aby bylo možné za ně zachytit kolíky (piny) manipulátoru a pomocí nich s plátem pohybovat. Celkem bylo pro farmu takto upraveno osm plátů, což je v tuto chvíli maximum vzhledem k počtu skladovacích pozic.



**Obrázek 3.6:** Tiskový plát upravený pro farmu.



**Obrázek 3.7:** Zasunutá piny manipulátoru pro pohyb s plátem.

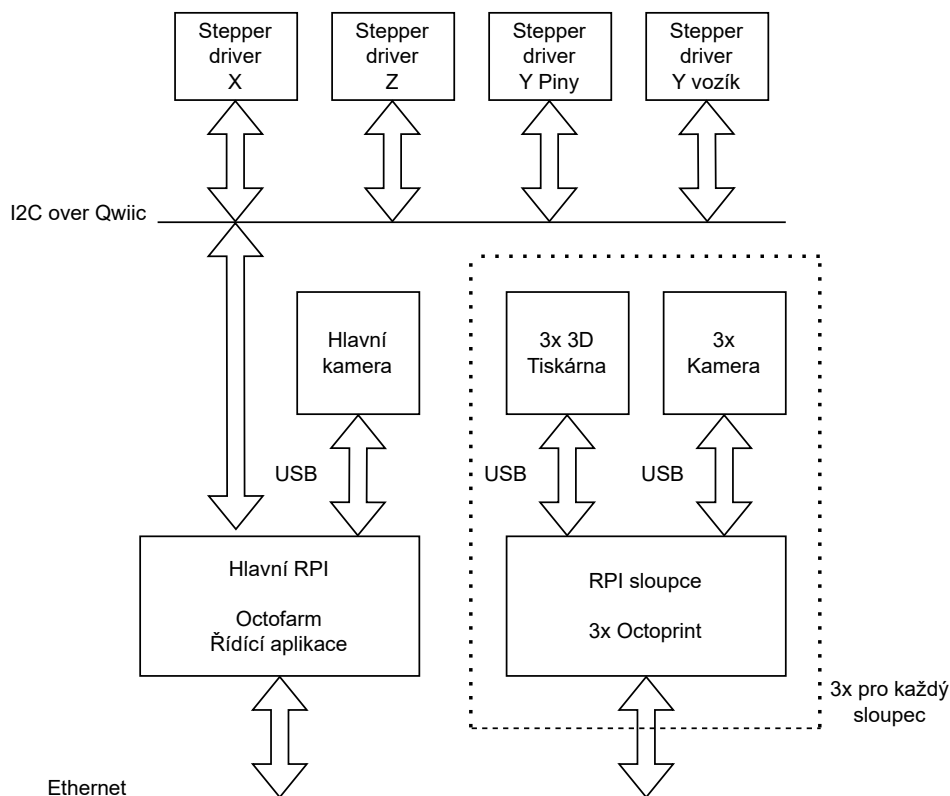
Jak je možné vidět na obrázku 3.7, manipulátor zasune své piny do děr v plátu a může tak s ním pohybovat ve směru osy Y. Jelikož jsou však magnety na vyhřívané podložce velmi silné, musí být plát při najíždění do pozice nad tiskárnu od něj dostatečně vzdálen. K tomu slouží vozík v ose Y umístěný pod plátem, který jej při vysouvání plátu podebere a od magnetů odtrhne a při zasouvání pak zajistí, že se plát k magnetům přichytí až po tom, co je ve správné pozici. Tím je zajištěno zasunutí plátu do správné polohy v tiskárně.

Pro lepší demonstraci manipulace jsem její průběh natočil na video, které je možné zhlédnout na Youtube<sup>1</sup> nebo je součástí repozitáře projektu na Gitlabu [3].

<sup>1</sup><https://youtu.be/EbsyqAigHk>

## 3.2 Elektronická konstrukce

V této sekci se budu věnovat elektronické konstrukci farmy a proberu hardware komunikace mezi jednotlivými prvky. Topologie zapojení komunikace je popsána na obrázku 3.8.

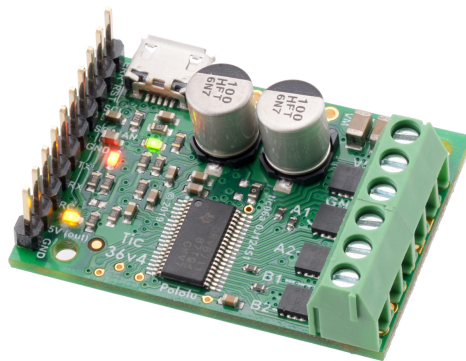


**Obrázek 3.8:** Topologie zapojení jednotlivých částí farmy.

### 3.2.1 Ovládání pohonů

Manipulátor je poháněn krokovými motory, které jsou řízeny drivery Pololu Tic 36v4 [19], který je zobrazen na obrázku 3.9. Ty jsou řízeny pomocí I2C sběrnice, která je z hlavního řídicího Raspberry rozvedena do každého driveru, viz obrázek 3.8. Samotná I2C sběrnice však není vhodná pro vedení signálů na vzdálenost větší než 1m, což není dostatečná délka na rozvedení po celém manipulátoru, proto je rozvod realizován přes převodník Qwiic Differential I2C Breakout [14], který SDA a SCL signály I2C sběrnice umožňuje vést po standardním čtyřpárovém RJ45 kabelu na vzdálenost až 30m, což je více než dostatečné pro naši aplikaci.





**Obrázek 3.9:** Driver Pololu Tic 36v4 [19].

Komunikací přes I2C je možné dávat driverům příkazy, nastavovat jejich polohu a parametry nebo zjišťovat jejich aktuální stav. Důležité příkazy použité pro řízení jsou vypsány v tabulce 3.2.1. Kompletní dokumentace komunikace s driverem je dostupná na [19].

<code>energize()</code>	Zapne napájení motorů
<code>deenergize()</code>	Vypne napájení motorů
<code>set_target_position()</code>	Nastaví cílovou pozici motoru
<code>go_home()</code>	Uvede pohon do home pozice
<code>get_target_position()</code>	Vrátí cílovou pozici motoru
<code>get_pos_certain()</code>	Vrátí, zda je poloha pohonu jistá vzhledem k home pozici

Programově je řízení komunikace driverů zajištěno pomocí knihovny `ticlib` pro Python [9], kde je jsou tyto příkazy a komunikace přes I2C rozhraní Raspberry Pi již implementovány.

### ■ 3.2.2 Napájení

Napájení celé farmy je řešeno z centrálního rozvaděče, umístěného vedle farmy. Do něj jsou přivedeny všechny napájecí kabely na 230V od všech tiskáren. Napájení řídicích Raspberry je řešeno běžnými 5V adaptéry přes USB-C, opět z hlavního rozvaděče. Obvod napájení tiskáren a řídicích prvků je jistěn 1x16A jističem.

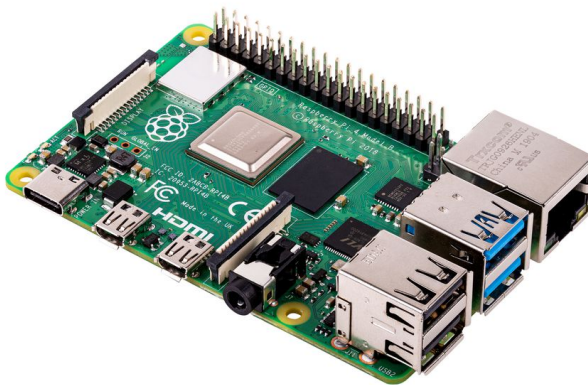
Napájení pohonů manipulátoru je řešeno centrálním zdrojem 24V, který je umístěn v rozvaděči. Síťové napájecí zdroje je jistěno jističem 1x10A. Pro rychlé vypnutí pohonů v případě potřeby je instalováno tlačítko nouzového vypnutí. Stisknutím tohoto tlačítka dojde v rozvaděči k odpojení přívodu ke zdroji pro pohony. O odpojení zdroje se stará stykač Elko EP VSM220-20 2x20A.

### 3.2.3 Ovládání tiskáren

Každá tiskárna je řízena skrze svůj webový Octoprint server [6], který běží na Raspberry Pi 4, které je však společné pro každý sloupec tiskáren. Tiskárny jsou k němu připojeny přes USB COM port. Na Raspberry pro každý sloupec tak běží na operačním systému Raspbian 3 instance Octoprintu, každé ve svém docker containeru. Každému containeru je pevně přiřazen USB port dané tiskárny, takže po restartu operačního systému nebo některé z instancí Octoprintu se vždy každá z instancí připojí ke správné tiskárně. Stejným způsobem jsou k Octoprintům připojeny kamery umístěné nad každou z tiskáren. Webová rozhraní Octoprintů jsou nastavena tak, aby byla pro každý sloupec k dispozici na portech :3000 až :3002 od vrchní tiskárny ve sloupci. Na obrázku 3.8 je zapojení znárněno.

### 3.2.4 Řízení manipulace

O řízení manipulátoru se stará hlavní řídicí Raspberry Pi 4, na kterém běží řídicí aplikace a její webový server s ovládáním na operačním systému Ubuntu. Do tohoto Raspberry je připojena zmíněná I2C sběrnice pro ovládání pohonů a hlavní kamera sledující celou farmu složíci k vzdálenému monitorování manipulátoru. Řídicí Raspberry a Raspberry pro každý ze sloupců jsou propojeny v rámci jedné podsítě Ethernetem. Do této podsítě je zároveň přístup pro obsluhu z vnějších sítí v rámci fakulty.



Obrázek 3.10: Raspberry Pi 4 [15].



## Kapitola 4

### Řídicí aplikace

V této kapitole se již budu věnovat návrhu řídicí aplikace pro manipulátor a celou farmu. Způsobů, jak celé řízení a komunikaci mezi jednotlivými prvky koncipovat, je mnoho. Proto nejdříve rozeberu několik konceptů, co a jak který prvek bude řídit a jak budou prvky mezi sebou komunikovat tak, abych mohl zvolit nejvhodnější řešení. To pak podrobně rozeberu a popíšu jeho implementaci.

#### 4.1 Koncepty řídicí aplikace

##### 4.1.1 Čtení stavů jednotlivých tiskáren

Aktuální stav jednotlivých tiskáren (Printing, Ready, Finished...) lze získat pomocí API Octoprintu dané tiskárny. Kompletní dokumentace Octoprint API je dostupná zde [16]. Aplikace by tak kontrolovala stav všech tiskáren ve farmě a při změně stavu by odpovídajícím způsobem zareagovala pohybem manipulátoru.

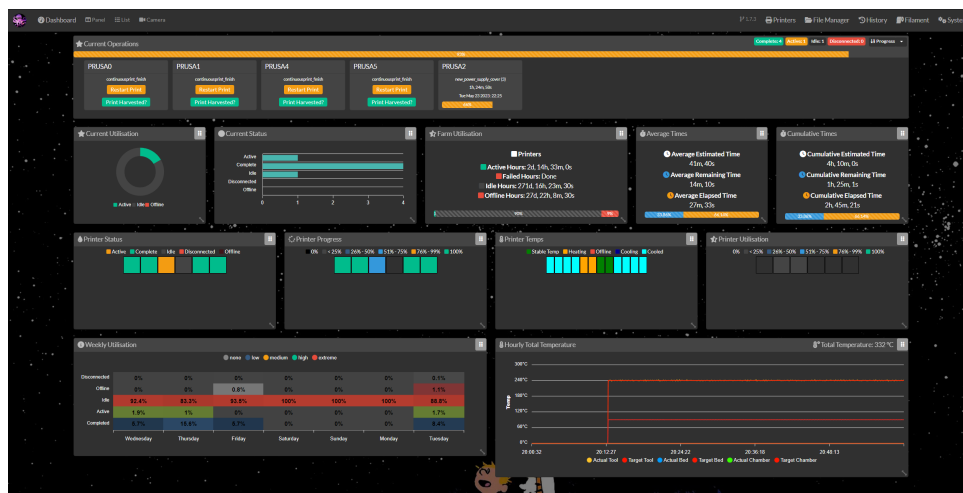
Problémů má toto řešení několik, prvním z nich je nemožnost tisku na tiskárně bez využití manipulátoru. Tuto skutečnost by nešlo ovlivnit ani přímo na tiskárně při tisku z SD, ani v nadřazeném Octoprintu. Změna by musela být provedena v řídicí aplikaci, což je značně nepraktické. Dále by pak pouhé sledování vedlo k velkému množství edge-cases, které by bylo nutné ošetřit, například při pozastaveném nebo přeušném tisku, případně poruše tiskárny. Stavový automat aplikace by tak byl velmi složitý a i přesto ne dostatečně spolehlivý, což jsem si ověřil při testování tohoto konceptu. Proto jsem se rozhodl v této variantě dále nepokračovat.

## 4.1.2 Využití Octofarm serveru

Octofarm je webový server, který je určen ke správě manuálních tiskových farem [10]. Je možné skrze něj zahajovat tisky na jednotlivých tiskárnách, nahrávat na ně soubory k tisku, monitorovat jejich stav a případně provádět aktualizace jejich softwaru. Lze jej také rozšířit o další funkce, jako je například manager spotřeby filamentu nebo kontroly průběhu tisku. Každá zapojená tiskárna musí mít svůj vlastní Octoprint server, skrze který Octofarm s tiskárnami komunikuje přes jejich API.

Octofarm samotný však nemá žádné komunikační rozhraní API, ani nic podobného pro komunikaci s řídicí aplikací. Aby bylo možné jej využít pro řízení manipulátoru, bylo by nutné jej implementovat přímo do webového serveru. Také nemá žádné nástroje na tvorbu tiskové fronty nebo rozdělování tisků mezi tiskárny, což by také bylo nutné doimplementovat pro potřeby naší farmy.

Z těchto důvodů jsem se rozhodl využít Octofarm jako webový monitor, pomocí kterého je možné zobrazit na jednom místě obrazy z kamer umístěných na tiskárnách, aktuální stav jednotlivých tiskáren (viz obrázek 4.1) a hlavně jako nástroj, pomocí kterého je možné provést hromadnou aktualizaci pluginů/jádra Octoprintu nebo hromadnou doinstalaci nových pluginů. Pro samotné řízení jsem však využil jiné vhodnější řešení.



**Obrázek 4.1:** Webové rozhraní Octofarm serveru pro monitoring a správu tiskáren.

### ■ 4.1.3 Vlastní octoprint plugin

Jelikož je každá tiskárna ve farmě řízena skrz vlastní Octoprint server, bylo by možné využít jeho vcelku přívětivé možnosti pro tvorbu pluginů a vytvořit vlastní [12]. Tento plugin by před zahájením nebo ukončením tisku nastavil hodnotu čitelnou z API, na kterou by zareagovala hlavní řídicí aplikace farmy. Ta by naopak dala zpět skrze API informaci o dokončení odnámání nebo vkládání plátu. Toto řešení by bylo velmi přímočaré, bylo by zároveň možné bez problému využívat tiskárny samostatně bez funkcí farmy. Tento přístup však neřeší problém s neexistující frontou tisků a případné distribuce tisků z fronty mezi jednotlivé tiskárny. Tvorba vlastního pluginu se nakonec ukázala jako zbytečná, jelikož plugin obsahující tyto funkce již existuje.

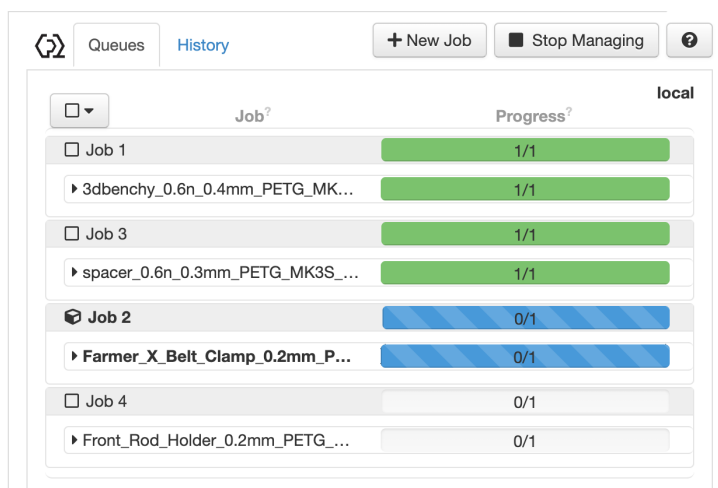
### ■ 4.1.4 Využití continuous print pluginu

Podrobnější průzkum ukázal, že tvorba vlastního pluginu není třeba, neboť repozitář pluginů Octoprintu obsahuje Continuous Print plugin [5]. Ten, umí tvořit fronty tisků pro jednotlivé tiskárny a distribuovat tisky mezi více tiskáren. Umí také před každým a po každém tisku spustit požadovaný GCODE script. Byť je tento plugin původně určen pro tiskárny využívající sundávání výtisků pomocí tiskové hlavy, tvorbou vlastních skriptů je možné ho uzpůsobit pro naši aplikaci. Zároveň má tento plugin vlastní API, což velmi usnadňuje napojení na řídicí aplikaci a čtení jeho stavu.

Plugin má velmi přívětivé uživatelské rozhraní, ve kterém lze přidat a řadit tisky do fronty, zároveň lze snadno vypnout/zapnout jeho funkci, takže tiskárna může být snadno provozována bez obsluhy manipulátorem. Tento plugin také umožňuje spolupráci s dalšími pluginy, jako je například manager filamentu monitorující spotřebu jednotlivých špulek nebo monitor průběhu tisku pomocí kamery. Toto řešení se ukázalo jako nejvhodnější, a proto bylo nakonec použito pro řídicí aplikaci.

### ■ 4.1.5 Kompletní řízení v hlavní aplikaci

Nejkomplexnější z možných řešení je implementace tiskové fronty přímo do řídicí aplikace. Uživatel by tak nahrál soubor skrze webové rozhraní farmy, aplikace by pak nahrála soubor do požadované tiskárny a spustila tisk. Ten by v průběhu monitorovala a po dokončení odebrala. Výhodou tohoto řešení by byla kompletní kontrola nad rozdělováním tisků mezi tiskárny a vlastní realizace fronty. Nicméně v takové případě již ztrácí smysl mít samostatnou instanci Octoprintu pro každou tiskárnu, neboť by většinu jeho práce přebrala řídicí aplikace. Z důvodu přílišné komplexnosti a implementační náročnosti jsem se rozhodl tuto možnost nakonec nerealizovat a využít variantu s Continuous Print pluginem.



Obrázek 4.2: Rozhraní tiskové fronty.

## 4.2 Zvolené řešení

Uvážením kladů a záporů výše uvedených konceptů jsem se rozhodl pro využití Continuous print pluginu [17] pro řízení manipulátoru v kombinaci s Octofarmem, jakožto nástrojem na monitoring, update a nastavování tiskáren. Continuous print plugin zajistí, že před začátkem a po dokončení tisku budou spuštěny příslušné skripty, na které zareaguje řídicí aplikace a provede manipulaci s plátem.

Každá tiskárna má ve svém Octoprintu svou tiskovou frontu. Do té může uživatel přes jeho webové rozhraní přidávat nebo odebírat tisky. Na obrázku 4.2 je možné vidět tisky ve frontě, konkrétně dva již dokončené (zelené), jeden který právě probíhá (modrý) a další na řadě.

Continuous print plugin má dva stavy, jejichž přepínání je možné pomocí tlačítka Start/Stop Managing patrném na obrázku 4.2. Prvním stavem je výchozí Unmanaged, ve kterém je prováděn jeden tisk běžným způsobem a nejsou v něm spouštěny skripty ovládající farmu. V tomto režimu lze tiskárnu používat bez využití manipulátoru, tzn. je nutná ruční obsluha.

Druhým stavem je Managed, kde jsou nové zadané tisky nejdříve přidány do fronty, ze které jsou pak postupně tištěny. V tomto režimu již dochází ke spuštění skriptů po a před zahájením tisku, na které reaguje řídicí aplikace farmy. Tiskárna je tak v tomto režimu obsluhována manipulátorem a je možné na ní provádět tisk bez obsluhy.

### ■ 4.2.1 Skripty

Continuous print plugin komunikuje s farmerem pomocí již zmíněných GCODE skriptů, které jsou spouštěny automaticky pluginem před (*Load\_plate.gcode*) a po tisku (*Unload\_plate.gcode*). Tyto skripty jsou běžná sekvence GCODE příkazů pro tiskárnu, doplněné o speciální příkazy, na které reaguje Octoprint. Jde hlavně o příkaz *@pause*, pomocí kterého dojde k pozastavení vykonávání skriptu.

```
M117 Farmer wil unload plate! ; Writes warning on screen
G91
G1 Z20
M300 S880 P900 ; Long beep before manipulation
G4 S1;
@pause
G4 S1;
M300 S880 P300 ; Sfore beep after manipulation
```

**Obrázek 4.3:** Gcode skript na vyjmutí tiskového plátu.

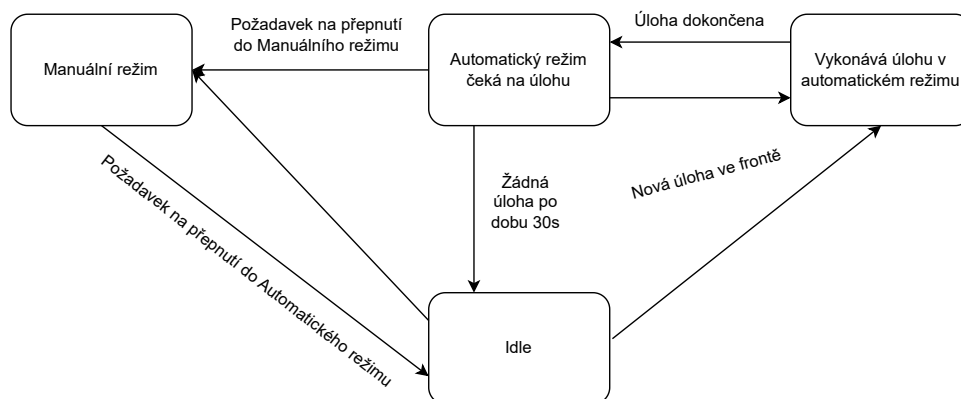
Řídicí aplikace čte přes API název aktuálně spuštěného skriptu a zda bylo pozastaveno jeho vykonávání. Pokud zjistí, že byl spuštěn některý ze dvou skriptů, přidá do fronty úloh farmera novou úlohu pro obsluhu dané tiskárny. Skript zůstává pozastaven do doby, než je dokončena manipulace. Po jejím dokončení pošle řídicí aplikace tiskárně přes API příkaz *resume\_print*, čímž se dokončí vykonávání skriptu a tiskárna může pokračovat v tisku. Po dobu vykonávání skriptu se na displeji tiskárny ukazuje hláška upozorňující na probíhající manipulaci. Po spuštění skriptu také tiskárna vydá zvukové varování pomocí svého bzučáku.

## ■ 4.3 Režimy provozu manipulátoru

Manipulátor je možné ovládat ve dvou provozních režimech. Automatický režim je výchozím režimem, ve kterém se řídicí aplikace nachází po spuštění. Běžný provoz farmy je realizován právě v tomto režimu. Manuální režim pak slouží jen pro údržbu a nastavování farmy. Přepínání režimů je možné pomocí přepínače ve webovém rozhraní. Samotné přepínání je pak řízeno jednoduchým stavovým automatem znázorněným na obrázku 4.4

### ■ 4.3.1 Automatický režim

Automatický režim je výchozím režimem, ve kterém se řídicí aplikace nachází po spuštění. Běžný provoz farmy je realizován právě v tomto režimu.



**Obrázek 4.4:** Stavový automat pro přepínání režimů.

Manipulátor je v automatickém režimu ovládán výhradně úlohami (tasky), které mu jsou zadávány od tiskáren z pluginu Continuous print, případně je může zadat uživatel ručně přes webové rozhraní. Úlohy jsou řazeny za sebou do fronty a jsou dvou druhů: přesun prázdného plátu ze skladu do tiskárny a přesun použitého plátu z tiskárny do skladu. Aktuálně vykonávaná úloha včetně všech úloh ve frontě se přehledně zobrazují ve webovém rozhraní (viz obrázek 4.6).

Před vykonáním úlohy nejdříve manipulátor zapne všechny pohony a najede všemi osami do výchozí pozice (Home). V případě, že manipuluje s tiskovým plátem ve skladu, tak pouze najede do příslušné pozice a provede vysunutí/zasunutí plátů. Avšak v případě, že manipuluje s plátem v tiskárně, musí zajistit, že vyhřívaná podložka tiskárny bude ve správné poloze. Proto nejdříve pošle Octoprintu, který řídí danou tiskárnu přes API požadavek na provedení Homingu a najetí do zadané pozice pro manipulaci. Pokud je tiskárna připravena a ve správné pozici, provede manipulátor založení/sundání plátu z tiskárny. V průběhu toho zůstávají krokové motory tiskárny zapnuté, tudíž vyhřívaná podložka na ose Y se při manipulaci s plátem nepohne. Po dokončení manipulace pošle řídicí aplikace opět příkaz do Octoprintu, který tentokrát odjede s podložkou zpět tak, aby nepřekážela. Pozice tiskáren a skladů jsou fixní a uloženy spolu s dalšími informacemi o skladu nebo tiskárnách v příslušné datové struktuře programu.

Je-li zapnutý automatický režim, pak manipulátor postupně vykonává úlohy z fronty. V případě, že je tisková fronta prázdná a po dobu 30s se neobjeví žádná nová úloha, pak najede manipulátor do výchozí polohy a vypne své pohony, čímž přejde do stavu Idle. Motory manipulátoru jsou tak v případě, že nejsou potřeba, vypnuté, nezahřívají se a šetří tím nejen svou životnost, ale i elektrickou energii.

### ■ 4.3.2 Manuální režim

Manuální režim slouží hlavně pro potřeby údržby nebo kalibrace. V případě změny poloh některé z tiskáren nebo skladu je možné s jeho pomocí zjistit jejich novou polohu.

Do manuálního režimu je možné přepnout v případě, že se v automatickém režimu nevykonává žádná úloha. Pokud jsou tyto podmínky splněny, přepne se manipulátor do manuálního režimu. V něm je zastaveno automatické vykonávání úloh a s jednotlivými osami manipulátoru je možné pohybovat pomocí tlačítek ve webovém rozhraní 4.7. Stejně tak je můžeme ručně zapnout/vypnout pohony nebo uvést manipulátor do home pozice.

Je-li jednotlivým driverům známa jejich poloha, tzn. daná osa provedla nájezd do výchozí pozice, pak je její poloha zobrazována také ve webovém rozhraní. Zároveň jsou také hlídány limity jednotlivých os tak, aby nebylo možné jejich přejetí. Není-li však poloha známa, pak je z bezpečnostních důvodů omezen krok pohybu tak, aby případný náraz manipulátoru do rámu, tiskáren nebo konce osy neměl vážné následky.

## ■ 4.4 Řízení skladu

Jelikož skladovací pozice nejsou žádným způsobem přímo monitorovány senzory, je nutné zajistit jejich monitoring pouze pomocí řídicí aplikace. Každá skladovací pozice má tři možné stavy: Empty, Clean Plate, Used Plate. Po spuštění aplikace by obsluha měla zadat aktuální stav jednotlivých pozic do webového rozhraní 4.5. Poté se již o změny stavů pozic stará řídicí aplikace. Stav skladu je vždy aktualizován ve chvíli, kdy přijde požadavek na novou úlohu. Zobrazovaný stav tedy již reflektuje stav po vykonání všech úloh ve frontě.

Manipulátor postupně bere nepoužité tiskové pláty od vrchních pozic. V případě zakládání použitých plátů je kontrolována výška výtisku, kterou je možné přečíst z Octoprintu přes API. Je-li výška výtisku vyšší než výška skladovací pozice, pak je zvolena taková skladovací pozice, nad kterou se nenachází žádný tiskový plát tak, aby výtisk nekolidoval s pláty ve vyšších pozicích. Tyto pozice jsou následně také přesunuty do stavu Used Plate, aby nedošlo vložení dalšího plátu ke kolizi svítiskem. Použité pláty jsou ve skladu opět ukládány do nejvyšší možné volné pozice.

V případě nedostatku plátů nebo skladovacích pozic pro použité pláty nedojde k přidání další úlohy do fronty do doby, než bude místo uvolněno/pláty doplněny. Uživatel je na takovou skutečnost upozorněn vyskakovací hláškou ve webovém rozhraní. Při odebrání nebo vložení plátů do/z skladovacích pozic je opět nutné aktualizovat jejich stav.

## 4.5 Webové rozhraní

K ovládání farmy uživatelem je určeno webové rozhraní. To běží na hlavním Raspberry spolu s Octofarmem a řídicí aplikací na portu :5000. Do rozhraní je zobrazována akutálně vykonávaná úloha, fronta úloh i stavy pohonů manipulátoru. Přepínačem je možné přepínat mezi manuálním a automatickým režimem farmy, v manuálním režimu pak ovládat pohyby jednotlivých os pomocí tlačítek. Do rozhraní je také zobrazován stav jednotlivých tiskáren, který aplikace čte z Octoprintů, zbývající čas tisku nebo zda jsou nebo nejsou obsluhovány farmou (Managed/Unmanaged) 4.5. Zároveň je možné se snadno proklínout Octoprint do rozhraní jednotlivých tiskáren, přes které je možné si zadávat tisky nebo přepínat její režimy. Je též zobrazován aktuální stav jednotlivých skladovacích pozic. V případě vložení nebo odebrání plátu uživatelem je možné tento stav upravit tak, aby odpovídal skutečnému stavu skladu.

PRUSA0	PRUSA1	PRUSA2	PRUSA3	PRUSA4	PRUSA5
Printing (QUEUE ON)	Printing (QUEUE ON)	Printing from SD (QUEUE OFF)	Operational (QUEUE OFF)	Printing (QUEUE ON)	Waiting for Farmer
Letter_O_0.3mm_PLA_MK3S_4m.gcode	Letter_I_0.6n_0.3mm_PLA_MK3S_1m.gcode	new_power_supply_cover (3).gcode		Letter_L_0.3mm_PLA_MK3S_2m.gcode	
T_REM: 0h6m15s	T_REM: 0h6m41s	T_REM: 6h4m52s		T_REM: 0h1m38s	

STORAGE0	STORAGE1	STORAGE2	STORAGE3	STORAGE4	STORAGE5	STORAGE6	STORAGE7
EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY

**Obrázek 4.5:** Zobrazovaný stav jednotlivých tiskáren a skladovacích pozic.

Task type	Storage	Printer
No active task	-	-

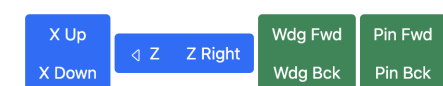
Source	Task type	Storage	Printer
user	Plate to priter	PRUSA0	STORAGE0
user	Plate to storage	PRUSA0	STORAGE0
user	Plate to priter	PRUSA0	STORAGE2

**Obrázek 4.6:** Aktuálně vykonávaná úloha a fronta úloh.



X	Z	Wdg	Pin
unknown	unknown	unknown	unknown

Energized	Moving	Auto mode
False	False	True



Auto mode [Camera feed](#)

**Obrázek 4.7:** Rozhraní pro manuální ovládání manipulátoru.



# Kapitola 5

## Implementace a Testování

### 5.1 Implementace

Následující část práce se bude věnovat praktické implementaci řídicí aplikace. Ta je rozdělena na několik vzájemně komunikujících bloků, které zde budou popsány. Schéma komunikace je zobrazeno na obrázku 5.1.

Při implementaci byl využíván repozitář verzovacího systému Gitlab<sup>1</sup>, ve kterém jsou dostupné všechny zdrojové kódy aplikace včetně jejich historie. Zároveň se v něm nachází jednoduchá dokumentace pro provoz farmy. Zdrojové kódy jsou také součástí přílohy této práce.

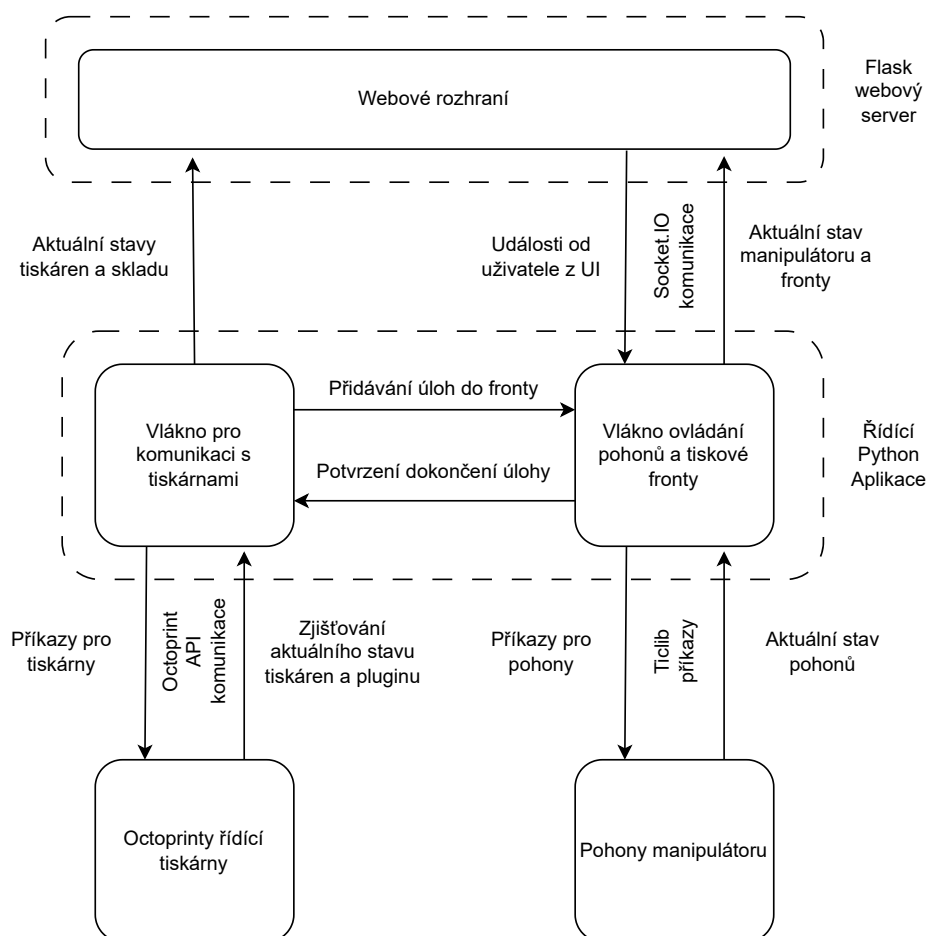
#### 5.1.1 Webové rozhraní

Webové rozhraní je implementováno jako HTML webová stránka běžící na Flask frameworku [7]. Vzhled stránky je tvořen pomocí CSS sady šablon Bootstrap [4]. Funkční část stránky pak zajišťuje Javascript, který kontroluje stav jednotlivých elementů stránky, reaguje na požadavky uživatele, které posílá řídicí aplikaci, nebo aktualizuje elementy stránky na základě požadavků od řídicí aplikace. Komunikace s řídicí Python aplikací je pak zajištěna oboustraně Sockei.IO knihovnou [18].

#### 5.1.2 Řídicí aplikace

Řídicí aplikace je implementována jako vícevláknová aplikace pro Python 3.8 běžící na Raspberry Pi 4 s operačním systémem Ubuntu. Je rozdělena do 3 vláken, které komunikují skrze společnou datovou strukturu. První z vláken zajišťuje veškerou komunikaci pohony přes I2C sběrnici. V automatickém režimu vykonávání úloh z fronty a jednotlivé pohyby manipulátoru. Dle potřeby také posílá aktuální informace webové stránce.

<sup>1</sup><https://gitlab.fel.cvut.cz/aa4cc/3d-farmer>



**Obrázek 5.1:** Schéma komunikace mezi částmi aplikace a farmy.

V tomto vlákne je také implementován stavový automat 4.4 pro přepínání režimů. Druhé vlákno zajišťuje komunikaci s tiskárnami, respektive jejich servery. V rámci něj je pravidelně zjišťován jejich aktuální stav, kontrolováno je spuštění skriptů v Octoprintu na požadavek odebrání nebo založení. V případě dokončení úlohy pak také toto vlákno zpětně informuje tiskárnu o dokončení procesu. Třetí vlákno pak zprovádá asynchronní události od webového rozhraní, zasílané skrz Socket.IO, tzn. reaguje na požadavky uživatele. Na obrázku 5.1 je nakresleno jako součást vlákna pro ovládání pohonů a tiskové fronty, neboť jeho úkolem je pouze zpracování událostí, které mu pouze předává.

## ■ 5.2 Testování

### ■ 5.2.1 Testování manipulátoru

Před samotnou implementací řídicí aplikace byl proveden test opakovatelnosti procesu manipulace s plátem. V rámci něj manipulátor cyklicky přesouval tiskový plát z tiskárny do skladu a zpět po dobu cca dvou hodin. Cílem tohoto testu bylo zjistit, zda je mechanika manipulátoru dostatečně pevná na to, aby byl manipulátor schopen najíždět opakovaně do stejné fixní pozice a nedošlo k posunu například v řemenecích nebo převodovce. Pokud by mechanika nebyla dostatečně spolehlivá, pak by bylo nutné zajistit zjišťování pozice tiskáren při každém najíždění a nebylo by možné se spolehnout pouze na fixní pozice.

Test však ukázal, že nic takového není nutné, jelikož manipulátor provedl cca 140 manipulací bez náznaku posunu nebo problému. Stejně tak vždy spolehlivě najel do pozice i po delším odstavení, během kterého s ním bylo hýbáno ručně bez pohonu. Opakovatelnost manipulátoru tak byla vyhodnocena jako dobrá a nebylo zatím nutné implementovat zjišťování pozic tiskáren.

### ■ 5.2.2 Testování farmy

Pro testování řídicí aplikace a automatického provozu farmy byl vytvořen jednoduchý simulační tisk, v rámci kterého tiskárna vykonala pouze několik pohybů a jehož běh trval kolem půl minuty. Bylo tak možné simulovat běh více tisků v krátkém čase a tím simulovat provoz farmy.

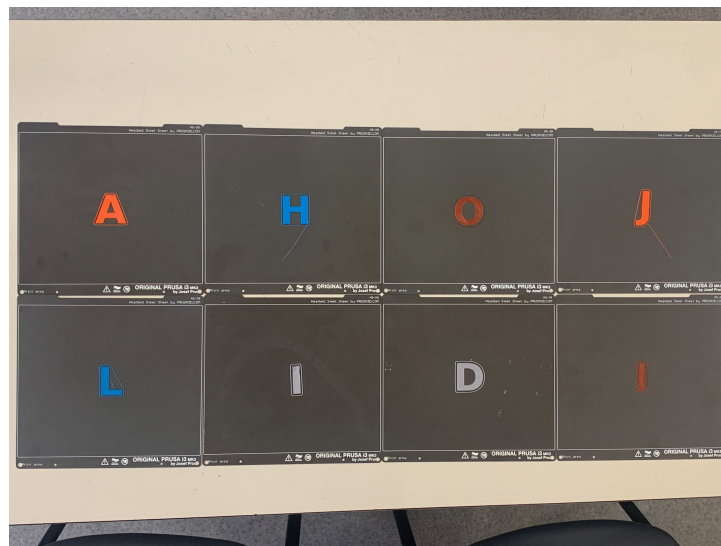
Pro demonstraci a ověření správného fungování byl na čtyřech tiskárnách současně vytisknut nápis "AHOJ LIDI", a to zcela bez nutnosti zásahu člověka. Každé písmeno bylo vytištěno samostatně na svůj tiskový plát, čímž byly využity všechny skladovací pozice. Farma postupně bez problémů provedla tisk všech osmi písmen 5.3 a pláty s hotovými výtisky založila do skladu 5.2. Pro lepší demonstraci fungování byl pořízen timelapse, který je k dispozici na Youtube<sup>2</sup> nebo v repozitáři na Gitlabu.

---

<sup>2</sup><https://youtube.com/shorts/SMy6QxyPdE0>



**Obrázek 5.2:** Pláty s nápísem připravené ve skladu k odebrání.



**Obrázek 5.3:** Výsledek testovacího běhu farmy byl nápis "AHOJ LIDI" s každým písmenem na vlastním tiskovém plátu.

## Kapitola 6

### Závěr

V rámci této práce se podařilo vytvořit řídicí aplikaci pro 3D tiskovou farmu, která kontroluje zahájení a dokončení tisku na tiskárnách a v reakci na tyto události ovládá manipulátor a přesouvání tiskové pláty mezi tiskárnami a skladištěm. Bylo dokončeno zapojení řídicích prvků a kamer nad prvním sloupcem tiskáren. Dále pak byl zapojen do farmy zapojen druhý sloupec tiskáren, nakonfigurováno a zprovozněno jeho řídicí Raspberry. Bylo provedeno rozšíření a úprava skladiště tiskových plátů, vyřešeno bylo také sledování a zobrazování jeho stavu. Celá farma je ovládána jednoduše skrze webové rozhraní, ze kterého je možné sledovat její stav, případně v manuálním režimu s manipulátorem ručně pohybovat. Ve webové rozhraní Octofarmu je pak možné monitorovat stav a využití všech tiskáren, případně je možné skrze něj provádět hromadný update nebo úpravu nastavení všech tiskáren najednou, což zjednodušuje údržbu farmy. Každá z tiskáren má vlastní tiskovou frontu, ze které jsou tisky postupně automaticky prováděny. Před každým tiskem je do tiskárny vložen nový tiskový plát, který je po dokončení tisku odebrán i s výtiskem a uložen do skladiště. Bylo tak dosaženo hlavního cíle této práce, což bylo dokončení farmy do stavu, kdy bude umožňovat automatické provádění tisků bez nutnosti zásahu obsluhy. Díky tomu je možné dosáhnout většího a efektivnějšího využití tiskáren.

## 6.1 Možná rozšíření

Celý projekt automatické farmy však lze stále zdokonalovat a přidávat mu nové funkce. Mezi jednodušší a praktická rozšíření bych zařadil například možnost zadávat tisky do tiskových front přes jedno webové rozhraní. To by eliminovalo nutnost přistupovat k tiskárnám jednotlivě a celý proces tisku by se tak pro uživatele přesunul do jednoho webového rozhraní. Dalším praktickým rozšířením by byl monitoring skladových pozic pomocí senzorů tak, aby již uživatel nemusel provádět aktualizace skladových pozic po vyjmutí nebo vložení plátu ručně.

Ke složitějším rozšířením bych pak zařadil například implementaci automatické kontroly průběhu tisku pomocí kamer instalovaných nad tiskárnami. Tyto kamery by zároveň mohly sloužit k detekci uvolněných výtisků během manipulace s plátem. Do budoucna by také bylo možné vybavit farmu nějakou formou přístroje na automatické sundávání výtisků z tiskových plátů a jejich čištění.



# Příloha A

## Literatura

- [1] 12 Automatic 3D Printer Projects. [online] <https://bitfab.io/blog/automatic-3d-printer/>. Navštíveno: (22.5.2023).
- [2] 3DQue Docs. [online] <https://docs.3dque.com/docs/intro/>. Navštíveno: (22.5.2023).
- [3] aa4cc/3D Farmer. [online] <https://gitlab.fel.cvut.cz/aa4cc/3d-farmer>.
- [4] Bootstrap - The most popular HTML, CSS, and JS library in the world. [online] <https://getbootstrap.com>. Navštíveno: (14.11.2022).
- [5] Continuous Print Queue. [online] <https://smartin015.github.io/continuousprint/>. Navštíveno: (25.2.2023).
- [6] Download & Setup OctoPrint. [online] <https://octoprint.org/download/>. Navštíveno: (12.10.2022).
- [7] Flask - Flask Documentation. [online] <https://flask.palletsprojects.com/en/2.3.x/#api-reference>. Navštíveno: (14.11.2022).
- [8] Form Auto - Automation Hardware for Your 3D Printer <https://dental.formlabs.com/products/form-auto/>. Navštíveno: (21.4.2023).
- [9] jphalip/ticlib. [online] <https://github.com/jphalip/ticlib>. Navštíveno: (9.11.2023).
- [10] OctoFarms Documentation. [online] <https://docs.octofarm.net/getting-started/>. Navštíveno: (16.2.2023).
- [11] Original Prusa i3 MK3S+. [online] <https://www.prusa3d.com/cs/kategorie/original-prusa-i3-mk3s/>. Navštíveno: (23.5.2023).
- [12] Plugin Tutorial - Octoprint. [online] <https://docs.octoprint.org/en/master/plugins/gettingstarted.html>. Navštíveno: (25.2.2023).
- [13] PRUSA PRO AFS - Automatizovaná tisková farma od Prusa Research. [online] <https://afs.prusa3d.com/cs>. Navštíveno: (22.5.2023).

- [14] Qwiic Differential I2C Bus Extender (PCA9615). [online] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/qwiic-differential-i2c-bus-extender-pca9615-hookup-guide/all>. Navštíveno: (20.5.2023).
- [15] Raspberry Pi 4. [online] <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>. Navštíveno: (23.5.2023).
- [16] REST API. [online] <https://docs.octoprint.org/en/master/api/index.html>. Navštíveno: (25.2.2023).
- [17] smartin015/continuousprint. [online] <https://github.com/smartin015/continuousprint>. Navštíveno: (25.2.2023).
- [18] Socket.IO - Bidirectional and low-latency communication for every platform [online] <https://socket.io/docs/v4/>. Navštíveno: (14.11.2022).
- [19] Tic Stepper Motor Controller. [online] <https://www.pololu.com/docs/0J71/all>. Navštíveno: (9.11.2023).
- [20] Tisková farma Prusa Research. [online] <https://blog.prusa3d.com/wp-content/uploads/2018/02/jp/farm01.jpg>. Navštíveno: (21.2.2023).



## Příloha B

### Seznam příloh



#### B.1 Zdrojové kódy

Přiložený archiv *3d-farmer-main.zip* obsahuje kompletní zdrojové kódy řídicí aplikace a webového rozhraní. Adresář má stejnou strukturu i obsah jako repozitář na Gitlabu [3].



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lendvorský** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **499165**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**3D tisková farma - řídicí aplikace**

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Pro 3D tiskovou farmu vytvořte základní řídicí aplikaci.

- 1) Dokončete konstrukci a konfiguraci řídicí infrastruktury (počítače Raspberry Pi, kamery, dotykový displej, OctoPrint, OctoFarm)
- 2) Finalizujte manuální řízení manipulátoru (nájezdy do uložených poloh, spouštění sekvencí) a zobrazování stavu manipulátoru i všech tiskáren.
- 3) Vytvořte aplikaci pro automatický provoz farmy - založení prázdného tiskového plátu, hlídání dokončení tisku, vyjmutí a založení výtisku.
- 4) Vyřešte monitorování stavu skladu - obsazenost jednotlivých pozic.
- 5) Aplikaci koncipujte jako webovou aplikaci
- 6) Vytvořte dokumentaci k systému, aby ho mohli využít další zájemci

Seznam doporučené literatury:

- [1] "12 Automatic 3D Printer Projects" <https://bitfab.io/blog/automatic-3d-printer/> [online]  
[2] "Budoucnost výroby je tady: V Dubaji prezentujeme naši automatizovanou tiskovou farmu!"  
[https://blog.prusa3d.com/cs/budoucnost-vyroby-je-tady-v-dubaji-prezentujeme-nasi-automatizovanou-tiskovou-farmu\\_55993/](https://blog.prusa3d.com/cs/budoucnost-vyroby-je-tady-v-dubaji-prezentujeme-nasi-automatizovanou-tiskovou-farmu_55993/) [online]

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jiří Zemánek, Ph.D. katedra řídicí techniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:

**do konce letního semestru 2023/2024**

Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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