



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

SYSTÉM ROBOTICKÉHO RAMENE PRO MODELÁŘSKÉ APLIKACE

ROBOTIC ARM SYSTEM FOR SCALE MODELS DOMAIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

ANTONÍN BRUŠTÍK

Ing. VÁCLAV ŠIMEK

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce



149521

Ústav: Ústav počítačových systémů (UPSY)
Student: **Brušník Antonín**
Program: Informační technologie
Specializace: Informační technologie
Název: **Systém robotického ramene pro modelářské aplikace**
Kategorie: Vestavěné systémy
Akademický rok: 2022/23

Zadání:

1. Seznamte se s dostupnými mikrokontrolery a dalšími nezbytnými prvky, které lze využít pro řízení krokových motorů a servo motorů.
2. Prozkoumejte existující řešení v oblasti robotických ramen, přičemž se zaměřte na možné využití pro modelářské aplikace.
3. Dle poznatků z bodů 1 a 2 navrhnete konstrukci ramene a koncepci systému pro jeho řízení.
4. Zvolte vhodné komponenty a proveďte obvodovou realizaci řídicích prvků. Dále zhotovte mechanické prvky tvořící rameno a proveďte jejich sestavení.
5. Implementujte řídicí firmware zajišťující v potřebném rozsahu funkčnost jednotlivých prvků tvořících navržený systém.
6. Implementujte grafické uživatelské rozhraní pro účely demonstrace ovládání ramene a ověření jeho funkčních vlastností.
7. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a diskutujte možnosti dalšího rozšíření projektu.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:
Bez požadavků.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Šimek Václav, Ing.**
Vedoucí ústavu: Sekanina Lukáš, prof. Ing., Ph.D.
Datum zadání: 1.11.2022
Termín pro odevzdání: 31.7.2023
Datum schválení: 31.10.2022

Abstrakt

Tato práce se okrajově zabývá problematikou průmyslových robotů, následně pak návrhem a sestavením vlastního robotického ramena. Zahrnuje postup výroby v domácích podmínkách s použitím běžně dostupných součástí a levné FDM 3D tiskárny. Podrobně se věnuje výběru a zapojení řídicí elektroniky, návrhu a následné implementaci vlastního firmwaru včetně grafického uživatelského rozhraní určeného k demonstraci funkčnosti. V závěru pak zhodnocuje dosažené výsledky a navrhuje možná vylepšení.

Abstract

This thesis marginally deals with issue of industrial robots, subsequently with the design and construction of own robotic arm. It includes production process in domestic conditions with usage of commonly available components and hobby FDM 3D printer. It is closely dedicated to selection and connection of control electronics, design and consequential implementation of firmware including graphical user interface intended to demonstrate its functionality. In conclusion, it evaluates achieved results and proposes possible improvements.

Klíčová slova

robot, robotické rameno, robotická paže, 3D modelování, 3D tisk, Arduino, krokový motor, servomotor, planetové převody

Keywords

robot, robotic arm, 3D modeling, 3D printing, Arduino, stepper motor, servo motor, planetary gears

Citace

BRUŠTÍK, Antonín. *Systém robotického ramene pro modelářské aplikace*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Václav Šimek

System robotického ramene pro modelářské aplikace

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Václava Šimka. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Antonín Brušík
31. července 2023

Poděkování

Mé poděkování patří všem, kteří vznik této práce jakkoliv podpořili. Jmenovitě bych rád poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Václavu Šimkovi především za notnou dávku trpělivosti, ochoty a vstřícnosti, které se mi od něj dostalo.

Obsah

1	Úvod	4
2	Základní aspekty průmyslových robotů	5
2.1	Průmyslový robot	5
2.1.1	Způsoby řízení pohybu	7
2.1.2	Kinematika průmyslových robotů	7
2.1.3	Generace průmyslových robotů	7
2.1.4	Konstrukce průmyslových robotů	9
2.2	Existující řešení	12
2.2.1	Komerční sféra	12
2.2.2	Nadšenci a open-source komunita	13
3	Použité nástroje a technologie	16
3.1	FreeCAD	16
3.2	Platforma Arduino	17
3.3	3D tisk	18
3.4	PrusaSlicer	21
4	Návrh mechanických částí a řídicí elektroniky	23
4.1	Specifikace cílů	23
4.2	Mechanické komponenty ramena	24
4.3	Prvky řídicí elektroniky	36
5	Implementace obslužného softwaru	42
5.1	Řídicí firmware	42
5.1.1	Arduino Mega	43
5.1.2	ESP-01S	47
5.2	Uživatelské rozhraní	49
6	Sestavení a testování	52
6.1	Finální sestavení	52
7	Závěr	54
	Literatura	55
A	Obsah přiložené SD karty	56
B	Zapojení elektroniky	57

Seznam obrázků

2.1	Vliv přesnosti a opakovatelnosti na schopnosti stroje	6
2.2	Možné trajektorie při způsobu řízení PTP	7
2.3	První průmyslový robot	8
2.4	Průmyslový robot Kawasaki	8
2.5	Kolaborativní robot FANUC	9
2.6	Kartézský robot KUKA	10
2.7	SCARA robot YASKAWA	11
2.8	Méně známé typy robotů	11
2.9	Nízkonákladový průmyslový robot NIRYO Ned2	13
2.10	Robotická ramena – <i>Dr. D-Flo</i> a <i>ZeroBacklash</i>	14
2.11	Robotická ramena – <i>AngelLM</i> a <i>John Lauer</i>	14
3.1	Modelování ve FreeCADu	16
3.2	Arduino IDE s ukázkou základní struktury jazyka Wiring	18
3.3	Orientace vrstev výtisku	19
3.4	Filament a jeho skladování	19
3.5	3D tiskárna Ender 3 Pro	21
3.6	Slicování v PrusaSliceru	22
4.1	Popis částí ramena	23
4.2	První návrh konstrukce	24
4.3	Klasická planetová převodovka s popisem	26
4.4	Schéma diferenciální planetové převodovky	27
4.5	Vytištěná diferenciální planetová převodovka	29
4.6	První funkční prototyp sedla	30
4.7	Spojení unašeče a převodovky	31
4.8	Výroba hřídele	32
4.9	Modelování výřezů na spojovacím dílu	32
4.10	Slip ring pro axiální kloub	33
4.11	Vedení kabeláže skrz převodovku	34
4.12	Zapouštění matic v průběhu tisku	35
4.13	Vedení kabeláže vně	35
4.14	Arduino Mega	36
4.15	RAMPS 1.6 a Arduino Mega	37
4.16	TMC2209 a nastavování proudu	38
4.17	Krokové motory NEMA	39
4.18	GY-521 a DFR0576	39
4.19	Optický koncový spínač	40
4.20	Nárazový senzor a servomotor	40

4.21	ESP-01S včetně adaptéru	41
5.1	Vývojový diagram – Arduino Mega	46
5.2	Webová rozhraní pro OTA Updaty	48
5.3	Řídicí rozhraní – záhlaví	49
5.4	Řídicí rozhraní – úhly natočení	50
5.5	Řídicí rozhraní – plátno	50
5.6	Řídicí rozhraní – konzole	51
6.1	Test opakovatelnosti	53
B.1	Schéma zapojení elektroniky	59

Kapitola 1

Úvod

Intenzivní robotizace a automatizace je bezesporu jedním z nejnápadnějších aspektů ovlivňujících současnou dobu. Umělá inteligence a strojové učení se těší dosud nevídanému zájmu veřejnosti. Ruku v ruce s tím přichází stále širší dostupnost nejrůznějších elektronických a mechanických součástek, což posouvá další vývoj rychle kupředu. Do značné míry za to vděčíme obrovskému „boomu“ dostupných 3D tiskáren a CNC zařízení v posledních letech.

Na roboty dnes můžeme narazit doslova na každém kroku. Od samého počátku mají za úkol lidskou práci usnadňovat, zefektivňovat a zkvalitňovat. Doba, kdy byly doménou pouze velkých průmyslových závodů a výzkumných laboratoří je dávno minulostí. Dnes je můžeme běžně nalézt nejen v menších provozech, ale také v rukou nadšenců.

Tato práce má ambici dát vzniknout nízkonákladovému robotickému ramenu zhotovitelnému v domácích podmínkách, které však bude po stránce funkcionality v rámci možností konkurenceschopné. Ambice, která by dříve byla možná jenom stěží, je dnes díky 3D tisku na dosah ruky. Ke zpracování tématu mne přivedlo nadšení pro robotiku a snaha do této rychle se rozvíjející technologické oblasti hlouběji proniknout. Možná se jí dokonce v budoucnu věnovat naplno.

Na prvních stranách tohoto textu je čtenář uveden do problematiky a obeznámen s méně známými pojmy používanými napříč celým textem. Poté jsou mu představeny technologie využití v průběhu práce. Dále nalezne detailní popis procesu modelování a posléze také implementace. V těchto kapitolách bude před jeho zrakem rameno kompletně zkonstruováno a otestováno, čímž práce pozvolna zamíří ke svému závěru.

Kapitola 2

Základní aspekty průmyslových robotů

Tato kapitola si klade za cíl zprostředkovat čtenáři takové množství informací, které je nutné pro porozumění rozebírané problematice. Podává mu především informace s tímto projektem přímo související, přičemž méně relevantní záměrně vynechává či zjednodušuje. Neměla by tedy být vnímána jako komplexní vhled do problematiky.

2.1 Průmyslový robot

Skutečnost, že je lidská práce postupně nahrazována prací robotů dnes nikoho nepřekvapí. O průmyslových robotech se jako o náhradě člověka mluví již řadu let. Stále častěji je však nahrazován i v činnostech, jejichž zvládnutí není možné bez alespoň základního pochopení jejich podstaty, což robotům postupně umožňuje jejich stále se zvyšující úroveň inteligence a autonomie. Definice průmyslových robotů není zcela jednoznačná, všeobecná shoda však panuje na tom, že se jedná o víceúčelové programovatelné stroje se dvěma a více pohybovými osami [8].

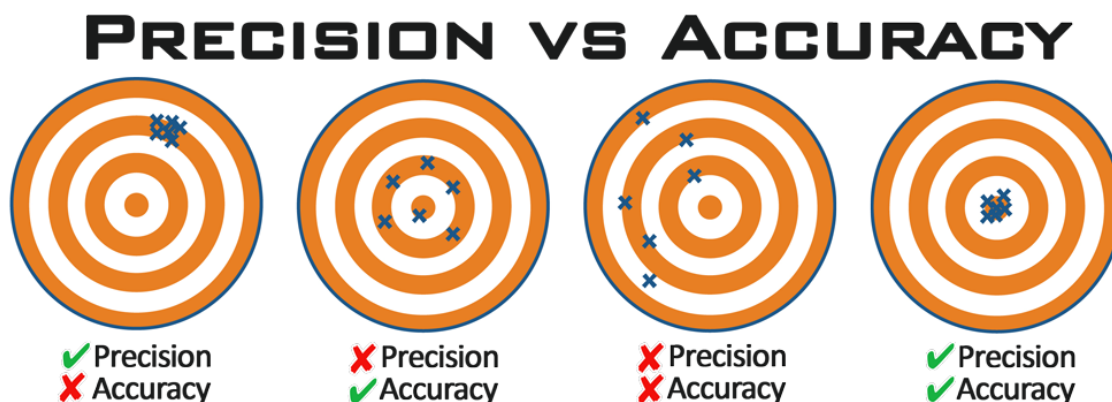
Definice průmyslového robotu dle ISO 8373

„Průmyslový robot je automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být upevněn na místě či být mobilní, užívaný pro automatizované průmyslové aplikace.“

Robotická ramena¹, pro která se v odborných kruzích užívá právě termínu průmyslové roboty, spadají do kategorie stacionárních manipulačních zařízení. Kvalitu robotů a vůbec jejich vhodnost pro daný úkon můžeme vyvozovat z parametrů, kterými disponují. Pro různé aplikace bude pořadí priority těchto parametrů různé, nicméně jako první uvedu přesnost. **Přesnost** je možné charakterizovat jako maximální odchylku skutečné pozice od pozice požadované [8]. Závisí na mnoha faktorech mezi, kterými jsou obvykle klíčové vůle v převodech. Tyto je možné alespoň částečně softwarově kompenzovat a tím i přesnost celku zlepšovat. Pro ještě lepší výsledky je nutné kombinovat s rozšiřujícími prvky poskytujícími zpětnou vazbu. Přesnost je často zaměňována s opakovatelností. **Opakovatelnost** určuje s jakou přesností je stroj schopen vrátit se do stejné polohy [8]. Podobně jako přesnost je

¹V některých publikacích se setkáme s označením robotické paže.

ovlivněna mnoha faktory, kompenzace jejích nedostatků je však výrazně obtížnější. Rozdíly přesnosti a opakovatelnosti dobře ilustruje obrázek 2.1.



Obrázek 2.1: Na obrázku lze pozorovat vliv přesnosti (accuracy) a opakovatelnosti (precision) na schopnosti stroje².

Dalším důležitým parametrem jsou **stupně volnosti** (Degrees of Freedom, DOF), které udávají možnosti pohybu stroje v prostoru, resp. čím více stupňů volnosti robot má, tím lepší jeho schopnost pohybu v prostoru je. Stupně volnosti úzce souvisí s termínem **kinematická dvojice**, což je zjednodušeně pohyblivé spojení dvou těles. Každá tato dvojice do soustavy zpravidla přináší jeden stupeň volnosti a dohromady tvoří tzv. kinematický řetězec. Pro konstrukci průmyslových robotů se nejčastěji využívají kinematické dvojice posuvné neboli translační a otočné neboli rotační [9].

Opomenout nesmíme vlastnosti jako jsou tuhost a pevnost konstrukce. Tuhost a pevnost obecně jsou pojmy známé z mechaniky a jejich význam je často vnímán jako identický. To se velmi pravděpodobně děje proto, že v reálném světě vysokou pevnost zpravidla doprovází vysoká tuhost a naopak. Ve skutečnosti se však jedná o dvě zcela rozdílné vlastnosti. Pro účely této práce nám postačí vědět, že **tuhost** (konstrukce) udává změnu či vychýlení vzhledem k velikosti a směru působící síly. Naproti tomu **pevnost** (konstrukce) je maximální intenzita působení vnější síly, při kterém je zachována celistvost, tzn. po skončení jejího působení následuje navrácení do původního stavu.

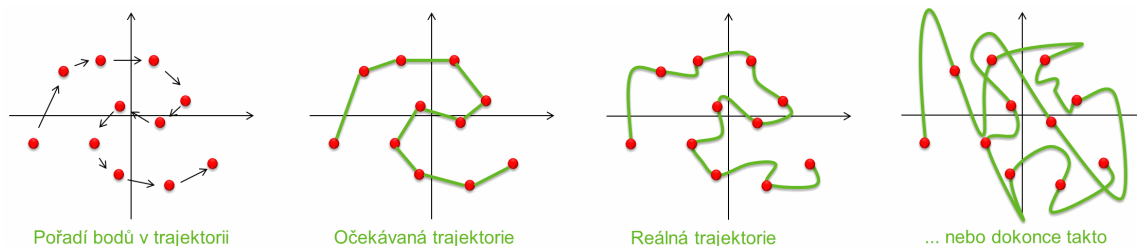
Často se setkáme s údaji o maximální rychlosti a zrychlení, kterých by měl být stroj schopen dosáhnout. Ty záleží především na hmotnosti v poměru k tuhosti použitých materiálů i celé konstrukce. Obecně platí, že vyšší hodnoty znamenají rychlejší práci robotu, avšak za cenu nižší přesnosti a naopak. Do toho dále vstupuje hmotnost a povaha neseného nákladu – tzv. užitečného zatížení. Tento problém se často ve snaze o zachování přesnosti a předcházení poškození stroje řeší snížením hodnot rychlosti i zrychlení pro těžší náklady. To celé ještě ovlivňuje zvolená trajektorie pohybu, která díky omezenému zrychlení nemusí svou délkou stačit k dosažení maximální rychlosti [8].

Stupně volnosti zásadně ovlivňují velikost pracovního prostoru robotu, který je dalším důležitým parametrem. **Pracovní prostor** je oblast, do které lze umístit koncový bod manipulátoru [8].

²Převzato z: <https://flyingdonv.com/2016/03/07/get-your-geek-on-accuracy-precision-and-resolution-whats-the-difference-1/>

2.1.1 Způsoby řízení pohybu

Rozlišujeme v zásadě dva způsoby řízení pohybu – **Point to Point** (PTP) a **Continuous Path** (CP). PTP funguje na principu definovaných bodů, které je v daném pořadí nutné navštívit, avšak pohyb mezi nimi není nijak definován. Tím jsou možnosti řízení pohybu citelně omezeny a tento přístup se tak spíše hodí pro jednodušší aplikace (obrázek 2.2). Druhý z nich – CP – umožňuje komplexnější řízení, kdy je kromě průjezdních bodů definována také trajektorie mezi nimi, avšak klade vyšší nároky na řídicí prvky. Hodí se pro aplikace, kde je zásadní celý průběh pohybu ku příkladu v členitém prostoru s mnoha omezeními [8].



Obrázek 2.2: Ukázka možných trajektorií při způsobu řízení PTP. (Převzato z: [8])

2.1.2 Kinematika průmyslových robotů

V teorii řízení robotů jsou zavedeny pojmy přímá a nepřímá kinematika.

Přímá kinematika³ (Forward kinematics) je převod ze souřadného systému robota do kartézského. Pro tento typ úlohy existuje vždy právě jedno řešení, je matematicky jednoznačná [10].

Nepřímá kinematika (Inverse kinematics) je naopak převod kartézských souřadnic do souřadného systému robota. Jedná se o komplexní problém, který má zpravidla mnoho řešení. Pro výběr toho nejvhodnějšího existuje v teorii řízení robotů celá řada přístupů [10].

2.1.3 Generace průmyslových robotů

Podle úrovně inteligence dělíme roboty do níže uvedených kategorií. Toto dělení však neznamená, že by předchozí generace měly být odstraněny a nahrazeny novějšími. Naopak jsou tyto roboty pro mnoho aplikací vhodnější zejména pro ekonomickou výhodnost jejich nasazení [9].

1. generace jsou roboty programovatelné. Mají přesně určený postup operací, přičemž jednoduchost změny jejich programu je učinila dostatečně univerzálními pro zvládnutí široké škály úkonů. Typicky nemají žádné senzory a pracují tak zcela bez zpětné vazby okolí. Příkladem může být robot na obrázku 2.3. Autor ještě zmiňuje 1,5. generaci, která již disponuje jednoduchými senzory.

³V některých publikacích se setkáme s označením dopředná kinematika.



Obrázek 2.3: První průmyslový robot Unimate zkonstruovaný roku 1961 v USA⁴.

2. generace je již vybavena výrazně větším počtem senzorů různého účelu. Jak vnějších (ku příkladu optických a hmatových), tak vnitřních určených ke snímání tlaku, polohy apod. Zásadní vývoj zaznamenalo také jejich řízení, které již ke své realizaci nutně potřebuje počítač. Autor opět zmiňuje mezigeneraci, pro kterou je typické vykonávání komplexní perceptuálně-motorické funkce.



Obrázek 2.4: Průmyslový robot BA006N od společnosti Kawasaki, který je primárně určený ke svařování⁵.

⁴Převzato z: <https://robots.ieee.org/robots/unimate/>

3. generace robotů se od předchozích liší především v koncepci řídicího systému. Nově systém zahrnuje prvky umělé inteligence, s čímž úzce souvisí schopnost se učit a adaptovat v procesu řešení úkonů i v okolním prostředí. To těmto robotům umožňuje fungovat do značné míry zcela autonomně a nahradit tak lidi i v činnostech, k jejichž vykonávání je nutné disponovat alespoň základními kognitivními schopnostmi.



Obrázek 2.5: Kolaborativní robot tzv. kobot CRX-10iA/L od společnosti FANUC. Jedná se o speciální typ robotů navržený pro bezprostřední spolupráci s lidmi v prostoru, který společně sdílí⁶.

2.1.4 Konstrukce průmyslových robotů

Jak již bylo zmíněno, skládáním kinematických dvojic vzniká kinematický řetězec neboli kinematická struktura konkrétního průmyslového robotu. Nejpoužívanější z těchto struktur si nyní uvedeme a krátce popíšeme.

Kartézské roboty případně lineární roboty, jsou roboty jejichž jednotlivé osy spolu svírají pravé úhly, jinými slovy se pohybují uvnitř kvádry a vykonávají tak pouze pohyby translační. Jsou oblíbené pro svou vysokou přesnost a rychlost. Jejich konstrukce je předurčuje pro práci s těžšími náklady. Velkou nevýhodou však jsou poměrně vysoké nároky na prostor v porovnání s maximální plochou, na které operují. Uplatnění našly v mnoha

⁵Převzato z: <https://www.pngegg.com/en/png-dvcqo/>

⁶Převzato z: <https://crx.fanuc.eu/cs/fanuc-cobot-crx-10ia-1-2/>

aplikacích například 3D tisku a CNC obrábění, ale také jako obrovské halové jeřáby. Příklad tohoto typu robotu je k vidění na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Ukázka kartézského robotu od společnosti KUKA⁷.

Kloubové roboty jsou popisovány jako nejuniverzálnější, a pravděpodobně proto i nej-používanější typ průmyslových robotů. Na rozdíl od kartézských robotů dokážou i při kompaktních rozměrech obsluhovat velkou pracovní plochu. Bohužel současně zpravidla disponují nižší přesností a horší opakovatelností. Jsou složeny z jednotlivých ramen spojených rotačními spoji – klouby, tudíž každého bodu ze svého operačního prostoru dosahují pouze pohyby rotačními. Díky své univerzálnosti tak najdou uplatnění v různých oblastech a široké škále činností. Kromě těch předpokládatelných, jako je přenášení předmětu z místa na místo, mezi ně často patří ku příkladu svařování. Ukázku kloubových robotů jsme mohli vidět na obrázcích 2.4 a 2.5.

SCARA roboty z anglického Selective Compliant Articulated Robot Arm, čehož vhodný překlad by vzhledem ke konstrukci mohl znít „selektivně poddajné kloubové robotické rameno“. Tento typ robotů se poprvé objevil v Japonsku roku 1981 a díky svým jedinečným vlastnostem se rychle rozšířil do celého světa. Skládá se zpravidla ze dvou nebo více rotačních kloubových spojení a jednoho posuvného. Tato kloubová spojení jsou poněkud netradičně situována v horizontální poloze, obsluhují tedy výhradně prostor v ose X a v ose Y, což jim ve vertikální rovině umožňuje dosáhnout značné tuhosti a tím přináší pro specifický druh úkonů zásadní výhodu. Zbývající osu Z zajišťuje zmíněný translační prvek. Zástupce těchto robotů je vidět na obrázku 2.7.

⁷Převzato z: <https://www.kuka.com/products/robotics-systems/industrial-robots/linear-robots/>



Obrázek 2.7: Ukázka SCARA robotu SG650 výrobce YASKAWA⁸.

Existují další méně obvyklé, avšak všeobecně uznávané kategorie kinematických struktur průmyslových robotů. Jako příklad můžeme uvést roboty cylindrické, sférické, delta roboty a další. Některé z nich ukazuje obrázek 2.8.



Obrázek 2.8: Ukázka cylindrického robotu⁹ a robotu typu delta¹⁰.

⁸Převzato z: https://cz.yaskawa.eu.com/products/robots/productdetail/packaging/product/sg650_6642/

⁹Převzato z: <https://www.automate.org/products/cylindrical>

¹⁰Převzato z: <https://www.deltaxrobot.com/>

2.2 Existující řešení

Ve snaze udržet krok s konkurencí jsou společnosti nuceny výrobu stále intenzivněji automatizovat a nahrazovat tak lidskou práci prací robotů. Poptávka po robotech stále roste, a to i v kategorii malých robotů s dosahem okolo 500mm. Robot má oproti zaměstnanci mnoho výhod, jakými jsou práce bez chyb a potřeby odpočinku. V jejich prospěch mluví také celkové náklady, kdy se zpravidla po určité době stávají oproti zaměstnanci nepoměrně výhodnějšími. Problémem však často bývá velká počáteční investice, což však v této velikostní kategorii nemusí být pravidlem.

2.2.1 Komerční sféra

Jelikož se tento trend velmi pravděpodobně v blízké době nezmění, neustále se na trhu bude zvětšovat prostor pro firmy, které se výrobou a instalací robotů zabývají. Většina v současnosti primárně cílí na průmysl, kde je poptávka zdaleka nejvyšší. Žebříčky největších producentů průmyslových robotů dlouhodobě ovládají japonské firmy, nalezneme v nich ale také firmy evropské. Stručný přehled ramen menších rozměrů z nabídky těchto renomovaných výrobců nyní uvedu:

- **LR Mate 200iD/4S** výrobce FANUC, maximální dosah 550mm, 6DOF, odchylka přesnosti opakování okolo 0,01mm, nosnost 4kg¹¹
- **KR 4 AGILUS** výrobce KUKA, maximální dosah 601mm, 6DOF, odchylka přesnosti opakování do 0,02mm, nosnost 4,6kg¹²
- **MotoMINI** výrobce YASKAWA, maximální dosah 350mm, 6DOF, odchylka přesnosti opakování do 0,02mm, nosnost 0,5kg¹³
- **RB 1010** výrobce ABB, maximální dosah 370mm, 6DOF, odchylka přesnosti opakování okolo 0,01mm, nosnost 1,5kg¹⁴

Tyto stroje jsou navrženy pro náročná prostředí průmyslové výroby. Léta zkušeností z oboru se odráží v jejich technologické vyspělosti, přičemž přiblížit se těmto kvalitám by vyžadovalo obrovské „know-how“ a prvotřídní materiály i technologie. Na trhu se však objevuje nespočet produktů menších firem určených spíše do méně náročných provozů s mnohem příznivější cenou. Samostatnou kategorií pak tvoří levné roboty (často prodávané jako stavebnice) zpravidla od čínských výrobců. Příkladem dříve zmíněného může být **Ned2** (obrázek 2.9) od společnosti *Niryo*. Ten disponuje maximálním dosahem 440mm, 6 osami, odchylkou přesnosti opakování okolo 0,5mm a nosností až 0,3kg. Navíc je kompletně založen na open-source technologiích.

¹¹Zdroj dat: <https://www.fanuc.eu/es/en/robots/robot-filter-page/lrmate-series/lrmate-200id-4s>

¹²Zdroj dat: <https://www.kuka.com/products/robotics-systems/industrial-robots/kr-4-agilus>

¹³Zdroj dat: https://www.yaskawa.eu.com/products/robots/handling-mounting/productdetail/product/motomini_603

¹⁴Zdroj dat: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-1010>



Obrázek 2.9: Nízkonákladový průmyslový robot NIRYO Ned2¹⁵.

2.2.2 Nadšenci a open-source komunita

Jedním z výdobytků dneška jsou bezpochyby možnosti jednoduchého a rychlého sdílení prakticky čehokoliv, co je elektronickou formou přenositelné. Intenzivně z toho těží open-source komunita napříč odvětvími po celém světě. Na serverech jako YouTube¹⁶ nacházíme nespočet projektů podobného zaměření, jako je tento. Některé velmi jednoduché, jiné propracovanější, mnohdy taky včetně zdrojových dat umožňujících robot vyrobit prakticky každému. Neméně zajímavá je taktéž situace na serveru Thingiverse¹⁷ a jeho obdobách, které obvykle sdružují zejména kreativní lidi s nadšením pro tvoření a kutilství. Nyní uvedu nevýznamnější zdroje inspirace, které projekt čerpá právě na těchto platformách.

Prvním zástupcem je rameno tvůrce *Dr. D-Flo* (obrázek 2.10 vlevo). Tento robot, spíše větších rozměrů, využívá k pohybu kloubů motory NEMA¹⁸ 23 a NEMA 17 ve spojení se zajímavým řešením převodů pomocí ozubených řemenů. Tvůrce videa není původním autorem návrhu, ale pouze jej rozšiřuje a vylepšuje.

Dalším je stroj tentokrát menší konstrukce (obrázek 2.10 vpravo). Zajímavý je trojicí NEMA 11 motorů pro řízení horní části ramena, které jsou umístěny nad sebou v blízkosti kloubu, čímž je strategicky přesouvána hmotnost. Díky tomu budou vyšší rychlosti méně ovlivňovat přesnost robota. Bohužel autor dosud nezveřejnil bližší detaily fungování mechanismu.

¹⁵Převzato z: <https://niryo.com/products-cobots/robot-ned-2/>

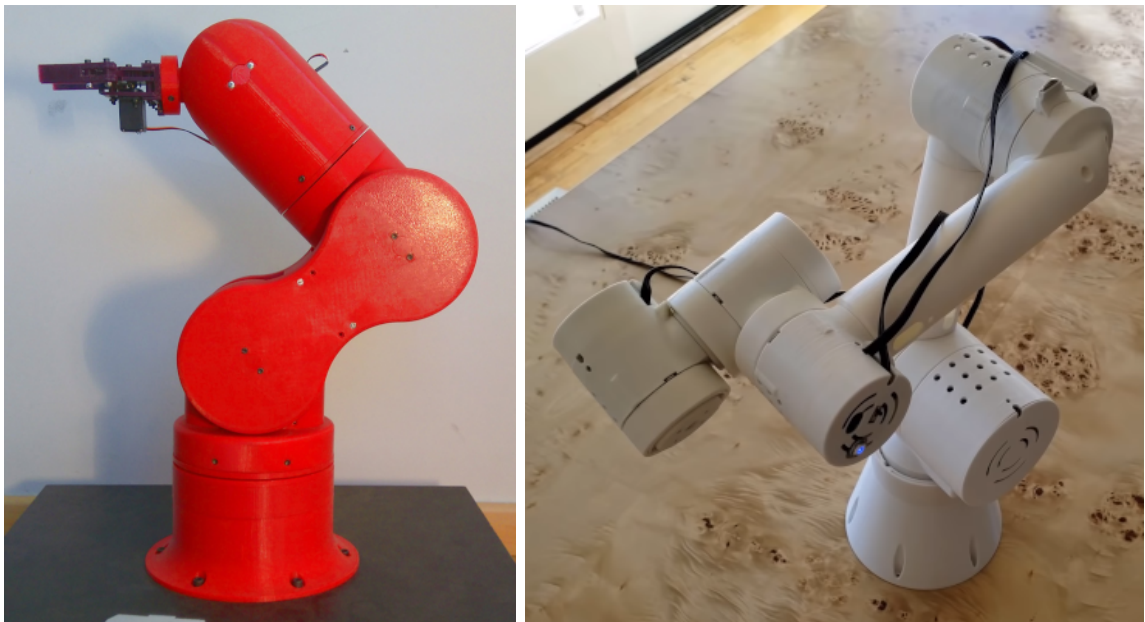
¹⁶<https://www.youtube.com/>

¹⁷<https://www.thingiverse.com/>

¹⁸NEMA je zkratka americké National Electrical Manufacturers Association, která zastřešuje standard tohoto typu motorů a mnoho dalšího.



Obrázek 2.10: Robotická ramena tvůrců *Dr. D-Flo*¹⁹ a *ZeroBacklash*²⁰.



Obrázek 2.11: Robotická ramena tvůrců *AngelLM*²¹ a *John Lauer*²².

¹⁹Převzato z: https://www.youtube.com/watch?v=h-gtw0P9xv4&t=288s&ab_channel=Dr.D-Flo

²⁰Převzato z: https://www.youtube.com/watch?v=NG5CyKcUFbg&t=15s&ab_channel=ZeroBacklash

²¹Převzato z: <https://hackaday.io/project/12989-thor>

²²Převzato z: https://www.youtube.com/watch?v=tEbJV32GyYU&ab_channel=JohnLauer

Dalším projektem je robotické rameno **Thor** tvůrce *AngelLM* (obrázek 2.11 vlevo). Jedná se o poměrně úspěšný projekt, kolem kterého dokonce vznikla komunita lidí a sám autor se mu intenzivně věnoval několik let. Jeho velkým přínosem je kvalitní a podrobná od raných fází vedená dokumentace všech aspektů, díky čemuž celý projekt výborně poslouží jako zdroj cenných informací a zkušeností.

Poslední projekt, který zmíním, vytvořil *John Lauer* (obrázek 2.11 vpravo). Robot je zajímavý mimo jiné využíváním planetových převodů a experimentováním s 3D tištěnými ložisky. Za zmínku také stojí na míru vytvořené plošné spoje, které zjednodušují zapojení a umožňují dosáhnout menších rozměrů ovlivněných částí.

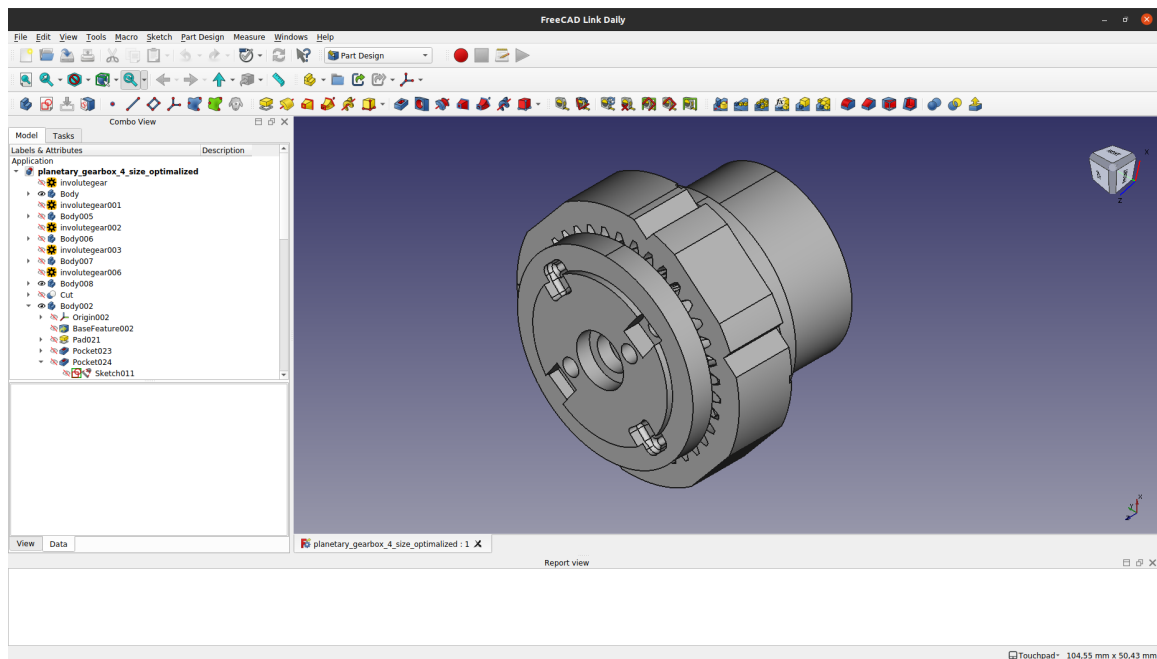
Kapitola 3

Použité nástroje a technologie

Tato kapitola bude věnována stručnému představení nástrojů a technologií, bez kterých by se návrh a implementace tohoto projektu neobešly.

3.1 FreeCAD

FreeCAD je nástroj pro parametrické 3D modelování. Primárně určen pro strojírenství, ale poslouží také v jiných oblastech, kde je zapotřebí přesného modelování objektů s podrobnou historií prováděných změn [3].



Obrázek 3.1: Model převodovky v programu FreeCAD.

FreeCAD je multiplatformní open-source software vyvíjený pod licencí LGPL¹, což jej dělá zdarma dostupným pro kohokoliv. S tím souvisí nepřehledné množství výukového materiálu, jež neúnavně tvoří jeho stále se rozrůstající komunita.

¹LGPL je zkratka Lesser General Public License publikované Free Software Foundation.

Na internetu lze najít množství rozšíření ve formě modulů ke stažení a dokonce celé uživatelské verze. Ty zpravidla vycházejí z verze oficiální a obsahují navíc nejrůznější vylepšení, úpravy a opravy. Velké oblibě se těší verze vývojáře *realthunder*. Ta mimo jiné z velké části implementuje nápravu jednoho z nejzásadnějších problémů tohoto programu – mezi anglicky mluvící komunitou známého jako „Topological naming problem“, který velmi komplikuje dodatečné změny v historii úprav jednotlivých dílů. Náhled do uživatelského rozhraní zprostředkovává obrázek 3.1.

Zajímavou funkcionalitou FreeCADu je Python konzole. Ta dává uživateli možnost ovlivňovat každý aspekt modelovaného dílu a zprostředkovává nepřeberné množství operací nad rámec běžné nabídky nástrojů. Také je možné přidávat vlastní makra. Pro ještě širší možnosti využití, zejména v externích aplikacích, je k dispozici otevřená Python API včetně dokumentace.

3.2 Platforma Arduino

Arduino navrhuje, vyrábí a poskytuje podporu pro elektronické zařízení a software, který lidem po celém světě usnadňuje přístup k pokročilým technologiím, které interagují s vnějším světem [1].

Jedná se o open-source platformu založenou na jednoduché desce s vlastním vývojovým prostředím. Otevřenost, jednoduchost a široké možnosti využití jsou bezesporu vlastnosti, na které je kladen důraz a jsou společným znakem jednotlivých produktů. Dały by se tak označit za jakousi filozofii celé společnosti, která je připravena uspokojit požadavky jak studentů, tak profesionálních vývojářů.

Uživatel má na výběr z mnoha různých desek. Ty se liší především svými rozměry, výkonem procesoru a velikostí paměti. Většina je dodávána s 8-bitovým procesorem, výjimečně se objevují verze s 32-bitovým. Za účelem dosažení co možná nejmenších rozměrů a nižší ceny některým deskám zcela chybí rozhraní určené k nahrávání kódu. V těchto případech je nutné použít vhodný externí programátor.

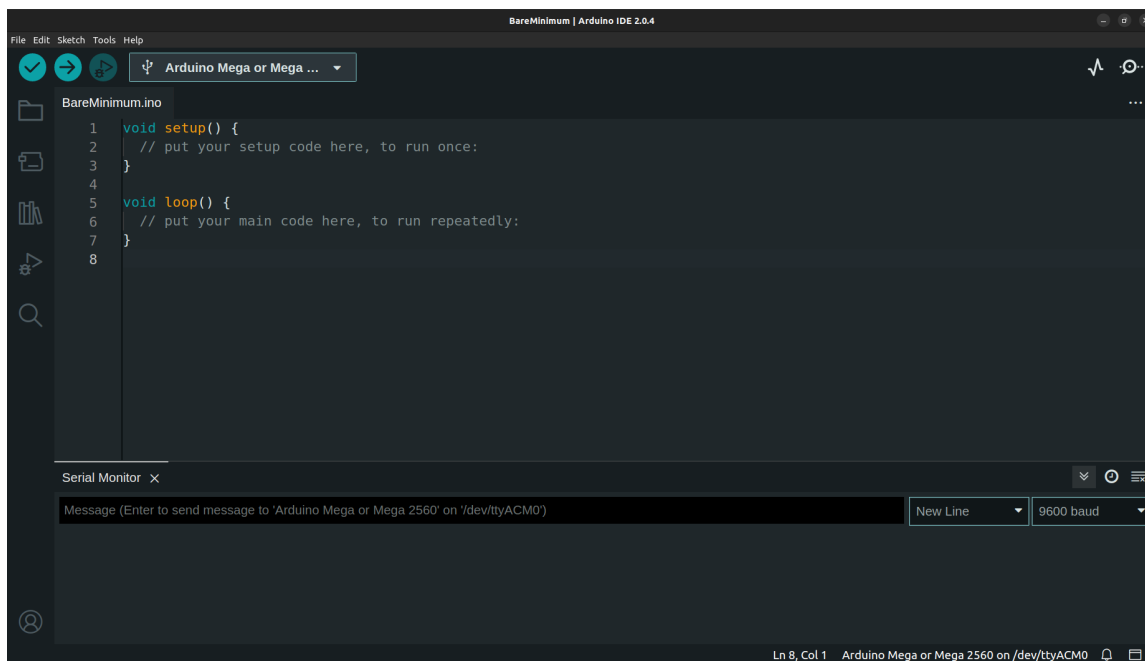
Jednou z cest, jak rozšířit funkcionalitu každé jednotlivé desky, jsou tzv. „shields“. Ty mohou díky principům open-source vznikat zcela bez omezení. Takto rozšířená funkcionalita může znamenat např. Ethernet konektor, bluetooth konektivitu, implicitní připojení k nepájivému poli, grafický displej a mnoho dalšího.

Arduino IDE

Arduino IDE² zastřešuje celý proces vývoje, přičemž klade důraz na jednoduchost a uživatelskou přívětivost. Slouží k programování desek a současně jako grafický editor s širokou nabídkou funkcí (obrázek 3.2). Snahu o přívětivost dokresluje povaha jazyka Wiring³, jehož podporou v podobě frameworku Arduino IDE disponuje [13].

²Z anglického Integrated Development Environment neboli integrované vývojové prostředí.

³Wiring je programovací jazyk vytvořený a uzpůsobený k programování mikrokontrolérů. V současnosti se s ním nejčastěji setkáme v podobě frameworku pro C/C++.



Obrázek 3.2: Arduino IDE s ukázkou základní struktury jazyka Wiring.

3.3 3D tisk

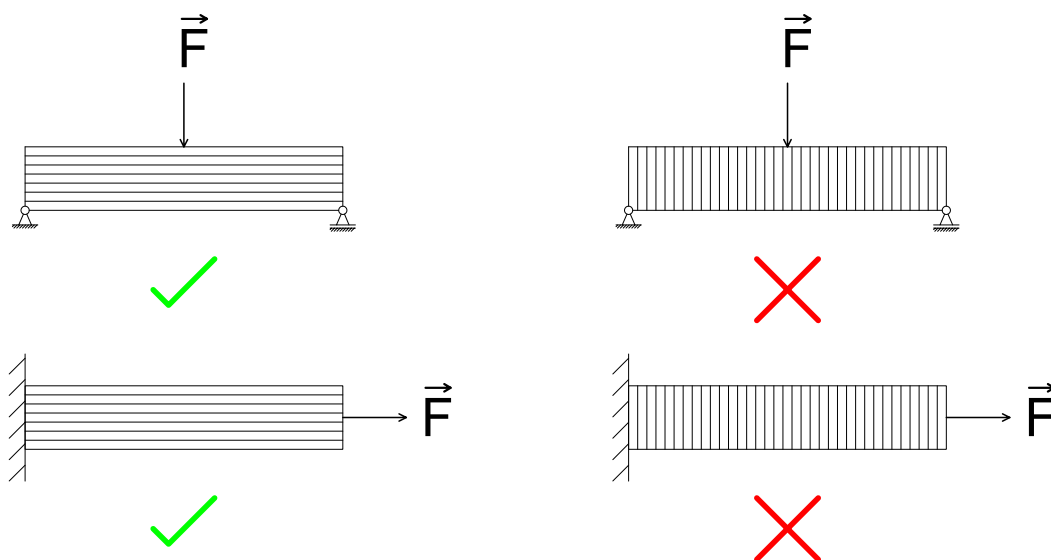
3D tisk je fenomén, který navždy v mnohém změnil celý svět. Umožňuje v podstatě komunikativně vyrobit svépomocí, s relativně malým úsilím a vstupní investicí, funkční produkt zcela libovolného tvaru s potenciálem konkurovat komerčnímu sektoru.

FDM/FFF

Technologie známá pod zkratkou FDM (Fused Deposition Modeling), o něco méně pak pod zkratkou FFF (Fused Filament Fabrication), je druh 3D tisku, při kterém výsledný produkt vzniká postupným nanášením roztaveného materiálu (termoplastu) v tenkých vrstvách. Tyto dvě zkratky jsou de facto totožné, rozdíl spočívá pouze v tom, že FDM je registrovaná ochranná známka a tudíž může být její obecné používání problematické. V neoficiální komunikaci se s ní však setkáme častěji.

V souvislosti s touto prací se význam slovního spojení „3D tisk“ omezí pouze na FDM/FFF technologii tisku.

O pevnosti výtisku rozhoduje mimo jiné směr orientace vrstev. Výsledný produkt není zcela homogenní a můžeme na něm jednotlivé vrstvy pozorovat. Je proto nutné tuto skutečnost znázorněnou na obrázku 3.3 brát v úvahu a s působícími silami a jejich směry počítat. Směr vrstev hraje roli také po stránce estetické. Nesprávně zvolená orientace na tiskové podložce může výtisk zcela znehodnotit.



Obrázek 3.3: Ukázka správné a nesprávné orientace vrstev vzhledem ke směru působící síly.

Filament

Filament neboli tisková struna je zpravidla vlákno termoplastu, ze kterého za pomoci 3D tiskárny vzniká požadovaný objekt. Setkat se můžeme s širokou škálou materiálů. Nejčastěji se vyrábí v šířkách 1,75 mm a 2,85 mm.

Filamenty je důležité správně uchovávat, protože bez ohledu na materiál všechny mají větší či menší tendenci pohlcovat vzdušnou vlhkost. Následný tisk dokáže tato skutečnost nepříjemně poznamenat a může vyústit až v nutnost zvlhlý filament zdlouhavě sušit. Jedna z možností jak tomu předcházet je demonstrována na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Ukázka 1 kg špulky filamentu a jedna z možností jejího správného skladování. Ve spodní části boxu se nachází vak se silica gelem pro pohlcování vlhkosti.

Tento projekt využívá téměř výhradně materiál **PETG** neboli polyethyltereftalát-glykol. Mezi jeho výhody patří relativně snadný tisk, dobrá soudržnost vrstev, pevnost v ohybu a teplotní odolnost sahající až k 70°C. Ta je, oproti v současné době zdaleka nejpreferovanějším materiálem 3D tiskařů – PLA (kyselina polyléčná), podstatně vyšší a v konečném důsledku to je hlavním důvodem jeho nepoužití. V menší míře na místech, kde je nutná poněkud vyšší tuhost, než jakou nabízí PETG, je zastoupeno materiálem **ASA** (Akrylonitril-styren-akrylát). Bližší srovnání vlastností těchto materiálů je v tabulce 3.1.

	PETG	ASA	PLA
Teplota trysky	235 – 255°C	240 – 255°C	190 – 210°C
Teplota podložky	65 – 75°C	80 – 105°C	50 – 60°C
Teplotní odolnost	70°C	96°C	55°C
Tisková komora	Nepovinná	Doporučuje se	Nepovinná
Pevnost v tahu	50 MPa	40 MPa	60 MPa
Pevnost v ohybu	71 MPa	62 MPa	83 MPa
Hustota	1,27 g/cm ³	1,07 g/cm ³	1,24 g/cm ³

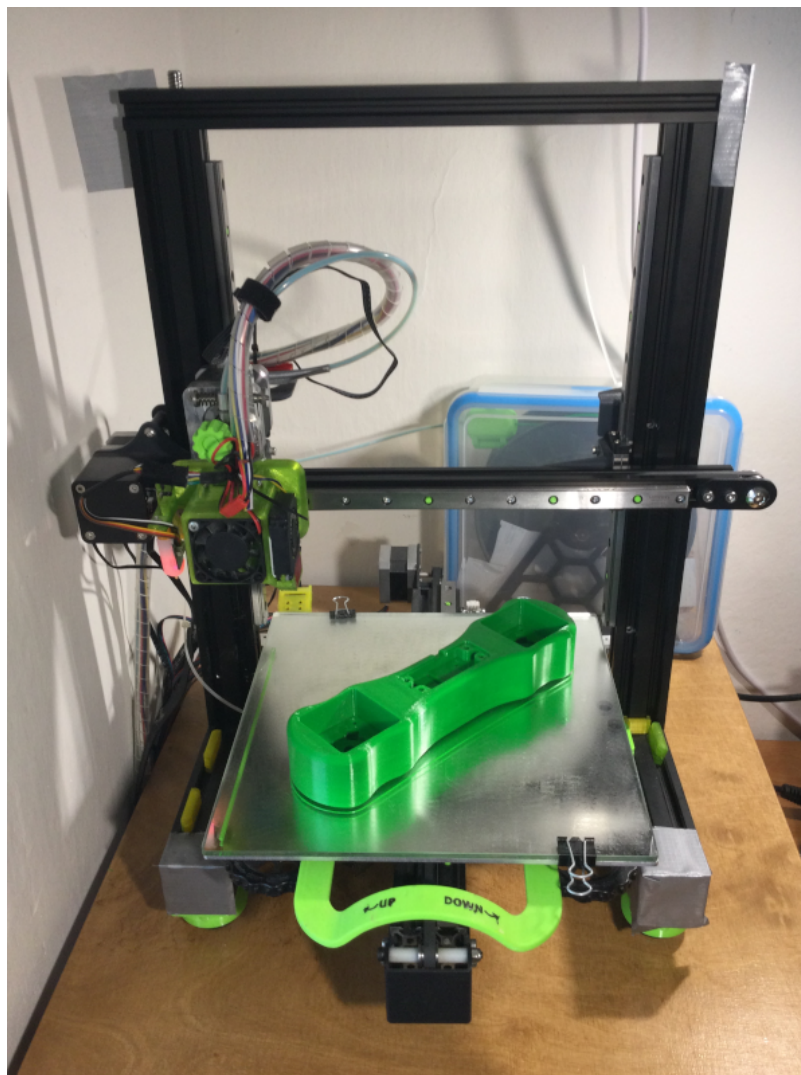
Tabulka 3.1: Stručný přehled vlastností použitých materiálů. Pro porovnání je zahrnut také všeobecně nepoužívanější materiál PLA⁴.

Ender 3 Pro

Mezi komunitou 3D tiskařů snad neexistuje nikdo, kdo by tuto tiskárnu neznal (obrázek 3.5). Oblibu obrovské části komunity si vysloužila především díky výbornému poměru ceny a schopností, díky čemuž pro ni existuje nepřeborné množství úprav a vylepšení. Konkrétně model využitý pro tento projekt disponuje oproti tovární verzi celokovovým hotendem⁵, bez kterého by byl tisk materiály PETG a ASA prakticky nemožný. Původní 8-bitovou elektroniku nahradila dokonalejší 32-bitová. Na přesnost a kvalitu tisku mělo velmi pozitivní vliv přidání druhé vertikální osy Z a zařízení BLTouch sloužícího pro automatickou kompenzaci nerovností tiskové podložky.

⁴Data pochází z webu české společnosti Fillamentum (<https://www.fillamentum.cz/>).

⁵Hotend je část 3D tiskárny, ve které se taví filament.



Obrázek 3.5: Ender 3 Pro použitý v tomto projektu, tiskovou podložku tvoří zrcadlo s vrstvou adheziva 3DLack.

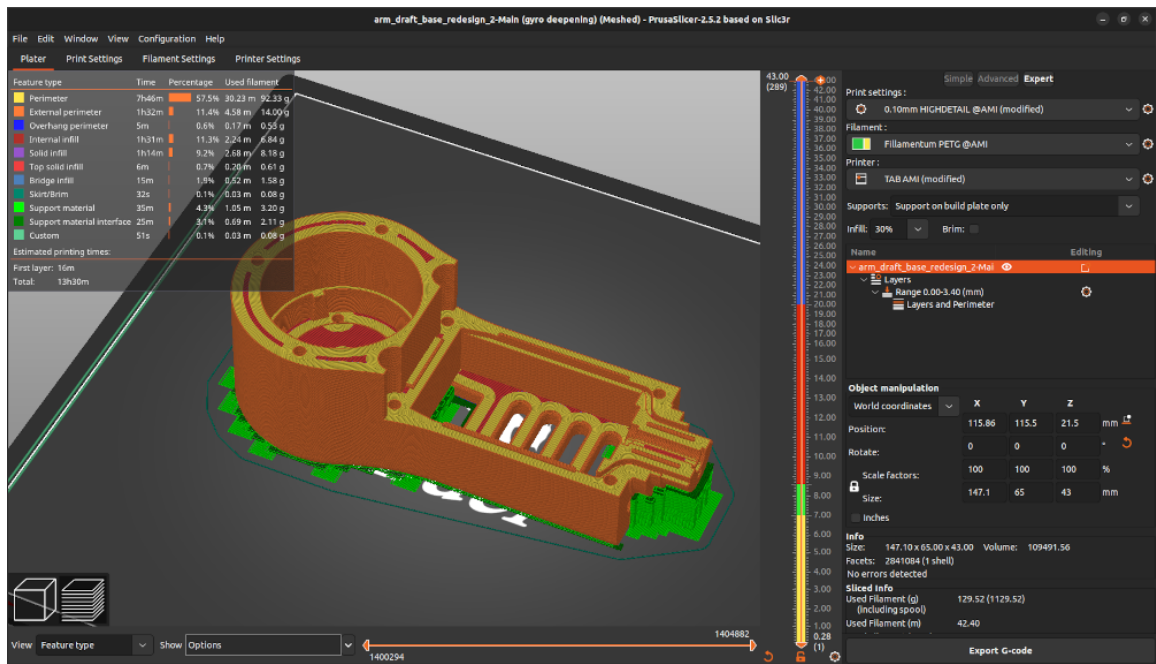
3.4 PrusaSlicer

Slicer je program schopný převést model vytvořený CAD programem do jazyka srozumitelného 3D tiskárnám – G-code⁶. Proces se nazývá „slicování“ – doslova krájení na vrstvy.

PrusaSlicer je multiplatformním open-source slicovacím nástrojem vyvíjeným českou společností Prusa Research, která je zavedenou značkou působící v oblasti 3D tisku známou nejen u nás, ale také v zahraničí. Je založený na open-source projektu Slic3r [4].

Prohlédnout si slicer uprostřed práce je možné na obrázku 3.6.

⁶Jazyk široce využívaný pro řízení CNC a podobných zařízení.

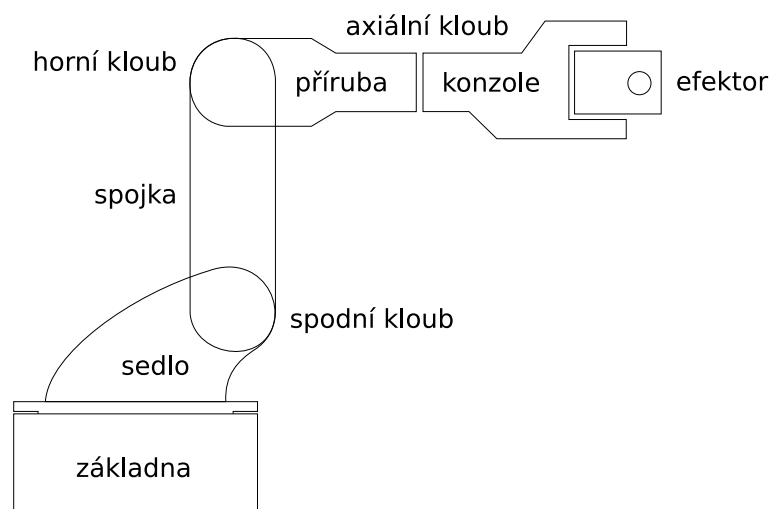


Obrázek 3.6: Ukázka slicování v programu PrusaSlicer

Kapitola 4

Návrh mechanických částí a řídicí elektroniky

Obsahem kapitoly je samotný návrh jednotlivých částí ramena. Následující text nastíní zvolené principy a postupy, zdůvodní výběr užitých komponentů a pokusí se stručně chronologicky provést celým procesem návrhu. Pro lepší orientaci bude kapitola rozdělena do tří hlavních částí, z nichž první čtenáře zběžně seznámí s cíli a požadavky, další pojednává o modelování konstrukce ramena a poslední o výběru a zapojení elektroniky.



Obrázek 4.1: Pojmenování jednotlivých částí ramena.

4.1 Specifikace cílů

V několika řádcích nyní nastíním neformální specifikaci cílů, požadavků a vlastně také očekávání, která do projektu vkládám. Tato specifikace vznikla na základě prostého nápadu postavit robot podobný těm komerčně vyráběným. Inspiraci čerpá z existujících řešení obdobného zaměření v tomto textu již zmíněných.

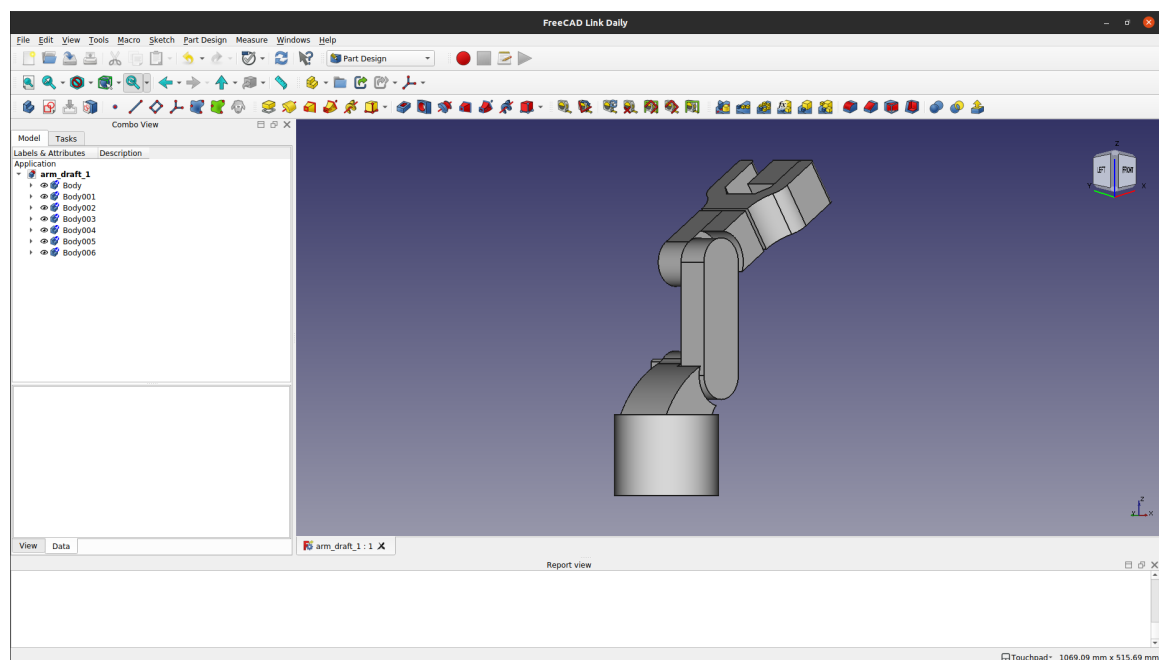
Důraz bude kladen na nenáročnou a v rámci možností levnou výrobu proveditelnou v běžných podmínkách kutilské dílny. Musíme počítat s nákupem v tuzemských specializovaných obchodech a s největší pravděpodobností bude v několika případech nezbytné objednat zboží také ze zahraničí. Neobejdeme se ani bez základní 3D tiskárny s tiskovou plochou alespoň 200x200 mm a výškou 100 mm uzpůsobené pro tisk filamenty PETG a ASA případně filamenty podobných či lepších mechanických vlastností.

Robot by mohl svou funkčnost a schopnosti demonstrovat kreslením na papír pomocí fixu, přičemž by měl disponovat alespoň čtyřmi stupni volnosti.

4.2 Mechanické komponenty ramena

Modelování probíhalo v programu FreeCAD, konkrétně v jeho vylepšené verzi s označením 2022.430 publikované vývojářem *realthunder*, jejíž specifika jsou zmíněna v sekci 3.1 předchozí kapitoly. Veškerá práce se odehrávala ve workbenchích Part Design, Part a Gears. Poslední zmíněný slouží výhradně pro modelování ozubených kol, které značně zjednodušuje a urychluje. Přes to všechno se modelování od počátku ukazovalo být obrovskou výzvou.

Jedním z prvních dilemat se stalo rozhodnutí, jaký typ pohonu zvolit. Přestože bylo možné vybírat mezi nejrůznějšími typy od tradičních až po velmi nekonvenční, ve finále se toto dilema zredukovalo pouze na volbu mezi krokovým motorem a servomotorem. Na straně servomotorů byla výhoda vyššího výkonu s nižší hmotností a kompaktnějšími rozměry, ale především snadné nastavení polohy bez potřeby dalších podpůrných mechanismů. Horší je to však s rychlostí, rozsahem otáčení a hlučností. Krokové motory umožňují dosahovat vyšší přesnosti a je možné je bez omezení dále zpřevodovat, čímž je nakonec možné dosáhnout vyššího kroutícího momentu. Zpravidla pro ně hovoří také cena. To všechno vedlo k rozhodnutí přiklonit se k použití krokových motorů. Tato skutečnost s sebou však nese zásadní problém, kterým je nutnost zajistit zjišťování polohy jednotlivých částí ramena.



Obrázek 4.2: Ukázka prvního návrhu konstrukce, ze kterého vychází finální řešení.

Krokové motory záhy doplnily planetové převodovky. Toto rozhodnutí bylo vzhledem k jeho zásadní roli překvapivě rychlé. Dám-li stranou svoji zálibu v tomto typu převodu, mluví v jejich prospěch celá řada veskrze pragmatických důvodů. Ku příkladu jejich výrobu kompletně obstará 3D tiskárna bez nutnosti nákupu jakýchkoliv dalších součástek, což znamená obrovskou flexibilitu jak samotného převodového poměru, tak možná ještě důležitější flexibilitu rozměrovou, materiálovou a mnoha dalších konstrukčních specifik. Tímto okamžikem ustoupily do pozadí všechny předchozí koncepty a jako nejspokladnější volba se začal jevit návrh konstrukce s jednostrannými klouby, které budou disponovat dostatkem prostoru k uložení planetových převodovek. To dalo vzniknout modelu (obrázek 4.2), který určil směřování celého projektu a na jehož základě postupně začalo vznikat finální řešení.

Planetová převodovka

Planetové převody jsou převody s jedním (se dvěma, mluvíme-li o diferenciálním planetovém převodu) stupněm volnosti. Jsou tvořeny unašečem a soustavou ozubených kol, konkrétně centrálním kolem (sluncem), dvěma nebo více satelity (planetami) a korunovým kolem (prstencem), což je zpravidla kolo s vnitřním ozubením a osou shodnou s osou centrálního kola. Satelity jsou na unašeči uloženy tak, aby mohly rotovat, přičemž takto rotují okolo centrálního kola [10]. Pro lepší představu slouží obrázek 4.3.

Ve všech v tomto projektu použitých planetových převodech zastává funkci hnacího členu centrální kolo. Ve všech případech také využívají čelních ozubených soukolí se šípovým ozubením, která dosahují oproti ozubením s přímými zuby vyšší výkonnosti a také klidnějšího a kvalitnějšího záběru, čímž zároveň snižují chvění a hluchost celé sestavy. Navíc díky svému tvaru minimalizují vůle a eliminují axiální síly, které v nich vznikají.

Tvar zubů se odvíjí od jejich celkového počtu a průměru jednotlivých kol. Pro každou konfiguraci existuje minimální počet zubů takový, že při něm mezi nimi nedochází ke kolizím způsobujícím nadměrné opotřebení a s tím související zhoršování vlastností převodu [12].

Pro výpočet takového minima slouží vzorec (4.1) popsany v publikaci [12], kde h_a^* je součinitel výšky hlavy zubu a α úhel záběru zubu.

$$z_{min} = \frac{2h_a^*}{\sin^2\alpha} \quad (4.1)$$

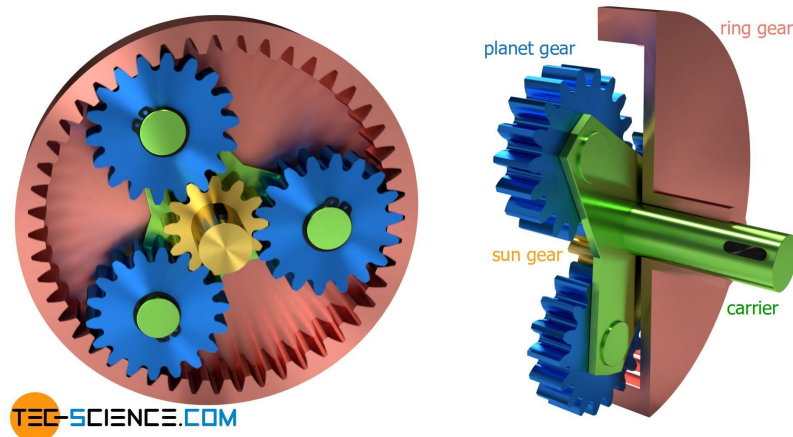
Jedná se o zjednodušený vzorec primárně určený pro záběr kola s ozubeným hřebenem, nicméně vzhledem k metodě výroby (3D tisk) v kombinaci s miniaturními rozměry nám bude tento orientační výsledek dostačovat. Z vzorce vyjádříme úhel α a dosadíme do něj hodnoty (4.2). Víme, že nejmenší ozubené kolo v sestavě disponuje 10 zuby a h_a^* bude pro tyto účely rovno 1.

$$\alpha = \arcsin\left(\sqrt{\frac{2h_a^*}{z_{min}}}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{10}}\right) \approx 26,565^\circ \quad (4.2)$$

Vhodný úhel záběru se tedy pohybuje okolo 26° a případné výraznější nedodržení této hodnoty by mělo být kompenzováno jinak. Tady je nutné poznamenat, že neplatí pro veškeré ozubení, ale pouze pro soustavu, do níž zmíněné kolo s 10 zuby patří (což je méně než třetina veškerého používaného ozubení).

Pro správné fungování planetové převodovky musí platit následující vztah (4.3), kde C je počet zubů na centrálním kole, S na satelitech a K na korunovém kole.

¹Převzato z: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/epicyclic-planetary-gear/>



Obrázek 4.3: Klasická planetová převodovka s přímým ozubením včetně popisu jednotlivých prvků¹.

$$K = 2 \cdot S + C \quad (4.3)$$

U jednoduché planetové převodovky platí, že ze základních prvků – centrální kolo, unašeč, korunové kolo – je vždy právě jeden člen hnací, jeden stacionární a jeden výstupní. Což společně s počty zubů určuje výsledné převodové poměry. V rámci této práce využijeme jednu základní planetovou převodovku disponující konfigurací s hnaným centrálním kolem o 11 zubech, výstupním korunovým kolem o 37 zubech a stacionárním unašečem nesoucím čtyři satelity o 13 zubech. Ze vztahu (4.4) vypočítáme, že v takové konfiguraci docílíme mezi centrálním a korunovým kolem převodového poměru okolo 3,36 : 1 (zanedbáváme obrácení směru). To znamená, že více než ztrojnásobíme sílu motoru, načež ten bude muset provést úměrně tomu více otáček.

V odborné literatuře se obvykle počítají převodové poměry na základě úhlových rychlostí. My použijeme srozumitelnější vzorce vycházející z počtu zubů.

$$i_{KC} = -\frac{K}{C} = -\frac{37}{11} = -3,3\overline{6} \quad (4.4)$$

Pro úplnost si uvedeme také vztahy pro konfigurace s hnaným unašečem, výstupním centrálním kolem a stacionárním korunovým kolem (4.5) a s hnaným unašečem, výstupním korunovým kolem a stacionárním centrálním kolem (4.6).

$$i_{CS} = 1 + \frac{K}{C} \quad (4.5)$$

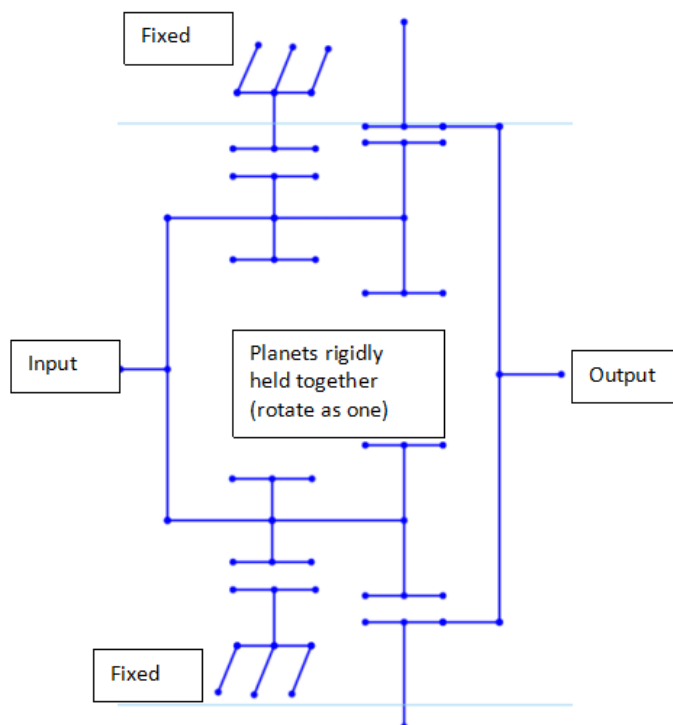
$$i_{KS} = 1 + \frac{C}{K} \quad (4.6)$$

Aby mohly být satelity v převodu rovnoměrně rozmístěny a stejně natočeny, musí být počtem planet dělitelný počet zubů centrálního i korunového kola, nebo alespoň součet počtu zubů centrálního a korunového kola. Ve druhém případě však budou mít satelity odlišnou fázi.

Diferenciální planetová převodovka

Konfigurací diferenciálních planetových převodů existuje více. Tento projekt používá konfiguraci sestávající ze dvou stupňů, která je schématicky znázorněna obrázkem 4.4. Satelity obou stupňů tvoří jeden celek a konstrukce tak zcela postrádá unašeč. Hnacím prvkem je jedno z centrálních kol a role výstupního a stacionárního prvku připadá každá jednomu korunovému kolu.

Oba stupně tvoří de facto samostatnou jednoduchou planetovou převodovku, přičemž ty mají stejný počet satelitů. Nutné je zajistit, aby satelity jednotlivých stupňů sdílely osu otáčení (tzn. aby při pohledu shora tvořily soustředné kružnice), což vytváří striktně omezenou množinu počtů zubů, které mohou jednotlivé prvky v rámci každého stupně mít. C_1 představuje počet zubů na hnaném centrálním kole, $S_{1,2}$ na jednotlivých stranách satelitů a $K_{1,2}$ na korunových kolech. Číslovka udává stupeň, do kterého daný prvek patří. Čím blíže k sobě budou součiny počtu zubů ($S_2 \cdot K_1$) a ($K_2 \cdot S_1$), tím vyšší bude převodový poměr.



Obrázek 4.4: Schéma použité konfigurace diferenciální planetové převodovky. (Převzato z: [2])

V tomto projektu využijeme tři totožné diferenciální planetové převodovky. Hnacím prvkem je vždy stejné centrální kolo s 12 zuby, korunová kola s počty zubů 36 a 40 se však budou na postu výstupního a stacionárního prvku střídát, budeme tedy muset počítat dva různé převodové poměry. Satelity mají 10 zubů na jedné straně a 14 na druhé. Volné centrální kolo disponuje 16 zuby a plní pouze úlohu prvku zvyšujícího spolehlivost, protože pro funkčnost převodu není jeho přítomnost bezpodmínečně nutná.

Při studiu tohoto typu převodu jsem byl překvapen, jak málo relevantní literatury se mi o něm podařilo dohledat. Zmínky o některém z typů diferenciálního planetového pře-

vodu nebyly úplnou výjimkou, nicméně byly zpravidla pouze okrajové a bez detailnějších informací. To se týká jak literatury zahraniční, tak především té tuzemské.

Vztahy (4.7) a (4.8) pro výpočet převodových poměrů jsem sestavil z informací publikovaných na webu [2], kde je zajímavým způsobem vysvětleno, jak rozložit simultánní pohyb více prvků na několik jednoduchých a ty poté skládat dohromady (princip superpozice).

	hnané centrální kolo	unašeč	satelity	korunové kolo 1	korunové kolo 2
A	x	x	x	x	x
B	y	0	$-\frac{C_1}{S_1} \cdot y$	$-\frac{C_1}{K_1} \cdot y$	$-\frac{S_2}{K_2} \cdot \frac{C_1}{S_1} \cdot y$
A + B	$x + y$	x	$x - \frac{C_1}{S_1} \cdot y$	$x - \frac{C_1}{K_1} \cdot y$	$x - \frac{S_2}{K_2} \cdot \frac{C_1}{S_1} \cdot y$

Tabulka 4.1: Pohyb A znamená, že je pohybováno pouze s unašečem bez stacionárního prvku. Při pohybu B je stacionárním prvkem unašeč a pohybují se všechny ostatní části sestavy. x a y jsou rychlosti. (Převzato z: [2])

Přestože v naší konfiguraci unašeč zcela chybí, jeho funkcionalitou sestava disponuje implicitně. Výsledné vztahy vzniknou jako poměr rychlostí hnaného a výstupního prvku, přičemž rychlost stacionárního prvku je rovna 0. Nyní již pouze dosadíme.

$$\begin{aligned}
 i_{K_2C_1} &= 1 + \left(1 + \frac{S_2}{K_2} \cdot \frac{C_1}{S_1}\right) \cdot \left(\frac{C_1}{K_1} - \frac{S_2}{K_2} \cdot \frac{C_1}{S_1}\right)^{-1} & (4.7) \\
 i_{K_2C_1} &= 1 + \left(1 + \frac{10}{36} \cdot \frac{12}{14}\right) \cdot \left(\frac{12}{40} - \frac{10}{36} \cdot \frac{12}{14}\right)^{-1} \\
 i_{K_2C_1} &= 21
 \end{aligned}$$

Výsledný převodový poměr pro výstupní korunové kolo s K_2 zuby.

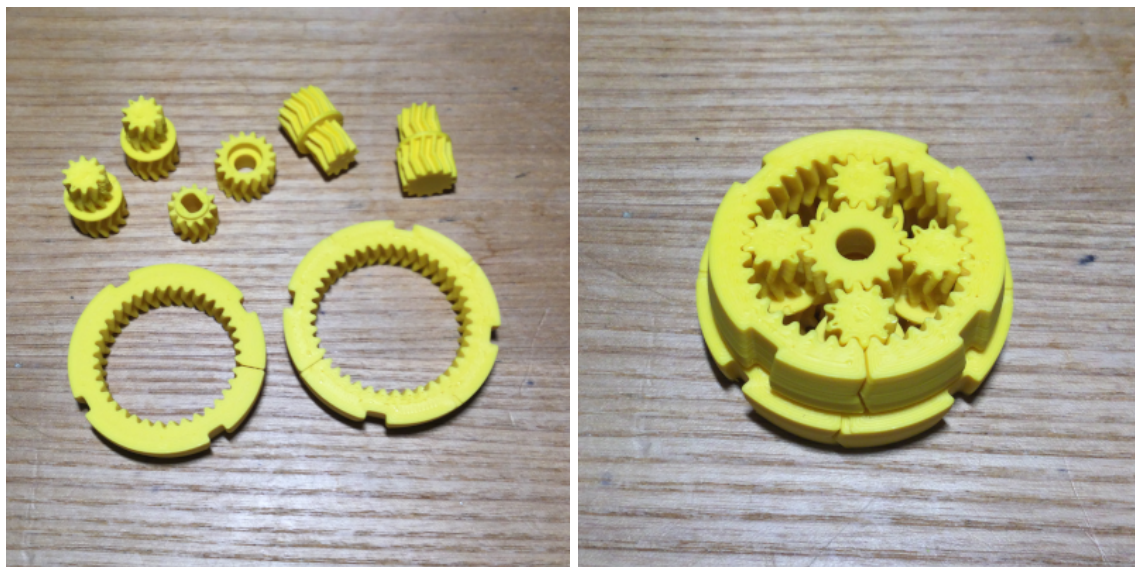
$$\begin{aligned}
 i_{K_1C_1} &= 1 + \left(1 + \frac{C_1}{K_1}\right) \cdot \left(\frac{S_2}{K_2} \cdot \frac{C_1}{S_1} - \frac{C_1}{K_1}\right)^{-1} & (4.8) \\
 i_{K_1C_1} &= 1 + \left(1 + \frac{12}{40}\right) \cdot \left(\frac{10}{36} \cdot \frac{12}{14} - \frac{12}{40}\right)^{-1} \\
 i_{K_1C_1} &= -20
 \end{aligned}$$

Výsledný převodový poměr pro výstupní korunové kolo s K_1 zuby (povšimněme si obráceného směru otáčení).

Tato koncepce převodovky (obrázek 4.5) umožňuje i přes kompaktní rozměry dosáhnout podstatně většího převodového poměru než v případě jednoduchého planetového převodu.

Vyšší převodové poměry jsou pro otáčení základnou a především jednotlivými klouby, kde vzniká potřeba překonávat poměrně velké síly, žádoucí. Výsledek proto považuji za velký úspěch dosažený navzdory striktním omezením pro počty zubů a subtilnosti celého dílu.

První verze tištěné z PETG trpěly nedostatečnou tuhostí ozubení kol a neakceptovatelnými vůlemi mezi nimi. Bylo potřeba vyladit tiskové parametry jako výplň, násobení extruze, kompenzace smrštění v osách X, Y a další. Vhodnějším se ukázal být materiál ASA, všechny části převodovek tak budou tištěny z něj.



Obrázek 4.5: Ukázka jednotlivých dílů diferenciální planetové převodovky, které jsou poté sestaveny ve funkční celek.

V této fázi bylo potřeba navrhnout systém pro zjišťování polohy jednotlivých částí a s tím spojený postup kalibrace. Je tím myšlen systém, který zajistí, aby řídicí jednotka věděla, v jaké poloze se jednotlivé části po spuštění nachází a mohla tak s touto informací dále pracovat. Nabízel se systém „endstopů“, podobně jako používají 3D tiskárny. Na předem určeném kraji každé z os je umístěn koncový spínač, který se pohybem jeho směrem sepne a předá tak řídicí jednotce informaci o poloze. Toto řešení však v případě takto navrženého robotického ramena naráží na problém. Je třeba si uvědomit, že poloha některých částí přímo ovlivňuje operační prostor částí jiných. Mohlo by tak docházet ke kolizím s podložkou nebo přímo mezi jednotlivými částmi samotnými. Potenciálně vhodným řešením by mohlo být zjišťování polohy pomocí gyroskopů. Konečné rozhodnutí a specifika provedení se vyvíjely postupně v průběhu dalších fází projektu a bude tak vhodné se k němu vrátit později.

Pro lepší vizualizaci jednotlivých dílů a orientaci v jejich názvech doporučuji při čtení následujících odstavců pracovat s obrázkem 4.1. Ze samotné konstrukce ramena začal nejprve vznikat díl **sedla**. Současně byl pojat jako Proof of Concept², zda-li je vůbec možné, aby takový návrh v reálném světě fungoval. Po vytištění a sestavení prvního prototypu testování ukázalo, že takové řešení je nejen možné, ale navíc překvapivě kvalitní po stránce tuhostí, pevností i výkonu.

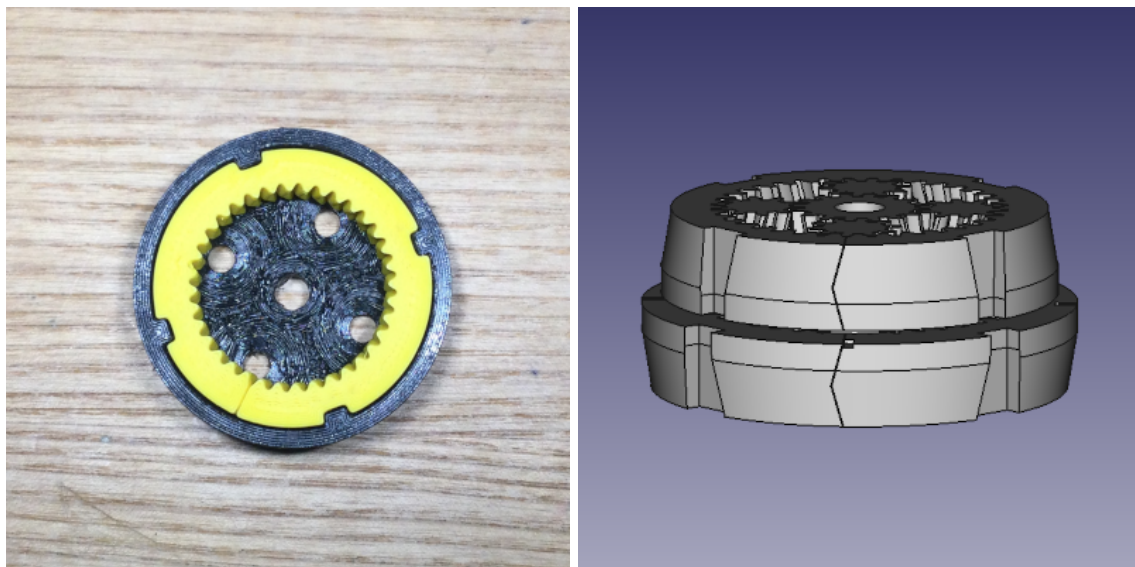
²Zjednodušeně se jedná o důkaz proveditelnosti nějaké myšlenky její realizací, případně realizací její části, a ukázat tak její praktický potenciál



Obrázek 4.6: Ukázka prvního funkčního prototypu sedla.

Jeho rozměry jsou výsledkem snahy o kompaktní provedení, nicméně se v nich odráží obava o řádné vytištění ozubení převodovek, které se ve výsledné podobě velmi přibližuje limitům použitého materiálu, ale také tiskárny v její aktuální konfiguraci. Po nalezení vhodného kompromisu mezi rozměry každé z ovlivněných částí přichází na řadu volba ložiska, které zajistí ladnost pohybu a podpoří tuhost celé konstrukce. Do návrhu se nejlépe hodilo tenkostěnné kuličkové ložisko *6807* o tloušťce 7 mm, které bude s ohledem na použitý materiál ramena zdvojené pro zajištění větší stability, tedy s celkovou šířkou 14 mm. Ložisko disponuje vnějším průměrem 47 mm, který je dostatečně malý na to, aby kolem něj mohlo vzniknout tuhé uložení s vnitřním průměrem o rozměru 35 mm. Ten je naopak dostatečně široký pro kompenzaci ztráty pevnosti unašeče převodovky tištěného se směrem vrstev shodným se směrem působící síly, který bude středem ložisek procházet. Návrh přesto počítá s ocelovou výztuhou v podobě šroubů, které celý unašeč pevně připojí ke spojovacímu dílu.

Poslání unašeče spočívá v zajištění přenosu pohybu z převodovky prostřednictvím spojení s její rotující polovinou do otočné části kloubu. Toto spojení je realizováno pouze pomocí třecích sil vsunutím prstence převodovky do vybrání unašeče. Tím je docíleno snadné rozebiratelnosti, což usnadňuje opravy a úpravy. Taková konfigurace je však náchylná na vznik nechtěných vůlí. Designování tohoto spojení bylo zdlouhavé hledání nejvhodnější kombinace protichůdných parametrů, přičemž se osvědčilo přidání kónusu (zkosení), který po přitlačení převodovku svírá. Drží ji tak na svém místě a zabraňuje jejímu prohýbání, což ve výsledku vůle účinně eliminuje (alespoň v porovnání s předchozími verzemi). Totožné řešení uložení převodovky nalezneme v jednotlivých kloubech, které jsou spojeny s její stacionární polovinou.



Obrázek 4.7: Ukázka řešení snadno rozebiratelného spojení unašeče s převodovkou, včetně znázornění kónusu pro lepší soudržnost.

V tuto chvíli návrh stále ještě počítal s umístěním krokových motorů na díly jednotlivých kloubů v těsné blízkosti samotné převodovky. Jak projekt postupoval, byl tento přístup definitivně zavržen. Design jak ve smyslu estetiky, tak i v rovině praktické dostal přednost před jednodušší výrobou. Původní řešení realizované na obrázku 4.6 znamenalo zcela minimální prostor pro zapuštění motoru do těla dílu, což budilo velmi nesymetrický dojem. Přesun motorů také významně zjednodušil umístění servisních otvorů na kloubech, které budou sloužit při řešení problémů s motory, rozebírání sestavy, kontrole správného fungování, vedení kabeláže a v případě horního kloubu také pro umístění polohového senzoru. Tento krok s sebou však přinesl zcela zásadní problém, kterým je nutnost úpravy hřídele u dvou motorů pohánějících klouby. Způsobů jak toho docílit existuje nepřehledné množství, jejich proveditelnost však závisí na technice, kterou máme k dispozici. Jako nejvhodnější se jevila varianta výroby nové hřídele na míru a její následná výměna, což otevřelo dveře návrhům na případná další vylepšení. Nová hřídel tak na rozdíl od původní disponuje vybroušenými plochami po obou stranách, jejichž cílem je maximalizovat přenášený točivý moment na příslušnou planetovou převodovku a současně minimalizovat možnost protočení a případné nechtěné vůle mezi motorem a poháněným centrálním kolem. Další odlišností je přítomnost drážky pro plochý šroubovák, která umožní snadné otáčení krokovým motorem v případě poruchy nebo jakékoliv jiné nestandardní situace. Nové hřídele byly vyrobeny svépomocí za použití 5 mm nemagnetické ocelové tyče o přesnosti H6³ a poté nainstalovány na místo původních (obrázek 4.8).

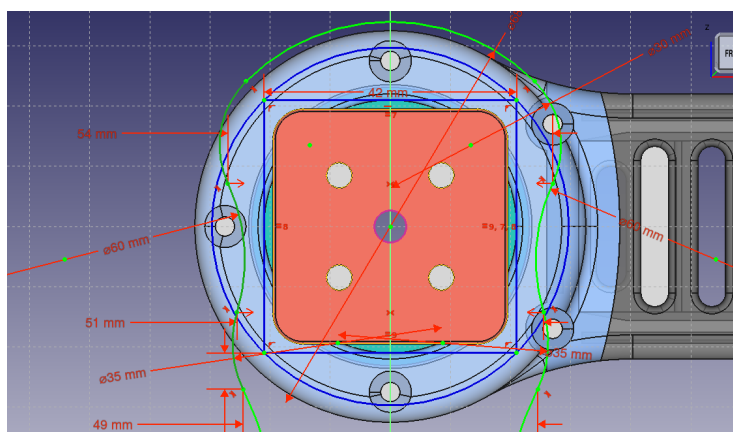
³Definovaná normou ISO 286-2.



Obrázek 4.8: Výroba hřídele a finální výsledek včetně výměny původní.

Práce na **spojovacím dílu** přinesly nevědní výzvu, což bylo stanovení postupu sešroubování celého mechanismu kloubu. Na první pohled snadný úkol, který ale někdy dokáže designera nepříjemně potrápit. Tím spíše jedná-li se o sešroubování většího množství součástí, kde zásadní roli hraje zachování pohyblivosti, mechanických vlastností a rozměrů, ale také estetiky. Je to typický příklad úkolu, kde jeden opomenutý detail zpravidla znamená návrat o několik kroků zpět.

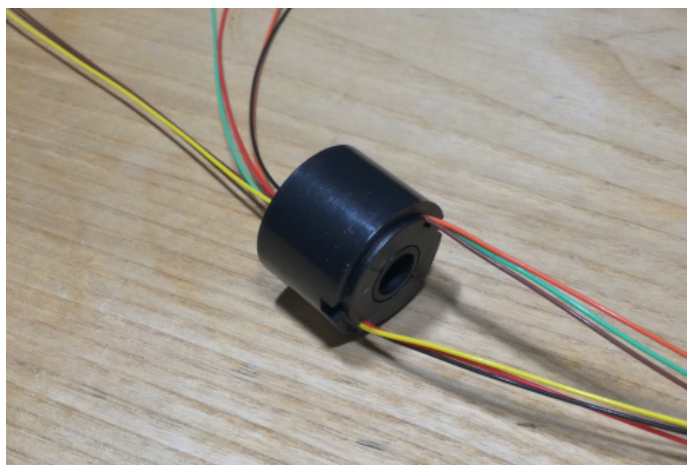
Finálním řešením se stal postup, podle kterého se nejprve na spojovací díl upevní motory. Dále se zkompletují unašeče s ložisky včetně příslušných vík, která nakonec jednotlivé klouby uzavřou. Pomocí čtyř šroubů procházejících celým tělem unašeče se propojí se spojovacím dílem, ve kterém drží díky maticím umístěným pod motory. V závěru přijde na řadu převodovka a celá takto připravená soustava se opatrně vsune do jednotlivých kloubů. Výřezy v bocích spojovacího dílu slouží pro řádné zašroubování zmíněných vík, čímž budou klouby ze všech stran zajištěny proti uvolnění.



Obrázek 4.9: Ukázka z FreeCADu – modelování výřezů na spojovacím dílu pro sešroubování u horního kloubu.

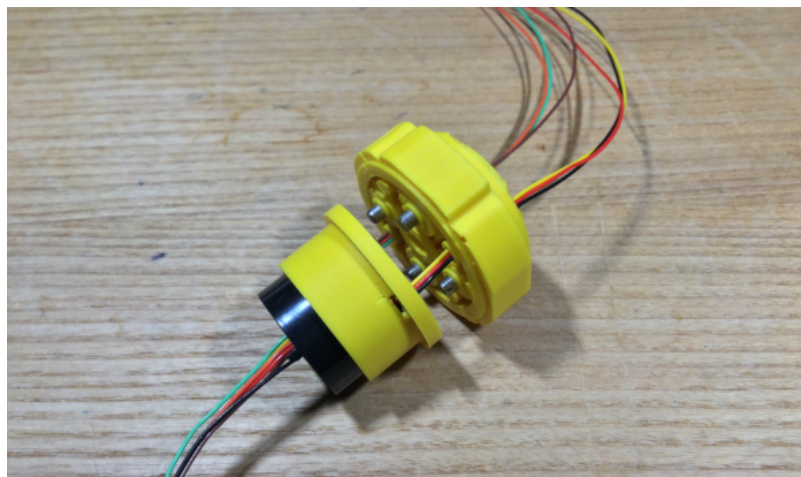
Ještě před dokončením spojovacího dílu se má pozornost přesunula k **hornímu kloubu**. Ten je na první pohled v porovnání se spodním výrazně subtilnější, nicméně řešení převodky a její spojení se zbytkem sestavy mají až na pár drobných detailů totožné. Obecně celý návrh horního kloubu vychází z návrhu toho spodního. Zásadní rozdíl však představuje menší krokový motor s přírubou NEMA 14 umístěný v jeho útrokách, což způsobilo nutnost rozdělit celý díl na tři části. Motor zajišťuje otáčení konzole, která sdílí s přírubou rotační spojení. Pro zajištění dostatečné tuhosti bylo nutné maximalizovat styčné plochy a tím pádem opět vyrábět speciální prodlouženou hřídel. Samotné spojení je realizováno dvěma tenkostěnnými ložisky 6704 a jedním 6705 a vyztuženo podpůrnými šrouby. Zahrnuje navíc kanálky pro vnitřní vedení kabeláže do konzole. Toto všechno opět komplikovalo návrh postupu finálního sešroubování, avšak výrazně méně, než tomu bylo v předchozím případě. Zjišťování polohy spoje je řešeno pomocí endstopu umístěného na vnější straně příruby.

Díl **konzole** je navrhován tak, aby poskytoval zázemí s dostatkem prostoru pro případnou elektroniku zajišťující funkcionalitu efektoru. Při jeho modelování bylo zcela zásadní vyřešit problém s vedením kabeláže. Nekontrolované otáčení by dříve či později způsobilo její utržení nebo jiné poškození. Elegantní řešení tohoto problému umožnila součástka v angličtině známá jako *slip ring*. Její úlohou je spolehlivě vést proud skrze rotační spoje bez obav o poškození vodičů. V omezené míře je k nalezení i v nabídce tuzemských obchodníků pod názvem „otočná kontaktní průchodka“. Jak dlouho bude bezchybně sloužit samozřejmě nejvíce záleží na její vytíženosti, je nicméně potřeba uvést, že bývá označována za relativně častý zdroj problémů. Pokud se toto řešení do budoucna neosvědčí, vedení kabeláže se pravděpodobně přesune zpět na plášť ramena a otáčení konzole bude omezeno pouze na nezbytně nutné.



Obrázek 4.10: Slip ring se šesti vodiči pro axiální kloub.

Popis zabudování slip ringu do konstrukce by vydal na samostatnou kapitolu. Podstatné však je, že celý proces skončil úspěchem, což umožnilo vodičům bezpečně procházet vnitřní stranou konstrukce, dokonce přímo skrz jednu z planetových převodovek (obrázek 4.11). Výsledkem je zcela nezávisle se otáčející osa, která dělá celé zařízení univerzálnějším.



Obrázek 4.11: Vedení kabeláže, detail na vedení skrz převodovku.

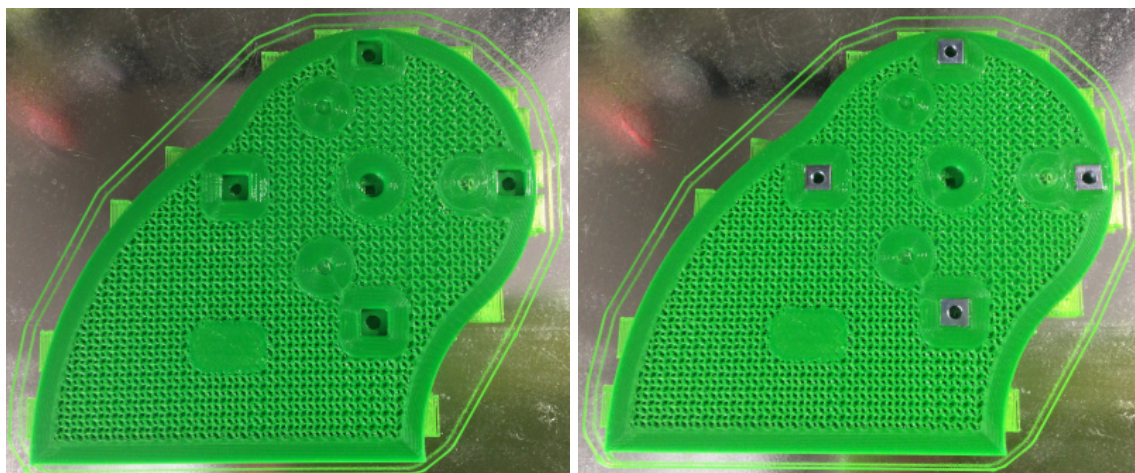
Konzole zajišťuje uchycení efektoru. **Efektor** nyní představuje jednoduchý držák fixu, kterým může robot kreslit. Návrh předpokládá, že bude nahrazován díly s libovolnou funkcionalitou v závislosti na požadované činnosti ramena. Jelikož nemusí efektor disponovat velkými točivými momenty ani neomezenými úhly náklonu a naopak je žádoucí kompaktnost a nízká hmotnost, byl pro zajištění jeho pohybu zvolen malý modelářský servomotor. Ten se díky jeho rozměrům pohodlně schová do těla hlavy a svou hřídelí vytvoří jednu z os otáčení. Druhá je realizována pomocí kolíčku zhotoveného z 3 mm nerezové tyče a miniaturního kuličkového ložiska *MR63*. Tato konfigurace umožňuje fixu i s velkou rezervou zcela dostatečné naklápění – až 90° v obou směrech.

Nyní přichází na řadu díl s největšími nároky na tuhost a celkovou robustnost – tedy **základna**. Má kruhový tvar a je navržena tak, aby ji bylo možné přišroubovat na podkladovou desku, se kterou budou tvořit pevný a stabilní základ celé konstrukce. Do podkladové desky bude částečně zapuštěn kratší NEMA 17 krokový motor doplněný jednou z diferenciálních planetových převodovek pro zajištění otáčení základny kolem vlastní osy. Hladké fungování otočného mechanismu podpoří jedno kuličkové ložisko *6010*. To je konstruováno především pro radiální zatížení, vzhledem k jeho velikosti však bude pro naše účely zcela dostačující. Jeho středem prochází unašeč planetové převodovky, kterým může v případě nedostatku tuhosti procházet ještě případná prodloužená hřídel motoru základny. Podkladová deska zajistí rovnou pracovní plochu s dostatkem prostoru a sníženým těžištěm díky částečnému zapuštění krokového motoru. O pevné spojení sedla se základnou se postará hned dvanáct M4 šroubů různých délek v závislosti na jeho tvaru v konkrétním místě.

Zjišťování polohy základny je řešeno pomocí endstopu. Vzhledem k umístění ramena na kraji podkladové desky a nikoliv ve středu, bude nutné jej natáčet pouze v omezeném rozsahu, čímž toto řešení nepředstavuje problém pro kabeláž.

Všechna potenciálně problematická místa konstrukce disponují výztuhou v podobě šroubů a ložisek. Šrouby jsou vždy včetně matic schovány v těle dílu. Dostáváme se tím k řešení otázky rozebíratelných spojů v tomto projektu hojně využívanému. Řeč je o zapuštění kovových matic do výtisku přímo v průběhu procesu jeho tištění (obrázek 4.12). V případě klasických šestihřanných matic hrozí zejména v pružnějších materiálech jejich protočení. K tomuto účelu se proto mnohem lépe hodí matice čtyřhranné, u nichž je toto riziko minimální, a které jsou využity i v tomto projektu. V méně kritických místech jsou nahrazeny

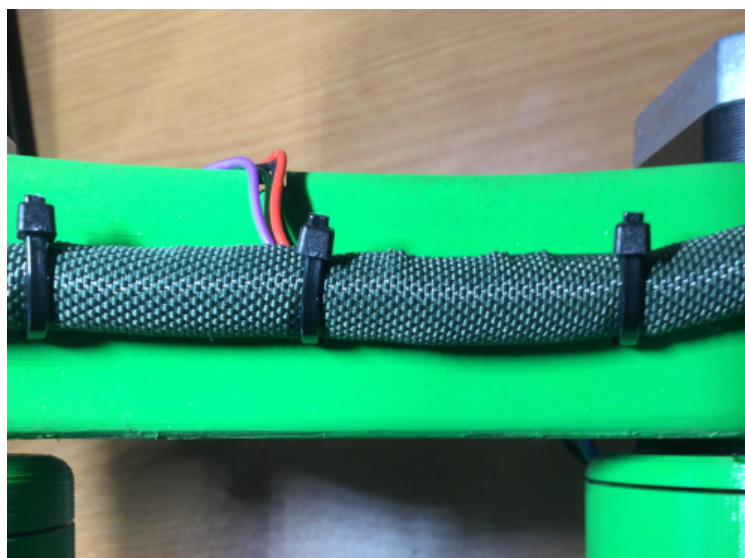
mosaznými závitovými vložkami, které se zatepla do výtisku nalisují. Šrouby je možné zapustit přímo do tištěného materiálu, kde si samy vyřežou závit. Tato varianta je jednoznačně nejjednodušší a překvapivě funkční. Její nevýhoda se však projeví po několika rozebráních a následných sešroubováních, kdy dojde ke zničení závitu a tím k zásadnímu poklesu soudržnosti.



Obrázek 4.12: Ukázka zapouštění čtyřhranných matic do dílu sedla přímo v průběhu tisku.

Pro bezpečné uložení elektroniky v blízkosti základny ramena, vznikly jednoduché doky, které budou upevněny na kraj podkladové desky.

V tomto odstavci navážu na popis vedení kabeláže uvnitř horních částí ramena. Kabeláž skrz servisní prostor horního kloubu vystupuje z konstrukce a dále je vedena vně po spojovacím dílu (obrázek 4.13) přes sedlo a základnu až k okraji podkladové desky, kde se nachází řídicí elektronika. Je upevněna jednorázovými stahovacími pásky provlečenými otvory pro tyto účely vhodně umístěnými na jednotlivých dílech.

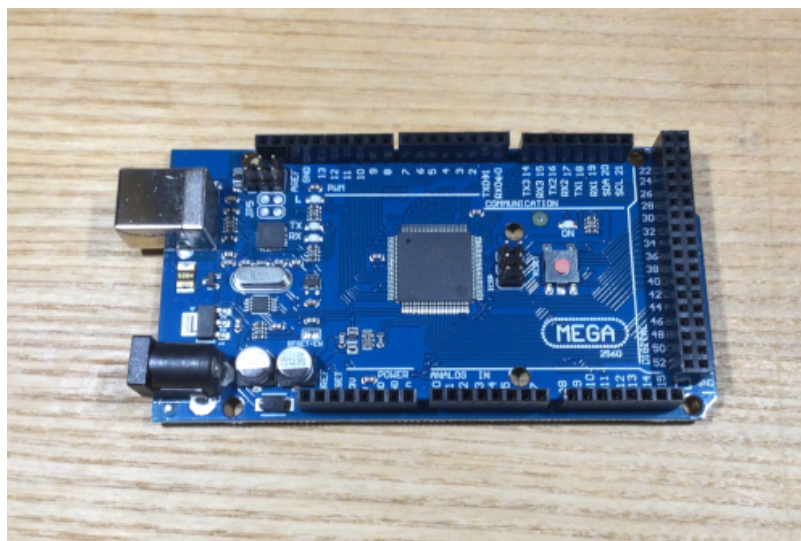


Obrázek 4.13: Ukázka řešení upevnění vně vedené kabeláže.

4.3 Prvky řídicí elektroniky

Výběr elektroniky byl dalším významným milníkem. Klíčová byla pochopitelně samotná funkcionality, nicméně pro potřeby tohoto projektu byly zásadní také rozměry. Hlavním prvkem se stalo Arduino Mega disponující dostatečným výkonem a množstvím I/O pinů pro připojení všech nezbytných součástí.

Arduino Mega (oficiálně Arduino Mega 2560 Rev3) je deska založená na čipu ATmega2560 s pracovní frekvencí 16MHz. Disponuje 8KB SRAM a 4KB EEPROM paměti. Nabízí 54 I/O pinů, z nichž je možné 15 využít jako PWM⁴ výstupy, a 16 analogových vstupů. Dále jsou k dispozici 4 UART⁵ rozhraní a také rozhraní I²C⁶ [1].



Obrázek 4.14: Ukázka desky Arduino Mega.

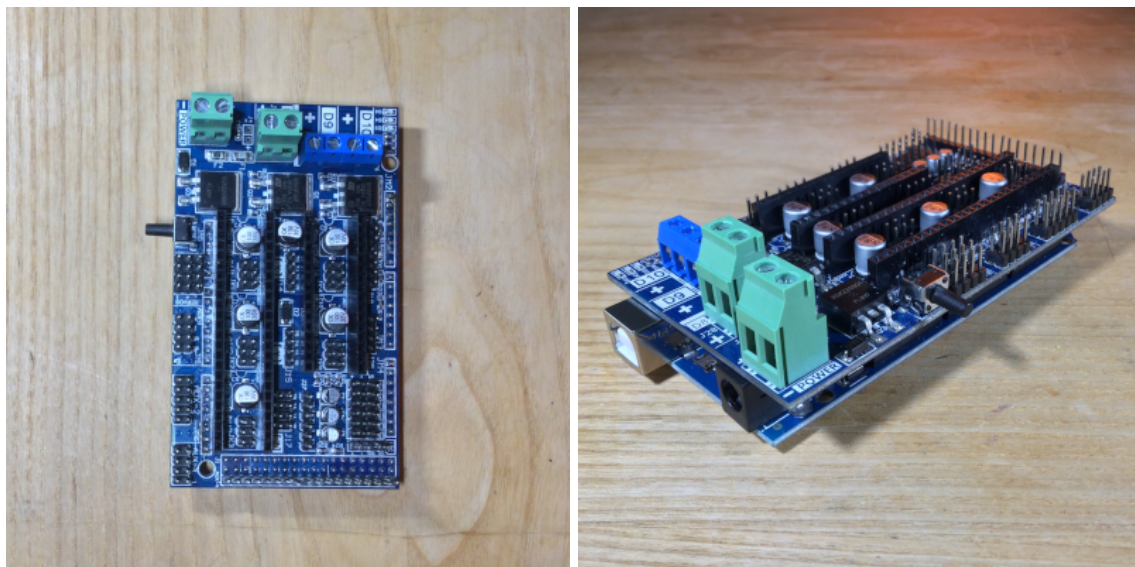
Pro zjednodušení zapojení a redukcí množství kabeláže bylo Arduino Mega doplněno deskou **RAMPS**⁷ ve verzi 1.6, která svou bohatou konektivitou poskytuje dostatečnou kapacitu pro zapojení všech použitých součástí. Tu je možné právě v kombinaci s Arduinem běžně nalézt v roli řídicích jednotek mnoha 3D tiskáren, pro které je primárně navržena. Mluvíme o již několikáté iteraci této desky, která přináší oproti svým předchůdcům četná vylepšení.

⁴Pulse Width Modulation neboli pulzně šířková modulace je metoda interpretace analogového signálu pomocí signálu dvouhodnotového s využitím velikosti (šířky) jednotlivých pulzů.

⁵Universal Asynchronous Receiver-Transmitter je dvouvodičová asynchronní seriová sběrnice pro přenos dat.

⁶Inter-Integrated Circuit je pojmenování pro dvouvodičovou sériovou komunikační sběrnici a protokol, kterým se komunikace na ní řídí.

⁷RAMPS je zkratka pro RepRap Arduino Mega Pololu Shield (https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.6).

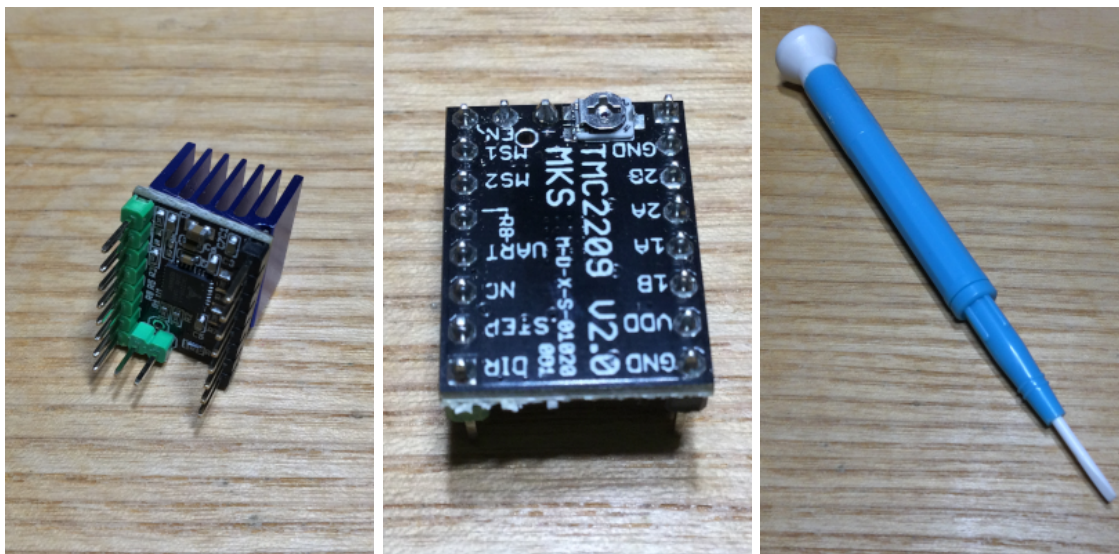


Obrázek 4.15: Rozšiřující deska RAMPS 1.6 s ukázkou připojení na Arduino Mega.

V naší konfiguraci budou do RAMPS desky zapojeny čtyři ovladače, každý pro řízení jednoho krokového motoru. První obsluhuje motor otáčející základnou, další dva mají na starost motory jednotlivých kloubů a poslední pro zajištění otáčení konzole. Jedná se konkrétně o ovladače s čipem **TMC2209**, které budou zapojeny v režimu STEP/DIR. Na poli ovladačů krokových motorů patří k tomu nejlepšímu, co společnost TMC v této kategorii dodává na trh. Jako takové se mohou chlubit nemalým množstvím „vychytávek“. Ku příkladu funkce jako *interpolace kroků* a s ní související *mikrokrokování*, která umožňuje jeden krok motoru rozložit až do 256 mikrokroků, přičemž výrazně sníží jeho hlučnost.

Pro správné fungování krokových motorů je klíčové adekvátní nastavení množství proudu, které jim ovladač dodává. Toto je v našem zapojení možné provádět pouze hardwarově přímo na desce ovladače pomocí malého potenciometru. Potenciometrem, jehož nastavování by mělo být z bezpečnostních důvodů prováděno nevodivým šroubovákem⁸, nastavujeme referenční napětí, které pak určuje výsledný proud. Příliš vysoké hodnoty mohou způsobovat neúměrné zahřívání krokového motoru a mohou vést až k jeho úplnému zničení. Naopak hodnoty příliš nízké snižují točivý moment, čímž mohou narušovat stabilitu celé sestavy.

⁸Ten zpravidla bývá keramický případně plastový.



Obrázek 4.16: Ovladač MKS TMC2209 s detailem na potenciometr sloužící k nastavování proudu na výstupu. Vpravo ukázka nevodivého šroubováku.

Krokové motory

Tento projekt využívá hybridní krokové motory, jejichž stator je tvořen osmi cívkami zapojenými do dvoufázového vinutí a rotor obsahuje axiálně orientovaný permanentní magnet. Jedno fázové vinutí tvoří cívky s lichým pořadovým číslem, druhé se sudým. Umístěním zubů s vhodně zvolenou konstantní roztečí na rotor i stator je v kombinaci se střídavě aktivovanými fázemi možné dosáhnout postupného otáčení rotoru po stejně velkých krocích [11].

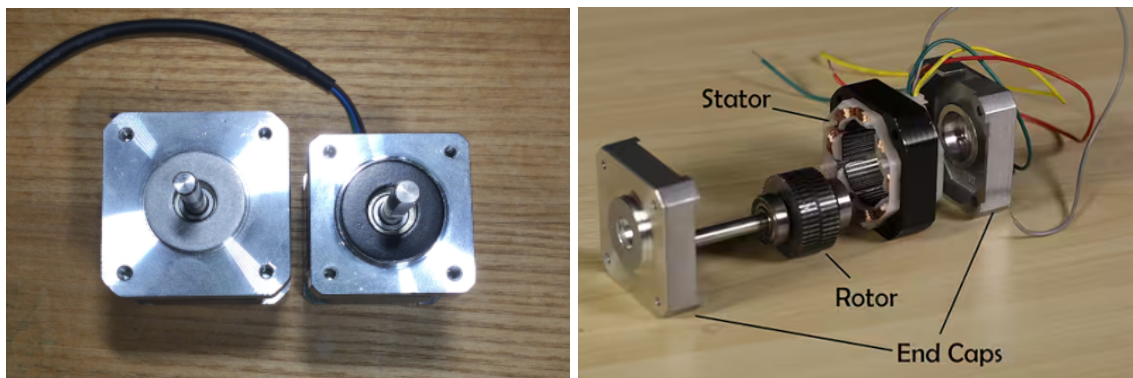
Publikace [10] uvádí rovnici vztahu mezi velikostí kroku a počtem zubů rotoru hybridních krokových motorů. Ze vztahu vyjádříme počet zubů a dosadíme hodnoty (4.9). Použité motory pracují s krokem o velikosti $1,8^\circ$, což znamená, že musí vykonat 200 kroků na jedno otočení kolem své osy. m je počet fází motoru, v našem případě roven 2.

$$N_r = \frac{S}{2 \cdot m} = \frac{200}{2 \cdot 2} = 50 \quad (4.9)$$

Z výsledku vyplývá, že statory našich motorů disponují 50 zuby, což je v této kategorii nejběžnější. Pro lepší představu o krokových motorech může sloužit obrázek 4.17.

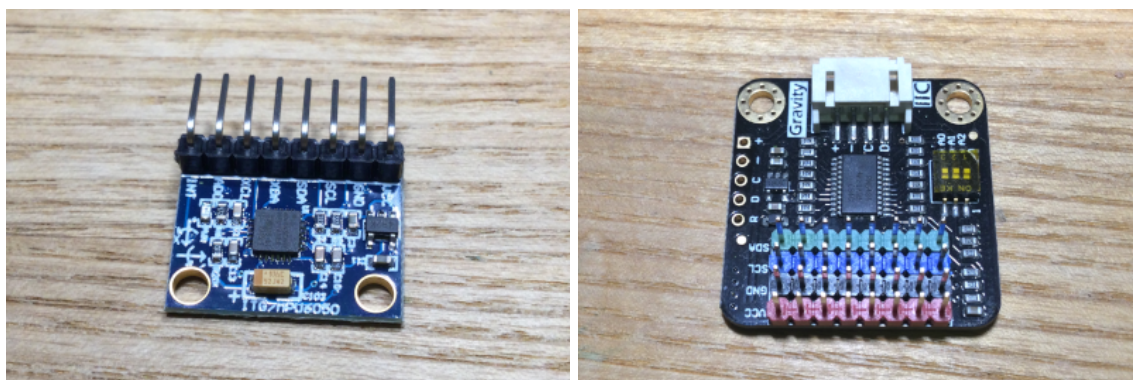
U tohoto typu motorů je nutné počítat s možnou ztrátou kroků. Tato situace nastává, když je na hřídeli příliš vysoká momentová zátěž, která způsobí, že motor vynechá provedení kroků⁹, čímž je ztracen údaj o aktuální poloze. Tomu je možné předcházet využitím zařízení poskytujících zpětnou vazbu v současné době nejčastěji realizovaných pomocí optických inkrementálních enkodérů. Jedná se však o poměrně drahá řešení a cenově dostupnější aplikace spíše spoléhají na předcházení těmto situacím – například použitím výkonnějšího motoru nebo vyššího převodového poměru apod.

⁹V případě, že zátěž působí ve směru otáčení, může naopak dojít k provedení více kroků.



Obrázek 4.17: Krokový motor NEMA 17 v porovnání s NEMA 14. Náhled do útrob hybridního krokového motoru¹⁰.

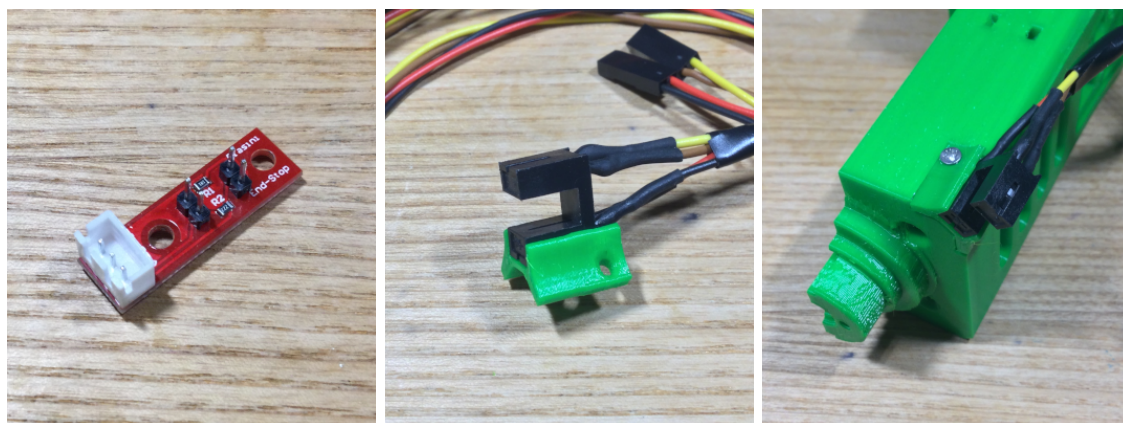
Sestavu dále rozšíří tři moduly **GY-521** disponující 3-osým akcelerometrem i gyroskopem. Jeden pro definování referenční roviny, druhý pro zjišťování polohy spojovacího dílu a poslední pro přírubu. Základem modulu je čip MPU6050 výrobce InvenSense Inc. Spojení bude realizováno na sběrnici I²C, přičemž moduly zapojíme přes I²C multiplexor **DFR0576**, který umožní adresovat všechny tři zároveň. GY-521 sám o sobě umožňuje volbu pouze mezi dvěma unikátními I²C adresami. Oba moduly jsou k vidění na obrázku 4.18.



Obrázek 4.18: Modul GY-521 sloužící pro zjišťování polohy několika částí sestavy s I²C multiplexorem DFR0576 zajišťujícím jeho bezproblémové adresování.

Zjišťování polohy axiálního kloubu a základny zajistí optické koncové spínače. Ty jsou zpravidla přesnější než jejich mechanické alternativy. Samotný senzor je z výroby připájen na plošném spoji, který je svými rozměry pro naše účely nevhodný. Senzor tedy odpájíme a umístíme do dílu samostatně (obrázek 4.19).

¹⁰Převzato z: <https://www.digikey.nl/en/blog/the-basics-of-stepper-motors>

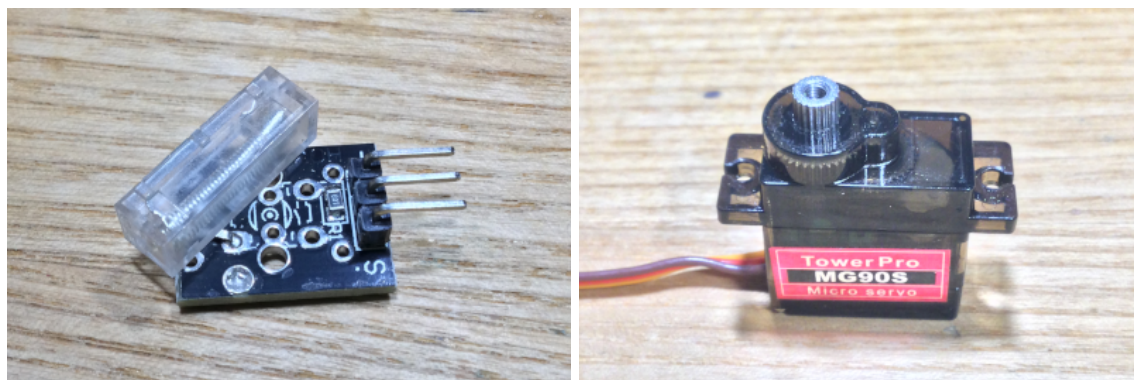


Obrázek 4.19: Optický senzor odpájený z původního plošného spoje snímače a umístěný do konstrukce v blízkosti axiálního kloubu.

Skrze slip ring bude k Arduinu Mega připojen servomotor zajišťující náklon efektoru a nárazový senzor, který má sloužit jako pojistka pro nepředvídatelné situace. Roli nárazového senzoru zastane modul **KY-031** od společnosti Keyes (obrázek 4.20). Ten bude umístěn uvnitř konzole, kde je připraveno zázemí pro případnou sekundární řídicí desku (menších rozměrů) k zajištění funkcionality libovolného efektoru.

Zmíněným servomotorem je **MG90S** (obrázek 4.20). Jeho řízení je výrazně jednodušší než je tomu u krokových motorů. Není potřeba zajišťovat výchozí polohu a stačí pouze nastavit požadovaný úhel pomocí PWM výstupního pinu desky.

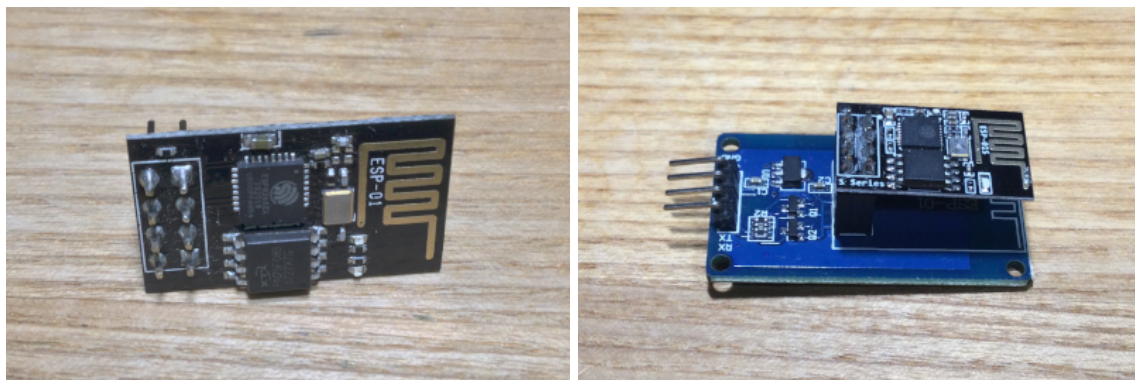
Celá sestava využívá pouze čtyři vodiče slip ringu. Při zachování současného zapojení je možné zbylé dva v budoucnu využít třeba jako komunikační kanál nebo jako přídatné napájení pro zvýšení maximálního odebíratelného proudu.



Obrázek 4.20: Nárazový senzor KY-031 (vlevo) a servomotor MG90S s kovovými převody (vpravo).

Ke zprostředkování komunikace s uživatelem slouží modul **ESP-01S**, který s Arduinem Mega propojí sériové rozhraní UART. Navzdory svým miniaturním rozměrům je sám o sobě plnohodnotným mikrokontrolerem. Obsahuje čip ESP8266, vyvinutý společností Espressif Systems, primárně určený pro komunikace v 2,4GHz pásmu bezdrátových sítí [7]. Nepříjemnou komplikací je jeho napájecí napětí 3,3V, se kterým pracuje i jeho rozhraní

pro sériovou komunikaci. Připojení k 5V, které ostatní prvky soustavy využívají, by jej tak mohlo poškodit. Z toho důvodu bude připojen přes speciální adaptér (obrázek 4.21), který tuto nekompatibilitu odstraní. Deska nedisponuje vlastním rozhraním programátoru, což přináší nutnost použít programátor externí a celý proces nahrávání kódu tím mírně komplikuje.



Obrázek 4.21: Detail ESP-01S včetně adaptéru.

Celá sestava bude napájena 12V DC zdrojem o výkonu až 60W, což je pro její potřeby více než dostatečné. ESP-01S a servomotor společně s nárazovým senzorem budou napájeny 5V skrze měnič napětí. Nebude chybět ani bezpečnostní tlačítko pro okamžité zastavení pohybu odpojením od napájecího zdroje. Podrobný popis zapojení jednotlivých součástí je uveden v příloze B.

Kapitola 5

Implementace obslužného softwaru

V této kapitole se pokusím přiblížit průběh samotné implementace. Smyslem následujících odstavců bude snaha vyzdvihnout zásadní skutečnosti a detailněji se věnovat náročnějším částem.

Obslužný software zahrnuje:

- **firmware pro Arduino Mega**, které řídí pohybovou soustavu a zajišťuje výpočty inverzní kinematiky, obsluhuje polohové moduly, endstopy a nárazový senzor,
- **firmware pro ESP-01S**, které poskytuje zázemí pro komunikaci soustavy s řídicím rozhraním,
- **řídicí rozhraní** v podobě webové aplikace.

5.1 Řídicí firmware

Od začátku je potřeba mít na paměti specifika programování vestavěných systému, že se od programování pro plnohodnotné počítače výrazně liší především v přístupu ke zdrojům zařízení. S praxí jakou je důraz na čitelnost kódu před jeho efektivitou, která je v jiných oblastech zcela běžná, se tady setkáváme o poznání méně.

Implementace probíhala ve vývojovém prostředí Arduino IDE za použití programovacích jazyků C/C++ ve spojení s pro Arduino typickou nadstavbou – jazykem Wiring. Pro kompilaci verze firmwaru s ladicími výpisy je potřeba nastavit makro `DEBUG_LEVEL` (součást `common.h`) na hodnotu 2. Je však nutné počítat se skutečností, že tyto výpisy mohou výrazně ovlivňovat rychlost motorů.

Čtení údajů o poloze

Výstup z akcelerometru i gyroskopu je analogový a je tedy nutné jej převést na digitální. K tomu slouží 16bitové analogově-digitální převodníky, jeden pro každou z šesti os. Součástí čipu MPU6050 je jednotka zvaná Digital Motion Processor (DMP) speciálně vyvinutá k efektivnímu zpracování polohových dat z obou senzorů. Připravená data jsou ukládána do FIFO¹ vyrovnávací paměti velikosti 1024B. To umožňuje systémovému procesu načítat již zpracovaná data v dávkách a díky tomu všemu výrazně šetřit své zdroje. Komunikace probíhá prostřednictvím sběrnice I²C o frekvenci až 400kHz [5].

¹First in first out, tzv. fronta.

DMP disponuje funkcionalitou Digital Low Pass filtru (DLP filtr, DLPF), který zlepšuje stabilitu výstupních dat. Současně je možné nastavovat rozsah a citlivost obou senzorů a mnoho dalšího [6].

5.1.1 Arduino Mega

V okamžiku, kdy je program spuštěn, jsou ve funkci `setup` nastaveny všechny náležitosti a provedena kontrola. Poté systém čeká na příkazy. V ideálním případě by měl dorazit požadavek na kalibraci. Při ní je zahájena rotace základny směrem k jejímu koncovému spínači a následné natočení do základní polohy. Mezitím probíhá interní inicializace jednotek DMP modulů GY-521. Ta trvá řádově jednotky vteřin a provází ji velké výkyvy výstupních hodnot. Čtení dat pro potřeby kalibrace ramena má význam zahájit až několik desítek vteřin po spuštění. Jakmile jsou úspěšně získána polohová data, natočí se a jednotlivé klouby do základní polohy. Následně se provádí další měření a dodatečné jemné korekce. Kalibrace polohy axiálního kloubu je provedena jako poslední, aby se předešlo kolizím.

K implementaci komunikace mezi deskou a moduly GY-521 byla použita knihovna *MPU6050*², jejíž základ tvoří knihovna *I2Cdev*³. Obě s přispěním komunity vyvinul *Jeff Rowberg*. Knihovna je výjimečná svou komplexností, přičemž navíc zahrnuje definice registrů, které oficiální dokumentace nezmiňuje, čímž odemyká vývojářům výrazně větší možnosti. Tyto registry a jejich účel byly odhaleny na diskuzních fórech v debatách se samotným výrobcem a technikami reverzního „inženýringu“ prováděným komunitou kolem knihovny.

Stabilita polohových dat z čipu MPU6050 navzdory aktivovanému DLP filtru není úplně ideální. Obecně platí, že data z akcelerometru jsou absolutní, ale plná šumu, zatímco data z gyroskopu jsou poměrně stabilní, ale pouze relativní, proto je potřeba data ve vhodném poměru jednotlivých složek spojovat. Program tuto nestabilitu dodatečně řeší aritmetickým průměrem z načtených hodnot. S daty pracuje ve formátu YPR⁴.

Čip modulu GY-521 – MPU6050 – má pevně stanovenou I²C adresu na hodnotu 0x68 s možností ji skrze dedikovaný pin zvýšit o 1. Na jedné sběrnici je tedy možné adresovat maximálně dvě tato zařízení. Takové problémy elegantně řeší I²C Multiplexor DFR0576, který umožňuje připojit až osm samostatných digitálních sběrnic, což by teoreticky znamenalo až šestnáct modulů GY-521. Jeho používání je velmi jednoduché, stačí do něj odeslat informaci, který z kanálů má být otevřen a on do něj následně přeměruje veškerou komunikaci. Multiplexor sám disponuje adresou nastavitelnou v rozsahu 0x70 – 0x77.

Řízení chodu motorů

Řízení krokových motorů probíhá tak, že je v jeden okamžik krok započat, následuje prodleva a dokončení kroku. Pro lepší představu přikládám ukázkou kódu 5.1. Reálně však nevykonáváme celé kroky, ale pouze jejich zlomky (mikrokroky), přičemž se na procesu nic nemění, jenom je potřeba jej zopakovat násobně vícekrát. Konkrétní počet mikrokroků v poměru k celému kroku určuje nastavení ovladače krokového motoru (v našem případě 1/8). Více kroků znamená plynulejší pohyb (TMC209 však již kroky sám o sobě interpoluje) a přesnější interpretaci úhlů, na druhou stranu ale nižší maximální rychlost otáčení v závislosti na výkonu mikrokontroleru. Je proto důležité počet mikrokroků zvolit vhodně. Musíme však do úvahy zahrnout také skutečnost, že podobným způsobem kroky motoru již násobí příslušné převodovky. Výslednou rychlost pochopitelně ovlivňují i délky prodlev.

²GitHub repozitář: <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/MPU6050>

³GitHub repozitář: <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/I2Cdev>

⁴Yaw, Pitch, Roll – úhly natočení podle os X, Y, Z. Systém používaný například v letectví.

První prodleva slouží pro vymezení délky pulzu, přičemž je vhodné volit spíše nižší hodnoty (v řádech mikrosekund). Druhá pak k přímé regulaci rychlosti. S minimálními hodnotami obou je možné experimentovat, jejich přítomnost je však pro správné fungování nezbytná.

```
for (int i = 0; i < 100; ++i)
{
    digitalWrite(MOTOR_STEP_PIN, HIGH);
    delay(pulse_width);
    digitalWrite(MOTOR_STEP_PIN, LOW);
    delay(10);
}
```

Ukázka 5.1: Otočení krokového motoru o 100 kroků.

Naopak řízení v sestavě jediného servomotoru probíhá o poznání jednodušeji. Částečně díky knihovně `Servo.h`, kterou k tomuto účelu projekt využívá. Model MG90S umožňuje natáčení v rozsahu 0–180°. Pro interpretaci tohoto rozsahu poskytují Arduino PWM piny hodnoty 0–255. Tento rozsah rozdělíme rovnoměrně mezi kladné a záporné hodnoty, čímž dostáváme výsledný rozsah natáčení efektoru přibližně -90–90°.

Rychlosti pohybu jednotlivých motorů jsou s každým novým požadavkem nastavovány tak, aby se pohybovaly synchronizovaně, začínají i končí tedy pohyb vždy společně.

Arduino Mega z podstaty své konstrukce neumožňuje vykonávat více programů paralelně tak jako výkonnější desky typu Raspberry Pi. Aby bylo možné pohybovat všemi klouby a zároveň zpracovávat sériovou komunikaci, je nutné tyto činnosti rozdělit na co možná nejmenší celky a následně vykonávat v hlavní smyčce (`loop`) rychle za sebou. Na obrázku 5.1 je toto pro lepší představu ve zjednodušené formě znázorněno. V takovém kódu je zásadní velmi omezit (ideálně zcela eliminovat) používání tradičních cyklů a prvky blokujícího čekání (ukázka 5.2). To nahradí konstrukce zahrnující funkci `micros`, která poskytuje informaci o počtu mikrosekund uplynulých od spuštění programu. Příklad takové konstrukce (avšak s `millis` namísto `micros`) nabízí ukázka 5.3.

```
bool state = digitalRead(LED_PIN);
digitalWrite(LED_PIN, !state);
delay(1000);
```

Ukázka 5.2: Běžně používaná konstrukce pro rozblikání LED diody.

```
if (millis() % 2000 < 1000)
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
else
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
```

Ukázka 5.3: Podobný výsledek, avšak umožňuje mikrokontroleru v průběhu „čekání“ provádět další úkony.

Návratové hodnoty funkcí `micros` i `millis` jsou typu `unsigned int`. Mohlo by se zdát, že program přestane po jejich přetečení fungovat. Což se v případě špatně zvolené podmínky stát opravdu může. K přetečení (tzv. „rollover“) dojde každých přibližně 50 dnů (`millis`), respektive 1,2 hodiny (`micros`). Při použití konstrukce uvedené v ukázce 5.4 však tento problém nehrozí a za všech okolností dostáváme korektní výsledek rozdílu hodnot.


```
if ((unsigned long)(millis() - now) > 1000)
{
    now = millis();
    Serial.println("Second");
}
```

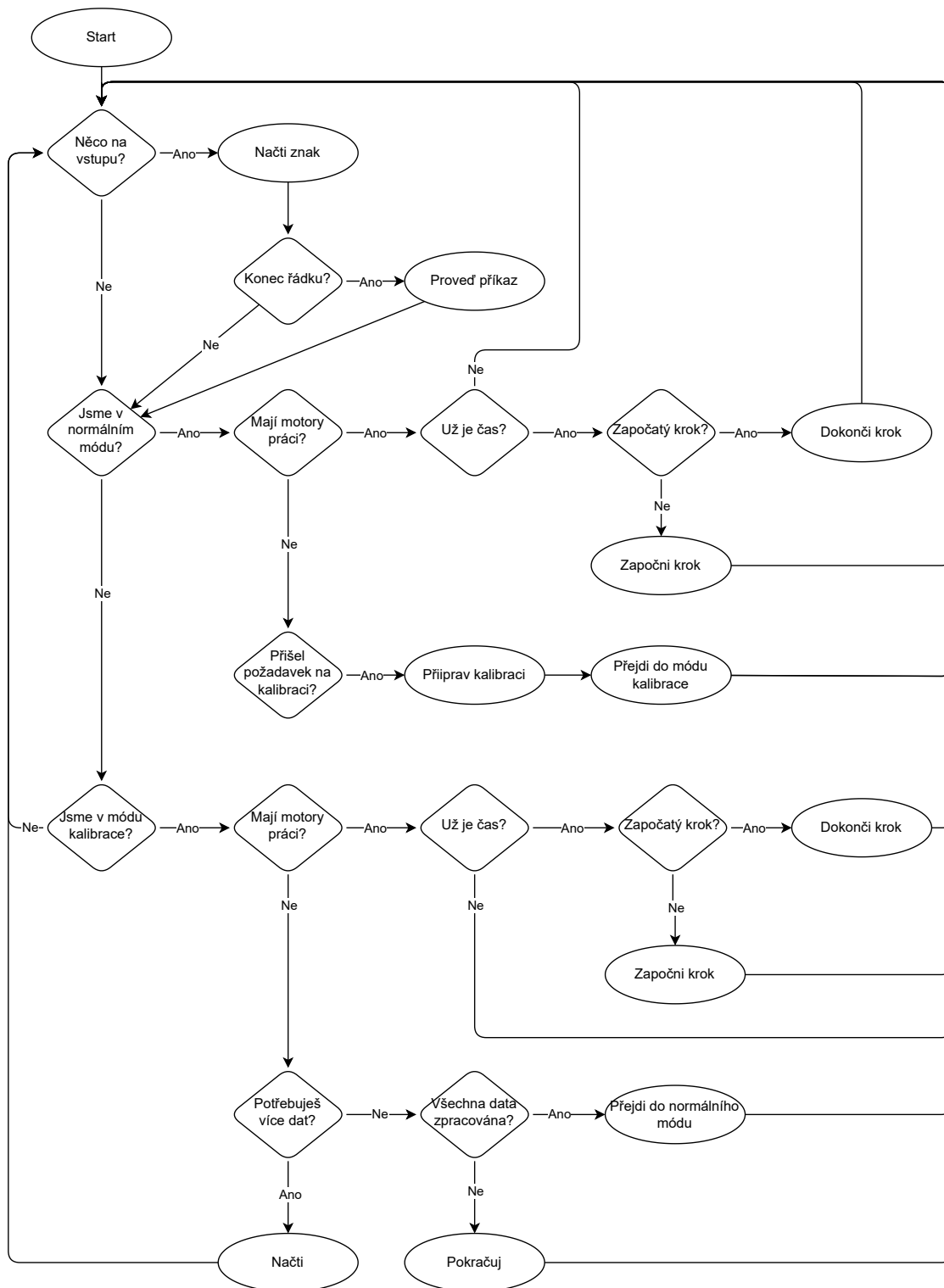
Ukázka 5.4: Předcházení problému přetečení hodnoty funkce `millis`.

Dalším užitečným Arduinem podporovaným nástrojem, který může kódu napomáhat k plynulejšímu chodu, je systém přerušení. Ten využívají například polohové moduly k oznámení, že jsou připravena polohová data.

Pro zamezení poškození v případě nárazu sestava disponuje senzorem, který by měl takové nárazy zaznamenávat. Senzor je jednoduché zařízení pracující na principu vychýlení tenké pružinky v něm umístěné. Je nutné však správně vyladit jeho senzitivitu, aby nedocházelo k aktivaci rychlejšími pohyby ramena. Když je systémem vyhodnoceno, že došlo k nárazu, vykonávání programu se ihned přeruší až do jeho restartování.

Inverzní kinematika

Součástí firmwaru pro Arduino je implementace jednoduché inverzní kinematiky založené na základních trigonometrických operacích. Výpočet je rozdělen na dvě samostatné části, které zjednodušují 3D prostor na dva 2D prostory. Nejprve se vypočítají hodnoty v rovině XY a na jejich základě jsou přepočítané souřadnice předány k výpočtu v rovině YZ.



Obrázek 5.1: Vývojový diagram zjednodušené hlavní smyčky Arduina Mega.

Komunikace mezi deskami

ESP-01S přijímá příkazy z řídicího rozhraní, následně je zpracuje a přes sériové spojení zasílá dále do Arduina Mega. Formát těchto příkazů je inspirován již zmíněným G-codem. Jejich seznam je vypsán v ukázce 5.5.

Každý příkaz má právě čtyři znaky a nula až pět argumentů. Musí začínat velkým písmenem „C“, protože dokud se na vstupu tento symbol neobjeví, jsou všechny příchozí znaky ignorovány. Nula na třetím místě zpravidla značí hromadnou operaci, naopak jiná číslovka je vztažena ke konkrétní části sestavy. Například „1“ představuje v příkazu C11S 90 motor základny. Posledním znakem je vždy písmeno „G“ (get) nebo „S“ (set) definující typ operace.

C10G - get actual positions of all motors

C10S agl0 agl1 agl2 agl3 agl4 - set positions of all motors

C11S agl - set position of base motor

C12S agl - set position of mount motor

C13S agl - set position of hook motor

C14S agl - set position of holder motor

C15S agl - set position of head motor

C20S - set zero positions of all motors

C21S - set zero position of base motor

C22S - set zero position of mount motor

C23S - set zero position of hook motor

C24S - set zero position of holder motor

C25S - set zero position of head motor

C30S speed - set speed (values 0 - 9 [slowest])

C40S x y z- set coordinates of tool position

C50S - run calibration

C60S - go to zero positions

C70S - stop all movement

Ukázka 5.5: Příkazy jazyka pro ovládání ramena.

Příkazy je třeba zadávat přesně a bez chyb. Z důvodu šetření výkonem probíhá pouze minimální kontrola a zadání příkazu v nesprávné formě může způsobovat neočekávané chování. Stejně tak neprobíhá žádná kontrola zadaných úhlů. Je tedy úkolem obsluhy předcházet kolizím.

5.1.2 ESP-01S

Deska ESP-01S implementuje funkcionalitu WiFi přístupového bodu a jednoduchého webového serveru. K implementaci prvního zmíněného využívá standardních knihoven, které pro

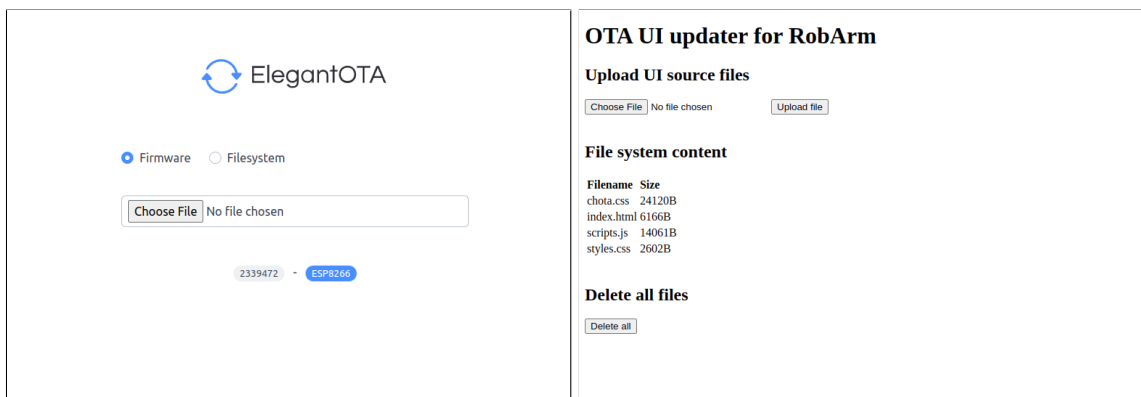
své čipy společnost Espressif poskytuje. Webový server je naopak implementován pomocí komunitní knihovny *ESPAsyncWebServer*⁵.

K přístupu do řídicího webového rozhraní ramena je nutné se pomocí WiFi připojit do sítě s názvem Robarm. Po zadání hesla 12345678 a úspěšném připojení bude na IP adrese 192.168.11.13 toto rozhraní dostupné. Součástí implementace webového serveru jsou „endpointy“, na které se později bude webové rozhraní dotazovat. Komunikace je navržena minimalisticky s důrazem na přenesení zpracování maximálního množství operací na stranu klienta, což v celkovém důsledku znamená šetření omezenými zdroji mikrokontroleru.

Jak již bylo zmíněno, nahrávání programu do ESP-01S je kvůli chybějícímu rozhraní komplikovanější. Pro zjednodušení celého procesu jsem do firmwaru zahrnul funkcionalitu „OTA Update“⁶. Ta se skládá ze dvou částí, přičemž první je implementována pomocí knihovny *AsyncElegantOTA*⁷ a poskytuje příjemné webové rozhraní sloužící pro nahrání zkompilevaného firmwaru desky. Má také možnost nahrávat soubory, bohužel pro naše účely komplikovaným způsobem, kdy je potřeba všechny umístit do jedné složky a vytvořit z nich obraz souborového systému, jehož nahráním se ten původní přepíše. Toto je možné provést na adrese `/update` (obrázek 5.2 vlevo). Obě zmíněné knihovny potřebují k běhu na této desce ještě navíc knihovnu *ESPAsyncTCP*⁸.

Druhou částí je opět, avšak o poznání jednodušší, webové rozhraní (adresa `/ui-upload`), které umožňuje do paměti ESP-01S jednoduše nahrávat jednotlivé zdrojové soubory (`*.html`, `*.css`, `*.js`) řídicího webového rozhraní ramena (obrázek 5.2 vpravo). Umožňuje také celou paměť vymazat.

Aby OTA updatey řádně fungovaly, je při prvotním nahrání firmwaru „tradiční cestou“ nutné vyhradit jim dostatek paměti, čímž se na druhé straně zmenšuje prostor pro souborový systém. Ten byl však za tímto účelem již od počátku redukován na nezbytné minimum.



Obrázek 5.2: Webová rozhraní sloužící pro OTA Updatey.

Přizpůsobení konfigurace

Oba firmwary jsou psány tak, aby je bylo možné co nejnázne přizpůsobovat změnám v modelech a ostatním kódu. Napomáhají tomu konstanty v hlavičkových souborech, které obsahují konfigurace mnoha parametrů sestavy. Je v nich možné měnit zapojení komponent, rozměry

⁵GitHub repozitář: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer>

⁶Over-The-Air Update – firmware se do zařízení nahrává bezdrátově, například pomocí WiFi připojení.

⁷GitHub repozitář: <https://github.com/ayushsharma82/AsyncElegantOTA>

⁸GitHub repozitář: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncTCP>

dílů, rychlost pohybu, offsety a mnoho dalšího. Ideální hodnoty těchto parametrů nejsou vždy univerzální a s trochou nadsázky záleží na každém utažení šroubu. Proto zpravidla bývá nutné je ihned po sestavení zkontrolovat, otestovat a případně doladit.

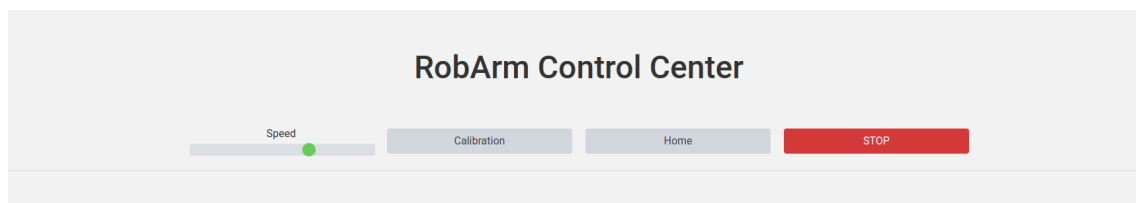
5.2 Uživatelské rozhraní

Jak již víme, pro implementaci řídicího rozhraní byly použity webové technologie, což umožňuje jeho provoz na široké škále zařízení. Zdrojové soubory jsou uloženy v perzistentní paměti desky ESP-01S.

Pro ucelnější vzhled do problematiky je nejprve nutné zmínit protokol HTTP⁹. HTTP z anglického Hypertext Transfer Protocol je textový bezstavový protokol typu dotaz–odpověď. Implementuje několik metod, z nichž jsou nejpoužívanější GET, POST, PUT a DELETE. Výjimkou však ku příkladu není ani používání metody PATCH, která v porovnání s metodou PUT může výrazně snížit množství přenášených dat, což ji při správném užití dělá efektivnější. Komunikaci vždy začíná klient, který vytváří HTTP Request, na který server odpovídá pomocí HTTP Response.

Pro implementaci uživatelského prostředí byly použity jazyky HTML¹⁰, CSS¹¹ a JavaScript¹². Základní zatřídění vzhledu rozhraní zajišťuje minimalistický CSS framework **Chota**¹³. Ten je příkladem open-source frameworku usnadňujícího tvorbu moderních responzivních webů. Jeho obrovskou předností je zcela minimální velikost, přičemž mluvíme o zlomku například v porovnání s všeobecně známým Bootstrapem¹⁴. Pochopitelně nedisponuje takovými možnostmi, ale pro naše účely je naprosto vhodným. Mezi jeho další výhody patří přehledná dokumentace.

V záhlaví uživatelského rozhraní najdeme posuvník pro nastavení rychlosti pohybu ramena. Dále tlačítka pro kalibraci, návrat do základní polohy a zastavení ramena 5.3. Každá provedená akce v rozhraní (například stisk tlačítka) spustí javascriptové volání metody POST nebo GET. Data se pro jednoduchost zpracování posílají jako prostý text. Server se poté pokusí dotaz zpracovat a provést požadovanou akci. Následně je vrácen adekvátní stavový kód dle HTTP konvence, výjimečně kód specifický pro tuto aplikaci.



Obrázek 5.3: Náhled do řídicího rozhraní – záhlaví.

Uživatelské rozhraní je dále rozděleno do tří částí, zabudovaných to záložek tak, že je vždy viditelná pouze jedna z nich. První se skládá z tlačítek, která umožňují natáčet jednotlivé klouby do uživatelem požadované polohy 5.4. Buď jednotlivě nebo všechny najednou.

⁹Dále uvedené informace jsou platné také pro jeho zabezpečenou variantu – protokol HTTPS.

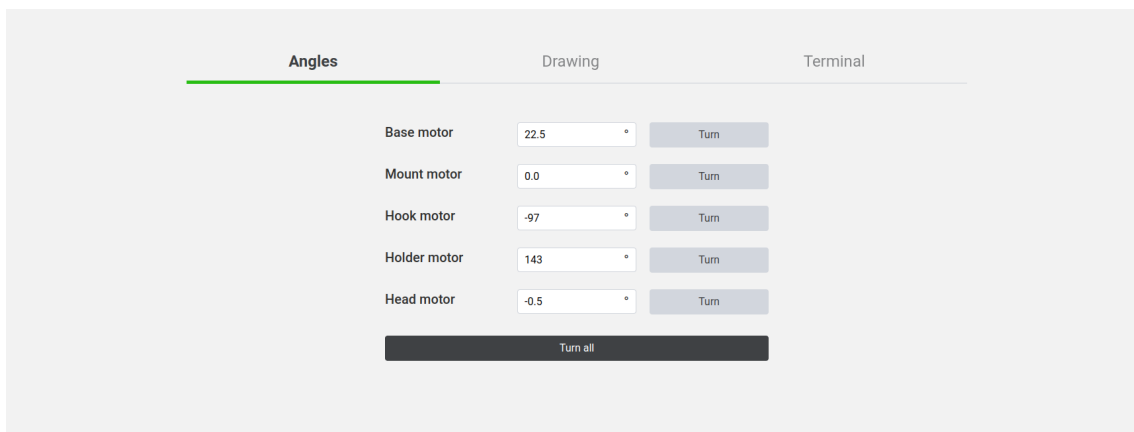
¹⁰Hypertext Markup Language je značkovací jazyk zpravidla používaný pro tvorbu webových stránek.

¹¹Cascading Style Sheets je jazyk pro popis způsobu zobrazení jednotlivých HTML elementů.

¹²JavaScript je objektově orientovaný skriptovací jazyk syntakticky spadající do rodiny jazyka C.

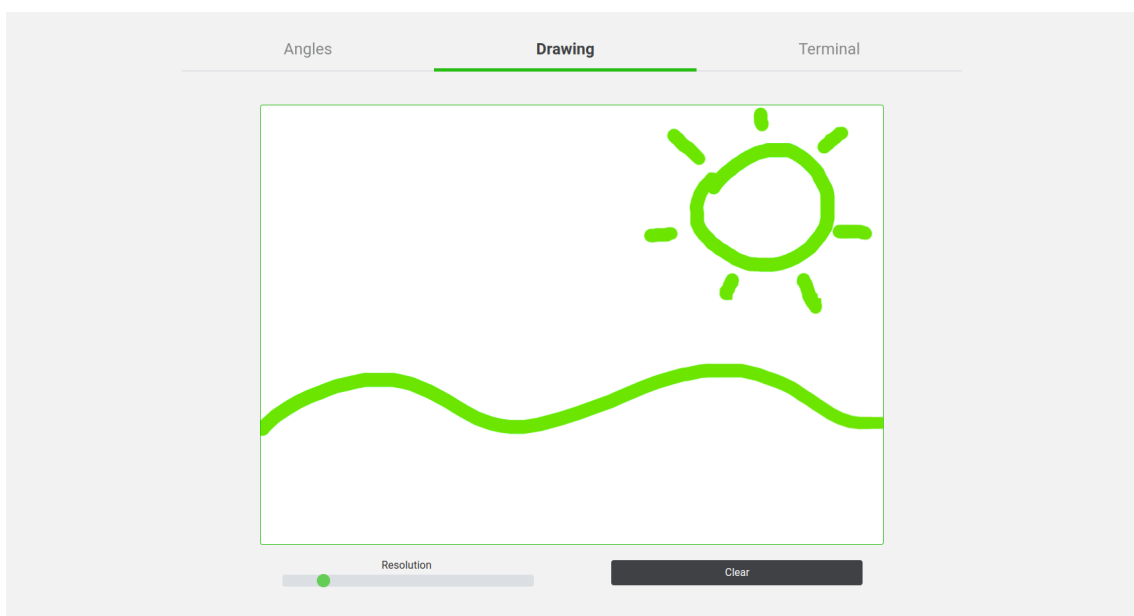
¹³Web: <https://jenil.github.io/chota/>

¹⁴Web: <https://getbootstrap.com/>



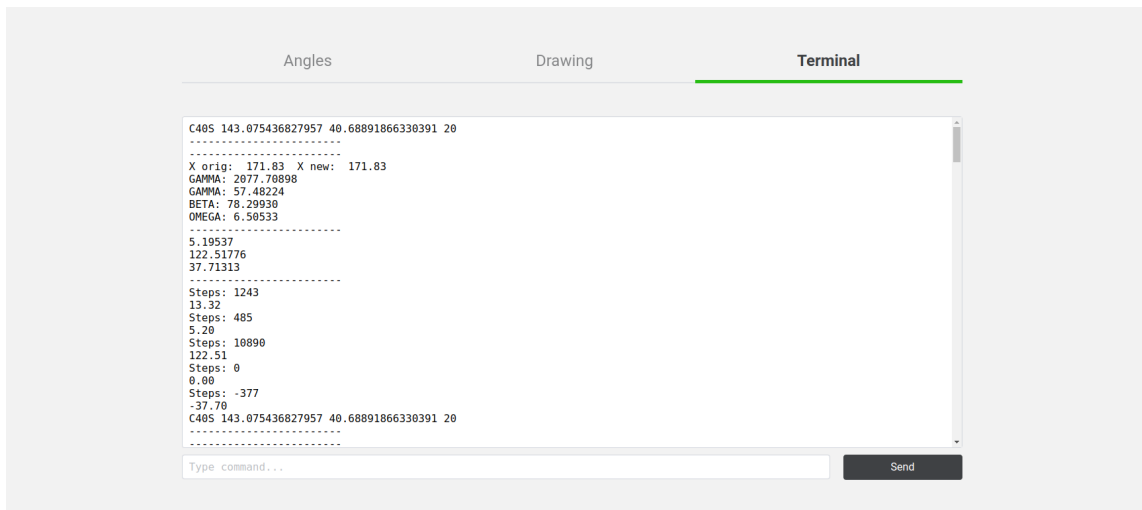
Obrázek 5.4: Náhled do řídicího rozhraní – řízení pomocí úhlů natočení.

Naproti tomu druhá obsahuje plátno (canvas) jehož obsah robot přenáší na papír 5.5. Plátno má shodný poměr stran s papíry formátu A a podporuje kreslení jak pomocí myši, tak dotykem. Rozhraní začne automaticky zasílat ramenu souřadnice už v průběhu kreslení obrazce. Smazání obsahu plátna se provádí tlačítkem umístěným dole, popřípadě klávesou Delete. Posuvník slouží k nastavení hustoty snímaných a následně odesílaných souřadnic – rozlišení.



Obrázek 5.5: Náhled do řídicího rozhraní – plátno.

Poslední je textová konzole, které umožňuje přímo komunikovat s Arduinem 5.6. Všechny příkazy jsou zasílány metodou POST na endpoint `/terminal`, ze kterého je také (avšak metodou GET) v krátkých pravidelných intervalech načítána veškerá komunikace.



Obrázek 5.6: Náhled do řídicího rozhraní – konzole.

Kapitola 6

Sestavení a testování

V průběhu sestavování bylo nesčetněkrát nutné vrátit se zpět k návrhu a řešit problém jinou cestou. Až praxe často poukáže na nedostatky daného řešení a mnohdy neobstojí ani ta, která v teoretické rovině fungují výborně.

Finálnímu sestavení předcházela finální tisk všech komponent. Představu o náročnosti tohoto procesu lze získat z tabulky 6.1.

Díl	Rozměry (mm)	Hmotnost (g)	Doba tisku (h)
základna	114 × 114 × 68	500	43
sedlo	87 × 100 × 89	250	20
spojka	172 × 172 × 70	300	26
příruba	147 × 65 × 50	200	18
konzole	114 × 74 × 47	170	15
efektor	55 × 46 × 20	40	3

Tabulka 6.1: Orientační přehled vlastností tištěných dílů. Hodnoty představují součty pro jednotlivé části dílu. Převodovky zahrnuté nejsou. Unašeče jsou započítány do spojovacího dílu.

6.1 Finální sestavení

Finální sestavení probíhalo již bez problémů. Všechny díly na sebe navazovaly a těsně doléhaly. Samozřejmě bylo potřeba provést standardní „postprocessing“, jako odstranění případných podpor a stringování, což se občas neobešlo bez lehkého zabroušení či zařiznutí pomocí pilníku nebo nože. Aby bylo sestavení kompletní, vyžadovalo ještě výrobu podkladové desky, na které budou všechny komponenty upevněny. Posledním krokem byla příprava a zapojení kabeláže elektroniky.

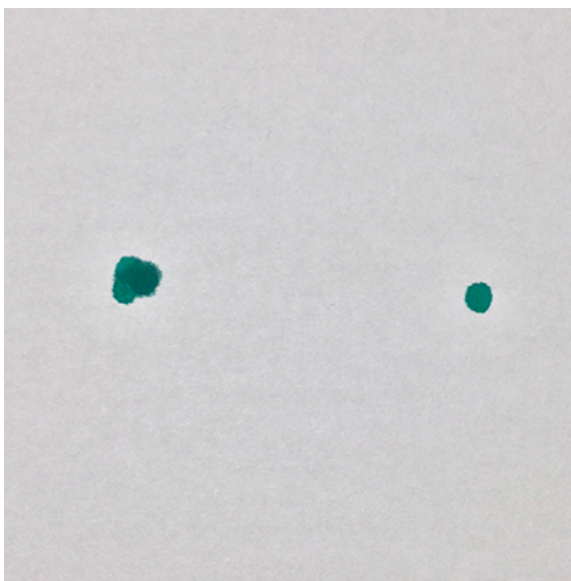
Problém nestability polohových modulů, se kterým jsem se již od začátku potýkal, se naplno projevuje teprve při kompletním sestavení a zapojení veškeré elektroniky včetně motorů. Někdy fungují lépe někdy hůře. Situaci znatelně pomohla stíněná kabeláž, externí

pull-up rezistory i vylepšená filtrace výstupních hodnot v rámci firmwaru. Stále však není výjimkou, že jsou výsledná data zcela chybná a bez včasného zásahu by způsobovala časté kolize. Rušení nezpůsobuje pouze chyby v polohových datech, ale ovlivňuje také správnou inicializaci modulů a vůbec kompromituje veškerou komunikaci. Sestava používá hned tři tyto moduly, pravděpodobnost, že v rámci jednoho běhu kalibraci ramena nastanou problémy alespoň u jednoho je poměrně vysoká, čímž tyto moduly dělají celé zařízení obtížně použitelným a nespolehlivým. Z uvedených důvodů jsem nucen jej dále používat a testovat bez nich.

V průběhu vývoje bylo rameno nesčetněkrát redesignováno, což ovlivnilo konečné rozměry, hmotnost, ale (ve snaze minimalizovat jejich vůle) také odpory převodovek. Nakonec dospěl do bodu, kdy se zvolené motory dostaly na hranici svých možností. Nejvíce se situace zhoršila přidáním výkonnějšího motoru pro axiální kloub. Tím v horních částech ramena, které jsou relativně vzdálené od os otáčení (zejména spodního kloubu), výrazně narostla hmotnost. Jedná se o princip páky, známý ze základů mechaniky. Jelikož je však každý motor upraven na míru, nelze jej snadno nahradit za výkonnější. V této fázi projektu nicméně nejsou jeho funkce a přínos stěžejní, za úvahu však stojí případná implementace v budoucnu.

Počítání inverzní kinematiky je velmi znát na plynulosti pohybu ramena. Musel proto být ze sestavy odstraněn také nárazový senzor, protože neustále hlásil detekci nárazu. Obecně se jedná o velmi jednoduchý, poměrně nespolehlivý a hlavně nekonzistentní senzor, pro podobné použití nepříliš vhodný. Mohl by jej nahradit například akcelerometr, na takové výpočty by však byla potřeba výkonnější elektronika.

Zbylé části fungují především při nižších rychlostech a menším akčním radiusu poměrně spolehlivě. Dokazuje to i jednoduchý test opakovatelnosti [6.1](#).



Obrázek 6.1: List papíru po jednoduché zkoušce opakovatelnosti ramena během provozu (při vykonávání pohybu na velké vzdálenosti) pro deset opakování (vlevo), jedno opakování (vpravo).

Kapitola 7

Závěr

Cílem této práce bylo zkonstruování univerzálního robotického ramena se všemi náležitostmi potřebnými k jeho praktickému fungování včetně jednoduchého ovládacího rozhraní současně sloužícího pro účely demonstrace jeho schopností. Díky této práci jsem se mnoho nového naučil a zdokonalil se v celé řadě činností, jako je psaní odborného textu nebo technické 3D modelování. V průběhu celého návrhu jsem zefektivňoval své vlastní postupy řešení jednotlivých typů problémů a snad tím i zlehka nahlédl do světa zkušených konstruktérů. Dále jsem si prohloubil znalosti zejména v oblasti programování vestavěných systémů a jejich fungování po stránce hardwarové, ale také programování obecně. Opomenout nemohu ani oblast 3D tisku. Díky těmto nově nabytým znalostem a zkušenostem se podařilo projekt úspěšně dokončit a tím také splnit samotné zadání práce. Během vývoje jsem čelil celé řadě nejrůznějších problémů, jako byly vadné součástky, dlouhé dodací lhůty, poruchy 3D tiskárny, konstrukční chyby, které se projevovaly nedoléhajícími díly nebo neakceptovatelnými vůlemi převodů, v neposlední řadě také občasně podcenění komplexnosti právě řešené problematiky.

V projektu spatřuji velký potenciál, ale také široký prostor pro zlepšení, a proto se mu hodlám nadále věnovat s cílem jej udělat větší a robustnější, z lepších materiálů a s výkonnějšími motory. Zvýšit úroveň autonomie (ku příkladu pomocí kamery). Navrhnout systém, který robotu umožní monitorovat stav jednotlivých jeho částí a v případě potřeby adekvátně reagovat, přičemž by měl věnovat zvláštní pozornost zejména motorům a jejich teplotám. Vytvořit pokročilejší elektroniku na míru a zdokonalit vedení kabeláže tak, aby se robot mohl točit neomezeně ve všech osách bez obav z jejího poškození, podobně jako je tomu nyní v případě axiálního kloubu. Vytvořit univerzální úchopový mechanismus a sadu jednoduše vyměnitelných nástrojů uzpůsobených nejrůznějším specifickým činnostem, které bude rameno vykonávat.

Dosažené výsledky a výstupy splnily má očekávání a osobně je vnímám jako velký úspěch. Nakonec bych jej však považoval za ještě větší, kdyby se tato práce stala inspirací pro další, tak jako mnohé z těch, které byly inspirací jí.

Literatura

- [1] *Arduino Store* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>.
- [2] *Engineering Clicks* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/planetary-gears/>.
- [3] *FreeCAD Wiki* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://wiki.freecad.org/Getting_started.
- [4] *PrusaSlicer* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/prusaslicer_424/.
- [5] *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification* [online]. 2013 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1788002.pdf>.
- [6] *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions* [online]. 2013 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.waveshare.com/w/upload/0/03/MPU6050-Register-Map-and-Descriptions.pdf>.
- [7] *ESP-01/07/12 Series Modules User's Manual* [online]. 2017 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://docs.ai-thinker.com/_media/esp8266/esp8266_series_modules_user_manual_en.pdf.
- [8] JELÍNEK, A. a CHROMÝ, A. *Vybrané partie z robotiky*. VUT FIT, 2015.
- [9] KOLÍBAL, Z. *Průmyslové roboty I. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. PRaM*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1993. ISBN 80-214-0526-0.
- [10] KOLÍBAL, Z. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [11] NOVÁK, P. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-141-1.
- [12] SHIGLEY, J. E. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [13] VODA, Z. a HW KITCHEN tým. *Průvodce světem Arduina*. 2. vyd. Bučovice: Nakladatelství Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.

Příloha A

Obsah přiložené SD karty

- */xbrust00/Arduino firmware/ - zdrojové soubory pro Arduino Mega*
- */xbrust00/ESP firmware/ - zdrojové soubory pro ESP-01S*
- */xbrust00/Exportované modely/ - modely jednotlivých částí ve formátu *.amf*
- */xbrust00/FreeCAD Modely/ - modely v původním FreeCAD formátu*
- */xbrust00/Technická zpráva/ - zdrojové soubory tohoto dokumentu*
- */xbrust00/Uživatelské rozhraní/ - zdrojové soubory ovládacího rozhraní*
- */xbrust00/INSTALACE.txt - popis instalace a zprovoznění firmwaru desek*
- */xbrust00/TZ.pdf - digitální verze tohoto dokumentu*

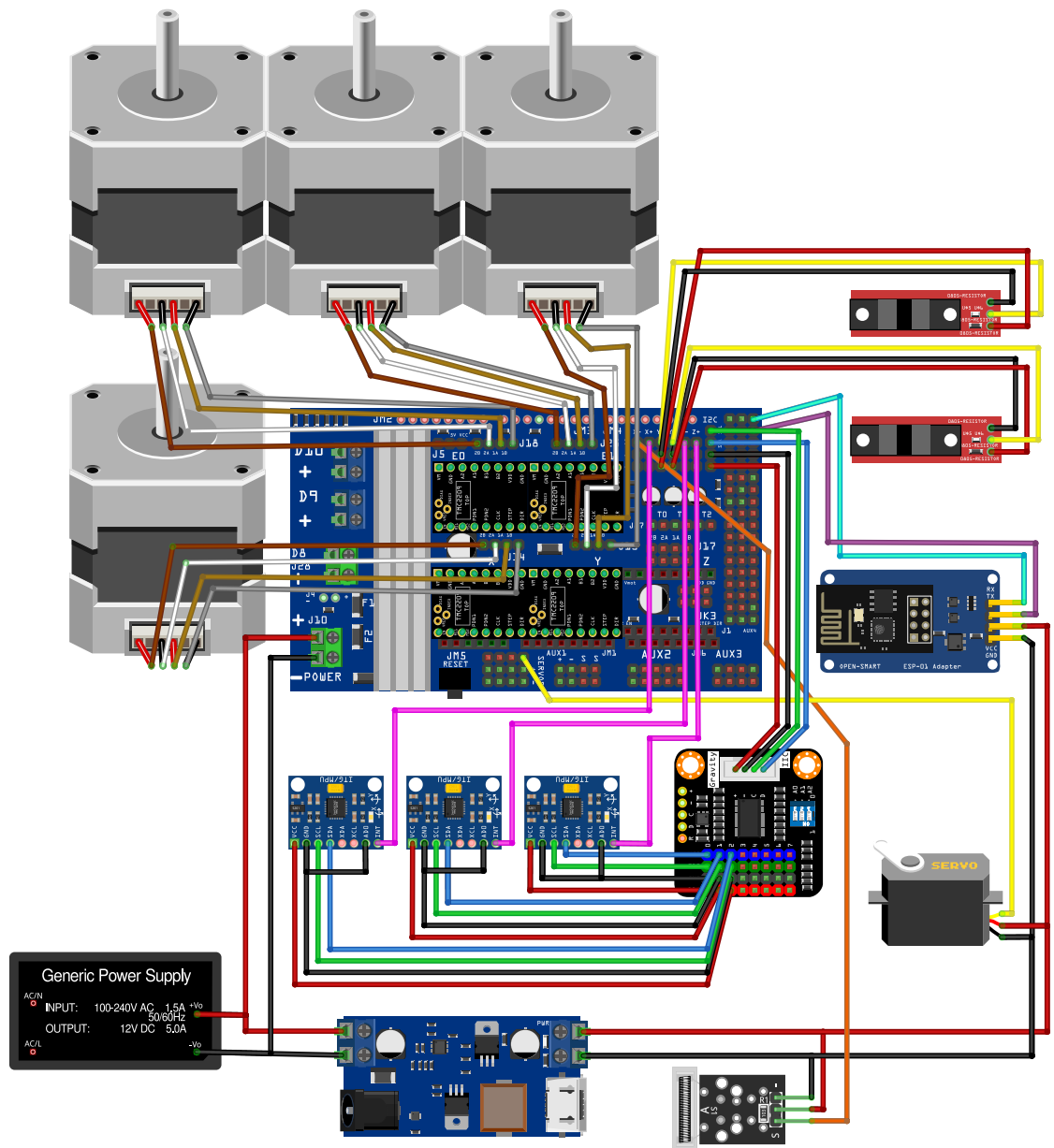
Příloha B

Zapojení elektroniky

Komponenta	Pin	RAMPS	Arduino
Motor základny	2B	X 2B	-
	2A	X 2A	-
	1A	X 1A	-
	1B	X 1B	-
Motor sedla	2B	Y 2B	-
	2A	Y 2A	-
	1A	Y 1A	-
	1B	Y 1B	-
Motor příruby	2B	E0 2B	-
	2A	E0 2A	-
	1A	E0 1A	-
	1B	E0 1B	-
Motor konzole	2B	E1 2B	-
	2A	E1 2A	-
	1A	E1 1A	-
	1B	E1 1B	-
Motor efektoru	SIG	-	4
	Vcc	5V (z měniče)	-
	GND	GND (z měniče)	-
Endstop základny	SIG	Y-	14
	Vcc	5V	-
	GND	GND	-
Endstop konzole	SIG	Y+	15
	Vcc	5V	-

	GND	GND	-
I ² C multiplexor	SCL	SCL	21
	SDA	SDA	20
	Vcc	5V	-
	GND	GND	-
Polohový modul podkladové desky	INT	Z-	18
	ADD	GND	-
	SDA	SDA 0 (na multiplexoru)	-
	SCL	SCL 0 (na multiplexoru)	-
	GND	GND 0 (na multiplexoru)	-
Polohový modul spojky	Vcc	Vcc 0 (na multiplexoru)	-
	INT	Z+	19
	ADD	GND	-
	SDA	SDA 1 (na multiplexoru)	-
	SCL	SCL 1 (na multiplexoru)	-
Polohový modul příruby	GND	GND 1 (na multiplexoru)	-
	Vcc	Vcc 1 (na multiplexoru)	-
	INT	X+	2
	ADD	GND	-
	SDA	SDA 2 (na multiplexoru)	-
Nárazový senzor	SCL	SCL 2 (na multiplexoru)	-
	GND	GND 2 (na multiplexoru)	-
	Vcc	Vcc 2 (na multiplexoru)	-
	SIG	X-	3
	Vcc	5V (z měniče)	-
ESP-01S (s adaptérem)	GND	GND (z měniče)	-
	RX	-	16 (TX2)
	TX	-	17 (RX2)
	Vcc	5V (z měniče)	-
	GND	GND (z měniče)	-

Tabulka B.1: Podrobný přehled zapojení jednotlivých pinů. Pro všechny vodiče SCL a SDA je vhodné použít stíněné kabely a případně doplnit pull-up rezistory.



fritzing

Obrázek B.1: Schéma zapojení řídicí elektroniky. Deska RAMPS kopíruje tvar Arduina Mega a je možné ji do něj zapojit pouze jediným správným způsobem. Schéma tedy Arduino Mega nezahrnuje.