

**Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích**

Přírodovědecká fakulta



Konstrukce robotické ruky pro mobilní podvozek

Bakalářská práce

Ing. Ondřej Trtílek

Vedoucí práce: Mgr. Jakub Geyer
Konzultant: PhDr. Milan Novák, Ph.D.

České Budějovice 2024



ZADÁVACÍ PROTOKOL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Ing. Bc. Ondřej Trtílek
(jméno, příjmení, tituly)

Program studia / specializace: Aplikovaná informatika
specializace Embedded systémy

Pracoviště PŘF JU: Ústav aplikované informatiky

Školitel: Mgr. Jakub Geyer
(jméno, příjmení, tituly, u externího š. název a adresa pracoviště, telefon, e-mail)

Garant z PŘF JU:
(jméno, příjmení, tituly, katedra – jen v případě externího školitele)

Školitel – specialista, konzultant: PhDr. Milan Novák, Ph.D.
(jméno, příjmení, tituly, u externího š. název a adresa pracoviště, telefon, e-mail)

Téma bakalářské práce: Konstrukce robotické ruky pro mobilní podvozek

Cíle práce:

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace konstrukce a řízení robotického nástavce („ruky“) pro použití na mobilním podvozku. Maximální operační prostor ruky bude nejméně 90 cm od základny a zvedací kapacita minimálně 0,5 kg. Důraz bude kladen na univerzálnost použití. Nástavec bude umožňovat upnutí různého příslušenství, včetně jejich ovládání. Řízení musí umožňovat automatizaci procesů (skriptování definovaných úkonů) s možností aktivace sekvence z mobilního podvozku (příklad: mobilní podvozek přežije od dveří ke dveřím a vždy signalizuje robotickému nástavci; robotický nástavec s připojeným rozprašovačem aplikuje dezinfekci na madlo dveří a signalizuje ukončení sekvence). Součástí práce budou bezpodmínečně následující dokumenty:

- *Analýza funkčních a nefunkčních požadavků*
- *Analýza a výběr vhodných hardwarových a softwarových prostředků*
- *Zdrojová data 3D modelů (CAD) a schémata elektroniky*
- *Dokumentace kódu*
- *Testovací dokumentace*
- *Uživatelská dokumentace*



Přírodovědecká
fakulta
Faculty
of Science

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Základní doporučená literatura:

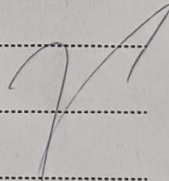
Zvláštní poznámky pracoviště:

Financování práce:

Školitel práce podpis: 

U externích vedoucích fakultní garant práce podpis:

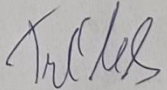
Garant programu/specializace¹² podpis:

Vedoucí pracoviště PřF JU, kde proběhne obhajoba podpis: 

Souhlas vedoucího ústavu AV nebo jiné instituce³ podpis:

Souhlas děkana⁴ podpis:

V Českých Budějovicích dne 19. 2. 2021

Podpis studenta: 

¹ v případě prací v programu bakalářském Biologie není podpis garanta programu vyžadován

² v případě magisterských prací v programech učitelství pro SŠ podpis proděkana pro učitelské obory

³ v případě, že práce bude vypracovávána jinde než prostorách PřF, například na ústavu AV

⁴ v případě, že práce bude obsahovat utajované skutečnosti dle zvláštních předpisů nebo dohod s externími partnery

Bibliografické údaje

Trtílek Ondřej, 2024: Konstrukce robotické ruky pro mobilní podvozek [Construction of the Robotic Manipulator for the Mobile Robotic Vehicle. Bc. Thesis, in Czech] – 122 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Práce se zabývá návrhem, konstrukcí a řízením robotické ruky (nástavce) za účelem užití na mobilním robotickém vozidle. Teoretická východiska práce zachycují používané typy robotických rukou/manipulátorů využitých v provozech a technický popis manipulátorů včetně jejich součástí. Praktická část práce se věnuje popisu modelu a konstrukce samotné robotické ruky a jejího softwarového řízení (ručního i autonomního) včetně komunikace s mobilním robotickým vozidlem.

Klíčová slova

robot, robotický, ruka, mobilní, vozidlo, manipulátor, autonomní;

Annotation

This thesis is mainly focused on a construction and control of a robotic arm (manipulator) used on a mobile autonomous vehicle. A theoretical part of the theses describes the most used types of industrial robotic manipulators, and last but not least the technical scheme of the manipulators and their parts. The second – practical part of the thesis focuses on a 3D model, technical drawings, and physical construction of the arm at large. A software for (direct and autonomous) control including a communication with mobile robotic vehicle is being described and explained in this section as well.

Key words

robot, robotic, arm, mobile, vehicle, manipulator; autonomous;

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích, dne 11. 4. 2024

Ing. Ondřej Trtílek

Poděkování

Tímto děkuji panu magistru Geyerovi a panu doktoru Novákovi za cenné rady a konzultace při studiu a psaní mé bakalářské práce. Rovněž děkuji za přístup do laboratoře aditivní výroby, možnost využití tavných prostor a 3D tiskáren a také za pomoc při frézování desky plošných spojů (neměl jsem s tím dosud žádnou zkušenost).

Dále můj velký dík patří rodině a přátelům, především za trpělivost. Nebylo to jednoduché.

Obsah

Seznam zkratk	1
1 Úvod	1
1.1 Cíle práce	2
1.2 Struktura práce	3
1.3 Úkoly	3
1.4 Metodika práce	4
2 Teoretická východiska	6
2.1 Robotické manipulátory	6
2.1.1 Klasifikace.....	6
2.1.2 Pohon manipulátoru – servomotor.....	16
2.1.4 Řízení servomotoru (PWM).....	18
2.1.5 Řízení manipulátoru – mikrokontrolery.....	20
2.1.6 Řízení manipulátoru – komunikační rozhraní.....	21
2.2 Kinematika manipulátoru	25
2.2.1 Přímá kinematika.....	26
2.2.2 Nepřímá kinematika.....	30
2.3 Analýza dostupných řešení na trhu	31
2.3.1 RoArm-M1.....	32
2.3.2 Braccio TinkerKit.....	32
2.3.3 MyPalletizer 260 Pi.....	32
2.3.4 ViperX 300 Robot Arm.....	33
2.4 Roboty a průmysl 4.0	33
3 Praktická část	36
3.1 Návrh mechanické konstrukce manipulátoru	36

3.1.1	Mechanické požadavky	36
3.1.2	Základny manipulátoru	36
3.1.3	Ramena manipulátoru	40
3.1.4	End-effectory	40
3.1.5	Pracovní prostor manipulátoru	43
3.1.6	Denavit-Hartenbergova notace	45
3.2	Použitý hardware	47
3.2.1	Servomotory	47
3.2.2	Řídící jednotka	53
3.2.3	Servo Driver HAT	55
3.2.4	Step-down měniče a další komponenty	56
3.2.5	Schéma elektrického zapojení	58
3.3	Doplňky konstrukce a úpravy	60
3.3.1	Nosič elektroniky	60
3.3.2	Kryt kloubu J2	61
3.3.3	Indikace naběhnutí Raspberry Pi OS	62
3.3.4	Výměna servomotoru a dílu na kloubu J3	62
3.4	Software a řízení	63
3.4.1	Softwarové požadavky	63
3.4.2	Schéma softwarového řízení	63
3.4.3	Použité SW nástroje	64
3.4.4	Websocket server	66
3.4.5	API server	67
3.4.6	Uživatelské rozhraní	69
3.4.7	Řízení servomotorů	76

4 Testování	79
4.1 Stisk čelistí	79
4.2 Přesnost, opakovatelnost a zatížení	87
4.2.1 Přesnost a opakovatelnost v horizontální rovině.....	88
4.2.2 Přesnost a opakovatelnost ve vertikální rovině	91
4.2.3 Nosnost.....	92
4.3 Aplikace dezinfekce	93
5 Nedostatky a možnosti vylepšení.....	95
5.1 Nedostatky	95
5.1.1 Plynulost chodu kloubu J3	95
5.1.2 Mechanické vůle	95
5.1.3 Singularita	96
5.1.4 Kabelové rozvody	96
5.2 Možná vylepšení.....	96
5.2.1 Proudové senzory	96
5.2.2 Senzory pro měření vzdálenosti	97
5.2.3 Čtení polohy servomotorů bez napájení.....	97
6 Diskuse a závěr	98
7 Seznam použitých zdrojů.....	102
Seznam obrázků.....	115
Seznam tabulek.....	118
Seznam grafů	119
Seznam rovnic.....	120
Seznam fragmentů kódu	121
Příloha A.....	122

Příloha B.....	122
-----------------------	------------

Seznam zkratek

A	Amper
Ah	Ampere-hour
AC	Alternating Current
ALU	Aluminium
API	Application Interface
AV ČR	Akademie věd České republiky
BF	Base Frame
CAD	Computer Aided Design
CF	Coordinate Frame
cm	centimetr
CLK	Clock
CORS	Cross-Origin Resource Sharing
CS	Chip Select
CSS	Cascading Style Sheets
DC	Direct Current
DH	Denavit-Hartenberg
DOF	Degrees of Freedom
DPS	Deska plošných spojů
EF	End-effector
g	gram
GB	Gigabyte
Gb	Gigabite
GCS	Global Coordinate System
GHz	GigaHertz
GM	General Motors

GPIO	General-purpose Input/Output
GUI	Graphical User Interface
HTM	Homogenní transformáční matice
HTML	Hypertext Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HW	Hardware
I ² C	Inter-Integrated Circuit
I/O	Input/Output
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IT	Informační technologie
JSON	JavaScript Object Notation
kg	kilogram
kΩ	kiloohm
LAN	Local Area Network
LCD	Liquid Crystal Display
LCS	Local Coordinate System
MCU	Microcontroller Unit
MISO	Master In Slave Out
mm	milimetr
MOSI	Master In Slave Out
ms	milisekunda
μs	mikrosekunda
N	Newton
Nm	Newtonmetr
OS	Operating System
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol

PoE	Power over Ethernet
PWM	Pulse-width Modulation
RAM	Random Access Memory
ROS	Robot Operating System
RX	Receiver
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SLC	Serial Clock
SDA	Serial Data
SPI	Serial Peripheral Interace
TX	Transmitter
UART	Universal Asynchronous Receiver-Trasnmitter
SW	Software
USB	Universal Serial Bus
USD	United States Dollar
URL	Uniform Resource Locator
V	Volt
WiFi	Wireless Fidelity

1 Úvod

Vývoj v průmyslových oblastech jde neustále kupředu a v oblasti informačních technologií to platí dvojnásob. Již v roce 1965 publikoval spoluzakladatel Silicon Valley a společnosti Intel Gordon E. Moore v odborném časopise *Electronics Magazine* tezi, že se při minimální ceně komponentů bude hustota tranzistorů na jednom integrovaném obvodu každý jeden rok zdvojnásobovat [1]. Jinými slovy, za jeden dolar si každý rok nakoupíme dvojnásobek výpočetního výkonu [1]. Následně Moore predikci upravil na dvojnásobek výpočetního výkonu každé dva roky [2]. Ačkoli již dnes můžeme spekulovat, zda není tzv. Moore's Law překonán či spíše dále nerealizovatelný [3], tak možnosti jsou v IT de facto nezměrné a výpočetní výkon obrovský, a to i při zachování relativně malé spotřeby energie.

Informační technologie totiž nejsou jen „bedny s monitorem“, na nichž lze hrát hry, sledovat videa, nebo psát články v textovém editoru. Mohou to být také automatizované systémy či celé sítě navzájem komunikujících automatizovaných systémů robotických rukou, díky nimž vám sjede z výrobní linky automobil, automatická pračka, mikrovlnná trouba anebo pomocí níž prozkoumáte nedostupné místo, manipulujete s nebezpečnou látkou v laboratoři či zneškodníte výbušninu. Ve svém důsledku každá takováto možnost využití neživého pomocníka v podobě robotické ruky může usnadnit život (v některých případech jej i zachránit). Mnoho předmětů pro každodenní použití bylo zkonstruováno za pomoci robotických rukou.

Předmětná ruka bude konstruována tak, aby měla modulární end-effector, přičemž jejím primárním účelem bude dezinfekce madel dveří, neboť poslední dva necelé roky společnost po celém světě bojuje s pandemií onemocnění COVID-19 a součástí prevence proti této nemoci je především dostatečná hygiena. Vir COVIDu-19 dle studie publikované v *The NEW ENGLAND JOURNAL of MEDICINE* ulpí na plastovém povrchu a povrchu z nerezové oceli až na 72 respektive 48 hodin [4] [1] [5], tedy i na klikách/madlech u dveří. Vzhledem k těmto okolnostem je nanejvýš vhodné madla pravidelně čistit a automatizovaný stroj v podobě robotické ruky je pro tuto aktivitu vhodným řešením.

Tímto lze výrazně omezit kontakt mezi člověkem a předmětem s potenciálním výskytem viru (madlo je velmi exponovaným místem).

Konstrukce ruky bude dále umožňovat širší škálu využití a aplikaci různých typů modulů pro jiné účely. Vzhledem k tomu, že robotická ruka může být upevněna na mobilním podvozku určeném také pro terénní využití, existuje racionální předpoklad, že i robotický nástavec bude možné případně použít pro plnění jednoduchých úkolů v rámci venkovních aktivit akademických pracovníků PřF JU / Biologického centra AV ČR.

Ruka bude koncipována rovněž tak, aby ji bylo možné staticky umístit a operovat s ní i mimo autonomní vozidlo.

1.1 Cíle práce

Jak již bylo nastíněno v úvodu, cílem práce je návrh a realizace konstrukce robotické ruky (nástavce) a jejího řízení. Robotická ruka bude moci být staticky upevněna na mobilním podvozku. Minimální vzdálenost end-effectoru od základny ruky bude 900 mm, přičemž ruka by měla být schopna unést alespoň 500 g.

Primárně robotická ruka ponese nádržku s dezinfekcí a end-effector bude sloužit jako rozprašovač. Nicméně, koncové rameno robotického manipulátoru bude koncipováno univerzálně tak, aby bylo možné ruku použít i pro jiné účely než dezinfikování povrchu, ergo bude možné vyměnit end-effector z držadla s nádržkou za například mechanický drapák ovládaný manuálně.

Řízení robotické ruky, respektive řízení jednotlivých úkonů souvisejících s dezinfikováním povrchu madel bude umožňovat automatizaci, tj. skriptovací sekvenci bude možné aktivovat z mobilního podvozku. Jako příklad lze uvést situaci, kdy robotické vozidlo přijede ke dveřím, vyšle signál robotické ruce, ruka se zdvihne ke dveřím a aplikuje rozprašovačem dezinfekci na kliku dveří. Po dezinfekci se ruka vrátí do domovské polohy a vyšle signál s ukončením sekvence zpět řídicí jednotce mobilního podvozku.

Vedle automatizované sekvence, bude možné manipulátor také ovládat prostřednictvím GUI, v němž uživatel vybere typ adaptéru, dle něhož následně bude moci řídit jednotlivé pohonné jednotky zvlášť, nebo zadá koncové polohy všem motorům a rameno vykoná pohyb naráz. Tento cíl není specifikován v zadání práce, ale autor se jej rozhodl do práce zakomponovat.

1.2 Struktura práce

Strukturou je práce rozdělena na rešeršně-teoretickou část a část praktickou. V teoretické části jsou zkoumány možnosti obecného využití robotických manipulátorů v provozech, a také jejich vazba na průmysl 4.0. Dále se zde rozebírá vhodné hardwarové vybavení pro konstrukci, pohyb a řízení motorů robotických ramen.

Praktická část bakalářské práce obsahuje kapitoly o vývoji mechanické konstrukce, vytvoření 3D parametrického modelu ruky včetně technických výkresů, dokumentaci s vysvětlením výkonného kódu a kódu GUI. Dále se zde autor věnuje výběru použitého HW a SW a jsou zde schémata elektrického zapojení a řízení ramene. Částečně zde a posléze případně v přílohách bude k dispozici dokumentace k ovládní ruky (uživatelský manuál) a fotodokumentace/vizualizace průběhu konstruování. V neposlední řadě praktická část obsahuje též hardwarové/mechanické a softwarové požadavky projektu a kapitolu stran testování.

1.3 Úkoly

- Rešeršní činnost stran využívaných manipulátorů pro komerční i modelářské/hobby účely, jejich anatomie, ovládní a dostupnost na trhu
- Navržení vlastní konstrukce robotického ramene (hrubé výpočty nosnosti jednotlivých ramen pro výběr motorů a vytvoření 3D modelu ruky)
- Vytvoření technických výkresů a tisk potřebných komponent
- Návrh elektrického zapojení komponent do funkčního celku
- Kalibrace servomotorů
- Testování servomotorů (opakovatelnost a přesnost)
- Otestování stisku používaných EF (čelistí)
- Zajištění komunikace s externím zdrojem požadavku (autonomním robotickým vozidlem)
- Vytvoření GUI a řídicí aplikace

1.4 Metodika práce

Následující kapitola popisuje jednotlivé kroky projektu a předpokládané dílčí problémy, jež bylo nutné řešit v celém průběhu práce. Zde je třeba říct, že původně naplánovaná chronologie bodů často v praxi úplně přesně neodpovídá dílčím krokům, toto platí zejména při fyzické konstrukci robota, neboť je třeba neustále testovat funkčnost a projekt průběžně ladit. Jinými slovy některé níže popsané kroky se následně v praxi vzájemně prolínají.

Prvotním krokem byl návrh samotné konstrukce robotické ruky, a to na základě analýzy designu zařízení využívaných v průmyslu, nebo pro komerční či modelářské účely. Základem konstrukce manipulátoru bylo zejména rozložení a velikost ramen a počet kloubů a zvážení, jaký typ kloubů využít (na základě toho také určit mechaniku pohybu či vybrat typ motoru – zda použít servomotor nebo krokový motor). Nosným parametrem pro předmětný návrh zařízení byl stanovený minimální operační prostor 90 cm od základny (první pohyblivé části manipulátoru) a nosnost 0,5 kg.

Dalším krokem byly dílčí výpočty pro samotný výběr vhodných motorů pro jednotlivé klouby, neboť zde záleželo na více faktorech: délka ramen, hmotnost manipulovaného předmětu, hmotnost samotných motorů v řetězu ramen a kloubů. Na základě těchto parametrů bylo možné určit minimální točivý moment, jenž by měly motory mít. Souběžně s výběrem motorů bylo nutné zvolit řídicí jednotku, která bude jednotlivé motory ovládat a dle řídicí jednotky také určit, v jakém jazyce bude psán výkonný kód.

Na základě předpokládaného designu bylo následně nutné vytvořit detailní a virtuálně funkční parametrický 3D model zařízení. Zde byl pro účely vytvoření 3D modelu a technických výkresů využit modelovací software Onshape [6]. Vzhledem k funkcionalitě nebyl model tvořen pouze statickými dílčími modely součástek, ale také takzvaným „Assembly“ tedy funkcionalitou, díky níž se jednotlivé díly skládají a šroubují dohromady a vytváří se mezi nimi funkční fyzikálně-mechanické vazby.

Vedle 3D modelu bylo potřeba navrhnout elektrické zapojení jednotlivých komponentů dohromady do jednoho funkčního obvodu. Pro účely návrhu elektrického zapojení autor využil software společnosti Fritzing [7].

Během vytváření modelu a realizaci dílčích výpočtů bylo nutné analyzovat jaký materiál použít, nejen pro samotnou konstrukci, ale také pro 3D tisk případných komponentů robotické ruky, neboť každý typ filamentu má jiné vlastnosti strany

roztlačnosti a tepelné či mechanické odolnosti. V konstrukci bylo třeba dbát na váhu a pevnost jednotlivých komponentů, a to především v návaznosti na krouticí moment použitých rotačních kloubů. Model musel být koncipován rovněž s ohledem na dispoziční robotického vozidla (jeho horní kryt), proto de facto v průběhu celé práce probíhala vzájemná komunikace s autorem zmíněného autonomního vozidla za účelem synergie obou zařízení.

Další kroky zahrnovali konstrukci manipulátoru a tisk potřebných dílů, programování řídicího kódu a GUI.

Testování pohybu robotické ruky včetně komunikace s externím zdrojem požadavků probíhala v konstrukční a závěrečné fázi práce.

Lze říci, že při vývoji byla do určité míry využita metoda „rapidního prototypování“, kdy autor navrhl jednotlivé konstrukční díly, následně model vytiskl a posléze otestoval. V případě nedostatků modely upravil, vytiskl znovu a opět otestoval. Takto jednotlivé díly procházely iteracemi, dokud nebyly dostatečně vhodné k použití. Totéž platilo i o součástkách formovaných (řezaných, broušených a vrtaných) ručně.

2 Teoretická východiska

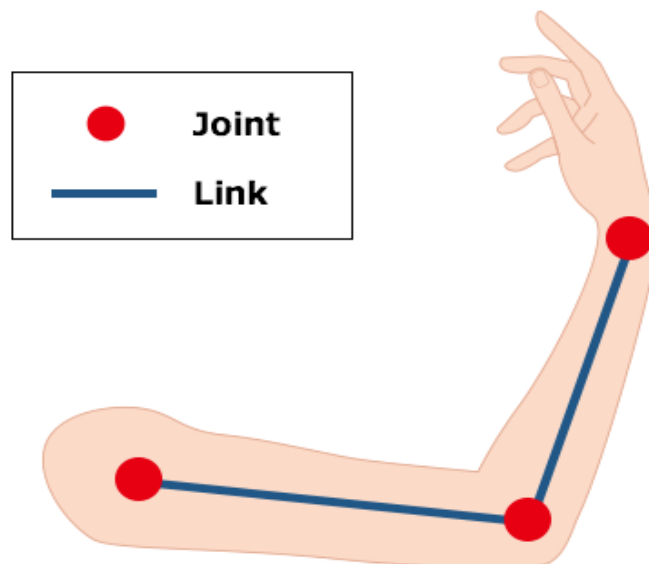
Tato kapitola pojednává o typech robotických manipulátorů využívaných v industriálních provozech a velmi stručně o provázanosti na průmysl 4.0. V teoretické části je rozebíráno schéma robotické ruky a v návaznosti na to i komparace a popis pro konstrukci robotické ruky základního hardware, zejména mikrokontrolerů a používaných motorů.

2.1 Robotické manipulátory

2.1.1 Klasifikace

Strukturou se robotické manipulátory velmi podobají pohybové soustavě lidského těla. Ačkoli se může na první pohled zdát, že lidská ruka či tělo a robotická ruka jsou rozdílné entity, sdílí velmi podobné mechanické vlastnosti. Robotický manipulátor je složen z kloubů a ramen, které kineticky kopírují lidské kosti paže propojené klouby v zápěstí, loktu a rameni. Tak jako rameno či loket člověku umožňuje pohyb a ohýbání ruky v různých směrech, tak umožňují robotické klouby volný pohyb manipulátoru. [8]

Obrázek 1 – Manipulátor vs lidská ruka



Zdroj: převzato z [8]

Industriálním robotem chápeme zařízení, jehož základními charakteristikami jsou univerzálnost a operační flexibilita. Relativně stará¹, ale do dnešní doby aktuální, přijímaná definice Robot Institute of America definuje robota jako [9]:

„Programovatelný a multifunkční manipulátor navržený pro přesun materiálů, součástek, náradí či zařízení prostřednictvím různých, předem definovaných pohybů, a to za účelem vykonání široké škály úkolů.“ [9]

Z podstaty mohou být industriální manipulátory integrální součástí automatizovaných celků realizujících velkou škálu činností ať již flexibilních, nebo repetitivních. Původními cíli konstrukce manipulátorů bylo sestavení přístrojů (mechanických, později elektromechanických), jež by byly schopné usnadnit či zpřesnit práci člověka či zvířat. Do zmíněné kategorie mohou spadat nakladače, bagry a různé pákové či kladkové mechanismy. Během let vývoje manipulátory ovšem získaly své místo v mnoha průmyslových aplikacích. Zde se dostáváme k letité definici uvedené výše, a tedy, že se jedná o programovatelné, zcela automatizované, přesné a rychlé stroje nahrazující práci člověka. [10]

Dnes robotické ruce/manipulátory nahradily lidskou práci především ve skladech (zakládací, přerovnávací a třídící manipulátory), na výrobních linkách (manipulátory v režimu „Pick and Place“), v potenciálně nebezpečných prostředích (armádní roboty pro manipulaci s výbušninami či toxickými a radioaktivními látkami, roboty pro průzkum vesmírných těles či pro průzkum staticky nestabilních objektů). Další využití robotických manipulátorů můžeme nalézt v průmyslových procesech (lakování, přesné svařování, broušení) a v neposlední řadě také v lékařství (laparoskopické chirurgické operační roboty). [10]

Podle [11] mohou být robotické manipulátory klasifikovány dle různých kritérií:

- počtu stupňů volnosti (DOF)
- kinematické struktury
- použitých pohonů – kloubů

¹ Tato definice je z roku 1980 (Sciavicco, 2001).

- geometrie pracovního prostoru (Working Envelope)
- pohyblivých charakteristik
- způsobu řízení či programování (funkční autonomie)

Kritérium počtu DOF

Dle kritéria strany stupňů volnosti klasifikujeme manipulátory jako univerzální, redundantní a deficitní. Univerzální roboty mají šest DOF, přičemž v souvislosti s jejich užitím lze jednoznačně vymežit polohu a orientaci manipulovaného objektu v kartézském souřadnicovém systému. [11]

Redundantní roboty disponují více než šesti DOF a využívají se k lepšímu obcházení překážek a k pohybu v relativně stísněných prostorech. [11]

Deficitní robot se vyznačuje méně než šesti DOF. Do této kategorie můžeme zahrnout některé typy SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) robotů s 4-5 DOF sloužícím k manipulaci nebo montáži prvků v rovině. [9] [11]

Kritérium kinematické konstrukce

Dle kinematické konstrukce rozlišujeme tři typy robotických manipulátorů: sériové, paralelní a hybridní. Sériové, jež se v provozech využívají nejčastěji, jsou tvořeny tzv. otevřeným kinematickým řetězcem (open-loop chain), jenž lze popsat acyklickým grafem, kde uzly grafu zachycují ramena a hrany grafu klouby manipulátoru. Ergo, každé rameno je spojeno prostřednictvím kloubů s dalšími dvěma rameny, s výjimkou základny a end-effectoru. Ramena typu základna a end-effector mají s dalšími rameny pouze jedinou vazbu. [10] [11] [12]

Ve všeobecné rovině lze říci, že pro sériové manipulátory můžeme nalézt jednoznačné analytické řešení přímé kinematické úlohy. Nicméně, analytický postup řešení inverzní kinematické úlohy tak snadný není, dokonce v mnoha případech jej ani nelze analyticky řešit, a navíc nepřímá kinematická úloha sériového manipulátoru může obsahovat mnoho výsledných řešení. [10]

Základ paralelních robotů je tvořen uzavřeným kinematickým řetězcem (closed-loop chain). Oproti otevřenému kinematickému řetězci, tento lze popsat cyklickým grafem a vzniká de facto uzavřením otevřeného řetězce. Paralelní manipulátor má dvě základny, pevnou nepohyblivou a pohyblivou základnu. Tyto základny jsou spojeny minimálně

dvěma (v mnoha případech více) nezávislými otevřenými kinematickými řetězci. [11]
[12]

V porovnání se sériovým manipulátorem má paralelní několik výhod, jednak větší tuhost/odolnost a jednak velký poměr tzv. „Load-to-Weight“, tedy poměr síly manipulovat s tělesem ku celkové váze/konstrukci manipulátoru. Díky těmto vlastnostem je jeho použití výhodnější na místech, kde se více dbá na přesnost, rychlost pohybu a odolnost zařízení než na velikost pracovního prostoru robota. [12]

Z výše uvedeného vyplývá, že paralelní robot má lepší nosnou kapacitu oproti sériovému, na druhou stranu jeho největší nevýhodou je právě velmi omezený pracovní prostor. [12]

Kvůli složité mechanické konstrukci se paralelní roboty dostaly do povědomí širší veřejnosti až v posledních deseti či patnácti letech. Vyššími nároky na řízení a technickou konstrukci tyto roboty dříve veřejnost spíše odrazovaly. Avšak, to, co průmyslová odvětví považovala za složité se stalo výzvou pro akademickou sféru, díky níž paralelní systémy dnes konkurují sériovým a zmenšují tím propast mezi akademickým a průmyslovým povědomím. [10]

Pro paralelní manipulátory platí, že inverzní kinematickou úlohu lze řešit analyticky. Polohu bodu, kterým je každý kinematický řetězec připojen k end-effektoru lze jednoznačně analyticky získat pro každou polohu end-effektoru. Tedy, kloubové souřadnice každého kinematického řetězce mohou být zjištěny nalezením řešení inverzní kinematické úlohy pro sériové roboty. Inverzní kinematická úloha paralelního manipulátoru je řešitelná analyticky z důvodů obecné jednoduchosti kinematických řetězců. Naproti tomu, přímá kinematická úloha není pro paralelní manipulátory (vyjma mechanicky jednoduchých) analyticky řešitelná. [10]

Následující tabulka zachycuje rozdíly mezi sériovými a paralelními robotickými manipulátory.

Tabulka 1 - Rozdíly mezi sériovým a paralelním robotickým manipulátorem

Sériový manipulátor	Paralelní manipulátor
<p>Jednoduchá mechanická konstrukce a z toho vyplývající jednodušší řešení přímé a inverzní kinematiky. Přímou kinematiku lze řešit analyticky, nepřímou nelze.</p>	<p>Složitá mechanická konstrukce, která znesnadňuje řešení přímé i nepřímé kinematiky. Nepřímou lze většinou řešit analyticky. Přímou analyticky řešit nelze.</p>
<p>Malé užité zatížení robota (Load-to-Weight Ratio) – všechna ramena robota jsou zatěžována především na ohyb, ergo musí být koncipována tak, aby udržela celkovou váhu břemene. Tato koncepce zvyšuje robustnost a hmotnost robota a snižuje jeho agilitu.</p>	<p>Velké užité zatížení robota – síla potřebná k manipulaci s břemenem je rozložena mezi jednotlivé kinematické řetězce a end-effector je podepřen ve více bodech. Díky této struktuře nemusí být robot tolik robustní a tím pádem má také lepší dynamické vlastnosti.</p>
<p>Slabší opakovatelnost a přesnost pohybů robota, jež je způsobena průhyby ramen a chybovostí snímačů v pohonných jednotkách.</p>	<p>Lepší opakovatelnost a přesnost pohybů robota způsobená odlišnou mechanickou strukturou. Chyby vzniklé při polohování ramen jsou zprůměrovány a tím je dosaženo větší preciznosti manipulace.</p>
<p>Umístění pohonných jednotek snižuje dynamiku robota, neboť pohony musí být umístěny na všech kloubech a pohybují se společně s manipulátorem. Takovéto umístění rovněž zvyšuje robustnost a zavádí nutnost vést kabeláž v celé konstrukci manipulátoru.</p>	<p>Zde jsou pohonné jednotky umístěny na základně robota (často jsou fixovány k základně). Fixace a umístění na základně zvyšuje kinematickou dynamiku, samotná konstrukce řetězce kloubů a ramen je lehčí a pohon lze fyzicky oddělit od manipulátoru, aby nedošlo k jeho poškození (v nestabilní či výbušném prostředí).</p>
<p>Velký pracovní prostor robota.</p>	<p>Velmi omezený pracovní prostor.</p>

Zdroj: převzato z [10]

Posledním zmíněným typem manipulátoru dle kinematické struktury je tzv. hybridní robot. Jedná se o systém založený na kombinaci otevřeného a uzavřeného kinematického řetězce (sériového a paralelního robota), případně jde o řetězec paralelních systémů. Hybridní robotický manipulátor disponuje vlastnostmi obou výše popsaných systémů. [12] [13]

Na následujících obrázcích jsou zachyceny návrhy jednotlivých typů manipulátorů z hlediska kinematické konstrukce.

Obrázek 2 - Sériový robot FANUC Arc Mate 120iC



Zdroj: převzato z [14]

Obrázek č. 2 zachycuje typ sériového kloubového robota japonské společnosti FANUC. Výše zachycený robot s 6 DOF, nosnost 20 kg s dosahem end-effektoru více než 1,8m a celkovou vahou 250 kg. Tato verze robota slouží k robotickému, obloukovému, a laserovému svařování. [14]

Obrázek 3 – Paralelní robot X-Delta

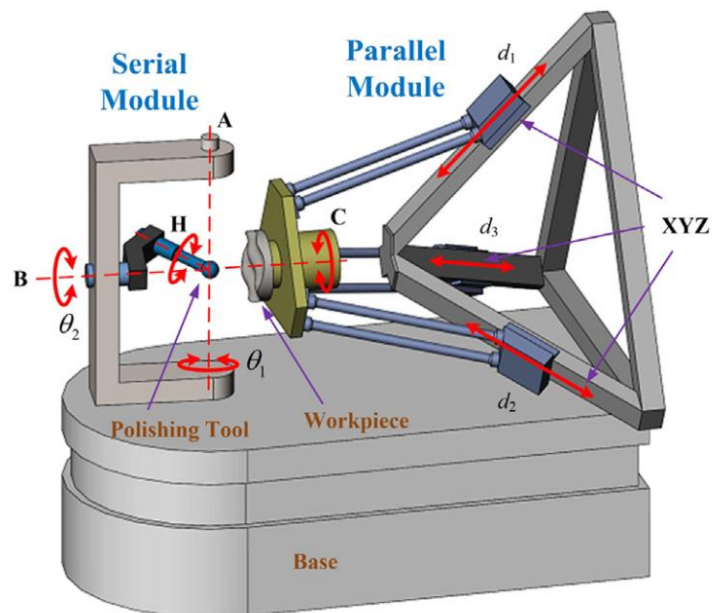


Zdroj: převzato z [15]

Obrázek č. 3 výše zobrazuje typ paralelního robota X Delta japonské společnosti OMRON. [15]

Na obrázku níže můžeme vidět vzor hybridního robotického manipulátoru, jehož celek je složen z paralelního a sériového systému. Tento návrh robotického manipulátoru by měl sloužit k ultra preciznímu leštění povrchů. [13]

Obrázek 4 - Návrh hybridního robota na přesné leštění povrchů



Zdroj: převzato z [13]

Kritérium typu pohonu

Na základě typu pohonu rozlišujeme manipulátory s pohony elektrickými, hydraulickými a pneumatickými. Dnes v průmyslu převažují manipulátory s elektrickými pohony. Pro účely velké nosnosti se používají pohony hydraulické a požadujeme-li velkou rychlost manipulace, je lepší instalovat pohon pneumatický. [11]

Kritérium činnosti a místa nasazení

Dle oblasti nasazení rozlišujeme manipulátory průmyslové a servisní. Průmyslové roboty slouží k výrobě rozličných druhů produktů a servisní se využívají pro zajištění obslužných činností (zdravotnictví, stavebnictví, údržba či hlídání objektů). Zejména u servisních robotů je patrný poměrně rychlý vývoj kopírující rozvoj jednotlivých robotických subsystémů. Tento rozvoj je očekáván i do budoucna, a to zejména díky zvýšené poptávce po automatizaci v různých segmentech služeb. Servisní roboty se také vyznačují velkou mobilitou. [11]

Kritérium Working Envelope

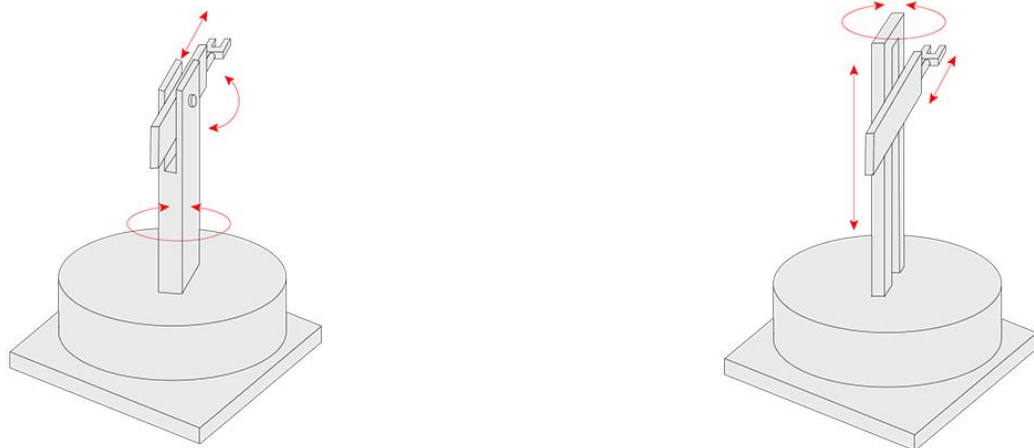
Dle geometrie pracovního prostoru dělíme roboty na kartézské, cylindrické, sférické, angulární (kloubové-rotační) a scara.

Sférický (polar) robot je tvořen vystředěnou hřídelí, která rotuje kolem osy Z. Tato hřídel je spojena s ramenem prostřednictvím rotačního kloubu umožňující ramenu pohyb po vertikální ose nahoru a dolů. Samotné rameno může být opatřeno také posuvným kloubem pro zvýšení dosahu. Tento typ průmyslového robota byl hojně využíván v počátcích průmyslové robotiky. Poloha end-effectoru je zjišťována na základě polární soustavy souřadnic. [16] [17]

Cylindrický manipulátor je velmi podobný sférickému. Základní rameno spojené se základnou se otáčí kolem osy Z, ale druhé rameno již není se základním spojeno rotačním kloubem, ale posuvným, díky němuž „klouže“ po ose Z. Jedná se o tzv. waist joint – robotický kloub „zápěstí“, který zde není rotační, jako u sférického manipulátoru, ale posuvný. Cylindrické roboty se stále využívají zejména ve skladech na přepravu zboží (například televizí či monitorů). [16]

Následující obrázky zachycují sférický a cylindrický manipulátor.

Obrázek 5 - Schéma sférického (vlevo) a cylindrického manipulátoru



Zdroj: převzato z [16]

Dalším typem manipulátoru dle pracovního prostoru je manipulátor kartézský. Tento typ je konstruován tak, aby se pohyboval pouze po třech, navzájem na sebe kolmých osách kartézského souřadnicového systému. Pracovní prostor takového robota je de facto krychle s parametry definovanými maximálním dosahem manipulátoru podél každé z os. Kartézský manipulátor je tvořen posuvnými klouby, jež jsou na sebe navzájem kolmé. Pozici end-effektoru lze zjistit na základě tří proměnných, přičemž robot má stejný počet aktuátorů a tudíž i DOF. [18]

Nevýhodou kartézského manipulátoru může být větší plocha potřebná pro instalaci. Na druhou stranu manipulátor se vyznačuje poměrně velkou přesností a je jednoduchý na ovládání. Tento typ robota se využívá například v podobě nákladních jeřábů na přepravní kontejnery v docích. [16] [18]

Čtvrtým typem je robot angulární. Jedná se o nejvyužívanější typ průmyslového manipulátoru. Angulární robot se strukturou a kinematikou nejvíce podobá lidské paži. Angulární robot se vyznačuje vysokým stupněm volnosti, ale jeho ovládání je komplikovanější než u předchozích zmíněných typů robotů. Vzhledem k možnosti vysokého stupně volnosti má angulární manipulátor také nejširší využití. [16]

Posledním manipulátorem posuzovaným dle kritéria pracovního prostoru je takzvaný SCARA manipulátor. Ramena manipulátoru SCARA se pohybují prostřednictvím rotačních kloubů pouze horizontálně. End-effector je spojen s ramenem posuvným kloubem umožňujícím jeho vertikální pohyb. SCARA roboty jsou nejčastěji používány v rámci linek na výrobu polovodičů, přenos křemíkových waferů, nebo výrobu integrovaných obvodů. [16]

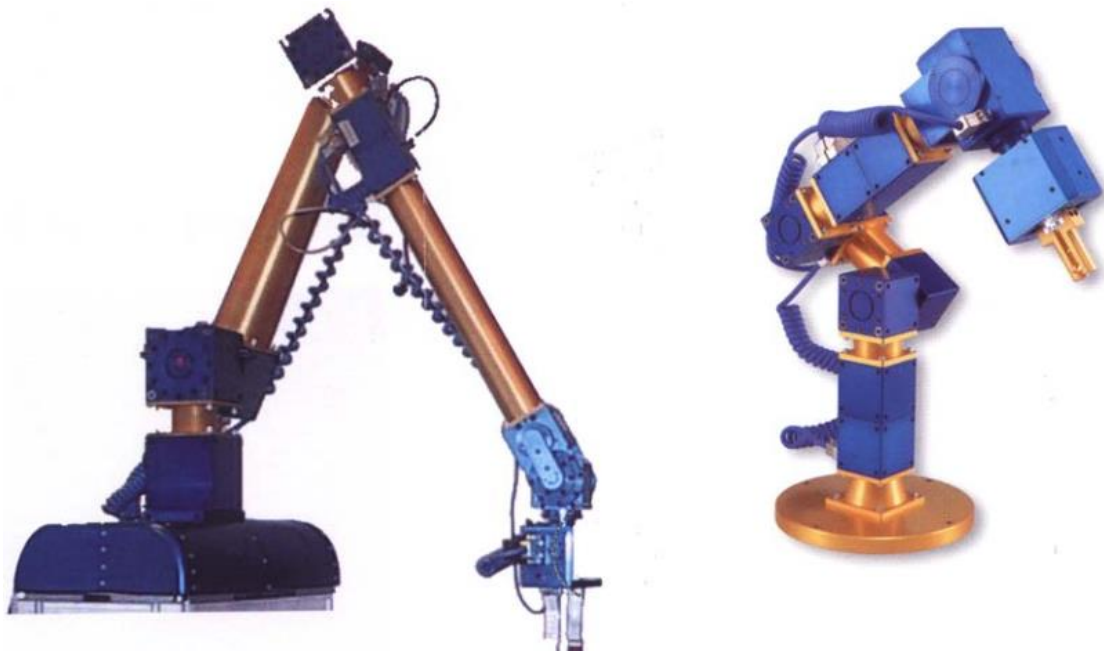
Kritérium kompaktnosti a funkční autonomie

Na základě kompaktnosti a autonomie robotů je můžeme rozlišit na univerzální a modulární. Za univerzální manipulátor lze považovat takový, jenž může být použit pro velkou škálu pracovních úloh nebo je konstrukčně navržen tak, že jeho jednotlivé pohybové části jsou na sobě závislé a nemohou fungovat separovaně. Univerzální manipulátory jsou konstrukčně složitější, čemuž odpovídá i jejich cena. [10]

Oproti tomu pohybové jednotky modulárního manipulátoru jsou samostatně funkční a pomocí vyrobených sad různých polohovacích jednotek lze složit robotickou strukturu přesně odpovídající zadanému úkolu. Modulární robot není tak nákladný (ať už pořizovací cenou, tak provozními náklady), neboť používá menší množství polohovacích jednotek. Navíc tyto jednotky jsou vyráběny sériově. Dnes se již tento typ robota vyrábí zcela běžně. [10]

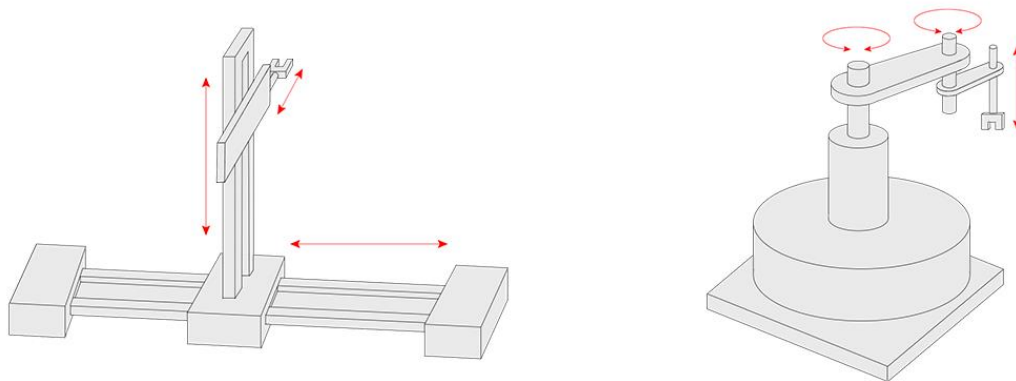
Obrázky níže zachycují modulární manipulátor angulární, schéma kartézského a SCARA manipulátoru.

Obrázek 6 – Modulární roboty angulární – různé konstrukce



Zdroj: převzato z [11]

Obrázek 7 – Schéma kartézského a SCARA manipulátoru



Zdroj: převzato z [16]

2.1.2 Pohon manipulátoru – servomotor

Elektrický pohon je základem (nejen) pro industriální roboty, přičemž primární pohonnou jednotkou v oblasti robotiky jsou servomotory. Důvodem je několik faktů, především to, že servomotor poskytuje vysokou přesnost pohybu a velký krouticí moment i při poměrně velkém zatížení. Servomotor je schopen si poradit i s dynamicky se měnící zátěží a samotná konstrukce servomotoru váží velmi málo oproti jiným typům motorů. [19] [20]

Dále je zde třeba uvést, že samotný termín servomotor nevyovídá o struktuře motoru jako takového. Servomotory mohou být stejnosměrné (DC), střídavé (AC), kartáčové (brushed), nebo bez kartáčů (brushless). DC servomotory jsou používány ve většině industriálních robotických systémů. [19] [20]

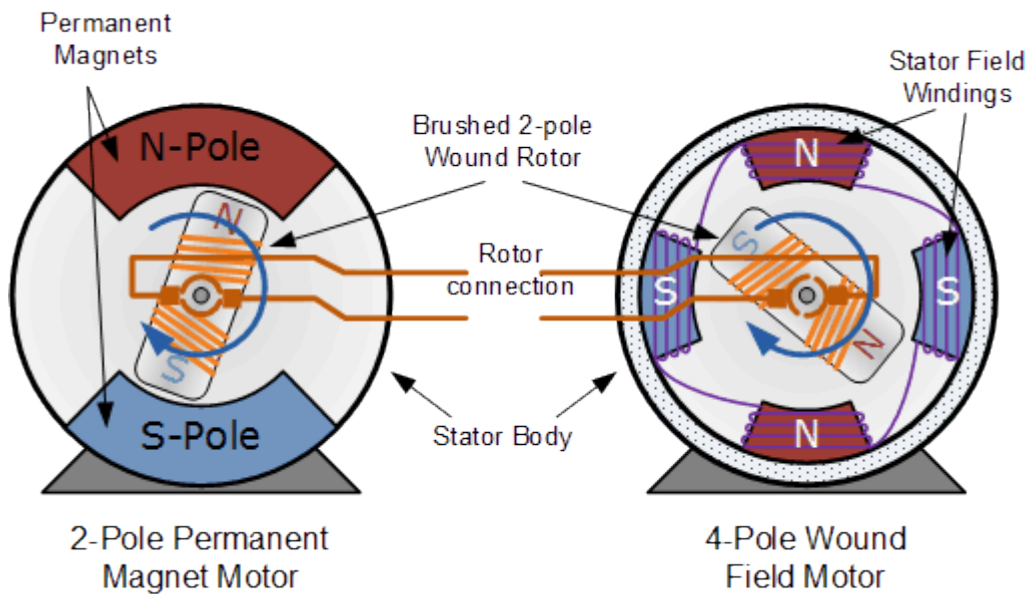
Základním rozdílem mezi servomotorem a jiným typem elektrické pohonné jednotky je skutečnost, že servomotor poskytuje informaci o své aktuální poloze (position feedback). Servomotor vyšle signál, na jehož základě řídicí jednotka zná aktuální polohu motoru či rychlost otáčení. V dnešní době se pro neindustriální aplikace hojně využívají tzv. hobby serva, u nichž schopnost zpětné vazby strany polohy a rychlosti otáčení může absentovat. [21]

Strany funkcionality, DC servomotor využívá rotoru – vinuté cívky, jež rotuje v magnetickém poli vyvolaném permanentními magnety či cívkou statoru. Pro hladší a efektivnější chod motoru je využit komutátor, který vede a přepíná proud, jak se rotor otáčí. Permanentní magnety se všeobecně vyrábí ze slitiny zvané alnico, což je směs hliníku, niklu, kobaltu a železa. Existují i magnety ze slitiny kobaltu a vzácného samaria

či feritové magnety. Permanentní magnety ze slitin vzácných kovů mohou generovat velmi silné magnetické pole. Toho lze využít v zařízeních vyžadujících vysoký výkon. [19] [22]

Obrázek níže zachycuje průřez dvou pólovým DC motorem (vlevo) využívajícím permanentní magnety a čtyřpólovým DC motorem s cívkami (vpravo).

Obrázek 8 - Schéma DC motorů

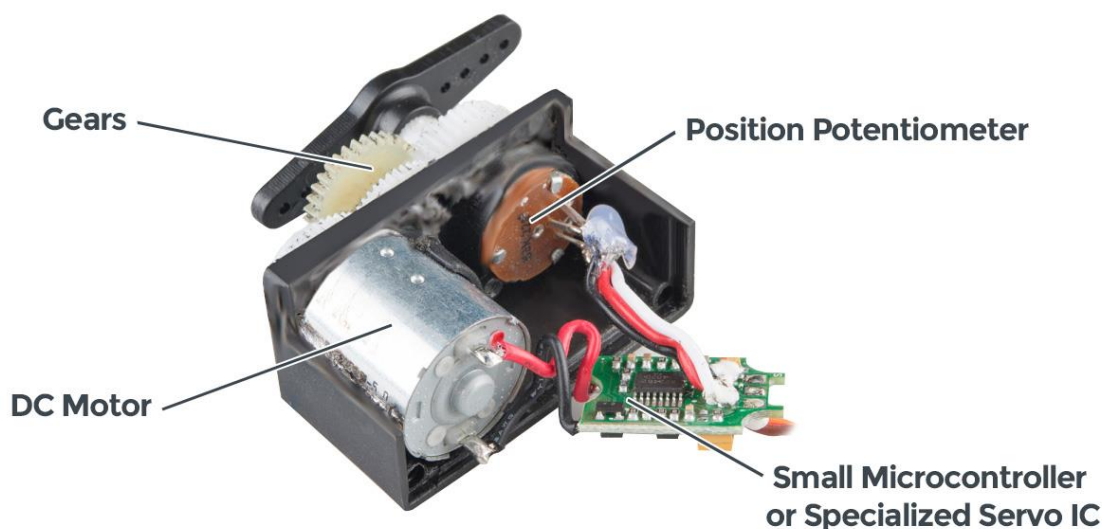


Zdroj: převzato z [24]

Jak je uvedeno v předchozích odstavcích, pro účely aplikací mimo industriální sféru se využívají takzvaná hobby serva. Jedná se de facto o čtyři základní komponenty: DC motor, micro-controller, poziční senzor – potenciometr a převodovku. Převodovka je napřímo spojena s DC motorem, respektive s jeho hřídelí, čímž je dosaženo většího krouticího momentu. Zabudované MCU zpracovává signál z externí řídicí jednotky a prostřednictvím impulsu jej předá motoru (více viz sub-kapitola 2.1.3 Řízení servomotoru). [23]

Na následujícím obrázku je vidět průřez standardním hobby servem a jeho jednotlivé části.

Obrázek 9 - Schéma hobby servomotoru



Zdroj: převzato z [23]

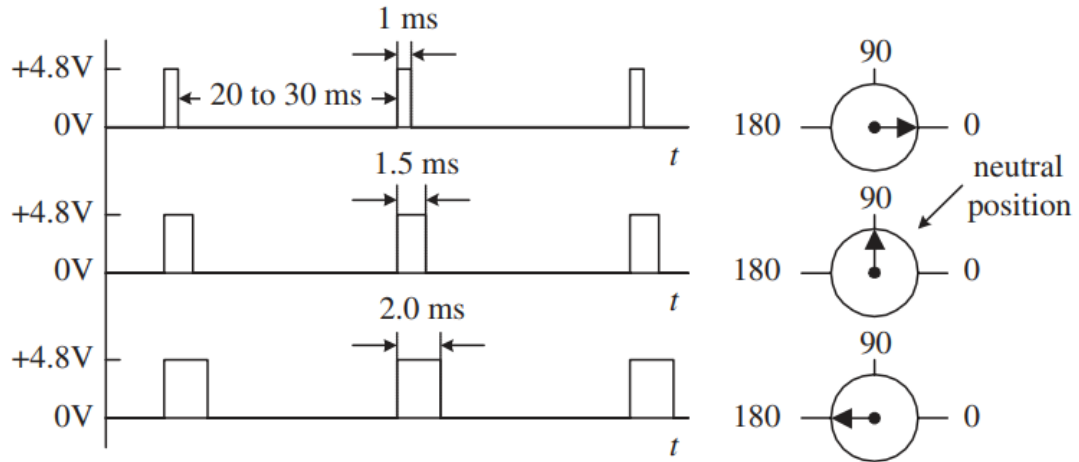
2.1.4 Řízení servomotoru (PWM)

Servomotory v závislosti na výrobci mají většinou limitovaný rozsah otáčení hřídele (do 180° nebo 210°), byť existují i kontinuální (mají rozsah nad 360°, ale nemusí vrátit údaj o natočení hřídele) [25]. Kontrolu otočení hřídele, respektive otočení motoru provádí potenciometr, který na základě odporu vrátí údaj o úhlu otočení hřídele řídicí jednotce. Pro řízenou a přesnou změnu polohy hřídele využíváme takzvanou pulzně šířkovou modulaci (PWM) – řízení vstupního napětí prostřednictvím impulsů, přičemž šíře impulsu stanovuje, kterým směrem a o jaký úhel se motor otočí (v závislosti na značce servomotoru a jeho konfiguraci). Frekvence impulsů stanovuje rychlost motoru. De facto se jedná o řízení analogového hardware (servomotor) prostřednictvím signálu z řídicí jednotky, která pracuje pouze s logickými nulami a jedničkami. Funkce PWM je lépe patrná na příkladech uvedených dále. [26] [27]

Obrázek 10 – **PWM a rotace hřídele** zachycuje řízený signál, jenž nabývá hodnot 0 V a 4,8 V (v digitální podobě zpracovatelné MCU logická nula a jedna) a rotace hřídele. Vyšle-li řídicí jednotka signál o šířce 1,5 ms, otočí se servomotor v tomto případě protisměrně hodinovým ručičkám o 90° do neutrální polohy. Bude-li šíře el. signálu menší než 1,5 ms (zde 1 ms), vrátí se motor o 90° po směru hodinových ručiček a obráceně, bude-li šíře signálu větší (zde 2 ms), otočí se hřídel opět o 90° proti směru vůči neutrální poloze, respektive otočí se v protisměru hodinových ručiček do úhlu odpovídajícímu předmětné délce impulsu (totéž platí i pro rotaci ve směru hodinových

ručiček). Interval mezi jednotlivými impulsy bývá u hobby servomotorů konvenčně 20 ms – řídicí jednotka pošle servomotoru 50 impulsů za sekundu. [21] [27]

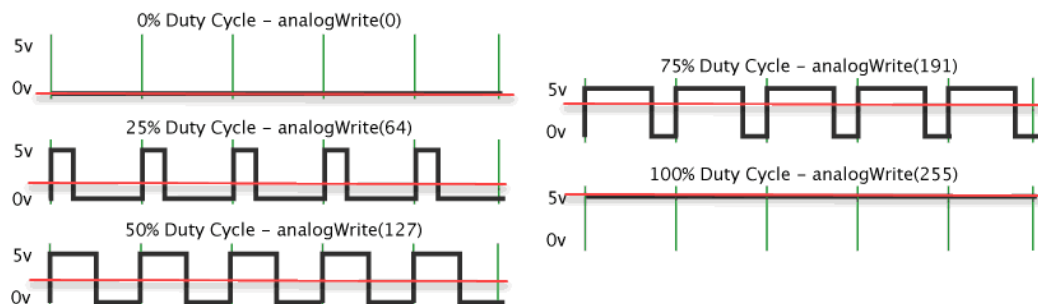
Obrázek 10 – PWM a rotace hřídele



Zdroj: převzato z [27]

Poměr šíře impulsů vůči intervalu t (viz obrázek 11) se nazývá střída signálu (duty cycle) a ukazuje průměrnou energii, jež je na výstupu řídicí jednotky/vstupu servomotoru a dle níž se mění rychlost motoru. Na obrázku je průměrná energie znázorněna červenými přímkami. Nad každým průběhem signálu je uvedena metoda „analogWrite“ s číselnými parametry v rozsahu 0-255, které udávají, na kolik procent poběží připojené zařízení (např. onen servomotor). Parametr 0 značí, že motor není pod napětím, zatímco parametr 255 zachycuje případ, kdy řídicí jednotka posílá nepřetržitě 5V a motor se neustále otáčí (mluvíme-li o DC motoru). V případě servomotoru dochází k přetočení hřídele do krajní polohy a následně snaze o její překonání. [26]

Obrázek 11 - Střída signálu



Zdroj: převzato z [26]

2.1.5 Řízení manipulátoru – mikrokontrolery

Pro účely řízení robotického HW jsou populární mikrokontrolery různých výrobců (Atmel Corporation – dnes Microchip Technology, Raspberry Pi Ltd, STMicroelectronics, Texas Instruments či Espressif Systems) [28] [29]. Nelze říci, který z mikrokontrolerů je nejlepší, neboť použití každého z nich závisí na mnoha faktorech:

- výkon mikrokontroleru;
- množství I/O pinů pro připojení požadovaných periférií;
- paměť a její velikost (operační i sekundární);
- typy a množství komunikačních rozhraní;
- spotřeba el. energie (zejména při využití externího zdroje napájení);
- náklady na pořízení;
- případná budoucí kompatibilita s dalšími vývojovými deskami, respektive MCU a perifériemi [30].

Konkrétně pro oblast robotiky jsou v široké populaci hojně využívány vývojové desky rodiny Arduino (Uno, Nano, Micro či MKR) využívající procesory ATmega a Arm Cortex-M0. Desky MKR mají také procesory od Intelu, konkrétně Intel Cyclone 10CL016. [31] [32] [33] [34]

Vedle Arduina jsou v mnoha projektech včetně konstrukce robotických ramen využívány také řídicí jednotky ESP32, ESP8266 či Raspberry Pi. Zmíněné desky od Espressif Systems využívají procesory Xtensa převzaté od americké společnosti Tensilica Raspberry Pi mají čipy společnosti Broadcom založené na architektuře ARM. Konkrétně vývojová deska Raspberry Pi 4 je osazena čipem BCM2711 s 64-bitovým procesorem Quad-core Cortex-A72 a Raspberry Pi 5 čipem BCM2712 s procesorem Quad-core Cortex-A76. [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42]

Důvodem, proč jsou zmíněné vývojové desky všeobecně používané, byť spíše pro edukační, testovací a modelářské účely, je fakt, že jsou poměrně levné, běžně dostupné, využívají jednoduché vývojové prostředí a lze je tudíž poměrně snadno programovat. Dále na ně existuje nepřeberné množství knihoven, nepotřebují veliký příkon a lze k nim připojit velikou škálu periférií. Pro profesionální provoz se však více hodí řídicí jednotky např. od STMicroelectronics (používá je třeba robotický vysavač iRobot

Roomba), ale kvalitě také odpovídá cena, která se v tomto případě pohybuje i v řádech tisíců až desítek tisíc korun za vývojovou desku. Samotný čip STM poté stojí stejně jako dvě vývojové desky ESP nebo jedno Arudino. [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49]

2.1.6 Řízení manipulátoru – komunikační rozhraní

V předchozí kapitole jsme si uvedli nejběžněji používané mikrokontrolery pro robotické aplikace. V mnoha případech však nestačí pouze jeden mikrokontroler, nebo vývojová deska, ale je třeba propojit více řídicích jednotek, s tím, že každá bude mít na starosti jinou část řízení (sensoriku, výpočty na základě vstupních dat, ovládání motorů apod.). Další možností je použití tzv. HATů/shieldů (přídavný HW pro příslušnou desku). Tyto HATy jsou průmyslově vyráběny ke konkrétnímu účelu: pro ovládání a připojení více servomotorů, DC motorů, krokových motorů. Rovněž existuje mnoho desek pro snazší připojení sensorů, čidel, LCD display aj..[50] [51]

Použití více typů HW vyžaduje, aby spolu jednotlivé systémy mohly komunikovat. Ke komunikaci mezi nimi slouží komunikační rozhraní, jimiž mikrokontrolery disponují. Uvedené tři řídicí jednotky (Arduino, ESP, Raspberry Pi) disponují rozhraními SPI, I2C a UART. [33] [36] [43]

Serial Peripheral Interface

SPI je vysokorychlostní synchronní sériové rozhraní využívající společnou sběrnici. Jedná se o rozhraní typu Single Master Multi Slave (jeden řídicí systém, jeden či mnoho sekundárních systémů) a používá se pro komunikaci mezi MCU a MCU či mezi MCU a externími periferiemi. [52] [53]

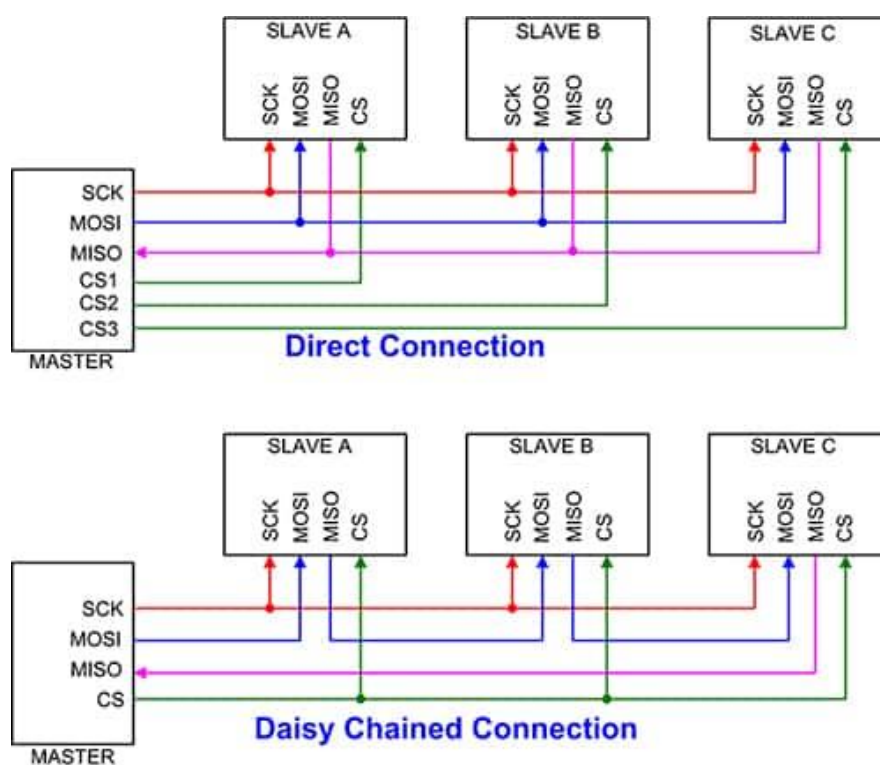
Rozhraní vyžaduje fyzicky čtyři vodiče signálu:

- 1. SCLK (Clock)** – slouží k přenosu hodinového signálu generovaného řídicím zařízením (Masterem) a data přenášená mezi Masterem a Slave se synchronizují na základě tohoto hodinového signálu; [52]
- 2. CS (Chip Select)** – výběr sekundárního zařízení prostřednictvím nastavení logické 0 na předmětný pin (pokud je nastavena logická 1, tak je Slave odstaven od sběrnice); [52]
- 3. MOSI (Master Out Slave In)** – slouží k přenosu dat od řídicí jednotky k sekundárním, tento vodič může být společný pro všechna sekundární zařízení; [52]

- 4. MISO (Master In Slave Out)** – slouží k přenosu dat od sekundárního zařízení do řídicí jednotky, tento vodič může být také společný pro všechna sekundární zařízení. [52]

V rámci SPI rozhraní existují dva způsoby výběru sekundárního zařízení. Prvním ze způsobů je tzv. přímé připojení, v němž jsou MISO a MOSI vodiče společné pro všechna sekundární zařízení a každý Slave má vlastní vodič CS. Druhý způsob řízení Slave je „Daisy Chained Connection“, díky čemuž se ze sekundárních zařízení stane de facto posuvný registr. Sekundární zařízení mají jeden společný vodič CS a namísto dvou linek pro MOSI a MISO existuje jen jedna. [53] Viz následující obrázek.

Obrázek 12 - Přímá a řetězová konfigurace SPI



Zdroj: převzato z [53]

Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

UART je standardem popisujícím sériové asynchronní rozhraní, které slouží ke komunikaci mezi dvěma zařízeními (Single Master Single Slave). Není tak rychlé jako SPI. Fyzicky jsou zde zapotřebí pouze dva vodiče. Těmi vodiči jsou:

1. **Tx (Transmitter)** – data vysílající zařízení
2. **Rx (Receiver)** – data přijímající zařízení

Připojení Tx-Rx je křížové a není zde potřeba adresace. [54] [55]

Přenos přes UART není synchronizován hodinami a data se posílají v paketech. Vysílající zařízení je připojeno ke sběrnici, z níž paralelně přijme data a ta prostřednictvím vodiče Tx pošle v sérii bit po bitu přijímajícímu zařízení. Přijímací zařízení přijímá jednotlivé bity dat do posuvného registru, až obdrží celý paket. Po přijetí paketu přijímající jednotka překontroluje pomocí paritního bitu správnost dat a přesune je paralelně dál do datové sběrnice. [55]

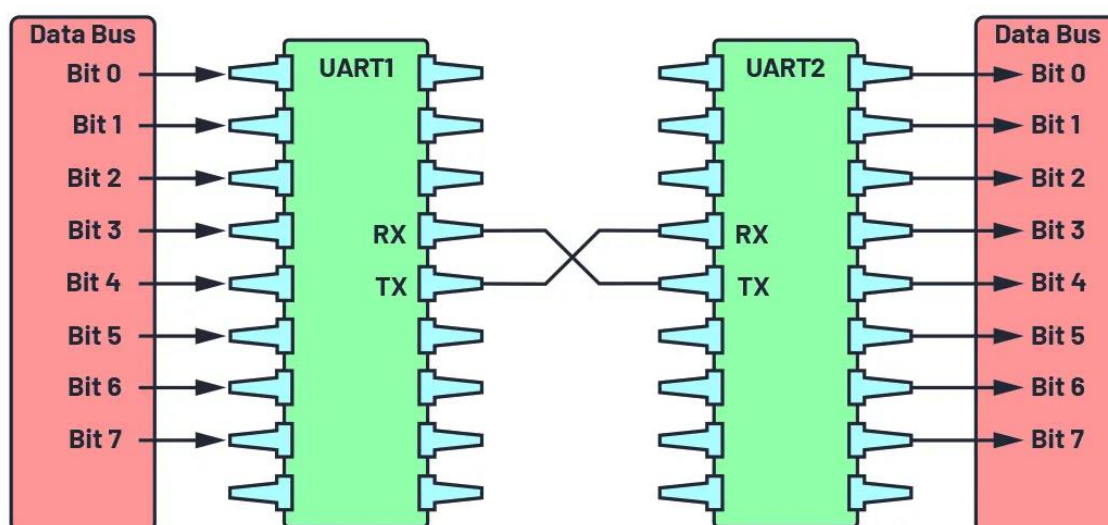
Obrázek 13 - UART datový paket

Start Bit (1 bit)	Data Frame (5 to 9 Data Bits)	Parity Bits (0 to 1 bit)	Stop Bits (1 to 2 bits)
------------------------	------------------------------------	-------------------------------	------------------------------

Zdroj: převzato z [55]

Datový paket obsahuje start bit, jímž vysílající zařízení nastaví přenosovou linku na logickou 0, poté co přijímač detekuje změnu (snížení) napětí na lince, začne číst sadu dat s frekvencí dle tzv. Baud rate (počet přenesených bitů za sekundu). Baud rate musí být u obou zařízení nastaven na stejnou hodnotu, čímž dojde právě k synchronizaci transferu dat. Druhou částí paketu je datový rámeček. Ten může být dlouhý od 5 do 9 bitů, pokud není použit paritní bit. Pokud je paritní bit součástí paketu, tak mohou být data dlouhá pouze 8 bitů. Třetí částí paketu je onen paritní bit, který nabývá hodnot logická 0 (počet logických jedniček v datovém rámci je lichý) a logická 1 (počet logických jedniček v datovém rámci je sudý). Pokud počet nesedí dle paritního bitu, tak přijímací zařízení ví, že byla data v průběhu přenosu pozměněna. Poslední částí paketu jsou stop bity (1 až 2), jimiž vysílající zařízení opět zvýší napětí na lince a přenos se tím ukončí. [55]

Obrázek 14 - Schéma připojení přes UART



Zdroj: převzato z [55]

Inter-Integrated Circuit

I²C je sériové synchronní rozhraní typu Multi Master Multi Slave, tedy více či jedno řídicí zařízení a více či jedno sekundární zařízení. Slouží primárně k připojení periférií (sensory, LCD, čidla, převodníky...) k řídicí jednotce. I²C vyžaduje pouze dva vodiče [56]:

1. **SDA (Serial Data)** – slouží k přenosu dat
2. **SCL (Serial Clock)** – hodinový signál

Všechna sekundární zařízení jsou připojena na obou linkách a mají je společné. Tyto dvě linky jsou připojeny k logické 1 pomocí pull-up resistorů. Samotný přenos dat probíhá následovně [56]:

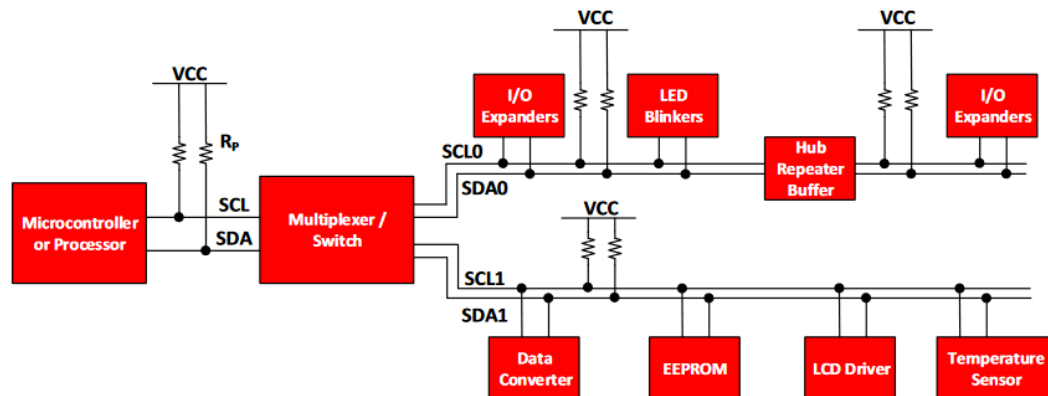
1. Master pošle příkaz START a vyšle adresu cílového zařízení
2. Master pošle data k přijímacímu zařízení
3. Master ukončí přenos příkazem STOP

Pokud chce řídicí zařízení přijmout data od sekundárního (Slave), tak je postup následující [56]:

1. přijímací master zařízení pošle příkaz START a vyšle adresu sekundárního zařízení odesílajícího data;

2. přijímající master zařízení vyše požadavek na čtení z registru sekundárního zařízení;
3. přijímající master zařízení obdrží a přečte data ze sekundárního zařízení;
4. přijímající master zařízení vyše příkaz STOP a ukončí přenos [56].

Obrázek 15 - Schéma I2C zapojení



Zdroj: převzato z [56]

2.2 Kinematika manipulátoru

Kinematika robotů využívá maticových počtů. Vektorové součty a skalární a vektorové součiny jsou vyjádřeny pomocí matic či maticových operací. Vektory vyjadřujeme jako sloupcové matice a označujeme je malým tučným písmenem. Složky matice označujeme malým písmenem v kurzívě s příslušným indexem. Matice označujeme tučně velkým písmenem a jejich složky malým písmenem kurzívou s příslušným indexem. [11]

Mimo standardní ortogonální souřadnice využíváme v kinematice robotů také tzv. homogenní souřadnice, které jsou čtyřrozměrné. Čtvrtá souřadnice má formální charakter, s tím, že pro účely souřadnic je velikosti 1 a pro účely vektoru je velikosti 0. První tři souřadnice jsou stejné jako souřadnice ortogonální. Níže uvádím příklad homogenních souřadnic bodu **A** a vektoru **a**. [11]

Rovnice 1 - homogenní souřadnice vektoru a bodu

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 0 \end{bmatrix}$$

Zdroj: převzato z [11]

Robotický manipulátor zobrazujeme prostřednictvím kinematického diagramu, v němž zachycujeme jednotlivé články mechanismu – klouby (joints) a ramena (links). Klouby mohou být rotační (otáčivé) či translační (posuvné). Vzájemnou polohu těchto článků popisujeme pomocí soustavy souřadných systémů. Užíváme zde dva typy souřadných systémů:

- lokální souřadné systémy (LCS), který jsou k článku pevně přiřazeny a pohybují se s článkem;
- globální souřadné systémy (GCS) označující základní souřadný systém.

V anglické literatuře či v přednáškách se můžeme běžně setkat také s výrazy Denavit-hartenberg Frame (DH Frame) nebo Coordinate Frame (CF) a pro GCS Base Frame (BF). Lokální souřadné systémy přiřazujeme každému kloubu v diagramu a také end-effectoru. Okolí robota přiřazujeme globální souřadný systém. [11] [57] [58]

Proměnnou zachycující velikost rotace i -tého kloubu nebo jeho posunutí nazýváme zobecněnou souřadnicí q_i (kloubová proměnná). Všechny zobecněné souřadnice pro pohybové články robota tvoří vektor zobecněné souřadnice [11]:

Rovnice 2 - Vektor zobecněné souřadnice

$$\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$$

Zdroj: převzato z [11]

2.2.1 Přímá kinematika

V prostorové kinematice existují dvě základní úlohy: přímá úloha a nepřímá úloha. První úloha je definována tím, že známe jednotlivé zobecněné souřadnice (úhly natočení kloubů a délky ramen) a hledáme polohu a orientaci end-effectoru. Tuto úlohu lze řešit pomocí goniometrických vztahů mezi jednotlivými klouby nebo

prostřednictvím tzv. DH Frames jednotlivých kloubů a transformačními maticemi pro přepočítání mezi nimi. [11] [57] [58]

Druhá úloha je podstatně složitější, zde známe polohu a orientaci koncového bodu (a základny) a hledáme jednotlivé zobecněné souřadnice (konfigurujeme jednotlivé klouby tak, aby se end-effector dostal přesně do daného bodu). [57] [58] [59]

Pro řešení přímé úlohy potřebujeme transformovat souřadnice mezi jednotlivými souřadnými systémy. K tomu se využívají maticové počty, konkrétně je potřeba zjistit matice rotace a vektory posunutí. [60]

Matice rotace

Matici rotace značíme \mathbf{R}_n^m a udává, jak je rotován LCS příslušného kloubu vůči předešlému LCS. Index m značí předešlý LCS a index n aktuální LCS. Tyto matice získáme pomocí průmětů vektorů reprezentujících LCS_n na jednotlivé osy LCS_{n-1} . Úhly rotace značíme řeckým písmenem θ (théta). Je-li průmět vektoru LCS_n shodný s osou LCS_{n-1} , jeho hodnota je 1. [60] [61]

Matice rotace existují 3 dle jednotlivých os:

Rovnice 3 - Matice rotace kolem osy X

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Zdroj: převzato z [11] [60]

Rovnice 4 - Matice rotace kolem osy Y

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Zdroj: převzato z [11] [60]

Rovnice 5 - Matice rotace kolem osy Z

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Zdroj: převzato z [11] [60]

Pokud chceme získat výslednou matici zachycující rotaci end-effectoru vůči LCS_0 (LCS prvního kloubu) vynásobí se matice rotace v pořadí, ve kterém jsou definované jednotlivé LCS. Matice rotace se vypočítá tak, že jedna z matic uvedených výše (\mathbf{R}_x , \mathbf{R}_y , \mathbf{R}_z) se vynásobí maticí definující orientaci LCS_n vůči LCS_{n-1} ve stavu, kdy nedošlo k pohybu žádného z kloubů. Označme jí \mathbf{M}_{def} (default matrix). Také je třeba mít na paměti, že je-li osa rotace příslušného kloubu orientována stejně, jako jedna z os LCS_n matici \mathbf{R}_x , \mathbf{R}_y nebo \mathbf{R}_z umístíme vlevo či vpravo od \mathbf{M}_{def} na základě výběru osy, dle níž kloub rotujeme. Rotujeme-li dle osy z LCS_{n-1} umístíme při násobení ony matice vlevo od \mathbf{M}_{def} . Rotujeme-li dle osy z LCS_n umístíme příslušné matice při násobení vpravo od \mathbf{M}_{def} . [62]

Představme si, že máme manipulátor se dvěma rotačními klouby a dvěma rameny. Výslednou matici rotace \mathbf{R}_2^0 dostaneme následovně:

Rovnice 6 - Výpočet matice rotace end-effectoru vůči LCS prvního kloubu

$$\mathbf{R}_2^0 = \mathbf{R}_1^0 \mathbf{R}_2^1$$

Zdroj: převzato z [60]

Vektor posunutí

Vektor posunutí značíme \mathbf{d}_n^m , kde horní index odkazuje na předešlý LCS a spodní index na aktuální LCS, který je vůči předešlému posunutý. Prvky matice označují vzdálenosti jednotlivých kloubů od sebe v příslušných osách dle kinematického diagramu. Pro hypotetickou úvodní/domácí pozici robota, kdy jsou všechny pohonné jednotky natočeny na úhel 0° , označujeme prostřednictvím \mathbf{d}_n^m de facto délky ramen. V případě natočení některého z kloubů je třeba danou složku matice vynásobit goniometrickou funkcí s parametrem odpovídajícím úhlu natočení. [63]

Známe-li jednotlivé vektory translace mezi souřadnými systémy a matice rotace, dostaneme tzv. Homogenní matici transformace. [64]

Homogenní matice transformace

Homogenní transformační matici (HTM) značíme \mathbf{H}_n^m (opět horním indexem zachycujeme předešlý souřadný systém a spodním indexem aktuální souřadný systém). HTM mezi sousedními souřadnými systémy má následující obecný tvar [11]:

Rovnice 7 - Obecný tvar Homogenní matice transformace

$$\mathbf{H}_n^m = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_n^m & \mathbf{d}_n^m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Zdroj: převzato z [11]

Parametr \mathbf{R} je zde submaticí rotace a \mathbf{d} je translačním vektorem. Výslednou HTM pro daný robotický manipulátor získáme vynásobením jednotlivých HTM (obdobně jako jsme postupovali u matice rotace). Poté nás zajímá pravá strana matice s vektorem, jehož složky značí souřadnice bodu v prostoru, kam míří end-effector. [11] [64] [65]

Denavit-Hartenbergova metoda

Druhou variantou pro zjištění pozice end-effectoru za využití HTM je použití Denavit-Hartenbergovy metody (DH metoda), a to v následujících krocích [66]:

A. Vytvoření kinematického diagramu při zachování 4 DH pravidel:

1. osa Z musí být osou otáčení rotačního kloubu, nebo osou posunu translačního kloubu (u end-effectoru vyznačíme LCS tak, aby odpovídal orientaci LCS předcházejícího kloubu);
2. osa X musí být kolmá na osu Z v totožném LCS a zároveň musí být kolmá na osu Z v předcházejícím LCS;
3. všechny souřadné systémy musí splňovat pravidlo „pravé ruky“ (v angličtině „right-hand“ rule) – lze si pomoci jednoduše – nastavíme dlaň tak, aby palec směřoval ve směru osy Z a prsty ruky ve směru osy X, směrem, kterým je orientována dlaň vede osa Y daného LCS;
4. osa X příslušného LCS musí protínat osu Z předešlého LCS.

B. Vytvoření parametrické tabulky (Denavit-Hartenbergova notace);

C. Hodnoty z DH parametrické tabulky dosadíme do HTM (pro každý souřadný systém zvlášť);

D. Jednotlivé HTM vynásobíme a dostaneme potřebné hodnoty. [65] [66] [67] [68]

DH princip je založen na sjednocování jednotlivých sousedních souřadných systémů vůči sobě, a to dle 4 jednoduchých pohybů - 2 rotací a 2 translací. První rotací je

natočení osy x_{n-1} kolem osy z_{n-1} o úhel θ_n . Druhá rotace spočívá v natočení osy z_{n-1} okolo osy x_n o úhel α . První translace je posunutí počátku souřadného systému LCS_{n-1} o velikost r_n po ose x_n . Druhou translací je posun osy x_{n-1} ve směru osy z_{n-1} o vzdálenost d_n . Když každý tento krok vyjádříme obecným formátem transformační matice a vynásobíme tyto mezi sebou, dostaneme HTM ve tvaru zachyceném níže. [11] [65]

Rovnice 8 - Homogenní matice transformace po aplikaci pravidel DH

$$H_n^m = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & r_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & r_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Zdroj: převzato z [11] [65]

Do této matice je třeba dosadit hodnoty z DH parametrické tabulky a vynásobit HTM mezi sebou (viz krok C a D) a opět nás budou zajímat hodnoty v pravém sloupci zachycující souřadnice bodu s end-effectorem. [66]

Níže je zachycen obecný tvar Denavit-Hartenbergovy parametrické tabulky. V levém sloupci jsou zachyceny jednotlivé souřadné systémy odpovídající kloubům manipulátoru. Souřadný systém end-effectoru do tabulky nezapíšeme. [69]

Tabulka 2 - Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka

q_n (kloub)	Θ_n	α_n	r_n	d_n
q_1	rotace kolem osy z_{n-1}	rotace kolem osy x_n	posun ve směru osy x_n	posun ve směru osy z_{n-1}

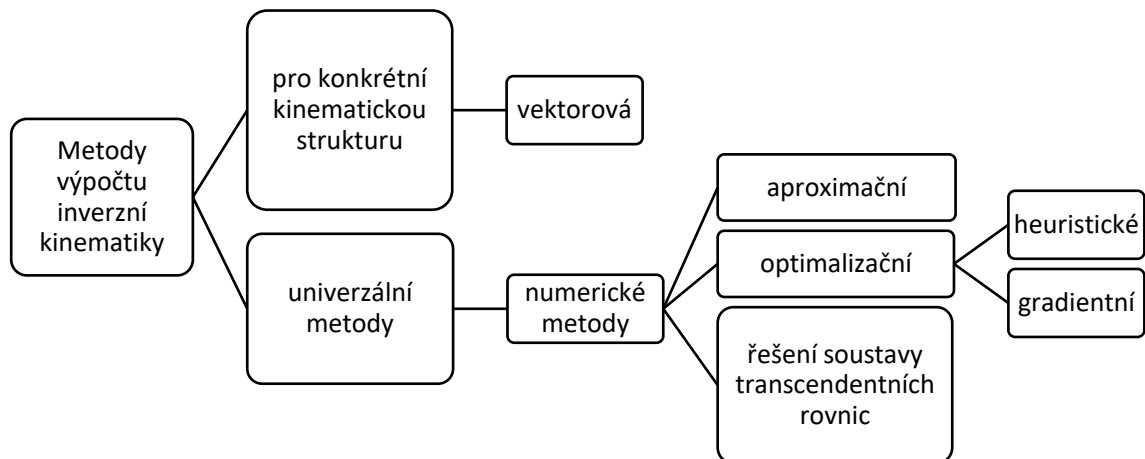
Zdroj: převzato z [69]

2.2.2 Nepřímá kinematika

Inverzní kinematická úloha vyžaduje poměrně komplikované výpočty, kterými se zabývají různá odborná pracoviště. Jejím základním kritériem je univerzálnost algoritmu tak, aby byl použitelný pro co nejširší škálu kinematických struktur a jejich počtu stupňů volnosti. Univerzální metody jsou aplikovány především u velkých CAD systémů, kde je rozhodující rychlost výpočtu, neboť řízení takového systému probíhá

mnohdy v reálném čase. Obecný přehled metod inverzní transformace dle jejich principu je zachycen níže. [11]

Obrázek 16 - Metody výpočtu inverzní kinematiky



Zdroj: vlastní tvorba dle [11]

Problematika inverzní transformace by vyžadovala mnohem delší a podrobnější popis, nicméně by to přesahovalo rámec této práce, a proto se jí zde nebudeme věnovat obsáhleji.

2.3 Analýza dostupných řešení na trhu

Vzhledem k povaze této práce nemá smysl zde podrobně uvádět řešení pro industriální účely, jakými jsou robotická (a kolaborativní) ramena společností FANUC nebo KUKA. Provedením i náklady na pořízení jsou zcela mimo rámec zkoumané oblasti. Nejpodobnějšími typy ramen od FANUC jsou LR Mate 200ic a ARC Mate 50iD/7L (6 DOF, dosah 704 respektive 911 mm s maximálním zatížením 5 a 7 kg a opakovatelností 0,02 a 0,018 mm), nicméně i menší z těchto robotů stojí repasovaný 8 500 USD (191 921,5 CZK dle kurzu ČNB k 15. 1. 2024). Použité robotické rameno s větším dosahem a podobným zatížením od společnosti KUKA je k prodeji za ještě vyšší částku. [70] [71] [72] [73] [74]

Dále je podrobněji popsáno řešení nákladově a technicky blíže srovnatelná s předmětným projektem: RoArm-M1, Braccio TinkerKit, MyPalletizer 260 Pi, MyCobot Pi a ViperX 300 od Trossen Robotics.

2.3.1 RoArm-M1

Robotické rameno RoArm-M1 je založeno na mikrokontroleru ESP32 a lze jej ovládat bezdrátově pomocí WiFi (webového klienta) a Bluetooth, anebo kabelem prostřednictvím USB/UART. Rameno má 5 servomotorů ST3215 (kontinuální 360° s točivým momentem 30 kg.cm a přídržným proudem 2,7 A), z nichž jeden ovládá otevírání a zavírání drapáku end-effectoru. Výrobce u ramene udává, že má 5 stupňů volnosti. Tělo robota je vyrobeno z hliníku, oceli a dle tvrzení výrobce též uhlíkových vláken. Rozsah pohybu je do 360 mm a přípustné zatížení ramene je 350 g v plném rozsahu a 850 g v rozsahu 120 mm od základny. Servomotory mají momentový zámek, který je možno odemkat a rameno vést ručně pro uložení a následování pohybu. Rameno je potřeba napájet 12 V. Cena tohoto ramene se pohybuje okolo 8-9 tis. CZK. [75] [76] [77]

2.3.2 Braccio TinkerKit

Rameno od společnosti Arduino je potřeba pohánět řídicí jednotkou Arduino, k níž se připojí Braccio Shield. Rameno má 6 servomotorů (2 servomotory SR311 180° s kroučícím momentem 9,1 respektive 3,8 kg.cm a 4 servomotory SR431 180° s momentem 12,2 nebo 14,5 kg.cm), z nichž jeden řídí otevírání a zavírání drapáku end-effectoru. Výrobce udává, že je ruka schopna pohybu v 6 stupních volnosti. Jednotlivé díly včetně drapáku jsou vyrobeny z plastu. Celkový dosah ramene je 320 mm a maximální zatížení udávané výrobcem činí 150 g. Rameno je třeba napájet 5 V či 6 V. Opakovatelnost výrobce neuvádí. Cena ramene je 6-7 tis. CZK. [78] [79]

2.3.3 MyPalletizer 260 Pi

Toto rameno je řízeno deskou Raspberry Pi 4B. Robot má 4 servomotory a 4 stupně volnosti. K robotovi je možné se připojit pomocí GPIO pinů, USB portů, Bluetooth, WiFi či ethernetového rozhraní. Manipulátor umožňuje řízení pomocí ROS. Manipulační prostor robotického ramene je 260 mm a maximální zatížení činí 250 g.

Opakovatelnost výrobce neuvádí. Maximální napětí pro napájení ramene je 12 V. Cena tohoto robota je necelých 20 tis. CZK. [80]

2.3.4 ViperX 300 Robot Arm

Robotické rameno ViperX 300 lze řídit ze stolního počítače prostřednictvím robotických systémů ROS, IRROS, GAZEBO, Python-ROS aj. Součástí HW ramene je konvertor ROBOTIS U2D2 pro USB-UART/RS-485. Samotné rameno je opatřeno 8 servomotory a umožňuje 5 stupňů volnosti. 6 z 8 servomotorů jsou Dynamixel XM540-W270-T a 2 servomotory Dynamixel XM430-W350-T. Oba typy je třeba napájet 12 V, přičemž první zmíněný typ je kontinuální 360° s točivým momentem 108 kg.cm a druhý typ je také kontinuální 360°, ale s menším točivým momentem, a to 42 kg.cm. Dosah ramene je 750 mm a doporučená maximální nosnost 750 g. Opakovatelnost manipulátoru při zátěži je 1 mm. Manipulátor je také možné doplňovat o vlastní navržené součástky. Toto robotické rameno převyšuje ostatní uvedená v mnoha parametrech i funkcích, ale také v ceně, která je za tento konkrétní model 127 tis. CZK. ViperX není rozhodně nákladově srovnatelný s manipulátorem, jenž je předmětem této bakalářské práce, ale jeho operační parametry jako maximální nosnost nebo dosah jsou obdobné, jako parametry projektovaného ramene. [81] [82] [83]

2.4 Roboty a průmysl 4.0

Stroje všeobecně usnadňují lidem život poměrně dlouho a následující sub-kapitola popisuje možnou budoucnost vývoje robotů a manipulátorů a jejich průmyslového využití.

První revolucí v průmyslu bylo zavedení mechanických parních strojů, poté nastoupila masová produkce využívající elektrickou energii. Třetí průmyslová revoluce byla založena na elektronice, robotech a průmyslové automatizaci. Stran čtvrté revoluce se jedná o spojení zařízení s datovými toky do jednoho digitálního celku, v jehož centru existuje „Chytrá továrna“ se schopností autonomně řídit a zefektivnit výrobní proces. Klíčovým prvkem této chytré továrny budou roboty. [84] [85]

Průmysl 4.0 se vyznačuje čtyřmi základními atributy:

- I. decentralizace** umožňující autonomní provoz jednotlivých továrních systémů, jež je možné operativně konfigurovat v návaznosti na aktuální potřeby;

- II. virtualizace**, díky níž je možné nasimulovat celé výrobní prostředí včetně jeho řízení, nároků na údržbu a energetické či lidské zdroje;
- III. interoperabilita**, tedy veškerá zařízení v rámci výrobního procesu spolu efektivně komunikují;
- IV. reálný čas**, veškeré procesy fyzické i kybernetické se odehrávají v reálném čase.

V souvislosti s atributy interoperability a decentralizace Průmyslu 4.0 je důležitých několik dalších faktorů: kolaborativní roboty, cloud, Big Data, takzvaná prediktivní údržba a sociální roboty. [84]

Kolaborativní roboty neboli „coboty“ jsou roboty, jež mohou samostatně fungovat a operovat v úzké spolupráci s lidmi. Robot sám neustále monitoruje a kalkuluje potenciální střet / kolizi s člověkem a předchází jí. Pro tyto účely již byly také implementovány postupy v rámci ISO norem (konkrétně EN ISO 10218 a ISO/TS 15066). Normy řeší nejen situace potenciální kolize robota jako takového s člověkem, ale také situace možné kolize end-effectoru či náradí, s nímž robot pracuje, s lidským pracovníkem. [85]

Dle aktuálního odhadu IoT, senzorka autonomních vozidel a průmyslových strojů generuje obrovské množství dat, přibližně 8 zettabytů (10^{21} bytů). Cílem je umět všechna tato data v reálném čase zpracovat, čímž se z Big Data stanou tzv. Smart Data, jež mohou být následně použita pro strategická rozhodnutí vyžadující rekonfigurace průmyslových systémů. De facto se Big Data stanou novou ropou 21. století. Toto obrovské množství dat bude třeba také někam ukládat. Zde se dostáváme k pojmu Cloud Robotics, kdy jednotlivé roboty budou umět přistupovat a číst potřebná sdílená data ze vzdáleného úložiště, čímž se průmyslová/robotická výroba stane flexibilnější. Na základě přístupu ke cloudu se mohou roboty také navzájem učit. [85]

Průmyslové robotické celky je třeba rovněž udržovat v kondici, v tomto případě se dostáváme k pojmu prediktivní údržba, tedy stavu, kdy mohou vzájemně se učící stroje snáze detekovat anomálie v rámci výrobního procesu a reagovat na ně v mnohem kratším čase, respektive zcela se jim vyhnout. Tímto mohou odpadnout dodatečné náklady spojené s fyzickou údržbou a zastavením produkce. Chytrou výrobu za účelem vyhnutí se výpadku produkce se již před čtyřmi lety začala zabývat například americká automobilka General Motors ve spolupráci s japonskou společností FANUC. GM totiž

vyčíslila, že zastavení produkce ji každou minutu stojí více než 20 000 USD / hodinu. [85] [86] [87]

Posledním zmíněným pojmem navazujícím na výše uvedené jsou sociální roboty. De facto jde o roboty navzájem komunikačně provázané a sdílející informace o sobě samých nebo o výrobě a jejích aktuálních změnách. Takovéto roboty fungují jako uživatelé sociálních sítí, nezávisle na sobě obdrží určitou informaci, již se přizpůsobí a posléze si navzájem vymění „zkušenosti“ a rekonfigurují své parametry na optimální výrobu. [85]

3 Praktická část

3.1 Návrh mechanické konstrukce manipulátoru

3.1.1 Mechanické požadavky

- Nosnost 0,5 kg a plynulý a koordinovaný pohyb ve všech směrech
- Velikost manipulačního prostoru od základny k EF alespoň 900 mm
- Jednoduché manuální i automatizované ovládání a výměna nástavců

3.1.2 Základny manipulátoru

Fyzická konstrukce ramene se skládá ze dvou základen a tří ramen. První základna je statická, druhá základna je již pohyblivá s tím, že je umístěna na první z použitých rotačních pohonných jednotek.

Důvodů pro použití dvou základen je několik. Prvním z nich je umístění zdroje napájení (trakční baterie) pod samotnou konstrukci ramene tak, aby zbytečně nepřekážela a celý manipulátor rovněž nezabíral další místo. Dále bylo třeba nadsadit vzdálenosti prvního a druhého rotačního kloubu za účelem dodržení cíle práce – velikosti operačního prostoru minimálně 90 cm od základny a zároveň tím mechanicky zkrátit potřebnou délku jednotlivých ramen.

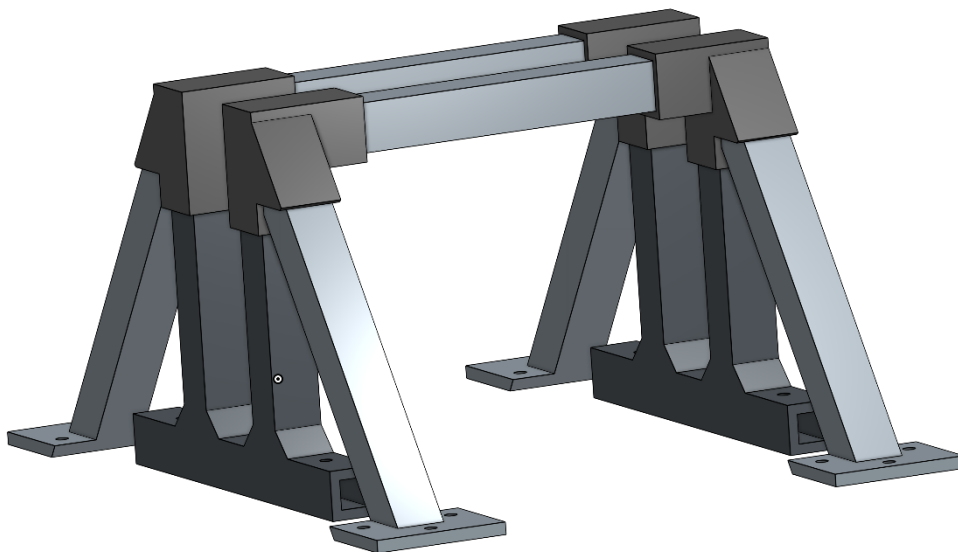
Delší ramena by prakticky znamenala potřebu použití silnějších a tím pádem i větších a těžších pohonných jednotek, což by vedlo patrně k větší a těžší konstrukci celé ruky. Ve spojení s nosností a operabilitou autonomního vozidla není toto řešení žádoucí. Autor navrhoval konstrukci a použití dílů pro montáž jednotlivých ramen tak, aby byla ramena, pokud možno pevná a zároveň co nejlehčí. Autor bral v potaz cenu použitých materiálů.

Původní návrh konstrukce statické základny počítal s využitím hliníkových profilů o čtvercovém průřezu a straně 20 mm a ocelových I-profilů pro účely spojování. Při sestavování prototypu základny došel autor k poznání, že takováto konstrukce vyžaduje velkou přesnost řezů a vrtání. Bohužel požadované přesnosti a lícování jednotlivých dílů toto nesplňovaly. Tak došlo ke změně návrhu a vytvoření přesných dílů za pomoci 3D tisku. Materiálem pro jednotlivé díly je PETG.

PETG je díky své houževnatosti a dobré mechanické a teplotní odolnosti vhodný materiál pro tisk technických dílů [88].

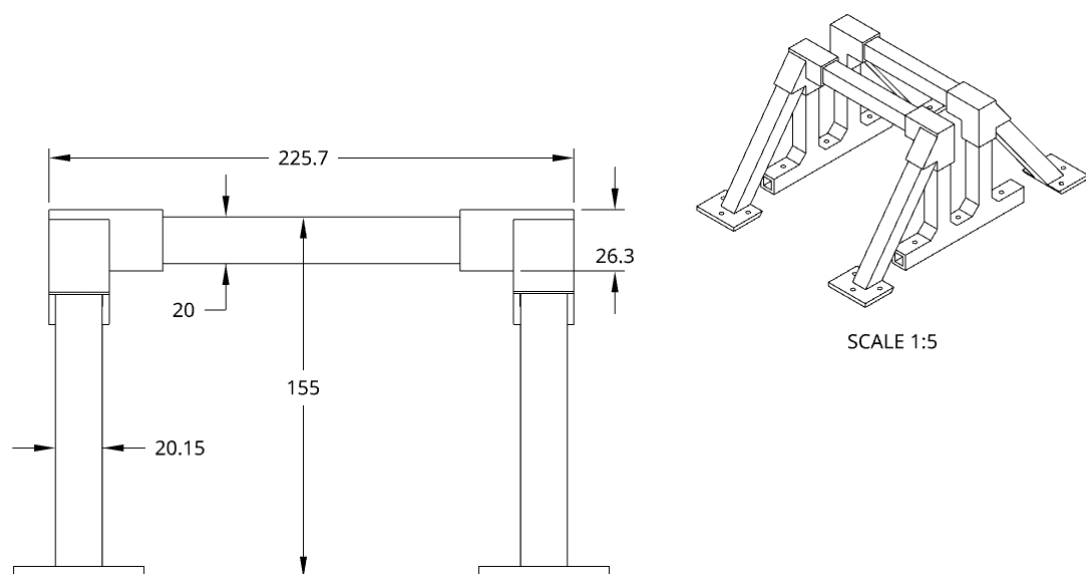
Pro účely konstrukce mohl autor využít prostory a nástroje Laboratoře aditivní výroby v budově Ústavu pudivní biologie rostlin na Biologického centra AVČR. Níže jsou zachyceny 3D modely obou návrhů, technický výkres a fotografie ze samotného konstruování.

Obrázek 17 - 3D model statické základny



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

Obrázek 18 – Technické parametry statické základny (v mm)



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

Obrázek 19 - Foto původní základny z ALU



Zdroj: autor

Obrázek 20 - Foto PETG základny s umístěným servem



Zdroj: autor

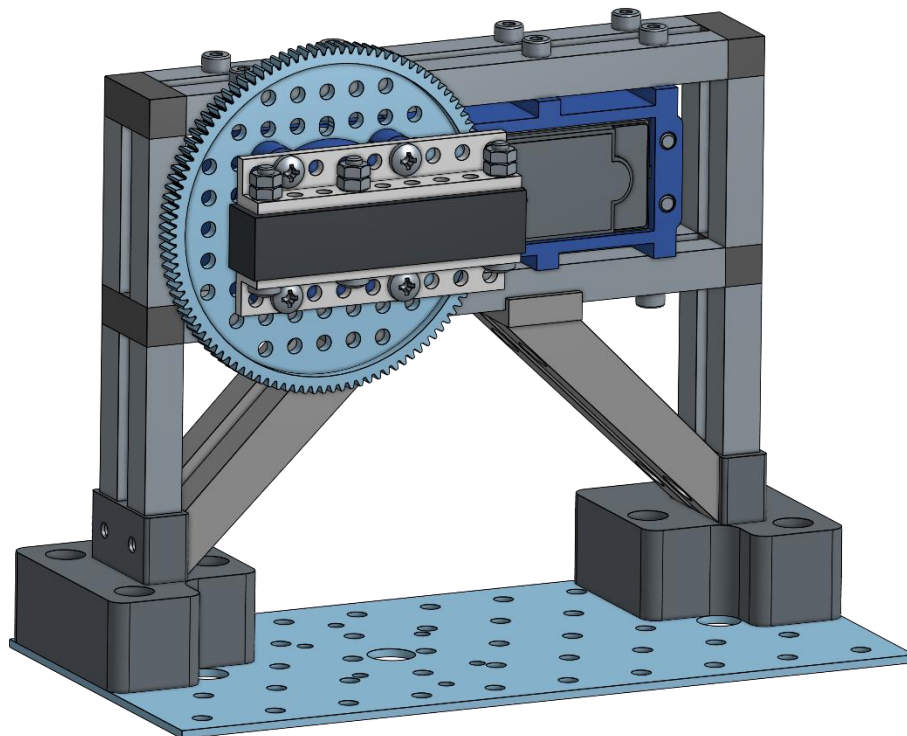
Základem druhé, rotační základny, je ocelový děrovaný plát o rozměrech 200x100x2 mm. Ten je uchycen na převodovém kole prvního rotačního kloubu (J1) pomocí šesti šroubů M4.

K tomuto plátu je uchycena nástavba s druhým rotačním kloubem a nosič elektronických součástek a řídicí jednotky. Nástavbu tvoří především hliníkové profily se čtvercovým průřezem o straně 10 mm, jež jsou spojené pomocí článků z PETG a přišroubované k ocelovému plátu a šasi servomotoru.

Do ocelového plátu, byť je děrovaný, bylo třeba přesně vyvrtat díry pro uchycení ke kloubu J1 a pro vedení kabeláže ze zdroje napájení umístěného pod manipulátorem. Rotační klouby J1 a J2 totiž obsahují otvory, kudy je možné (v případě nutnosti) vést vodiče, aniž by došlo k jejich překroucení. Tím pádem lze zcela mimo manipulátor od zdroje napájení vést vodič i skrze plát, jenž mění svoji polohu, aniž by se vodič zničil nebo zamotal do konstrukce.

Na obrázku níže je zachycen model druhé základny s nástavbou a uchyceným servomotorem J2, za povšimnutí stojí také upravený ocelový plát s novými otvory pro šrouby a vedení kabelů.

Obrázek 21- 3D model rotační základny



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

3.1.3 Ramena manipulátoru

Vedle nastavby s kloubem J2, disponuje manipulátor třemi rameny o následujících parametrech:

Tabulka 3 - Parametry ramen manipulátoru

Označení	Délka profilu (mm)	Vzdálenost mezi osami otáčení (mm)
Nástavba L1	-	135
Rameno L2	378	340
Rameno L3	360	334
Rameno L4	90	-

Zdroj: autor

Ramena svojí délkou a z toho vyplývající vzdáleností os otáčení jednotlivých pohonných jednotek musí po připočtení nadsazení kloubu J2 a usazení end-effectoru splňovat jeden z cílů práce, a to, aby maximální manipulační prostor ramene činil alespoň 900 mm.

Původně měla délka profilu ramene L2 být 380 mm, ale po fyzickém řezání, které i za pomoci relativně dobrých nástrojů zde ubralo na materiálu ALU profilu, uvádí autor reálnou délku L2.

Profily všech tří ramen jsou necelých 830 mm (828 mm) a vzdálenost od osy otáčení kloubu J1, až po hranu PETG krytu servo-páky ramene L4 činí 890 mm. Tedy po nasazení/připnutí end-effectoru je splněn cíl práce stran maximálního operačního prostoru alespoň 900 mm.

3.1.4 End-effectory

Dalším cílem práce byla univerzálnost použití takovým způsobem, aby poslední rameno umožňovalo upnutí různého příslušenství, ergo neomezovalo se pouze na jeden end-effector.

Tohoto cíle bylo dosaženo mechanickou úpravou posledního hliníkového profilu. Byly do něj vyvrtány dva otvory pro šrouby o průměru M4. Zároveň byl ponechán prostor mezi koncem profilu ramene L4 a krytem páky kloubu J4 v délce 40 mm pro možnost nasazení jiného nástavce dle potřeb uživatele.

Na snímcích níže je zachycen otevřený konec ramene L4 a jednotlivé (rozdílné) end-effectory/nástavce, jež autor využíval při testování. Následuje také model profilu s roztečí a průměrem otvorů pro šrouby k upevnění nástavce.

Obrázek 22 - Otevřené rameno L3 a EF s rozprašovačem



Zdroj: autor

Obrázek 23 - EF s rotačními čelistmi (vlevo) a statickými (vpravo)



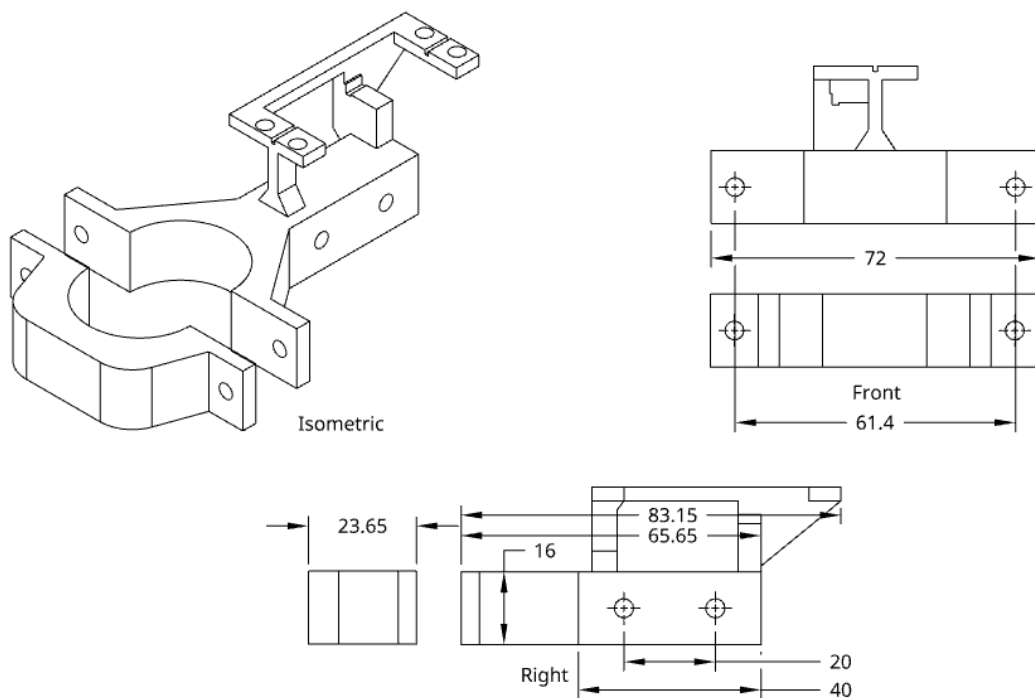
Zdroj: autor

Na robotické rameno je možné upnout různé typy nástavců, jak je zachyceno na fotografiích výše. Autor pro demonstraci využíval dva typy upravených čelistí: jedny

s možností rotace kolem osy X a jedny statické. Třetím end-effektorem byl speciálně vyrobený nástavec s rozprašovačem – pro dezinfekci madel/klik dveří. Samotné rozprašování je řešeno pomocí táhla upevněného z jedné strany na páku servomotoru a z druhé strany nasazeného na madlo lahve pro rozprašování. Nástavec na lahev je vyroben specificky pro zobrazený typ lahve.

Parametry nástavce pro zmíněný konkrétní rozprašovač jsou zachyceny na obrázku níže. Dále následuje fotografie kompletního end-effektoru včetně upnutého rozprašovače.

Obrázek 24 – Parametry nástavce pro rozprašovač (v mm)



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

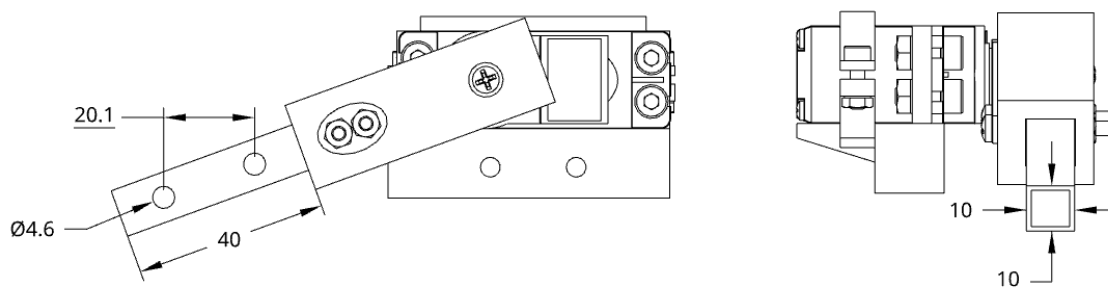
Obrázek 25 - Kompletní EF s rozprašovačem



Zdroj: autor

Je třeba dodat, že pro upnutí vlastního nástavce je ovšem třeba vyrobit úchyt, který bude splňovat parametry dané průměrem ramene L4 a roztečí šroubů. Autor doporučuje nástavce uchyťovat šrouby velikosti M4, alternativně M3.5 a délkou 20 mm či větší.

Obrázek 26 - Parametry otevřeného konce ramene L4 pro upnutí nástavců (v mm)



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

Níže jsou v tabulce zachyceny údaje o maximálním dosahu ramene v závislosti na použitém typu end-effektoru. Vzdálenosti jsou měřeny od středu velkého ozubeného kola rotačního kloubu J1 po špičku uzavřených čelistí při vzpřímené poloze všech ramen. Strany rozprašovače byla vzdálenost měřena také od kloubu J1, ale po konec nástavce s upnutou rozprašovací lahví, respektive po hranu madla lahve.

Tabulka 4 - Maximální dosahy manipulátoru v závislosti na použitých EF

Typ end-effektoru	Dosah manipulátoru (v mm)
Rozprašovač	950
Statický drapák	1020
Drapák s možností rotace	1050

Zdroj: autor

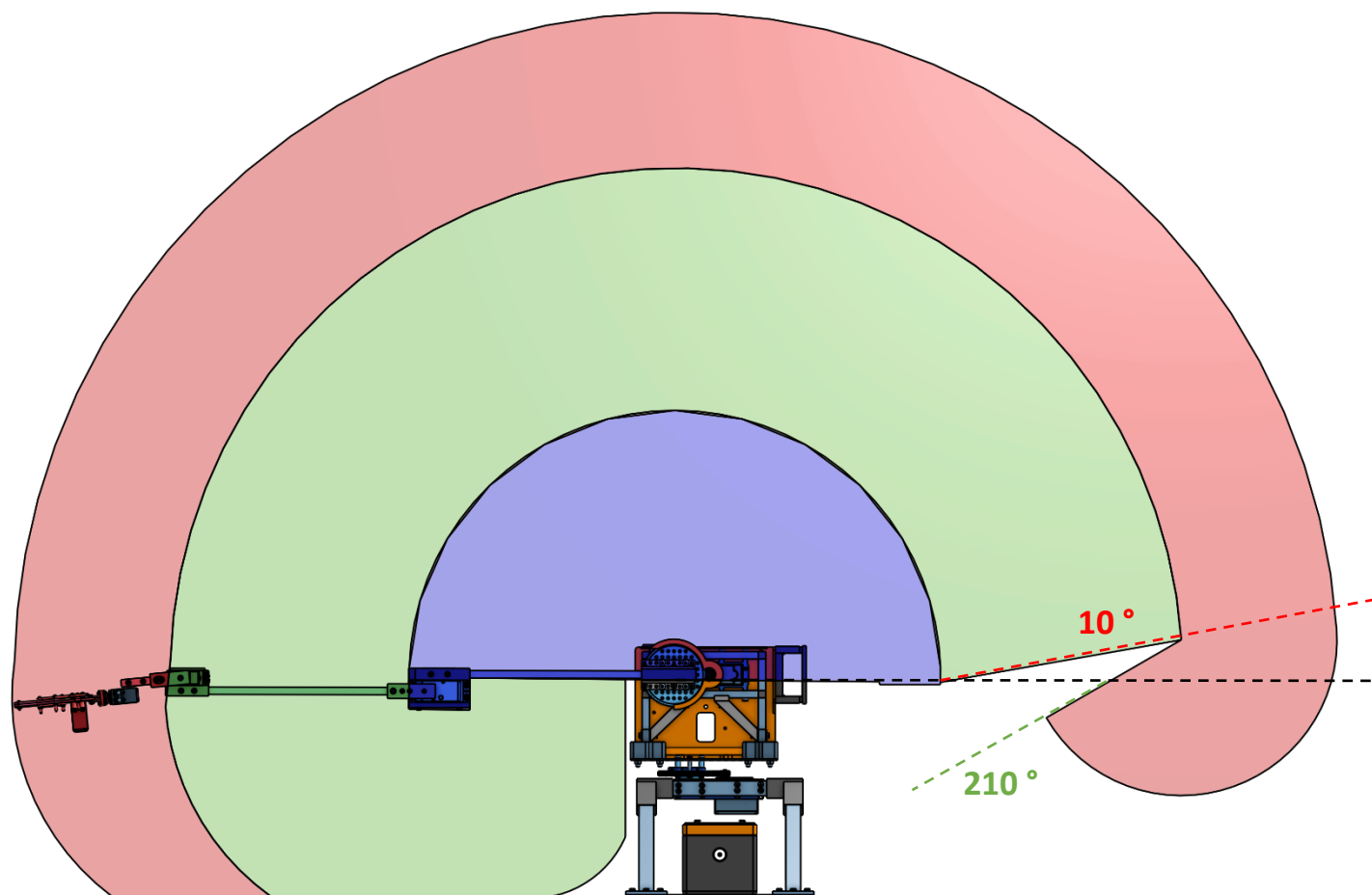
V případě použití všech tří end-effektorů a de facto jakýkoli dalších uživatelem vyrobených/používaných end-effektorů je stanovený dosah ramene (900 mm) převyššen.

3.1.5 Pracovní prostor manipulátoru

Velikost pracovního prostoru se liší v závislosti na upnutém koncovém nástavci. Na následující straně je k dispozici schéma zachycující pracovní prostor předmětného manipulátoru s end-effectorem s největší délkou.

Dosah každého ramene je ve schématu znázorněn odlišnou barvou.

Obrázek 27 - Pracovní prostor manipulátoru



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

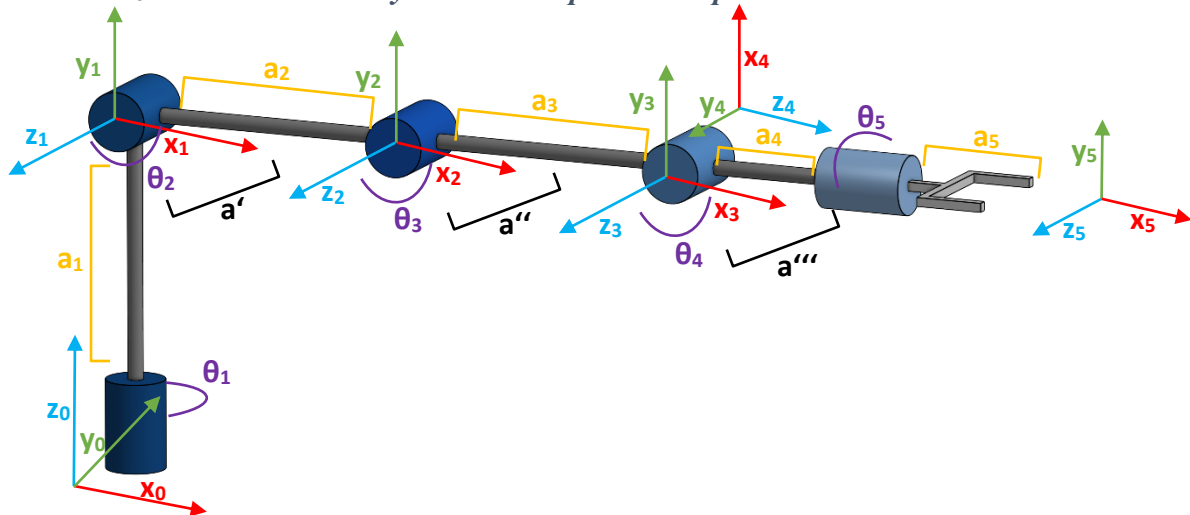
3.1.6 Denavit-Hartenbergova notace

Manipulátor má čtyři až pět stupňů volnosti v závislosti na použitém end-effectoru. Je tomu z toho důvodu, že end-effektory rozprašovače a statických čelistí se hýbou v důsledku rotace kolem osy y „zápětním“ kloubem J4.

Třetí end-effector (rotační čelisti) má na sobě upnuté dva motory, přičemž jeden ovládá stisk čelistí a druhý rotuje celými čelistmi kolem osy x, čímž může měnit polohu nošeného předmětu vůči základnímu LCS, ergo zvyšuje počet stupňů volnosti na 5.

Níže jsou zachyceny kinematické diagramy manipulátoru při čtyřech i pěti stupních volnosti. Pod každým diagramem následuje Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka.

Obrázek 28 - Kinematický model manipulátoru v provedení 5 DOF



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

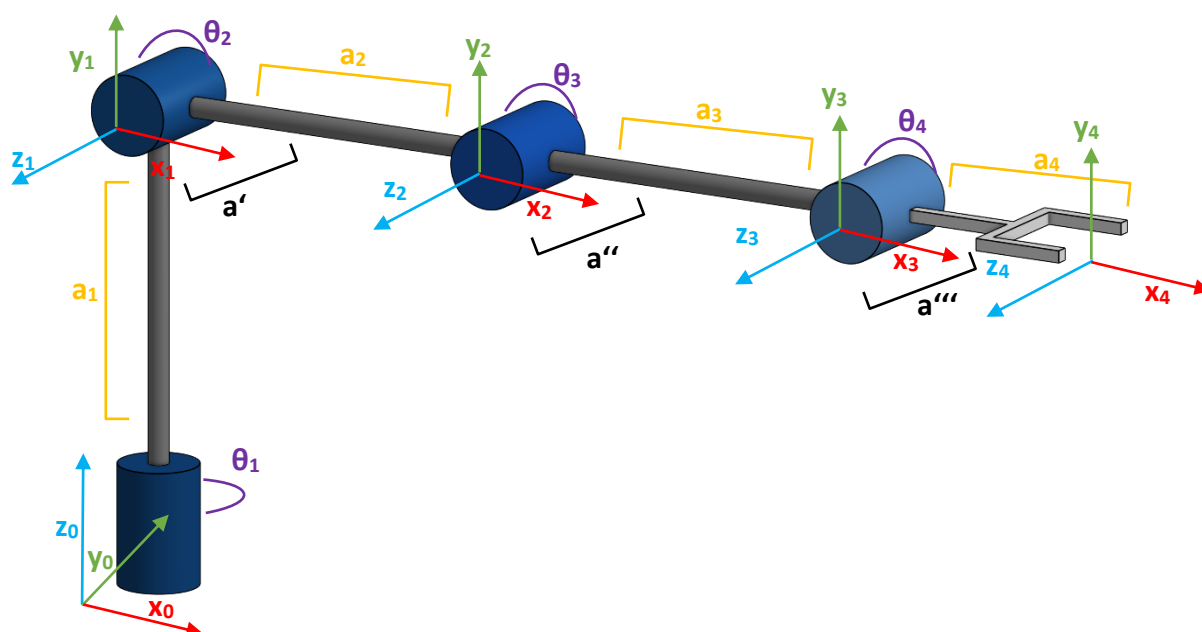
Na kinematické schéma jsou aplikovaná pravidla uvedená v kapitole 2.2.1. U posledního rotačního kloubu by nebylo možné splnit pravidlo v souvislosti s kolmostí osy „x“ na osu „z“ z předešlého souřadnicového systému, tudíž je nutné posunout počátek rámce o délku a_4 zpět. Parametry a' , a'' a a''' znázorňují posunutí EF ve směru osy z_{-1} vůči základně.

Tabulka 5 – Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka pro variantu 5 DOF

q_n (kloub)	θ_n	a_n	r_n (mm)	d_n (mm)
1	θ_1	90	0	135
2	θ_2	0	340	30
3	θ_3	0	334	45
4	θ_4	0	0	35
5	$90 + \theta_5$	90	235	235

Zdroj: autor

Obrázek 29 - Kinematický model manipulátoru v provedení 4 DOF



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

Tabulka 6 - Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka pro variantu 4 DOF (EF s rozprašovačem)

q_n (kloub)	θ_n	α_n	r_n (mm)	d_n (mm)
1	θ_1	90	0	135
2	θ_2	0	340	30
3	θ_3	0	334	45
4	θ_4	0	135	35

Zdroj: autor

Tabulka 7 - Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka pro variantu 4 DOF (EF se statickými čelistmi)

q_n (kloub)	θ_n	α_n	r_n (mm)	d_n (mm)
1	θ_1	90	0	135
2	θ_2	0	340	30
3	θ_3	0	334	45
4	θ_4	0	205	35

Zdroj: autor

V Tabulce 5 jsou pro pátý kloub, ve čtvrtém a pátém sloupci uvedeny hodnoty odpovídající délce nasazeného EF na otevřeném konci, přičemž první hodnota odpovídá vzdálenosti mezi osou otáčení J4 a J5, druhá hodnota pak délce čelistí. Hodnota pro posunutí ve směru osy z (d_n) je vzdáleností mezi osami otáčení kloubů J1 a J2 upevněného na nástavbě.

Hodnoty v tabulkách šest a sedm v případě čtvrtého kloubu odpovídají vzdálenostem od osy otáčení J4 po konce EF statických čelistí a nástavce na rozprašovač.

3.2 Použitý hardware

Následující kapitola pojednává o použitém HW pro konstrukci manipulátoru.

3.2.1 Servomotory

Stran výběru pohonných jednotek pro daný projekt hrálo roli několik faktorů:

- točivý moment;
- váha motoru;
- přesnost řízení;
- zpětná vazba ve vztahu k natočení hřídele;
- cenová a tržní dostupnost;
- stejný (nebo velmi podobný) rozsah napájecího napětí.

V neposlední řadě před výběrem vhodných pohonných jednotek byl také proveden průzkum retailových nabídek manipulátorů (parametricky obdobných předmětné konstrukci), viz kapitola 2.3.

Z hlediska výše uvedených podmínek bylo rozhodnuto o výběru servomotorů pro jednotlivé klouby ramene. V úvahu původně připadaly také krokové motory vyznačující se velmi přesným chodem díky mikrokrokům. Nicméně, jejich nedostatkem je poměr hmotnosti a točivého momentu potřebného pro aplikaci a také cena, pokud je potřeba velký kroutící moment.

Před výběrem bylo třeba zjistit točivý moment potřebný pro zvednutí nejen finálního objektu o váze 0,5 kg nebo lahve s dezinfekcí, ale také ostatních součástí uložených na jednotlivých ramenech.

Provedeme-li výpočet pro jednotlivé klouby ramene (vyjma rotačního kloubu základny, který musí unést pouze váhu samotného manipulátoru, jehož těžiště leží přibližně v ose otáčení a motor nemusí při rotaci překonávat gravitaci násobenou vahou manipulátoru), dostaneme následující:

Rovnice 9 - Výpočet točivého momentu

$$\tau = F_g r \sin(\theta)$$

Zdroj: převzato z [89] [90]

Kde τ je točivý moment a $F_g r$ gravitační zrychlení vynásobené polovinou délky ramene (jinak lze označit také $\frac{L}{2}$) a sinem úhlu mezi vektorem síly a ramenem.

Pro účely zvednutí předmětu lze rovnici přepsat do tvaru:

Rovnice 10 - Upravený výpočet točivého momentu

$$\tau = F_g r \cos(\theta)$$

Zdroj: převzato z [89] [90]

Tedy, mám-li rameno minimálně o délce 0,9 m a potřebuji-li uzvednout 0,5 kg a vím, že gravitační zrychlení je $9,8 \text{ m/sec}^2$, dostanu výsledek 4,41 Nm. Pro výpočet uvažujeme s tzv. nejhorším možným scénářem, v němž rameno drží závaží v poloze paralelně se zemí, a tedy úhel mezi ramenem a zemí je 0. Po převodu na kg.cm (běžně uváděné jednotky ve specifikacích servomotorů) tato hodnota odpovídá 44,97 kg.cm. Pro převod byl použit dostupný převodník veličin [90].

Tento zjednodušený výpočet můžeme aplikovat na všechny klouby. Hodnoty točivého momentu pro jednotlivé servomotory jsou společně s celkovými délkami ramen znázorněny v tabulce níže. Pro každé rameno jsou vzaty v úvahu také jednotlivé demonstrační typy end-effectorů: EF1 – rozprašovač, EF2 – statické čelisti, EF3 – rotační čelisti (každý má jinou délku).

Tabulka 8 - Hodnoty točivého momentu pro jednotlivé servomotory

Rameno	Délka řetězce (m)	Kloub	Točivý moment (Nm)	Točivý moment (kg.cm)
L2 + EF1	0,809	J2	3,96	40,38
L2 + EF2	0,879	J2	4,31	43,95
L2 + EF3	0,909	J2	4,45	45,38
L3 + EF1	0,469	J3	2,30	23,45
L3 + EF2	0,539	J3	2,64	26,92
L3 + EF3	0,569	J3	2,79	28,45
L4 + EF1	0,135	J4	0,66	6,73
L4 + EF2	0,205	J4	1,00	10,20
L4 + EF3	0,235	J4	1,15	11,73

Zdroj: autor

Výpočty výše mohou dát hrubou představu o potřebném točivém momentu. Do výpočtu však není zahrnut moment setrvačnosti. Rovněž výpočet neuvažuje s vahou jednotlivých komponentů umístěných na jednotlivých ramenech (a end-effectorech) ani s vahou ramen jako takových.

Pro tyto účely existuje dostupný kalkulátor [92], který jako vstupy bere výše uvedené proměnné. Na základě všech vstupů jsou vypočítány hodnoty točivého momentu pro každý servomotor následovně (opět uvažujeme se třemi předmětnými end-effectory):

Tabulka 9 - Výpočet točivého momentu servomotorů pro zdvih předmětu o váze 0,5 kg se zahrnutím momentu setrvačnosti a vah ramen a dalších komponent

Kloub a EF	Potřebný točivý moment (kg.cm)
J2 + EF1	78,53
J2 + EF2	86,00
J2 + EF3	91,81
J3 + EF1	38,05
J3 + EF2	43,68
J3 + EF3	47,08
J4 + EF1	8,89
J4 + EF2	12,71
J4 + EF3	13,77

Zdroj: autor s pomocí výpočtu z [92]

Příklad se zadanými parametry s nástavcem pro rozprašovač je zachycen na obrázku níže.

Obrázek 30 - Příklad výpočtu točivého momentu s pomocí kalkulátoru (pro EF rozprašovač)

L: [cm]	M: [kg]	A: [kg]	T: [kg cm]
L1: 5	M1: 0	A1: 0.583	T1: 2.915
L2: 9	M2: 0.0081	A2: 0.077	T2: 8.891449999999999
L3: 33.4	M3: 0.0300	A3: 0.190	T3: 38.052989999999994
L4: 34	M4: 0.0310	A4: 0.287	T4: 78.53339
L5: 0	M5: 0	A5: 0	T5: 0
L6: 0	M6: 0	A6: 0	T6: 0

Zdroj: převzato z [92]

Vstupy do kalkulátoru jsou brány od end-effectoru dále. L1 v tomto případě znamená délku EF (zkrácenou o 4 cm, které se překrývají s otevřeným koncem ramene L4). M1

je hmotnost ramene EF, zde je 0, neboť konstrukce držáku rozprašovače je započítána do hmotnosti drženého předmětu. Parametr A1 zachycuje hmotnost drženého předmětu včetně hmotnosti servomotoru pro rozprašování a váhy PETG nástavce. Údaj ve čtvrtém sloupci je točivý moment.

Výpočty na jednotlivých řádcích jsou provázané, tudíž změny jakýkoli parametrů v řádcích výše změni hodnoty v nižších řádcích atd.

Hmotnost hliníkových profilů (M1 až M4) 10 * 10 mm pro jednotlivá ramena je 0,9g/cm. Údaj o hmotnosti servomotorů (A2 a A3) zahrnuje taktéž hmotnost PETG nástavců, v nichž jsou motory uchyceny. Hmotnost čelistí (včetně servomotoru pro ovládání stisku) byla uvedena pro další výpočty jako parametr M1, přičemž hmotnost čelistí bez dodatečného servomotoru pro rotaci je 137 g a hmotnost čelistí s rotací 209 g.

Konstrukce manipulátoru se všemi použitými end-effectory zahrnuje celkem osm servomotorů o různých velikostech a různých parametrech. Se získanými údaji o jednotlivých točivých momentech pohonných jednotek a s přihlédnutím k výše požadovaným faktorům byly vybrány následující servomotory.

Kloub J1 (základna) – 7:1 Hitec HS-788HB Servo

Jedná se o kloub základny manipulátoru, na jehož převodovém kole je přimontována druhá, rotační základna. Design servomotoru je patentem společnosti goBILDA. Servomotor má nad rámec skrytého převodového ústrojí také dvě ozubená převodová kola v převodovém poměru 7:1, díky čemuž dosahuje točivého momentu až 92,4 kg.cm. Váha servomotoru je 289 g, požadovaný rozsah napájecího napětí 4.8 až 6 V a jeho rychlost bez zátěže činí 37°/s. Rozsah řídicího signálu je zde 600-2400 μs. Celý servomotor je upevněn do pevného hliníkového šasi. [93]

Kloub J2 (ramenní kloub) – 9:1 Hitec HS-788HB Servo

Tento motor vyžadoval největší točivý moment, neboť musí unést celou váhu ruky včetně nákladu. Dle výpočtů výše bylo nutné, aby jeho točivý moment byl vyšší než 91,91 kg.cm. Po průzkumu dostupných servomotorů na trhu bylo rozhodnuto o pořízení servomotoru rovněž od společnosti goBilda, a to ze stejné řady, jako servomotor pro základnu. Zde je třeba zdůraznit, že nákup obou pohonných jednotek probíhal na konci

roku 2021 a nabídka motorů se od té doby změnila. Společnost dnes nabízí za totožnou cenu modifikované verze s mnohem větším kroutícím momentem.

Samotný servomotor pro ramenní kloub má opět převodová ozubená kola v poměru 9:1 a dosahuje točivého momentu 118,8 kg.cm. S touto hodnotou převyšuje hodnotu požadovanou. Motor je upevněn v šasi a jeho celková hmotnost je 287 g. Potřebný rozsah napětí pro napájení je 4,8 až 6 V. Rozsah řídicího signálu pro tento motor je opět 600-2400 μ s a rychlost bez zátěže 29°/s. [94]

Na fotografiích níže jsou zachyceny oba předmětné servomotory (fyzicky vypadají téměř totožně, ale liší se ozubením).

Obrázek 31 - Hitec HS-788HB Servo 7:1 ratio (vlevo) a HS-788HB Servo 9:1 ratio (vpravo)



Zdroj: převzato z [93] [94]

Kloub J3 (loketní kloub) JX DS5160 SSG

U tohoto kloubu bylo již nutné vedle točivého momentu řešit také váhu servomotoru a design pro možnosti uchycení, neboť tento je uložen na konci ramene L2. Vzhledem k potřebnému momentu, velikosti a váze přistoupil autor k nákupu servomotoru od čínské společnosti JX. Konkrétně se jedná o typ DS5160 SSG s vahou 158 g, rozsahem napájecího napětí 6-8,4 V a maximálním kroutícím momentem 70 kg při 8,4 V. Rozměrově a ku svému výkonu je motor relativně malý: 65 mm, 30 mm a 56,8 mm. Rychlost otáčení je poměrně vysoká a to 60°/0,13 sec. Rozsah řídicího signálu se pohybuje v rozmezí 500-2500 μ s a přídržný proud je při 8,4 V 6,2 A. Výrobce Shantou JiXian Electronic Technology Co., Ltd. Tento motor již ve svém portfoliu (na

webových stránkách) nenabízí – v době nákupu byl pořízen přes Ali-Express, neboť nebyl tento servomotor, ani parametricky obdobný, v době sestavení k dispozici na tuzemském trhu. Nyní je k dispozici například zde [95] nebo zde [96].

Obrázek 32 - Servomotor JX DS5160 SSG



Zdroj: převzato z [95]

Kloub J4 (zápěstí) – JX PDI-6225MG-300

Tento servomotor je kloubem pro zápěstí rotující kolem osy **z3** dle kinematického modelu pro rameno o pěti stupních volnosti. Servomotor váží 62 g a potřebuje pro svůj chod napětí o rozsahu 4,8-6 V. Maximální kroutící moment při 6 V je 25,32 kg.cm. Servomotor lze ovládat prostřednictvím pulzně šířkové modulace v rozsahu 500-2500 μ s. Rozměry je tento servomotor malý, a to 40,5 x 20,2 x 38 mm. [97] Z hlediska tahu dle výpočtu je pro účely zdvihu EF se zátěží dostačujícím.

Obrázek 33 - JX PDI-6225MG-300



Zdroj: převzato z [97]

Servomotory pro ovládání EF

Zbývající čtyři servomotory slouží k ovládání prvků na end-effectorech. Jeden z motorů je upevněn na nástavci pro rozprašovač. Dva jsou na rotačních čelistích, kde jeden motor ovládá stisk čelistí a druhý motor rotaci kolem osy **z₄** dle kinematického diagramu ramene s pěti stupni volnosti. Poslední zbývající motor ovládá stisk čelistí bez rotace.

Všechny čtyři motory jsou od společnosti TowerPro. Konkrétně se jedná o typ menšího servomotoru MG955. Servomotor váží 55 g s rozměry 40,7 x 19,7mm x 42,9 mm. Rozsah napájecího napětí je u tohoto typu 4,8 až 6 V s točivým momentem 13-15 kg.cm. Výrobce i prodejce zde uvádí točivý moment trochu jiný. Šíře řídicího impulsu je mezi 500 a 2500 μ s. Výrobce uvádí přídržný proud u tohoto servomotoru 1,2 A. [98] [99]

Tabulka 10 - Parametry vybraných servomotorů

Motor	Max. točivý moment (kg.cm)	Hmotnost (g)	Šíře řídicího pulsu (μ s)	Napájecí napětí (V)
7:1 Hitec HS-788HB Servo	92,4	289	600-2400	4,8 - 6
9:1 Hitec HS-788HB Servo	118,8	287	600-2400	4,8 - 6
JX DS5160 SSG	70	158	500-2500	6 - 8,4
JX PDI-6225MG-300	25,32	62	500-2500	4,8 - 6
TowerPro MG995	15	55	500-2500	4,8 - 6

Zdroj: autor

3.2.2 Řídící jednotka

Při výběru řídicí jednotky bylo třeba zhodnotit požadavky na projekt. V tomto případě bylo nutné, aby řídicí jednotka umožnila následující:

- dostatečný výpočetní výkon pro provádění jednotlivých operací;
 - rovněž pro simultánní běh vícera aplikací;
- zajištění běhu několika procesů/aplikací naráz;
- zajištění dostatečného počtu I/O pinů pro připojení a řízení motorů, nebo možnost připojení driver HATu pro tento účel;
 - v případě rozšíření do budoucna pro připojení dalších periférií a senzoriky;

- původní záměr počítal také s využitím pinů pro komunikaci přes rozhraní UART;
- vzdálenou správu;
 - prezenci uživatelského rozhraní pro účely kódování a úpravy projektu (v případě nemožnosti vzdálené správy);
- bezdrátové připojení k síti (případně kabelem, je-li potřeba).

Vzhledem k výše popsanému byla vybrána vývojová deska Raspberry Pi. Jedná se konkrétně o typ 4 Model B s operační pamětí 2 GB.

Raspberry Pi 4 Model B disponuje 64bitovým procesorem quad-core ARM Cortex-A72, Broadcom BCM2711o frekvenci 1,5 GHz. Deska má GPIO header se 40 piny a umožňuje připojení přes 2,4 i 5GHz IEEE 802.11b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 5.0 a také BLE (Bluetooth Low Energy). K internetové síti je možné tento model vývojové desky připojit i skrze rozhraní ethernet s maximální přenosovou rychlostí 1 Gb/s. [100]

Raspberry Pi 4 Model B lze napájet prostřednictvím USB-C, GPIO pinů (2, 4 a 6) nebo prostřednictvím PoE, přičemž tato metoda vyžaduje nákup PoE HATu. Deska musí být napájena 5 V při minimálním proudu 3 A. [100]

Ve vztahu k vyjmenovaným funkcionalitám disponuje vybraná vývojová deska dostatečným výkonem pro provádění výkonného kódu. Jelikož je na Raspberry Pi nainstalovaná také jedna z distribucí operačního systému Linux (Raspberry Pi OS) [101], umožňuje řídicí jednotka správu mnoha procesů najednou, a tak je možné zapnout (i na pozadí) simultánně potřebné aplikace (zde konkrétně tři serverové aplikace).

Operační systém má vlastní grafické rozhraní pro práci přímo na vývojové desce při udržení jistého uživatelského komfortu. K Raspberry Pi je však možné se připojit vzdáleně například přes Putty nebo přes VNC či Team Viewer.

Čtyřicetipinový header je dostatečný pro možná budoucí sensorická rozšíření, nicméně pro účely ovládání více servomotorů je nutné připojit příslušný driver HAT. Raspberry Pi 4 Model B disponuje totiž pouze čtyřmi piny s hardwarovou pulzně šířkovou modulací. Konkrétně se jedná o piny 32, 33 35 a 12 (GPIO 12, GPIO 13, GPIO 19 a GPIO 18). [102]

3.2.3 Servo Driver HAT

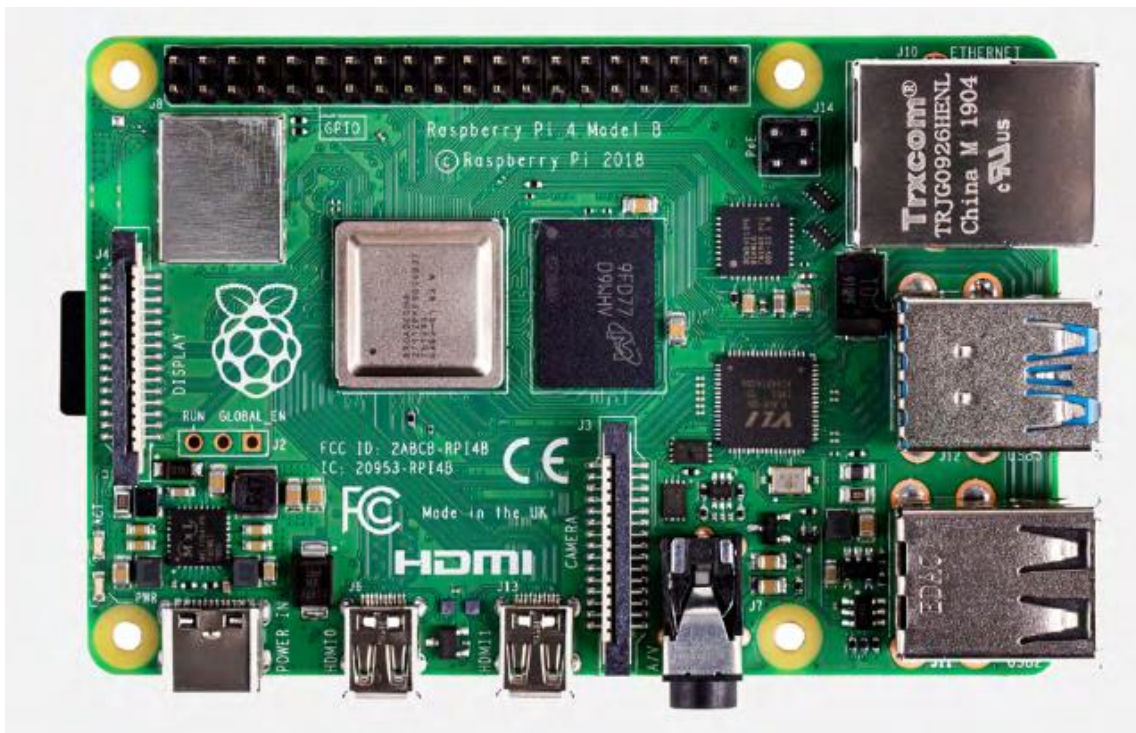
Vzhledem k nemožnosti využití více než čtyř pinů s HW PWM bylo nutné zakoupení HATu pro řízení servomotorů. Pro účely aplikace byl využit Servo Driver HAT od společnosti Waveshare s 12bitovým čipem PCA9685 a šestnácti řídicími kanály. Driver HAT je možné rovnou nasadit na pinhead Raspberry Pi, nebo připájet vlastní piny po straně HATu a připojit vodiči. Při připojení na pinhead vývojové desky je nutné v systémové konfiguraci povolit komunikaci přes rozhraní I²C [103].

HAT lze napájet z Raspberry Pi (5 V) nebo z externího zdroje (6–12 V). Maximální možný proud pro řízení servomotorů je však omezen na 3 A. Pokud se uživatel rozhodne napájet servomotory z externího zdroje přes terminál na HATu, musí nejdříve odpájet z desky 0R rezistor. [103]

Jednotlivé servomotory mají v rámci projektu vlastní zdroj napájení, tudíž je HAT využíván především kvůli řídicímu signálu.

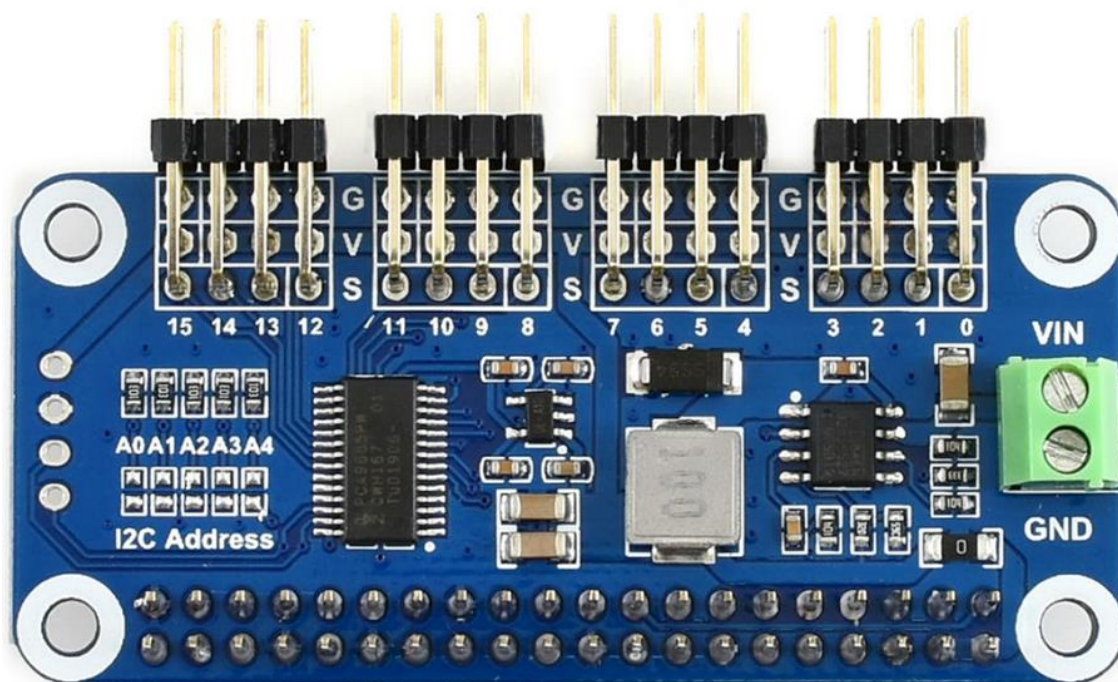
HAT má také tu výhodu, že prodlužuje piny vývojové desky, a jsou tedy dále k dispozici.

Obrázek 34 - Raspberry Pi 4 Model B



Zdroj: převzato z [100]

Obrázek 35 - Waveshare 16-channel Servo Driver HAT



Zdroj: převzato z [103]

3.2.4 Step-down měniče a další komponenty

Většina servomotorů vyžaduje napájecí napětí mezi 4,8 až 6 V. Napájecí napětí pro servomotor kloubu J3 je však vyšší (6 až 8,4 V) a samotná vývojová deska Raspberry Pi 4 potřebuje 5,1 V. Aby bylo možné všechna tato zařízení napájet (především na místech bez možnosti připojení do elektrické sítě), bylo nutné zvolit vhodný zdroj napájení.

Chod nebo spíše rozběh všech servomotorů naráz může nárokovat poměrně velký odběrový proud, a jelikož zde existuje potřeba napájet jeden ze servomotorů více než 8 V, jevil se jako vhodný zdroj napájení 12 V trakční olověný akumulátor značky EMOS. Vybraný typ disponuje kapacitou 15 Ah a připojením pomocí konektorů faston [104].

Po výběru vhodného zdroje bylo třeba regulovat napájecí napětí tak, aby odpovídalo potřebám jednotlivých komponentů. Za tímto účelem byly vybrány tři step-down měniče. Jeden pro napájení servomotorů 5,8 V, druhý pro napájení solitérního servomotoru 8,2 V a třetí měnič slouží k regulaci napětí pro napájení vývojové desky 5,1 V.

K výběru měničů bylo přistoupeno s opatrností ve vztahu k výstupnímu proudu tak, aby byly součástky naddimenzovány oproti potřebám projektu. Při výběru měničů byl brán v potaz přídržný proud jednotlivých servomotorů (pokud jej výrobce uváděl). Přídržný proud u dvou typů servomotorů (kde výrobce údaj sdělil) dosahuje téměř 8 A. Dále bylo vhodné vzhledem k počtu použitých servomotorů s tímto přídržným proudem využít silnější typ měniče.

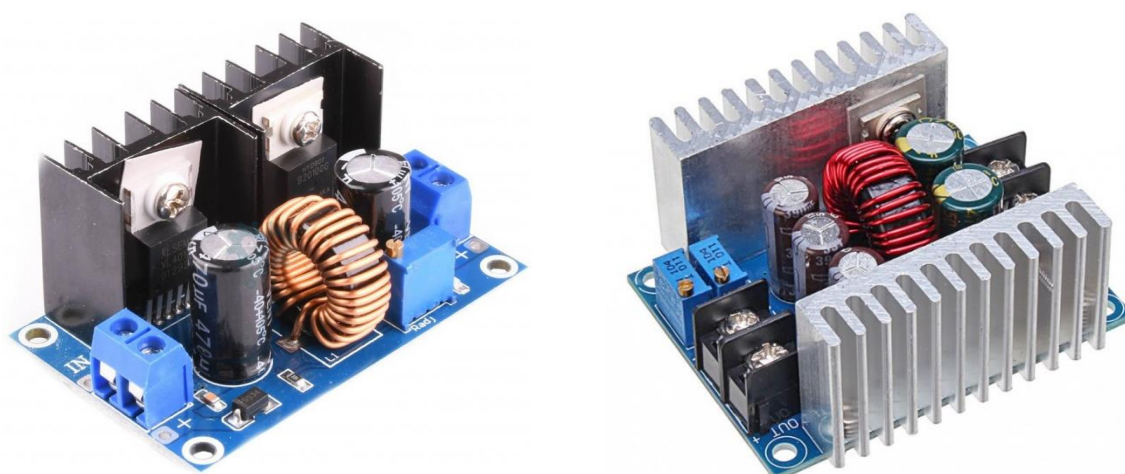
Použité měniče v rámci elektrického zapojení jsou uvedeny s jednotlivými parametry v tabulce níže.

Tabulka 11 - Step-down měniče

Měnič	Vstupní napětí (V)	Výstupní napětí (V)	Max. výstupní proud (A)	Účinnost (%)
XL4016E1	4-38	1,25-36	8	<= 92
LM25116	6-40	1,2-36	20	<=95

Zdroj: autor s využitím dat z [105][106][107][108]

Obrázek 36 - Step-down měniče XL4016E1 a LM24116

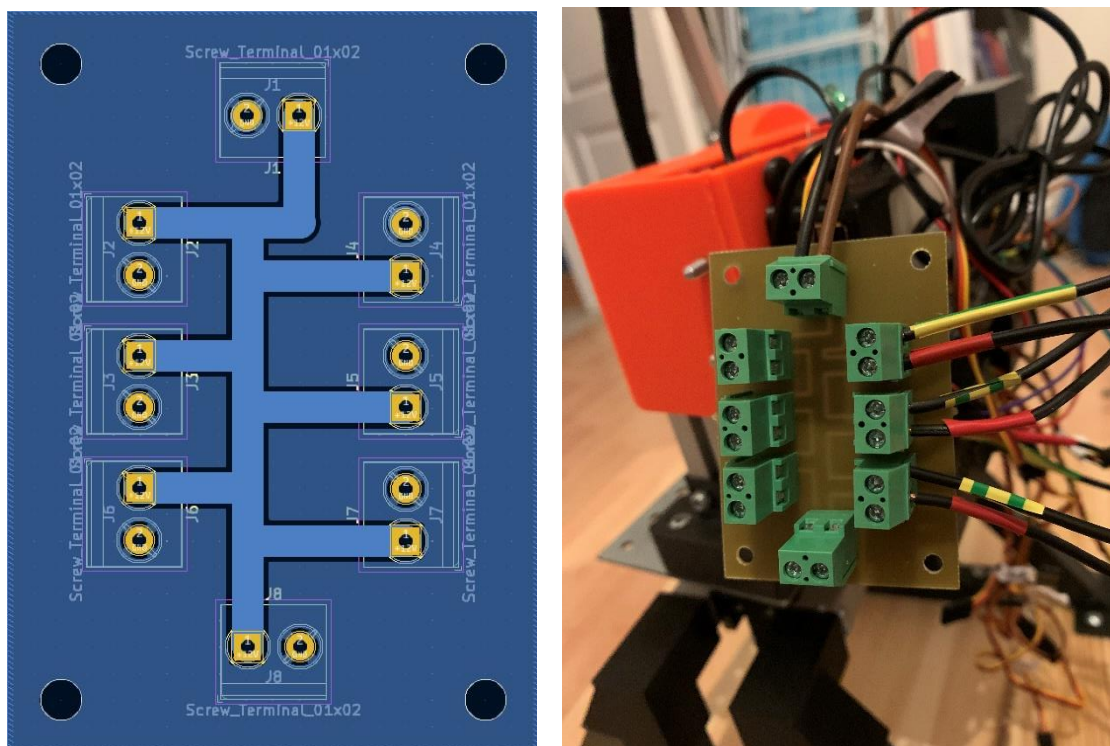


Zdroj: převzato z [106] [108]

Elektrické zapojení dále vyžadovalo rozvedení el. energie o totožném napětí do vícera servomotorů naráz – napětí 5,8 V do 7 servomotorů (J1, J2, J4 a čtyř servomotorů ovládajících end-effectory). K tomuto bylo nutné vytvořit vlastní desku plošných spojů a napájet na ni terminály.

Deska byla navržena v software KiCad 7.0 a vyfrézována na fríze v laboratoři Katedry informatiky Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity. Snímky návrhu desky a již zapojené desky jsou k dispozici níže.

Obrázek 37 - Návrh DPS rozvaděče a vpravo připojený rozvaděč



Zdroj: autor, návrh DPS vytvořen v software KiCad

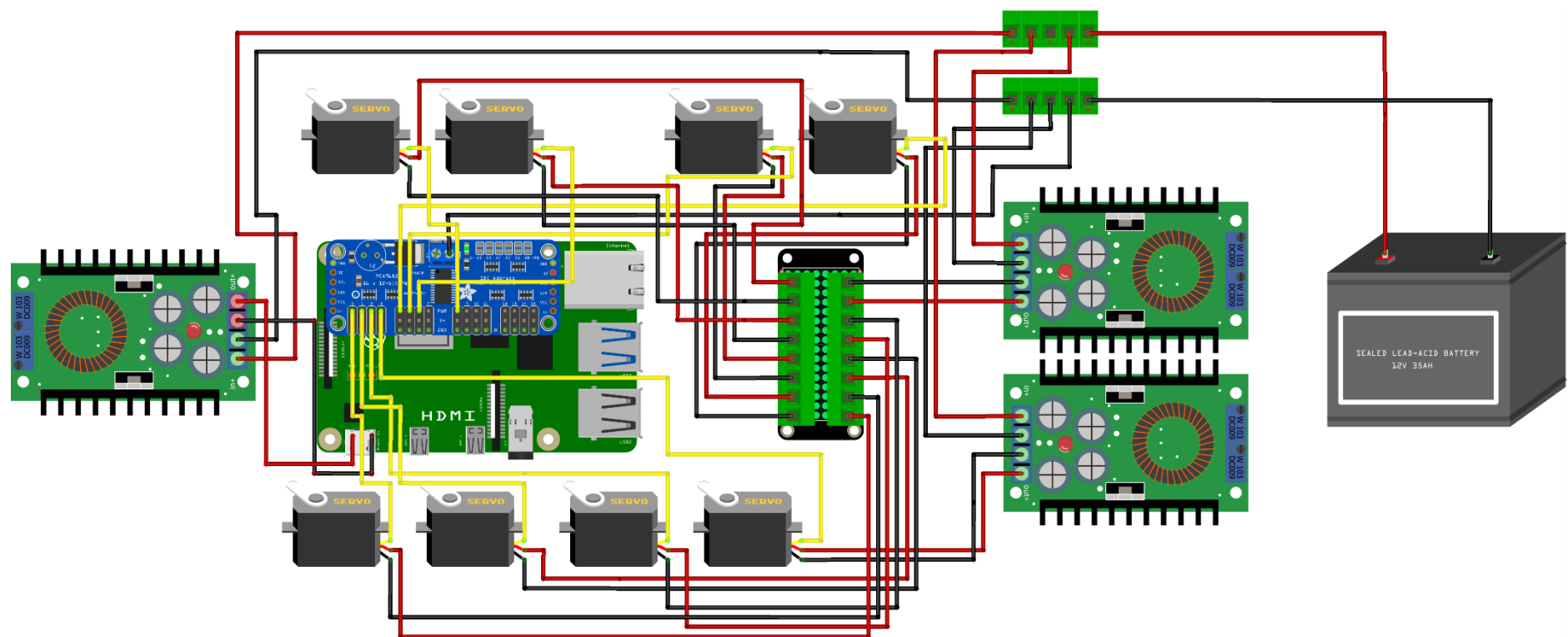
3.2.5 Schéma elektrického zapojení

Jednotlivé komponenty jsou zapojeny následovně:

1. z trakční baterie vedou vodiče do tzv. wago svorek a z nich do jednotlivých měničů (na schématu na další straně zachyceny jako terminály);
2. na měniči XL4016E1 je nastaveno výstupní napětí 5,1 V a je k němu připojena řídicí jednotka;
3. na prvním měniči LM25116 je nastaveno výstupní napětí 8,4 V a je k němu napřímo připojen servomotor JX DS5160 SSG;
4. na druhém měniči LM25116 je nastaveno výstupní napětí 5,8 V a napájí rozvaděč, k němuž jsou připojeny ostatní servomotory;
5. všechny servomotory disponují tří-pinovým konektorem, z nějž jsou napojeny vodiče řídicího signálu na Driver HAT připojený k vývojové desce.

Celé schéma zapojení je zachyceno na následující straně.

Obrázek 38 - Schéma elektrického zapojení komponent



Zdroj: vytvořeno autorem v software Fritzing

fritzing

3.3 Doplnky konstrukce a úpravy

Konstrukce manipulátoru je doplněna o nosič elektronických komponentů, o kryt servomotoru J2 a o LED diodu připojenou k řídicí jednotce, aby uživatel mohl lépe rozpoznat, že je Raspberry Pi OS naboťován a aplikace běží. Také bylo nutné před testováním vyměnit servomotor klouby J3 za nový, neboť motor vykazoval nezvyklé chování a nerovnoměrný běh. Při rotaci mezi 85 a 95 stupni docházelo k velkým vibracím (pravděpodobně v důsledku mechanického poškození servomotoru).

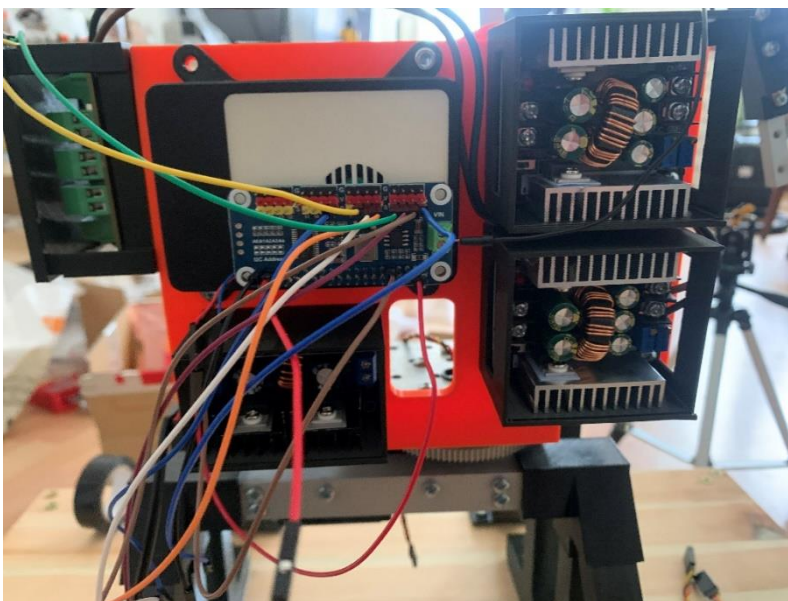
3.3.1 Nosič elektroniky

Nosič elektroniky je připevněn k ocelové desce rotující základny pomocí dvou šroubů o průměru M4. Na tomto nosiči jsou ve speciálních autorem vytvořených nebo upravených boxech uloženy (a připevněny) jednotlivé komponenty.

Box pro Raspberry Pi 4 je upravený původní model [109], neboť původní horní kryt měl poměrně malý otvor pro přístup k pinheadu a absentovala u něj větrací mřížka k ventilátoru. Bylo tedy nutné zde zvětšit otvor pro piny, vytvořit mřížku pro ventilátor a způsob jeho osazení a v neposlední řadě upravit osazení horního krytu do spodní části boxu.

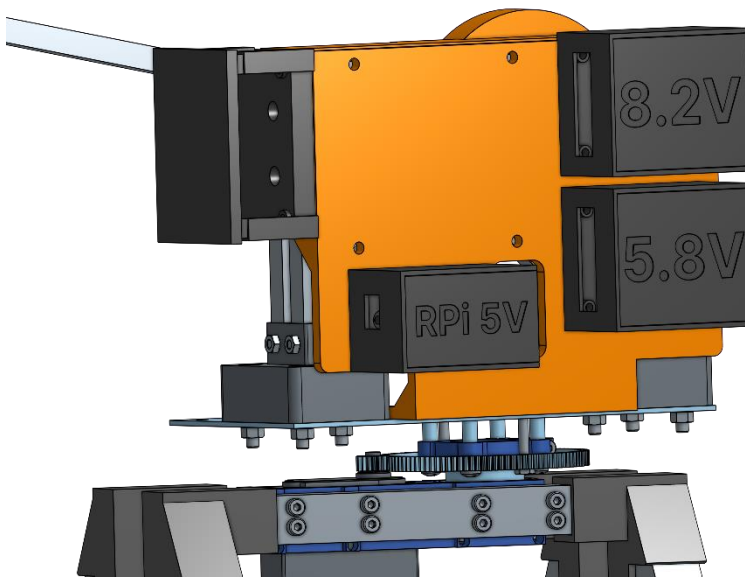
Další nosiče pro uchycení měničů jsou jednoduché schránky s vysouvacím víkem a popisem potřebného napájecího napětí. Box pro rozvaděč je uchycen z boku nosiče.

Obrázek 39 - Nosič elektroniky s uchycenými boxy (na obrázku bez víka)



Zdroj: autor

Obrázek 40 - 3D model nosiče na elektroniku

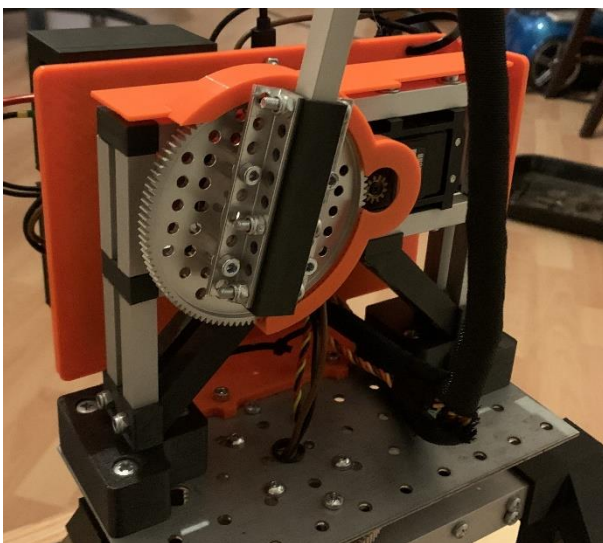


Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

3.3.2 Kryt kloubu J2

Při testování se kabeláž vedená podél ramen zachytávala v ozubení kloubu J2 a došlo k jejímu trvalému poškození. Z tohoto důvodu přistoupil autor k vymodelování a vytisknutí speciálního krytu kolem ozubení tak, aby nedocházelo ke kontaktu vodičů s ozubenými převodovými koly servomotoru. Kabeláž byla také na kritických místech zakryta opletem.

Obrázek 41 - Kryt kloubu J2



Zdroj: autor

3.3.3 Indikace naběhnutí Raspberry Pi OS

Při řízení bez připojeného monitoru je potřeba zjistit, zda naběhl operační systém na řídicí jednotce a nastartovaly se jednotlivé aplikace. Pro tento účel je k Raspberry Pi připojena LED dioda a vytvořen malý program s nekonečným cyklem, který se nastartuje ihned po „nabootování“ OS a nechává diodu blikat. Toto je indikace toho, že řídicí jednotka běží a je možné se k ní připojit nebo poslat signál na API.

3.3.4 Výměna servomotoru a dílu na kloubu J3

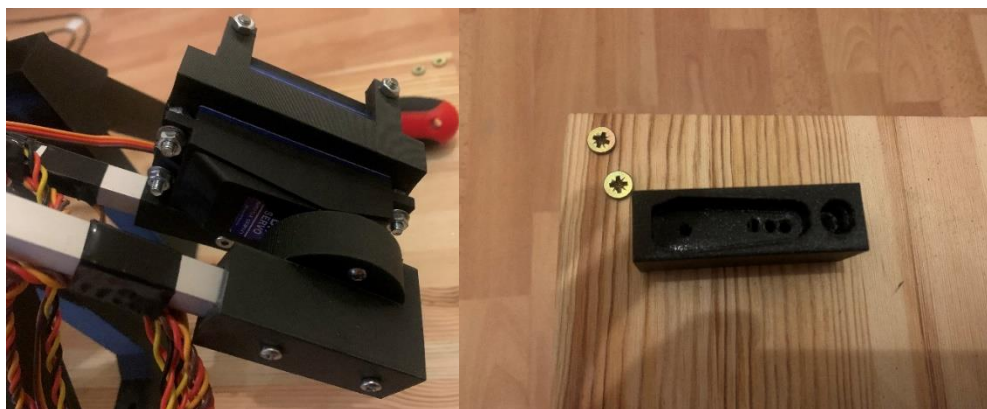
V rámci testování pohybů jednotlivých kloubů separovaně i po složení vykazoval jeden ze servomotorů nezvyklé chování. Jednalo se o motor JX DS5160 SSG pro kloub J3. Motor během chodu silně vibroval, při rotaci v rozsahu 85° až 95° až do té míry, že jej nebylo možné de facto ovládat. Ačkoli výrobce deklaruje napěťový rozsah pro napájení od 6 do 8,4 V, při napětí pod 7,2 V se motor nerozběhl ani bez zatížení.

Následně při předběžném testování nosnosti (manipulátor zvedal lahev o objemu 500 ml, necelých 540 g) neudržel zátěž a došlo pravděpodobně k mechanickému poškození.

Původní servomotor byl nahrazen za typově téměř totožný. Nový motor je značky BH, rozměrově i výkonově identický. Rozsah napájecího napětí je 4,8 – 8,4 V a PWM 500-2500 μ s. Maximální točivý moment výrobce udává na 70 kg při 7,4 V a provozní rychlost tohoto motoru je 60° za 0,16 sekundy. Hmotnost motoru je 200 g. [110]

K servomotoru dodal prodejce kruhovou servo-páku, ergo bylo nutné vyrobit i nový díl pro upevnění ramene L3 a uchycení na kruhový nástavec na hřídel motoru.

Obrázek 42 - Nový (vlevo) a původní úchyt ramene L3 (vpravo)



Zdroj: autor

3.4 Software a řízení

Strany softwarové části lze projekt rozdělit na dva funkční celky: back-end s WebSocket serverovou aplikací a API serverovou aplikací s výkonným kódem pro řízení pohonných jednotek a autonomní chování manipulátoru a front-end s webovým serverem s grafickým uživatelským rozhraním pro výběr schémat řízení a manuální ovládání.

3.4.1 Softwarové požadavky

Vzhledem ke stanoveným cílům práce jsou očekávané funkcionality SW aplikace následující:

- zajištění autonomního režimu ovládání (v návaznosti na jeden cíl práce, a to umožnění autonomního řízení ramene na základě vzájemné komunikace mezi autonomním vozidlem a manipulátorem);
- vzájemná komunikace s autonomním vozidlem;
- provedení předdefinovaných pohybů ramene v závislosti na zachyceném externím signálu/zprávě (z autonomního vozidla);
 - následná dezinfekce madla dveří.

Mimo definované cíle práce, ale ve vazbě na autonomní řízení manipulátoru:

- přepnutí režimu ovládání autonomní/manuální;
- manuální ovládání;
 - ovládání servomotorů separovaně;
 - zadání parametrů motorům současně a spuštění sekvence.

3.4.2 Schéma softwarového řízení

Projekt se softwarově skládá ze dvou výše uvedených celků. Oba tyto celky a jejich sub-části jsou navzájem propojeny.

Front-end celek s grafickým rozhraním slouží uživateli k definování pohybů pohonných jednotek a výběru schématu řízení, kdy si uživatel může zvolit mezi autonomním řízením zahrnujícím předdefinované (skriptované) pohyby manipulátoru a manuálním

řízením umožňujícím pohyb dle uživatelského vstupu. Prostřednictvím websocketů a http požadavků komunikuje s back-end celkem (s oběma částmi).

Back-end celek zpracovává v jedné ze svých částí, zde WebSocket serveru, příchozí data a extrahuje z nich hodnoty potřebné pro řízení servomotorů. Server také vysílá zprávu na front-end celek se statusem serveru a stavem připojení.

Ve druhé sub-části – API serveru – zachytává program http požadavky z externího zdroje a na základě těchto požadavků provede manipulátor předdefinované úkony. Před přijetím http požadavku je však nutný zásah uživatele a přepnutí režimu řízení na autonomní. Tedy, API server čeká na http požadavek rovněž z uživatelského rozhraní.

Ucelené schéma SW řízení a propojení jednotlivých celků je zachyceno na následující straně (Obrázek č. 43).

3.4.3 Použité SW nástroje

Oba aplikační celky byly programovány ve vývojovém prostředí VS Code.

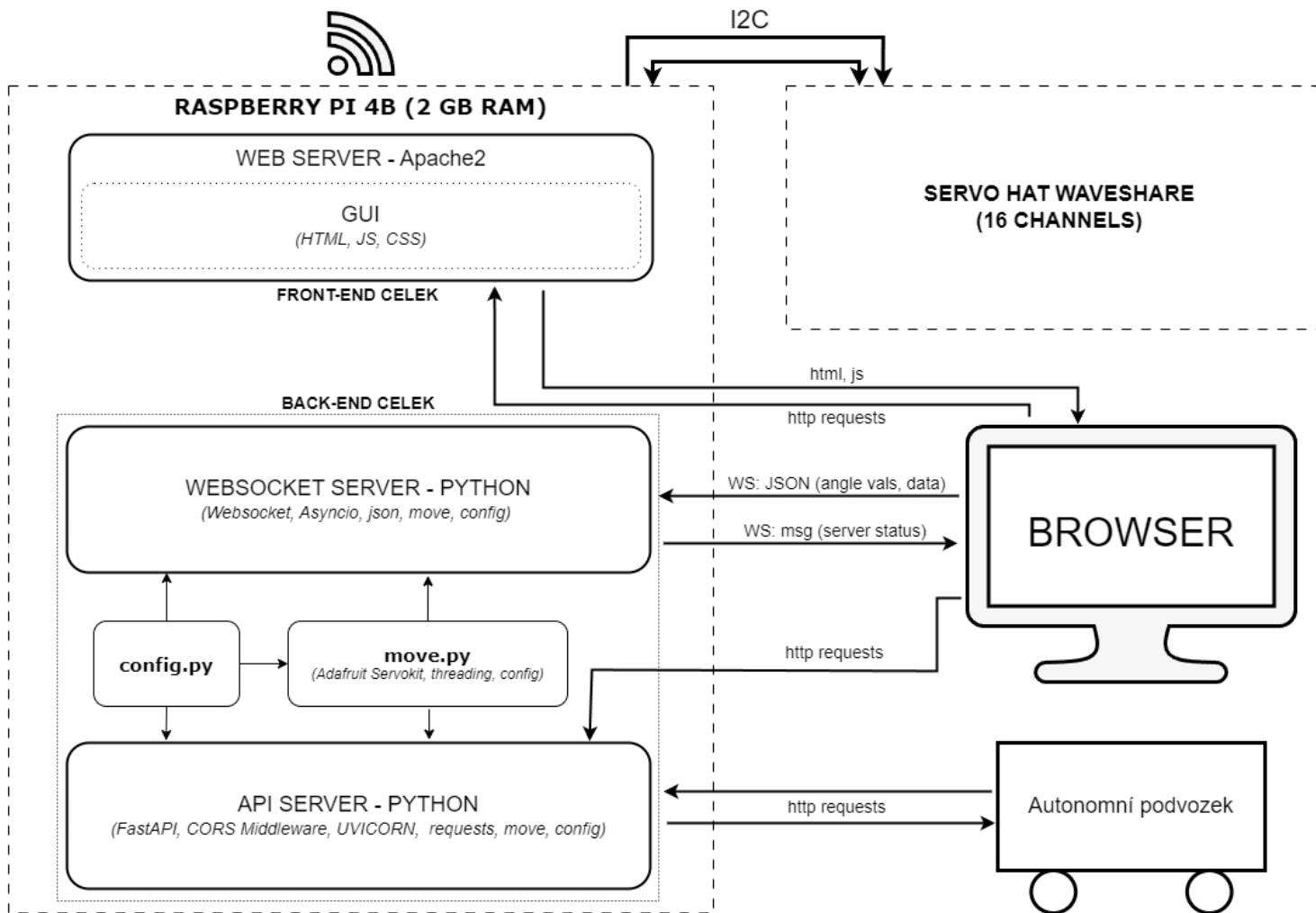
Tvorba uživatelského rozhraní probíhala a priori na externím zařízení a následně byla postupně nasazována na řídicí jednotku a laděna. Uživatelské rozhraní je webovou aplikací, pro jejíž vývoj byly použity jazyky HTML, CSS a JavaScript.

Beck-end aplikace: WebSocket server a API server jsou programovány v jazyce Python. Vývoj obou částí back-end probíhal děleně na externím zařízení i na samotné řídicí jednotce, s pomocí vzdáleného připojení prostřednictvím programu Putty a VNC, nebo napřímo s připojenými periferiemi.

V rámci WebSocket serveru jsou využívány knihovny WebSocket a Asyncio pro vytvoření komunikačního kanálu s front-end celkem a pro účely rozběhnutí serveru. Dále je zde knihovna Adafruit ServoKit, pomocí níž lze přes připojený driver HAT ovládat pohonné jednotky. Server také využívá metody a parametry z pomocných programů vytvořených autorem (`move.py` a `config.py`).

API server využívá knihovny FastAPI pro vytvoření endpointů a zpracování http požadavků, CORS Middleware pro povolení přijímání požadavků z uživatelem definovaných adres/zdrojů, Uvicorn zajišťující spojení mezi klientem (prohlížečem) a serverem a postoupení požadavku na endpoint. Pro odesílání http požadavku slouží metody knihovny requests. API využívá rovněž oba pomocné programy.

Obrázek 43 - Schéma SW řízení a komunikace



Zdroj: vytvořeno autorem v software Draw.io

3.4.4 WebSocket server

V rámci WebSocket serveru (`Arm_test.py`) běží v rámci funkce `websocket_server()` cyklus čekající na příchozí data a je zde volána metoda pro odeslání zprávy o stavu serveru na klienta. Data jsou přijata ve formátu JSON a jako parametr předána funkci pro extrakci údajů z klienta. Funkce pro rozbalení dat je volána rovněž v rámci cyklu uvnitř `websocket_server()`.

Extrahované údaje o úhlech jsou předány funkci `set_servo_angles()`, v níž jsou volány jednotlivé metody pro pohyb všech servomotorů. Tyto jsou deklarovány v programu `move.py` s parametry z konfiguračního souboru.

Dvě z metod pro řízení motorů běží v samostatných vláknech, neboť pro hladší a plynulejší chod oněch motorů bylo zapotřebí složitější logiky v rámci cyklů, které za normálních okolností blokují další průběh kódu.

Fragment kódu 1 - Přijetí dat z klientské aplikace

```
# Function with a loop for listening to new messages/events
(receiving angles from a client)
# Handling the JSON to a function for unloading in
async def websocket_server(websocket):

    await websocket.send(f"{server_message}")

    try:
        while True:
            received_json = await websocket.recv()
            servo_angles = json.loads(received_json)

            unpack_json_angles(servo_angles)

    except websockets.ConnectionClosedError:
        set_home_position()
        print("Internal Server Error.")
```

Zdroj: autor

Deklarace pomocí `async` a `await` umožňuje čekat v rámci cyklů na zprávu zvenčí a zároveň neblokovat provádění zbytku kódu.

3.4.5 API server

Jedna z dalších sub-částí back-end celku je API server, který má za cíl zprostředkovat komunikaci mezi řídicí jednotkou manipulátoru a autonomním vozidlem (případně jiným zdrojem požadavku). Server je naprogramován v jazyku Python a pro chod využívá interpreter verze 3.7.3.

V rámci programu jsou definovány funkce s pevně stanovenými parametry pro natočení servomotorů tak, aby manipulátor provedl uživatelem předem definovaný úkon. Parametry pro Cross-Origin Resource Sharing nebo pro pohyb jednotlivých ramen jsou volány z pomocného konfiguračního souboru `config.py` a uživatel si je může nadefinovat sám dle požadovaného účelu.

Funkce pro pohyb motorů jsou volány u každého endpointu zvlášť. Endpointy odrážejí požadovanou sekvenci, kterou má manipulátor vykonat (po přijetí požadavku – http requestem na předem určený end-point).

Souvztažně s cílem práce jsou endpointy nadefinovány na pohyb manipulátoru ke klice dveří, provedení rozprašení dezinfekce, složení ramen zpět do domovské polohy a vyslání signálu autonomnímu vozidlu, že je sekvence ukončena.

Natočení kloubů pro pohyb ke klice je kalibrováno ručně. Existuje zde předpoklad, že si uživatel nadefinuje zcela jiný cíl pohybové sekvence a dle toho také upraví pozice kloubů.

Zpracování požadavku z externího zdroje je podmíněno povolením autonomního řízení z GUI. Uživatel klikne na tlačítko, čímž vyšle požadavek na API server, na příslušném endpointu se změní hodnota proměnné, již je podmíněno zpracování požadavků dalšími endpointy. V rámci bloku s podmínkou se provádí automatizované úkony, dokud uživatel nepřepne režim zpět na manuální – poté API další signály nepřijímá.

Celkem je zde definováno sedm endpointů, přičemž dva slouží ke změně hodnoty proměnné pro povolení nebo ukončení autonomního režimu a na ostatních pěti jsou volány funkce pro:

- aplikaci dezinfekce;
- komplexní pohyb manipulátoru s EF, bez přidaného servomotoru (řídí pouze čtyři pohonné jednotky) – testováno autorem na klice dveří;

- komplexní pohyb manipulátoru s čelistmi bez možnosti rotace v horizontálním směru;
- komplexní pohyb manipulátoru s čelistmi s možností rotace;
- pro pohyb manipulátoru zcela dle volby uživatele – uživatel zde přidává k příslušné funkci metody pro pohyb jednotlivých servomotorů tak, jak potřebuje.

Fragment kódu 2 - Ukázka funkce pohybu s rozprašovačem

```
# Get to the handle and spray on it
def test_move_bottle():
    if auto_setup == True:
        move.MoveWithoutEF.no_EF_move(Spray.J1_move,
        Spray.J2_move, Spray.J3_move, Spray.J4_move)
        sleep(5)
        move.SprayTheHandle.PullBottleHandler()
        sleep(4)

move.MoveWithoutEF.no_EF_move(ServoHomePositions.base_servo_home
_pos, ServoHomePositions.shoulder_servo_home_pos,
ServoHomePositions.elbow_servo_home_pos,
ServoHomePositions.wrist_servo_home_pos)

sleep(2)
```

Zdroj: autor

Podmínka v úvodu funkce je závislá na proměnné měnící se dle potřeb uživatele. Následuje volání metody třídy `MoveWithoutEF` s parametry z konfiguračního souboru. Než se rameno mechanicky přesune do požadovaného bodu, je aktivní pětisekundový delay. Poté je zavolána metoda pro pohyb servomotoru na nastavci s rozprašovačem a následně se rameno přesune zpět do své domovské pozice.

Fragment kódu 3 - Endpoint pro aktivaci pohybu s rozprašovačem

```
# When requested, manipulator spray the door & send request
outside (you can change URL in config)
@app.get("/tests/test1")
def test_move_1():
    test_move_bottle()
    send_request()
```

Zdroj: autor

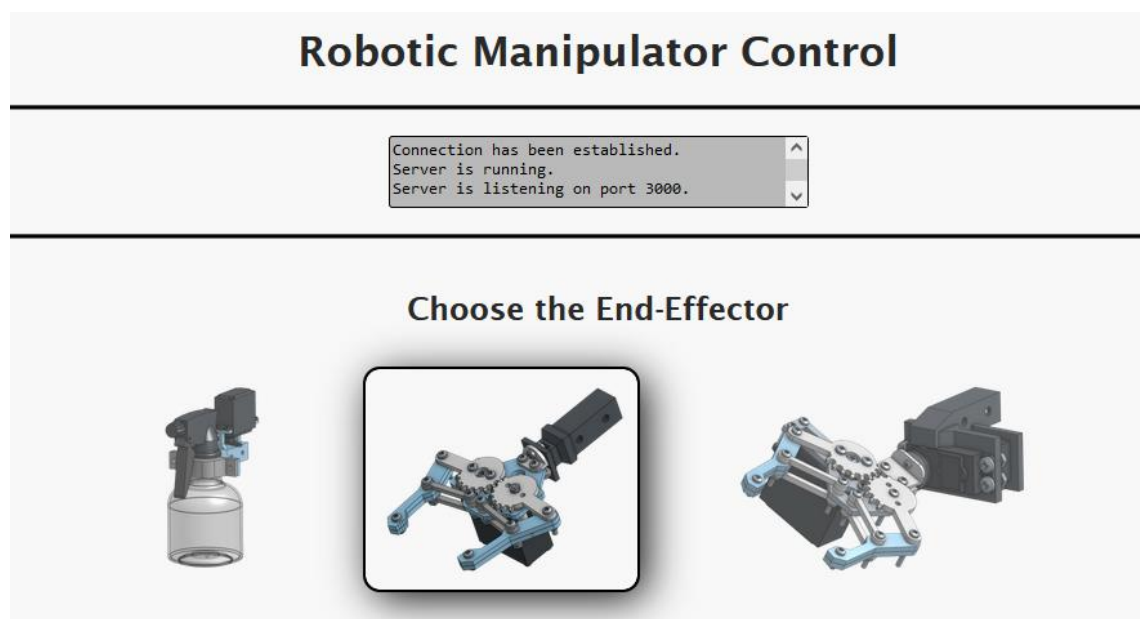
Mimo volanou funkci pro pohyb se na endpointu volá také funkce pro odeslání požadavku ven (pro účely testování na api github), nicméně parametrem funkce je URL, které uživatel opět v konfiguračním souboru může změnit dle svých potřeb.

3.4.6 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je vytvořeno jako webové rozhraní a je napsáno v jazyce HTML, CSS a JavaScript.

Jednou z funkcionalit je přepínání režimu mezi manuálním řízením a vykonáváním autonomních sekvencí. K tomuto slouží tlačítka, jimiž lze přepnout režim v závislosti na typu používaného end-effectoru. Nad tlačítky v horní části GUI je textové pole, do něž se vypisují zprávy o stavu WebSocket serveru a stavu spojení.

Obrázek 44 - GUI režimy ovládání



Zdroj: autor

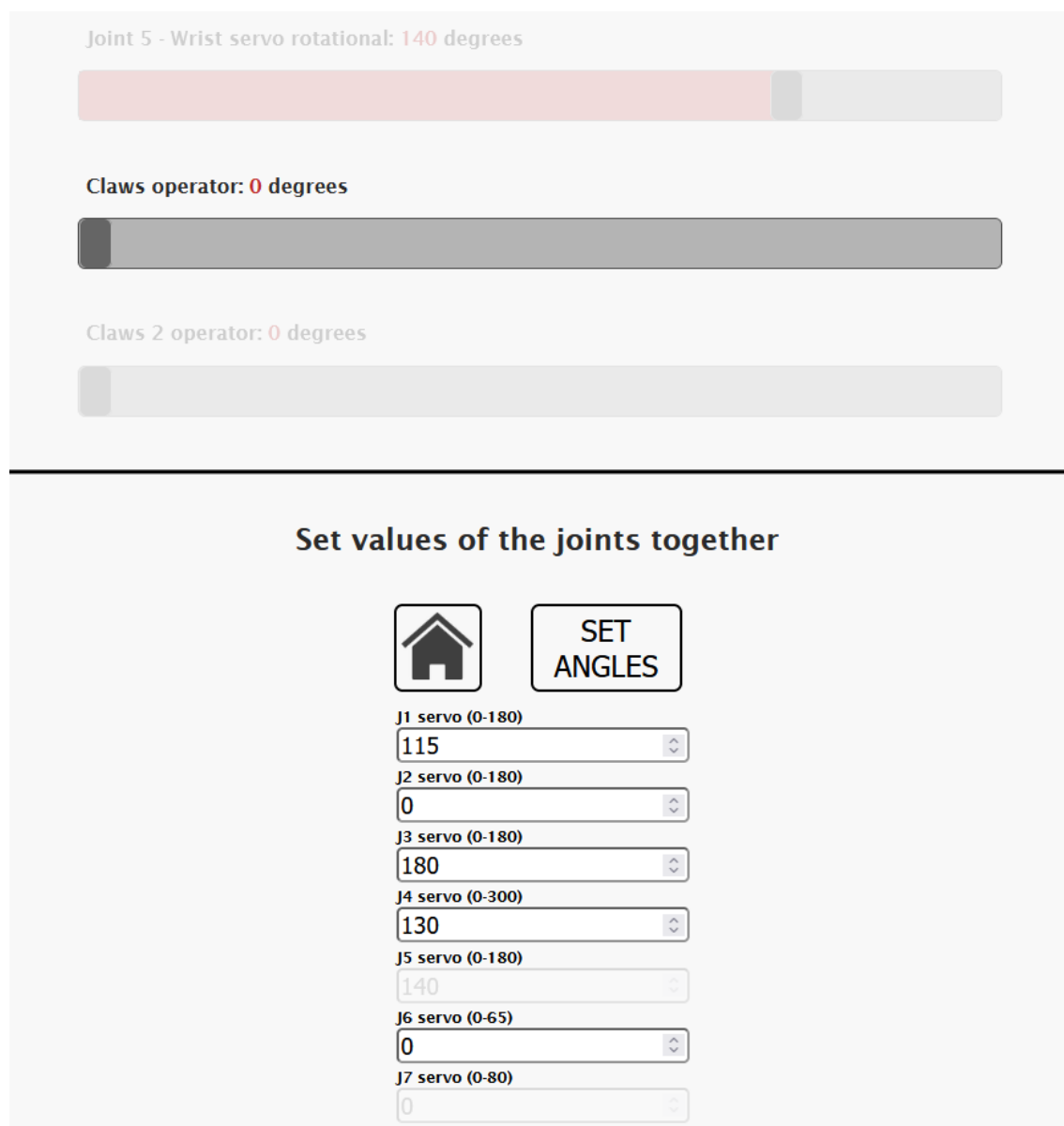
Tlačítko s rozprašovačem aktivuje autonomní režim, druhé tlačítko manuální režim bez rotace end-effectoru kolem osy z_4 a poslední je pro režim manuálního ovládání včetně rotace end-effectoru kolem osy z_4 .

Manuálně lze řídit jednotlivé motory posuvníky, jimiž je definován rozsah. Ten však u některých servomotorů neodpovídá rozsahu jejich mechanického natočení. Důvodem je, že běžně dostupné servomotory se mohou chovat nepředvídatelně nebo rozsah otáčení ne vždy odpovídá deklarovaným hodnotám. Jiným důvodem je nutnost zajistit, aby v domovské pozici ramena nekolidovala.

Další možností je nastavení hodnot vybraným servomotorům naráz a spuštění sekvence. Uživatel nastaví hodnoty natočení do textových polí. Je-li hodnota mimo rozsah daného servomotoru, uživatel je programem upozorněn na špatně zadané hodnoty a vyzván k zadání správných hodnot.

V obou případech se dostupnost posuvníků i polí pro nastavení úhlů mění v závislosti na vybraném režimu ovládání.

Obrázek 45 - Ovládací prvky pro manuální řízení



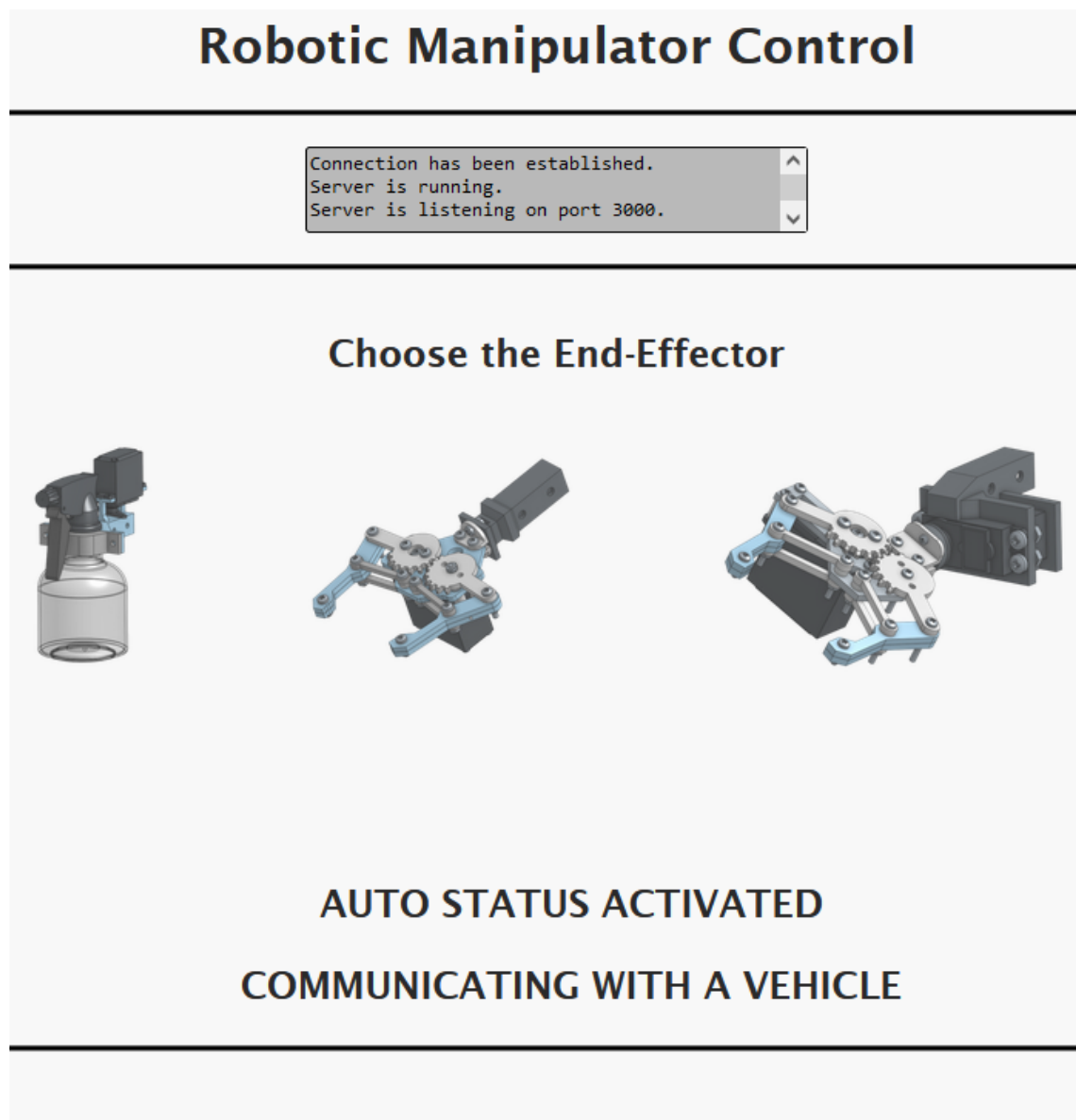
Zdroj: autor

Obrázek výše demonstuje případ, kdy uživatel vybral režim se 4 DOF a zneprístupnil ovládací komponenty pro kloub J5 a předmětné čelisti.

Tlačítka nad textovými poli (ve spodní části uživatelského rozhraní) slouží k uvedení manipulátoru do domovské pozice (vlevo) a spuštění sekvence po manuálním nastavení hodnot pro více motorů naráz. Vedle názvu kloubu je v závorkách uveden rozsah, v němž se daný kloub může pohybovat, respektive z něhož lze zadat patřičné hodnoty.

Při výběru režimu se zneprístupní všechny ovládací prvky, tudíž uživatel konvenčním způsobem nemůže do řízení zasáhnout.

Obrázek 46 - GUI autonomní režim řízení



Zdroj: autor

Programově je uživatelské rozhraní rozděleno do čtyř projektů: index.html & sliders_style.css, index.js, websoc.js a jsApi.js. Strany ovládání jsou podstatně především **index.js** a **websoc.js**.

Soubor index.js

Na začátku programu jsou deklarovány a inicializovány proměnné pro jednotlivé elementy použité v index.html tak, aby na ně bylo možné volat proměnnou „value“ v rámci jednotlivých funkcí.

Fragment kódu 4 – Ukázka přiřazení HTML elementů proměnným

```
var slider1 = document.getElementById("myRange1");
var textBox1 = document.getElementById("slideText1");

var slider2 = document.getElementById("myRange2");
var textBox2 = document.getElementById("slideText2");

var slider3 = document.getElementById("myRange3");
var textBox3 = document.getElementById("slideText3");

var slider4 = document.getElementById("myRange4");
var textBox4 = document.getElementById("slideText4");
.
.
.
var degBaseValue = document.getElementById("baseValue");
var degShoulderValue = document.getElementById("shoulderValue");
var degElbowValue = document.getElementById("elbowValue");
.
.
.
```

Zdroj: autor

Vedle proměnných s elementy je v projektu také vytvořeno pole s hodnotami počátečních úhlů jednotlivých servomotorů „servoAngle“, do něž se v jednotlivých funkcích ukládají hodnoty po uživatelské zásahu (pohnutí posuvníkem, nebo zadání hodnoty do textového pole).

Fragment kódu 5 – Ovládání servomotorů posuvníkem

```
/*Servo default angles' values*/
var servoAngle = [115, 0, 180, 130, 140, 0, 0];

/*Setting angles to servos by indexes & to particular elemets*/
```

```

function setSliderAndTextBox(slider, textBox, jointValue,
index){
    servoAngle[index] = parseInt(slider.value);
    textBox.value = servoAngle[index];
    jointValue.textContent = servoAngle[index];
    sendData();
}

slider1.oninput = function(){
    setSliderAndTextBox(slider1, textBox1, degBaseValue, 0);
};

```

Zdroj: autor

Funkce `setSliderAndTextBox()` přijímá jako parametry elementy z html a index z pole reprezentující servomotory. Následně dle změny na předmětném elementu (zde posuvníku pro kloub J1), viz anonymní funkce `slider1.oninput`, přiřadí příslušné hodnoty jednotlivým proměnným. Tímto se změny promítnou do všech ovládacích prvků v uživatelském rozhraní a zejména do pole hodnot úhlů servomotorů.

Fragment kódu 6 - Ovládání pomocí textových polí a tlačítkem

```

function setValuesByButton(slider, textBox, jointValue,
                           condition1, condition2, index){
    servoAngle[index] = Math.round(textBox.value);
    if (servoAngle[index] >= condition1 && servoAngle[index] <=
condition2){
        slider.value = servoAngle[index];
        jointValue.textContent = servoAngle[index];
    }
    else{
        alert("Wrong value inserted. "
+ "Please insert appropriate angle values.");
    }
}

```

Zdroj: autor

Funkce opět přijímá jako parametry elementy, ale přibyly zde podmínky definující rozsah natočení motorů. Hodnoty se před uložením do pole zaokrouhlují na celá čísla.

Následně se vyhodnocuje podmínka validity vložených údajů. Pokud jsou zadány údaje mimo rozsah, je uživatel programem upozorněn a vyzván zadat údaje znovu.

Funkce zachycená výše se následně volá s odlišnými parametry po všechny pohonné jednotky v další funkci `setAnglesmanually()`, přičemž tato je přiřazena tlačítku "SET ANGLES".

Poslední funkce, které je zde třeba zmínit jsou `setDefAngleValue()` a `homePos()`. První zmíněná funkce přibírá ještě další parametr v podobě počáteční (domovské) hodnoty natočení kloubu a tato se opět volá s odlišnými parametry pro každý servomotor ve funkci `homePos()`, která je přiřazena tlačítku pro uvedení ramen do počáteční polohy.

Ve funkci z fragmentu č. 2 je při každé změně hodnoty na posuvníku volána funkce `sendData()`, tato funkce je definována v programu `websoc.js` a bude popsána dále.

Soubor websoc.js

Na začátku jsou deklarovány a inicializovány proměnné pro textovou oblast stran výpisu stavu Websocket serveru, instance třídy Websocket s parametry IP adresy a portem rozhraní, na němž běží a naslouchá Websocket server spuštěný na řídicí jednotce.

Fragment kódu 7 - Základní proměnné pro komunikaci přes websockety

```
var textConnectStat = document.getElementById("conStat");
//const websocket = new WebSocket("ws://192.168.50.97:3000");
const websocket = new WebSocket("ws://192.168.50.98:3000");
//var bottleEfSetter = false;
```

Zdroj: autor

Zde je třeba uvést, že parametr vytvořeného objektu `websocket` musí uživatel změnit v závislosti na rozsahu IP adres přidělených řídicí jednotce po připojení do místní sítě.

Důležitou funkcí v rámci souboru **websoc.js** je `sendData()`.

Fragment kódu 8 - Odesílání dat na Websocket server

```
/*Sending data (angles) to the server*/
function sendData(){

    if ((servoAngle[0] >= 0 && servoAngle[0] <= 180)
```

```

    && (servoAngle[1] >= 0 && servoAngle[1] <= 180)
    && (servoAngle[2] >= 0 && servoAngle[2] <= 180)
    && (servoAngle[3] >= 0 && servoAngle[3] <= 300)
    && (servoAngle[4] >= 0 && servoAngle[4] <= 180)
    && (servoAngle[5] >= 0 && servoAngle[5] <= 65)
    && (servoAngle[6] >= 0 && servoAngle[6] <= 80) ) {

        const anglesValToSend = {
            s1: servoAngle[0], //BASE
            s2: servoAngle[1], //SHOULDER
            s3: servoAngle[2], //ELBOW
            s4: servoAngle[3], //WRIST
            s5: servoAngle[4], //ROT WRIST
            s6: servoAngle[5], //CLAWS W/O ROT
            s7: servoAngle[6], //CLAWS WITH ROT
            //bEfStat: bottleEfSetter
        };

        const jsonToSend = JSON.stringify(anglesValToSend);
        websocket.send(jsonToSend);
    }
}

```

Zdroj: autor

Na začátku funkce jsou podmínky pro rozsahy natočení každého jednoho servomotoru. Následně se hodnoty z pole úhlů pohonných jednotek (soubor **index.js**) uloží do proměnné – slovníku klíč-hodnota. Slovník je následně jako parametr předán metodě volané na objekt typu JSON. Tato metoda data zformátuje do textového řetězce pro odeslání a poté zformátovaná data předá opět jako parametr metodě `send()` volané na objekt `websocket` pro samotné odeslání.

Dále je na každém tlačítku volána metoda čekající na interakci uživatele (kliknutí na tlačítko). V těle všech těchto metod se zavolá funkce `sendData()` a u tlačítek výběru režimu ovládání také `setBottleEfTrue()` nebo `setBottleEfFalse()`, které posílají http požadavky na API server za účelem povolení nebo ukončení autonomního řízení.

Soubor jsApi.js

Zde je deklarovaná pouze jedna funkce s parametrem URL, která se volá právě ve funkcích popsaných v předchozím odstavci.

Uživatelské rozhraní je vytvořeno, aby bylo responzivní i na mobilních telefonech či tabletu. Nicméně, pro účely správného zobrazení se doporučuje používat prohlížeč Mozilla Firefox.

3.4.7 Řízení servomotorů

Metody pro řízení motorů a jedna z metod pro komplexnější pohyb jsou deklarovány v pomocném programu `move.py`. Příchozí údaje s hodnotami úhlů je třeba před předání metodám pro pohyb „přemapovat“ na hodnoty, které je možné přiřazovat proměnným z knihovny `adafruit_servokit`.

K přemapování slouží dvě metody třídy `MappingAngleValues`, které jako parametr přijmou požadovaný úhel, vstupní rozsah hodnot (co je servomotor mechanicky schopen zvládnout) a výstupní rozsah hodnot. Jedna ze zmíněných metod přijímá také index řídicího kanálu. Je to z toho důvodu, že každá z těchto metod slouží k mapování hodnot pro jiné pohonné jednotky.

Fragment kódu 9 – Ukázka mapování hodnot pro pohyb servomotorů

```
def set_angle_to_channel(channel_index, angle, min_In, max_In,
min_Out, max_Out):
    desired_angle =
MappingAngleValues.servo_change_range_values(angle, min_In,
max_In, min_Out, max_Out)
    ServoInit.kit.servo[channel_index].angle = desired_angle
```

Zdroj: autor

Dva ze servomotorů mají již integrovanou logiku decelerace a není nutné jejich pohyb dále upravovat (konkrétně klouby J1 a J2). Nicméně, další dva ze základních kloubů (J3 a J4) úpravu pohybu potřebovaly. Servomotory (zejména u kloubu J3) disponují příliš velkou rychlostí, pro aplikaci nepoužitelnou, a tak bylo nutné chod zpomalit a učinit jej plynulejším.

Pro zjemnění chodu pomocí uměle vytvořených mikrokroků slouží dvě metody, jež jako parametry přijímají cílovou pozici, čas pro vykonání pohybu (navyšuje počet iterací v cyklu) a index řídicího kanálu příslušného servomotoru. Ukázka metody pro

zpomalení servomotoru J3 a plynulejší chod pomocí mikrokroků je na následující straně.

Fragment kódu 10 - Zpomalení a úprava chodu servomotoru

```
# Slow down J3(70KG) - microsteps, shorter transition, longer
time for the whole move

# end_position --> angle from a client
# time_for_move --> param for creating microsteps
# index --> param for control channel
# delay --> delay between iterations

def elbow_move_better(end_position, time_for_move, index):
    global elbow_start_position

    if end_position >= elbow_start_position:
        move_direction = config.ElbowSmoothMove.backwards
    else:
        move_direction = config.ElbowSmoothMove.forward

    move_distance = end_position - elbow_start_position
    move_distance = abs(move_distance)
    servo_steps_count = int(time_for_move *
config.ElbowSmoothMove.number_of_steps)
    size_of_step = move_distance / servo_steps_count *
move_direction

    for i in range (servo_steps_count):
        move_angle = elbow_start_position + size_of_step
        move_angle = min(max(move_angle,
ServoRanges.elbow_range_min_actual),
ServoRanges.elbow_range_max_actual)
        ServoInit.kit.servo[index].angle = move_angle
        elbow_start_position = move_angle
        time.sleep(config.ElbowSmoothMove.delay)
```

Zdroj: autor

Metoda na úvod zkontroluje, zda je cílový úhel větší nebo menší, než stávající (uložen v globální proměnné), dle toho poté odečítá nebo přičítá od stávající pozice. Poté uloží do proměnné `move_distance` rozdíl mezi cílovou a počáteční polohou. Následně vypočítá počet kroků jako součin dvou parametrů zadaných uživatelem. Dalším

krokem je výpočet velikosti kroku na základě podílu spočítané dráhy motoru a součinu parametru směru pohybu a výsledného počtu kroků.

Následně v každé iteraci cyklu přičítá (mikro)krok ke stávající pozici motoru, porovnává rozsah hodnot s aktuálním natočením, aby onen rozsah servomotor nepřekročil a ve finále je úhel přiřazen proměnné pro samotný pohyb a uložen do globální proměnné pro další iterace/chod. Poslední řádek jsou prodlevy mezi impulsy.

Uživatel může sám pomocí konfiguračního souboru upravovat pro obě metody parametry počátečního počtu kroků, doby trvání cyklu (multiplikace počtu kroků) a prodlevy mezi impulsy.

Vzhledem k tomu, že řízení J3 a J4 vyžaduje běh cyklu, je nutné pro simultánní pohyb všech kloubů tyto dva spustit v samostatných vláknech. Metody přijímající již pouze parametr s hodnotou natočení a řídící motory bez úpravy pohybu i s úpravou jsou zachyceny níže.

Obrázek 47 - Ukázka řízení servomotoru kloubu J2 a J3

```
def shoulder_servo_custom(angle2):
    MappingAngleValues.set_angle_to_channel(config.ServoIndex.shoulder_index,
                                           angle2, ServoRanges.range_min,
                                           ServoRanges.range_max,
                                           ServoRanges.shoulder_range_min_actual,
                                           ServoRanges.shoulder_range_max_actual)

def elbow_servo_custom(angle3):
    elbow_t = threading.Thread(target = SmoothServoMove.elbow_move_better, args =
                               [(MappingAngleValues.servo_change_range_values(angle3, ServoRanges.range_min,
                                       ServoRanges.range_max,
                                       ServoRanges.elbow_range_min_actual,
                                       ServoRanges.elbow_range_max_actual), |
                               config.ElbowSmoothMove.moving_time,
                               config.ServoIndex.elbow_index], )
    elbow_t.start()
```

Zdroj: autor

4 Testování

U manipulátoru byly testovány tři různé parametry:

- síla stisku čelistí při změně velikosti a váhy drženého předmětu;
- opakovatelnost a přesnost v závislosti na zatížení;
 - součástí testu byla též nosnost.

Sílu stisku bylo třeba otestovat kvůli zjištění, zda jsou čelisti schopny udržet cílenou váhu a zároveň, aby bylo případně možné, získaná data použít pro nastavení správných hodnot ať už u manuálního nebo autonomního řízení v závislosti na změně velikosti drženého předmětu.

Stran parametrů přesnosti a opakovatelnosti., cílem práce nebylo vytvoření manipulátoru pro velmi precizní práci (aplikace dezinfekce madel dveří ji ani nevyžaduje), nicméně testování opakovatelnosti může ukázat, zda lze manipulátor využít i pro přesnější nebo složitější úkoly.

Nosnost byla testována ve vztahu k mechanickým cílům práce, a to při různých vzdálenostech dosahu manipulátoru.

4.1 Stisk čelistí

Pro stisk čelistí byl zakoupen a použit senzor síly FSR-402 s průměrem měřící plochy 18 mm. Senzor funguje na principu změny odporu v závislosti na velikosti síly aplikované na měřící plochu. Čím větší síla na senzor působí, tím se snižuje odpor senzoru (zvyšuje výstupní napětí). Senzor je dle datasheetu schopen změřit sílu v rozsahu 0,2-20 N, což odpovídá síle 0,02-2 kg, nicméně měl by být schopen dokázat zachytit i větší sílu, byť výrobce uvádí, že již nemusí rozpoznat rozdíl mezi silami nad 2 kg [111] [112].

Senzor byl připojen k vývojové desce Arduino UNO R3 přes rezistor s odporem 10 k Ω a poté připevněn mezi předmět, jež měly čelisti stisknout a samotné těleso čelistí.

Maximální šíře, do které lze autorem použité čelisti otevřít, je 50 mm (tato šířka je dána vlastní konstrukcí čelistí, neboť ve větším otevření jim brání úchyt servomotoru), proto byly pro testování použity vlastní modely úchytů, jež měly různé rozměry.

Jednalo se konkrétně o 5 válcových a 5 hranolových úchytů o průměrech 10-40 mm a 45 mm. K úchytům bylo připevněno závaží, jehož hmotnost se měnila po 50 g v rozsahu 50-500 g. S tělesy byly také prováděny rotace pro zjištění vlivu prudké změny pohybu na stisk.

Obrázek 48 - Úchyty pro závaží o různých průměrech (válcové a hranolové)



Zdroj: autor

Níže jsou k dispozici výsledky síly stisku čelistí, které autor sám používal pro testování manipulátoru.

Zde je třeba dodat, že díky otevřenosti ramene pro uchycení vlastních end-effectorů/nástavců mohou další uživatelé vytvořit vlastní upravené nástavce, které mohou vykazovat zcela jiné parametry.

Obrázek 49 – Sensor síly FSR-402 (18 mm)



Zdroj: převzato z [109]

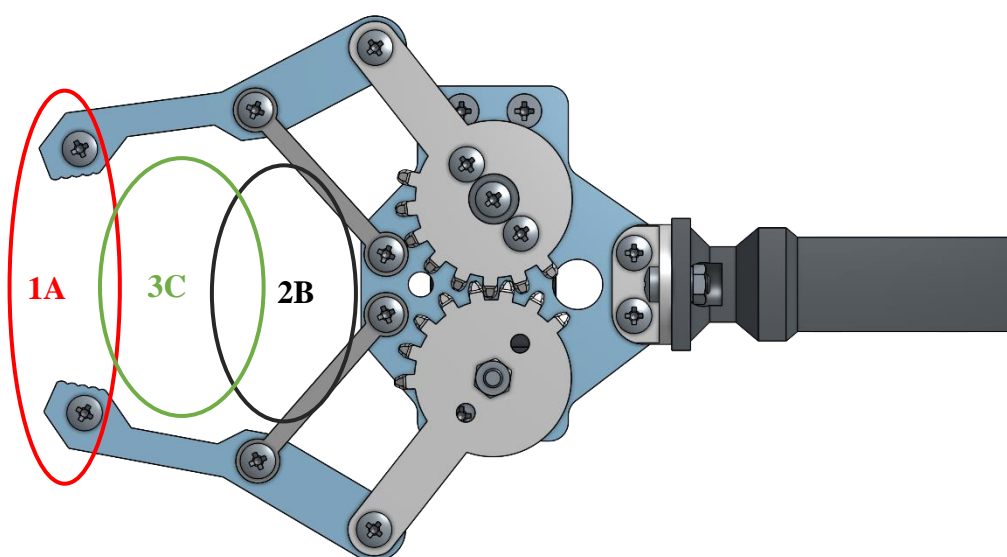
Tabulka 12 - Výsledky testování stisku čelistí (N) - hranol

Hranoly síla (N)	váha (g)									
průměr (mm)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
10	1/4	1/4	0/4	0/4	0/3	0/5	0/3	0/3	0/3	0/1
20	2/4	2-3/4	2/3-4	2/4-5	2/4-5	2/3	2/4-5	1-2/4	3/4	5/3-4
30	9-10	8	8-9	10	10	9	10-11	9-10	4-5	5-6
40								9	4-5	6
45								8	8	11-12

Zdroj: autor

Při použití hranolovitých úchytů o průměru 10 mm a 20 mm byla měněna pozice úchytu ve dvou prostorech čelistí, a to špičkou drapáku (prostor 1A) a místem co nejbližší servomotoru ovládajícím čelisti (prostor 2B). Z tohoto důvodu jsou v prvních dvou řádcích uvedeny páry hodnot oddělené lomítkem. První hodnota je síla stisku co nejbližší konci čelistí a druhá hodnota je stisk blízko servomotoru. V případě dalších průměrů hranolových úchytů již nebylo vzhledem k jejich velikosti možné měnit polohu v prostoru čelistí, ergo jedná se o hodnoty stisku konce EF.

Obrázek 50 - Prostory pro polohování úchytů v čelistech při testování



Zdroj: vytvořeno autorem v software Onshape

Hodnoty síly zachycené s pomlčkou odráží oscilaci v průběhu daného testu.

Z tabulky je patrné, že pro malé průměry, zejména 10 mm, nejsou tyto konkrétní čelisti příliš vhodné, neboť naměřená síla stisku v obou částech čelistí (blíže k servomotoru i u špiček) odpovídá 300-400 g. Při testování s hmotností 500 g nejmenší úchyt se závažím z čelistí vypadal.

Při testování s průměrem 30 mm začal autor od největší hmotnosti a při třetí iteraci (400 g) došlo ke spálení a úplnému zničení servomotoru, který ovládá stisk čelistí. Do té doby se pro všechny tři průměry úchytů a všechny hmotnosti závaží testoval stisk též při rotaci. Rotace na sílu stisku neměla žádný vliv, během prudkých změn pohybu se síla stisku neměnila a vyjma úchytu s nejmenším průměrem a nejvyšší hmotností (10 mm a 500 g) nedošlo k selhání čelistí. U 10 milimetrových čelistí nebyla rotace de facto možná. Po zničení servomotoru došlo k výměně čelistí. Oba end-effectory mají velmi podobné mechanické parametry.

Z tabulky je zřejmé, že se zvyšujícím se průměrem úchytu, konkrétně od průměru 30 mm, se také zvyšuje síla stisku, která se u hmotnosti do 400 g zdvojnásobila a odpovídala síle 1000-1100 g. Od testování průměru 30 mm nebylo již se závažím rotováno.

Pro největší průměry již autor odstoupil od testování na menších hmotnostech závaží, neboť z předchozích testovacích iterací vyplývá, že čelisti jsou schopny udržet předměty do 350 g s menším průměrem.

Poslední dvě měly ukázat též dobrý výsledek. V případě síly stisku u předmětu s průměrem 40 mm sice došlo k poklesu síly stisku, nicméně se stále jedná o sílu, se kterou je možné půl kilogramový předmět v drapáku udržet.

Největší síla stisku byla naměřena s největším testovaným průměrem úchytu, a to pro 500 g v rozmezí 11 a 12 N (1,1 a 1,2 kg).

Následuje tabulka s naměřenými hodnotami pro válcové úchyty. Vzhledem k naměřeným údajům z testování hranolových úchytů byly testy prováděny pouze na hmotnostech od 400 g výše.

Tabulka 13 - Výsledky testování stisku čelistí (N) - válec

Válce síla (N)	váha (g)									
průměr (mm)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
10								2	2	N/A
20								2-3	2	4-5
30								5	4-5	3-4
40								6/3	5/2	6/2
45								5/2	6/3	8/2

Zdroj: autor

Válcový tvar byl pro čelisti obtížnější k úchopu, zejména při menších průměrech úchytu. Toto se odráží i na naměřených hodnotách.

S nejmenším úchytem jsou naměřené hodnoty síly poměrně malé 200 g (2 N), s tím, že při největší váze sensor ani žádnou sílu neměřil. Úchyt opakovaně vypadal a nedržel v čelistech dobře. Úchyt nebylo možné čelistmi dobře uchopit v prostoru blíže servomotoru, a tedy zde naměřené hodnoty odpovídají síle špiček čelistí.

Totéž platí i pro úchyt s průměrem 20 mm. U nejvyšší hmotnosti byla sice naměřena vyšší hodnota odpovídající stisku půl kilogramu, ale také bylo nutné úchyt do čelistí poměrně dlouho nastavovat.

Hodnoty síly u úchytu s průměrem 30 mm jsou na úrovni 400-500 g síly.

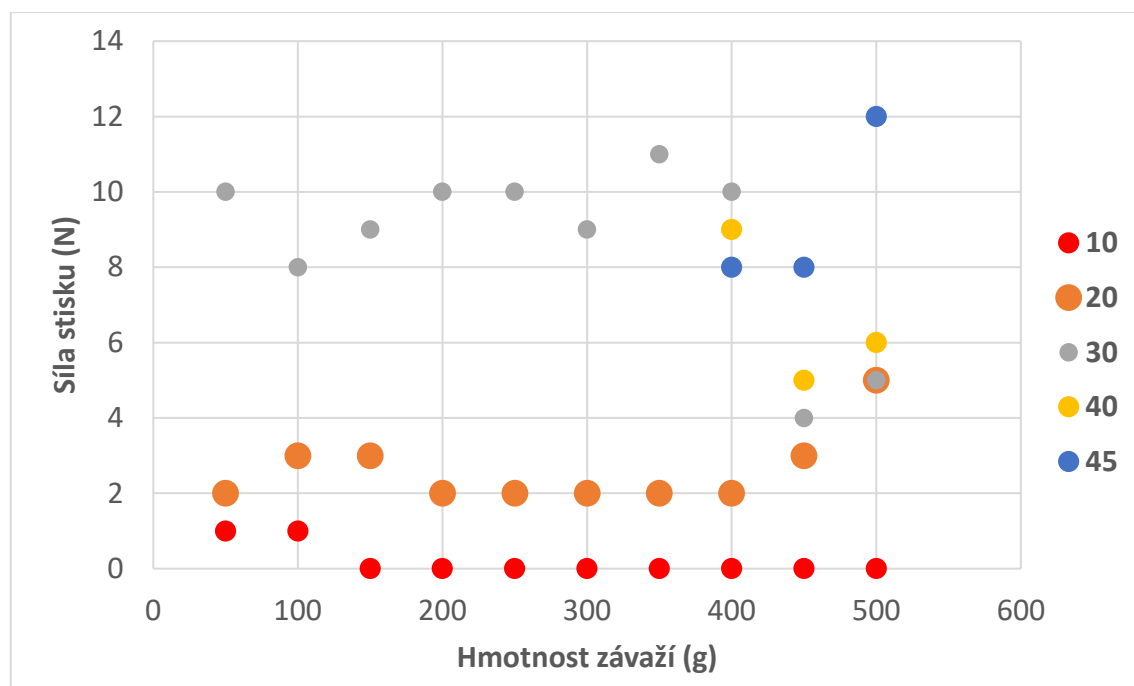
V případě posledních dvou průměrů (40 a 45 mm) bylo naopak možné měřit stisk v obou částech čelistí. První hodnoty jsou naměřenou silou stisku špiček čelistí (prostor 1A) a druhé hodnoty za lomítkem odpovídají stisku přibližně uprostřed čelistí (prostor 3C).

Hodnoty síly stisku konců čelistí jsou dvakrát až třikrát větší než u „obejmutí“. Důvodem může být nedostatečná sensitivita odporového sensoru, ale neměřil-li sensor v daném testu žádnou hodnotu, měnila se poloha úchytu.

Níže jsou zachyceny naměřené hodnoty síly dle průměrů graficky, kvůli překryvu hodnot při různých parametrech mají datové řady jinou velikost bodů. Legenda vpravo

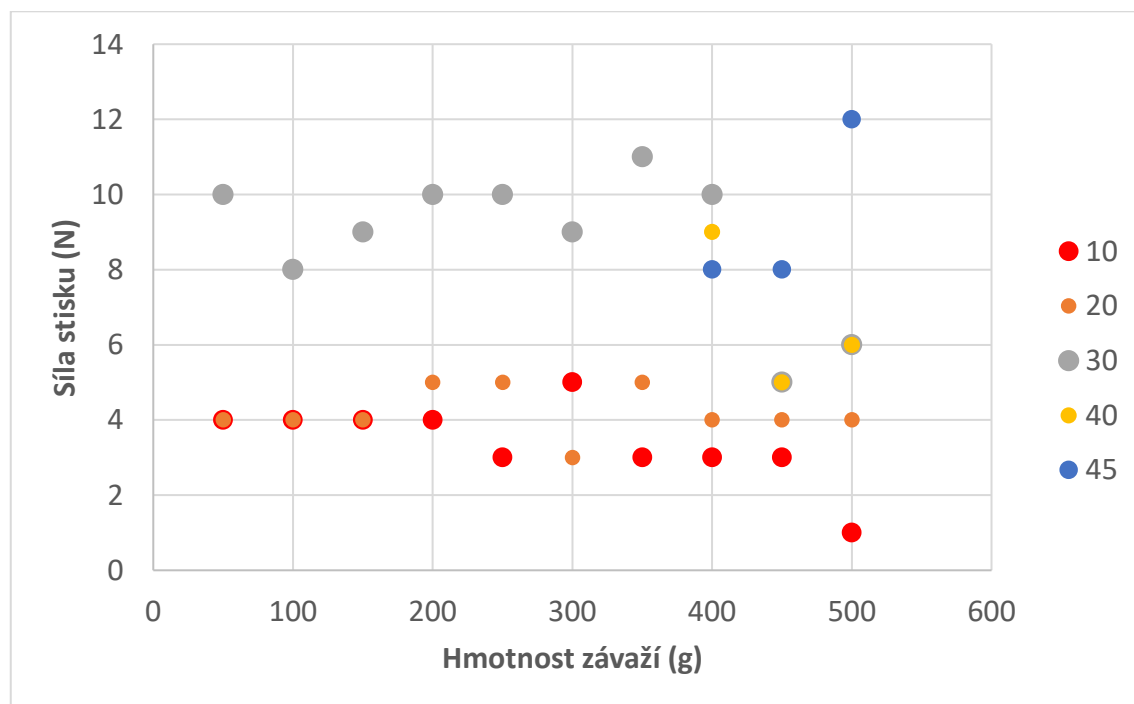
odráží ony průměry úchytů v milimetrech. U oscilujících hodnot síly stisku byla všude vybrána vyšší hodnota.

Graf 1 - Síla stisku čelistí v prostoru 1A – hranolový úchyt (průměry v legendě v mm)



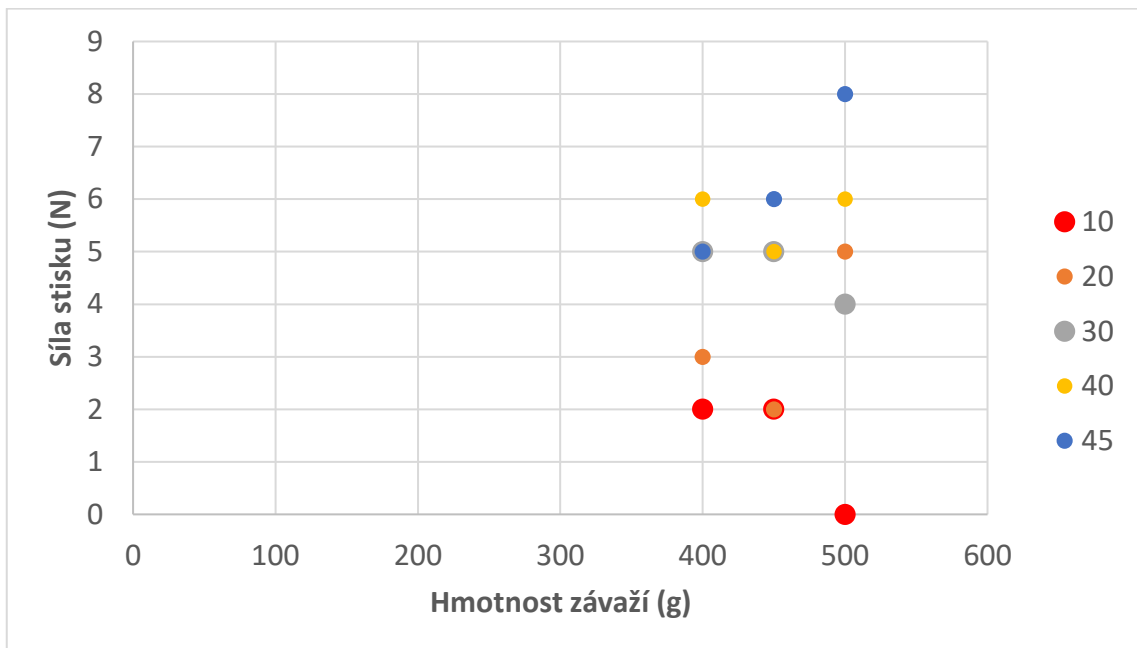
Zdroj: autor

Graf 2 - Síla stisku čelistí v prostoru 2B – hranolový úchyt (průměry v legendě v mm)



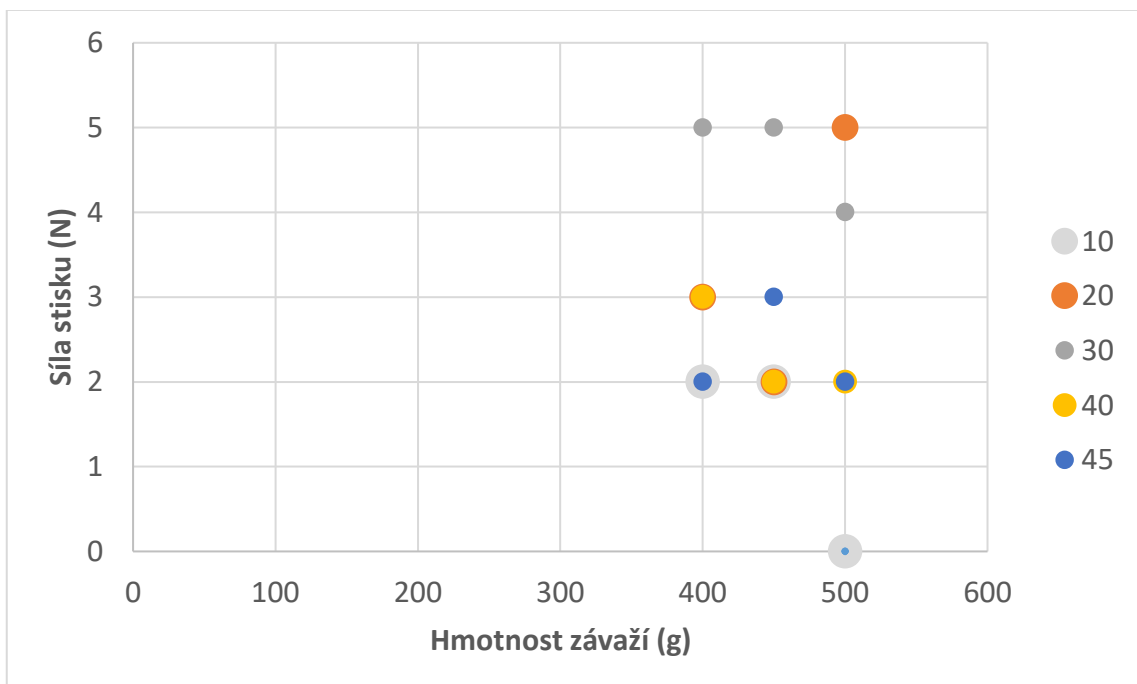
Zdroj: autor

Graf 3 - Síla stisku čelistí v prostoru 1A – válcový úchyt (průměry v legendě v mm)



Zdroj: autor

Graf 4 - Síla stisku čelistí v prostoru 3C – válcový úchyt (průměry v legendě v mm)



Zdroj: autor

Použité čelisti manipulátoru mají lepší úchop, když drží předmět s čtvercovým nebo krychlovým tvarem, než předměty válcovité nebo kulovité. Se zvětšujícím se objemem předmětu se zvětšovala síla stisku.

Pro velmi malé předměty je lepší uchopit je předmětnými čelistmi co nejbližší pohonné jednotce ovládající stisk. V případě válcovitých předmětů o větším objemu mají čelisti větší stisk na koncích u špiček, ale síla stisku je všeobecně nižší než u druhých testovaných úchopů.

Změna hmotnosti hrála roli zejména u předmětů se čtvercovým průřezem a hmotností nad 400 g. U menších předmětů (průměr 10 až 30 mm) se síla stisku s měnící se hmotností tolik nelišila, větší vliv zde měl právě onen průměr drženého předmětu. Válcovité/kulovité předměty s malým průměrem je téměř nemožné v čelistech udržet. Pro tento typ předmětu je vhodnější vyrobit vlastní úchyt na míru.

Opět je zde potřeba dodat, že se jedná o nástavce zakoupené a použité autorem. Otevřené rameno L4 umožňuje nasazení jiných end-effektorů vyspecifikovaných přesně pro jejich účel.

Dalším poznatkem je nepříliš velká výdrž servomotorů MG995, které jsou osazeny na čelistech. Příslušný motor byl před destrukcí zatěžován během testování asi 90 minut. Tedy pro běžné použití je možné tyto servomotory využít, nicméně více než hodinové kontinuální zatížení již může způsobit jejich zadření a vyřazení z provozu.

Obrázek 51 - Ukázka výpisu naměřených hodnot (vlevo válec 10 mm s hmotností 400 g, vpravo hranol 45 mm s hmotností 500 g)

```

Analog reading (0-1023): 2
Voltage reading (mV): 9
FSR resistance (ohm): 5545555
Grip force (N): 0

Analog reading (0-1023): 717
Voltage reading (mV): 3504
FSR resistance (ohm): 4269
Grip force (N): 2

Analog reading (0-1023): 719
Voltage reading (mV): 3514
FSR resistance (ohm): 4228
Grip force (N): 2

Analog reading (0-1023): 0
Voltage reading (mV): 0
No pressure

Analog reading (0-1023): 926
Voltage reading (mV): 4525
FSR resistance (ohm): 1049
Grip force (N): 11

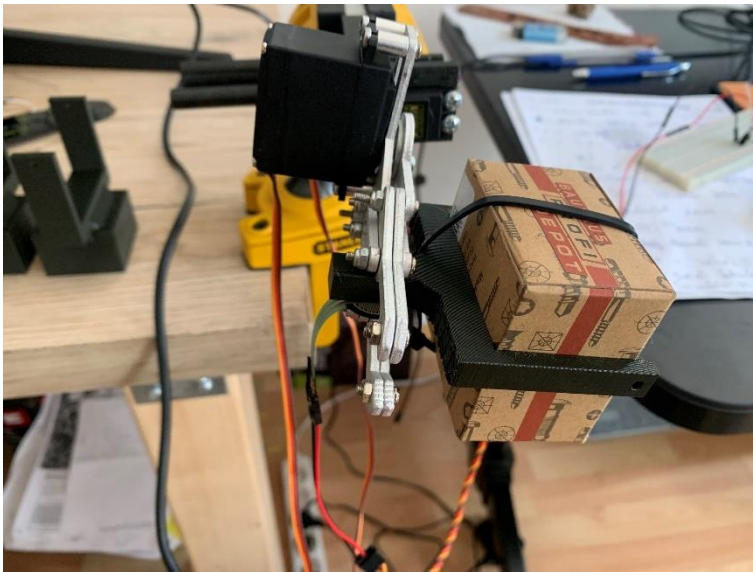
Analog reading (0-1023): 927
Voltage reading (mV): 4530
FSR resistance (ohm): 1037
Grip force (N): 12

Analog reading (0-1023): 925
Voltage reading (mV): 4521
FSR resistance (ohm): 1059
Grip force (N): 11

```

Zdroj: autor

Obrázek 52 - Test síly stisku s rotací předmětu (10 mm, 50 g)



Zdroj: autor

Obrázek 53 - Test síly stisku (20 mm, 350 g)



Zdroj: autor

4.2 Přesnost, opakovatelnost a zatížení

Vedle přesnosti a opakovatelnosti je součástí této kapitoly i sub-kapitola stran nosnosti. Jelikož bylo testování prováděno s komplexními pohyby při změnách hmotnosti závaží, bylo možné také vyzorovat nosnost potřebné zátěže.

4.2.1 Přesnost a opakovatelnost v horizontální rovině

V prvním testu opakovatelnosti a přesnosti byl manipulátor nastaven pro pohyb na tři různé pozice (v horizontální rovině) se zvyšující se zátěží v rozmezí 100 až 500 g. Na pozicích byl umístěn čistý papír a na konec ramen manipulátoru upnut speciální nástavec s permanentním fixem pro značení konečné polohy.

Vzdálenosti pozic od osy otáčení kloubu základny J1 činily 600, 650 a 700 mm. Pozice byly zároveň v různých výškách: 195, 265 a 315 mm a v úhlech 0° , 45° a 135° od počátečního natočení J1 (respektive EF).

Celkem bylo provedeno 6 testů, přičemž první proběhl bez přídavné zátěže pouze se speciálním end-effectorem (hmotnost i s fixem 33 g). První test proběhl jednou pro zanesení referenčního bodu a poté 20 testovacími iteracemi. Testy se zátěžemi 100-300 g proběhly 10 iteracemi a testy 400-500 g s pěti iteracemi (respektive 11 a 6 při započtení nanesení počátečního bodu). Pro zakreslení referenčních bodů na jednotlivých pozicích byl manipulátor nejdříve ručně kalibrován.

Manipulátor se pohyboval kontinuálně, tedy mezi pohyby na jednotlivé pozice se vracel do počáteční (domovské pozice) s tím, že před dokončením pohybu (nebo těsně po jeho dokončení) do domovské polohy se opět vrátil k pohybu na další pozici.

Po proběhnutí každého testu byly na papír nanесeny kružnice (bylo-li to potřeba) se středem v referenčním bodě (označeném křížkem) a změřeny vzdálenosti k ostatním naneseným bodům v rámci daného testu (přesnost) a následně změřen poloměr kruhu, v němž se nachází všechny zanesené body (nebo nejdelší vzdálenost mezi nimi).

První tabulka níže zachycuje zjištěné hodnoty i dobu trvání testu a počet iterací. Druhá tabulka ukazuje průměry opakovatelnosti a přesnosti v jednotlivých pozicích a hodnoty váženého průměru za všechny tři pozice naráz (vzat v potaz počet iterací k příslušným hmotnostem). Data jsou zachycena také graficky a fotografie nanesených bodů pro každou pozici a jednotlivá zatížení end-effectoru jsou k nalezení v příloze Fotogalerie.

Tabulka 14 - Přesnost a opakovatelnost (údaje v mm) v horizontální rovině

	váha (g)	bez zatížení	100	200	300	400	500
1. pozice	přesnost	9,0	3,0	8,0	2,0	10,0	10,0
	opakovatelnost	3,5	4,5	5,0	4,0	4,0	9,0
2. pozice	přesnost	12,0	3,0	2,0	20,0	15,0	13,0
	opakovatelnost	10,0	4,0	4,5	36,5	11,5	11,0
3. pozice	přesnost	5,0	2,0	3,0	6,0	11,0	14,0
	opakovatelnost	6,5	3,5	4,5	15,0	12,5	13,0
Počet iterací		20	10	10	10	5	5
Doba trvání testu (min)		14	7	7	7	5	5

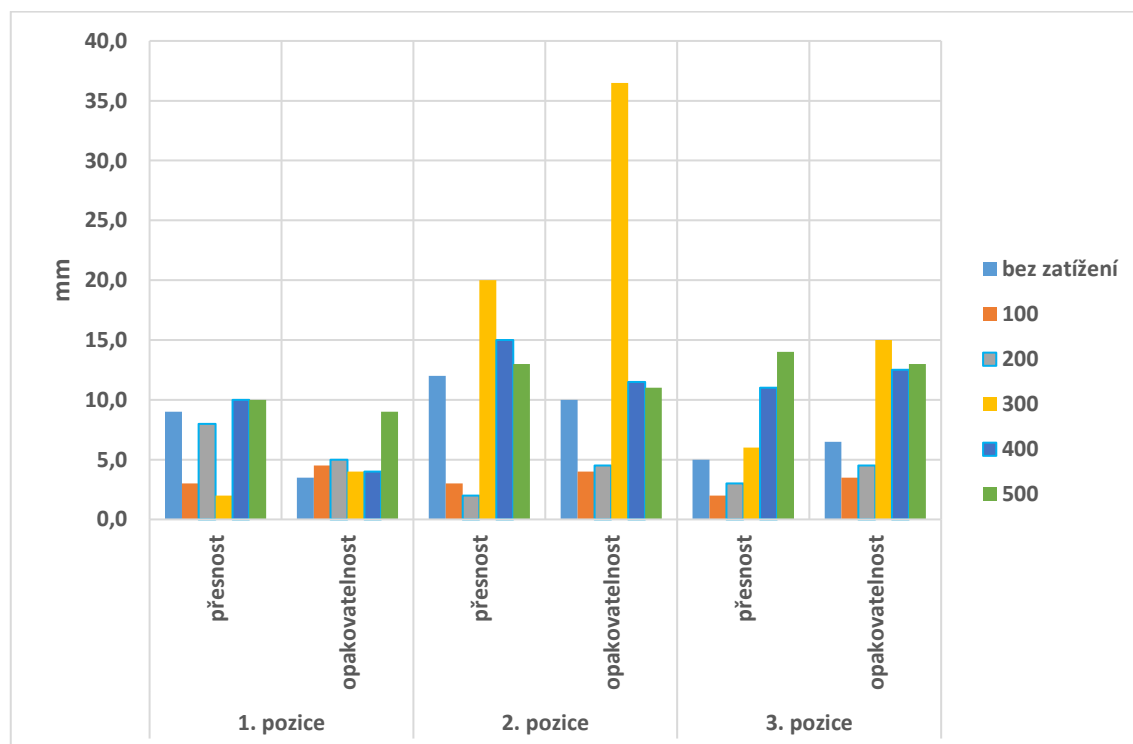
Zdroj: autor

Tabulka 15 - Přesnost a opakovatelnost – průměry a vážený průměr (údaje v mm) v horizontální rovině

	váha (g)	bez zatížení	100	200	300	400	500	Vážený průměr
průměr	přesnost	8,7	2,7	4,3	9,3	12,0	12,3	7,6
	opakovatelnost	5,0	3,0	3,5	13,9	7,0	8,3	6,3

Zdroj: autor

Graf 5 - Přesnost a opakovatelnost na jednotlivých pozicích EF v závislosti na měnícím se zatížení (g) v horizontální rovině



Zdroj: autor

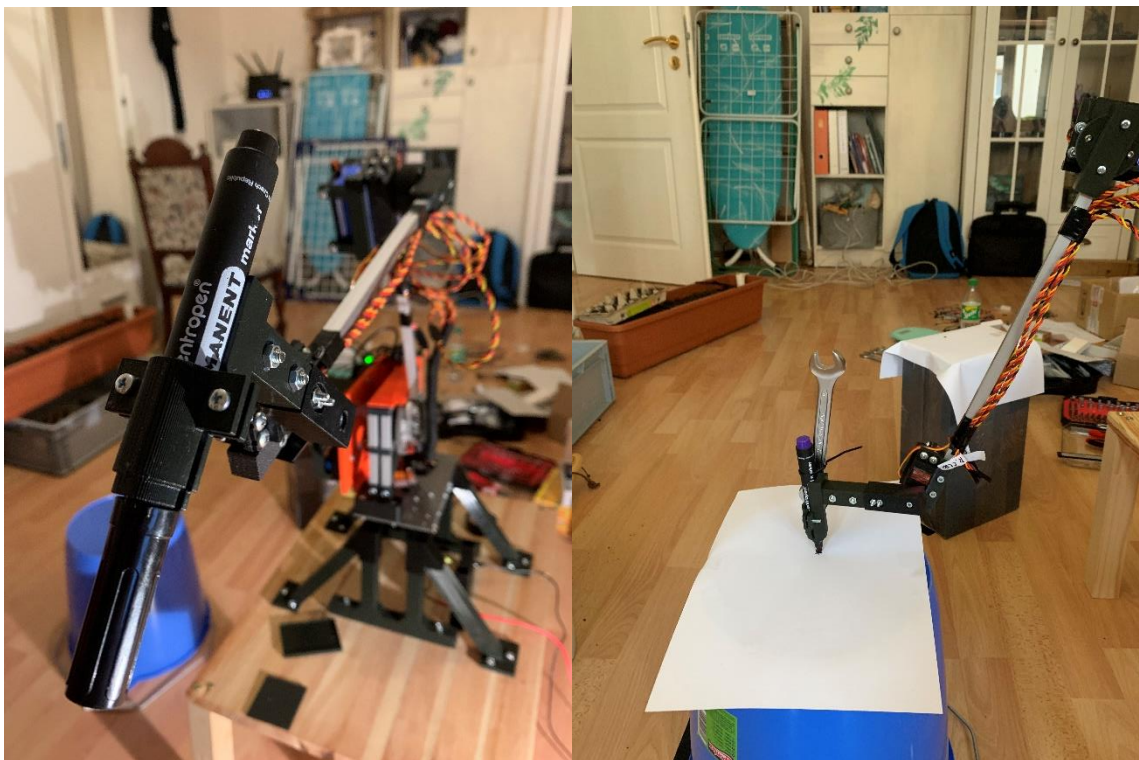
Z hlediska přesnosti má manipulátor toleranci 7,6 mm napříč všemi zatíženími do 500 g. S opakovatelností je na tom o něco lépe, vážený průměr opakovatelnosti je 6,3 mm.

Nejlepší výsledky rameno vykazovalo při zatížení 100 a 200 g (průměrné hodnoty přesnosti a opakovatelnosti jsou 2,7 mm, 4,3 mm a 3,0 a 3,5 mm). Naopak nejhorší výsledky byly vyzorovány při zatížení 500 g (12,3 mm přesnost a 8,3 mm opakovatelnost).

Při zatížení 300 g se rameno zpomalilo a při přesunu k druhé pozici se EF dotkl papíru dříve a vykreslil dráhu pohybu až k cílovému bodu. Z tohoto důvodu jsou u tohoto zatížení a údajů z druhé pozice zachyceny velké odchylky.

Po úpravě času pro pohyb k druhé pozici (navýšení o 2 sekundy) vykazovalo rameno v porovnání normální hodnoty.

Obrázek 54 - Nástavec na permanentní fix k testování a testování se zátěží 100 g



Zdroj: autor

4.2.2 Přesnost a opakovatelnost ve vertikální rovině

Druhý test byl proveden obdobným způsobem. End-effector manipulátoru se pohyboval na dvě předem stanovené vertikální pozice v různých výškách. První pozice byla od osy otáčení základny vzdálena 900 mm a druhá pozice 700 mm.

Test probíhal při měnících se hmotnostech (bez zátěže/vlastní zátěž EF, 300 g, 500 g). Nejprve byly umístěny čisté papíry a end-effector zatížen potřebnou hmotností. Následně (pro každou hmotnost) nanasl manipulátor referenční bod (ten byl označen křížkem) a poté provedl 10 iterací se všemi uvedenými hmotnostmi end-effectoru.

Poté byly změřeny vzdálenosti nanesených bodů od referenčního (přesnost) a vzdálenost mezi dvěma nejvzdálenějšími nanesenými body pro určení opakovatelnosti.

Níže jsou graficky a v tabulkách zachyceny zjištěné údaje.

Tabulka 16 - Přesnost a opakovatelnost (údaje v mm) ve vertikální rovině

	váha (g)	bez zatížení	300	500
1. pozice	přesnost	8,0	7,0	5,0
	opakovatelnost	16,0	17,0	15,0
2. pozice	přesnost	19,0	28,0	36,0
	opakovatelnost	80,0	48,0	60,0
Počet iterací		10	10	10
Doba trvání testu (min)		4,0	4,0	4,0

Zdroj: autor

Tabulka 17 - Přesnost a opakovatelnost – průměry a vážený průměr (údaje v mm) ve vertikální rovině

	váha (g)	bez zatížení	300	500	Vážený průměr
průměr	přesnost	13,5	17,5	20,5	17,6
	opakovatelnost	48,0	32,5	37,5	40,4

Zdroj: autor

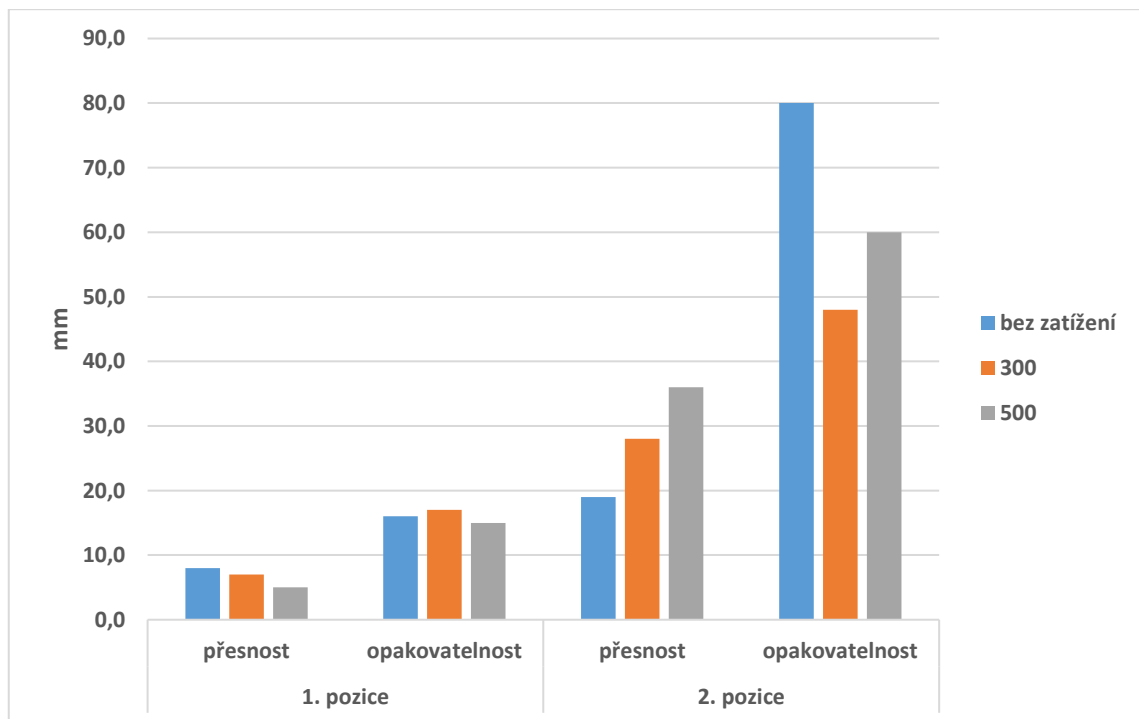
Výsledky testu při nanášení bodů na vertikálně umístěnou pozici byly lepší při pohybu manipulátoru k první (vyšší) pozici. U druhé pozice měl manipulátor problém nanést body přesně do definovaného referenčního bodu a značkovač se dotýkal ve vertikální ose podložky dřívě, čímž vynesl křivku namísto bodu (viz Fotogalerie v přílohách). Na druhou stranu poloha end-effectoru sena horizontální ose vychylovala v porovnání s vertikální pouze o 1-2 mm. Možností zpřesnění výsledné polohy end-effectoru by bylo

zpomalení kloubu J4, tak aby se end-effector dotkl podložky po zastavení ostatních ramen. Tento způsob by však prodloužil dobu potřebnou pro úkon a pohyb by postrádal dynamiku.

Strany váženého průměru jsou výsledky tohoto druhého testu horší než výsledky prvního testu, kde vážený průměr přesnosti činil 7,6 mm a opakovatelnost 6,3 mm oproti 17,6 mm přesnosti a 40,4 mm opakovatelnosti.

Na rozdíl od prvního testu zde manipulátor dosahuje lepších hodnot z hlediska přesnosti, a to u všech hmotností na obou pozicích.

Graf 6 - Přesnost a opakovatelnost na jednotlivých pozicích EF v závislosti na měnícím se zatížení (g) ve vertikální rovině

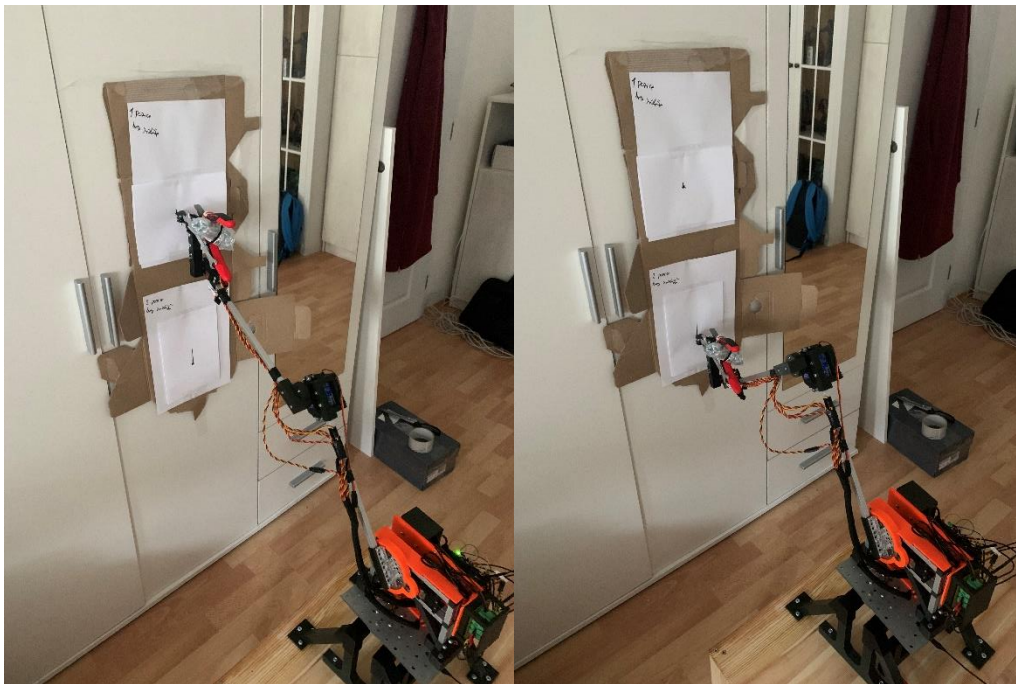


Zdroj: autor

4.2.3 Nosnost

Zatížení bylo otestováno v rámci testů opakovatelnosti a přesnosti, viz výše. Manipulátor provedl napříč testem 60 iterací s celkovou dobou chodu 45 minut při změnách zatížení od 33 do 500 g. Z hlediska nosnosti je manipulátor způsobilý unést 500 g. Ačkoli při této zátěži již vykazuje horší vlastnosti stran přesnosti a opakovatelnosti předdefinovaných pohybů a také pomalejší chod.

Obrázek 55 - Ukázka z testu přesnosti a opakovatelnosti s hmotností 500 g – pozice ve vertikální rovině



Zdroj: autor

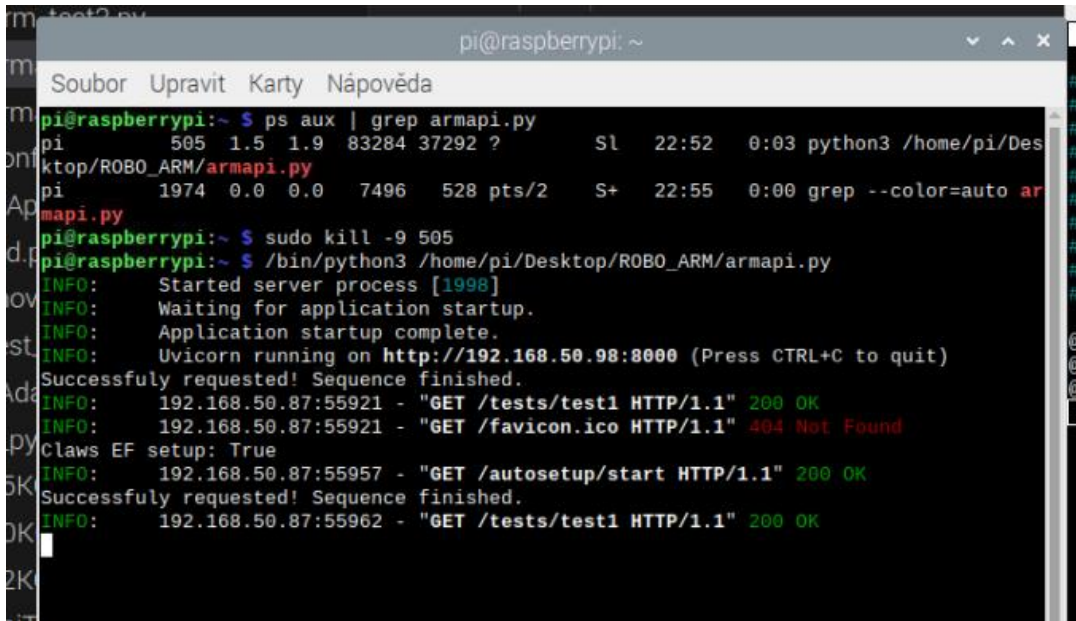
4.3 Aplikace dezinfekce

Test proběhl na dveřích s klikou ve výši 1220 mm od země. Před testem byly polohy natočení servomotorů kalibrovány pro příslušný úkon ručně. Proměnné s úhly jsou k dispozici v souboru `config.py`. Pro aplikaci dezinfekce byla použita univerzální metoda pro komplexní pohyb kloubů J1 až J4, jež přijímá parametry k pohybu k předmětné klice. Dále byla využita metoda pro pohyb servomotoru umístěném na EF s rozprašovačem (hodnoty lze také měnit v konfiguračním souboru, ale aktuální nastavení rozsahu odpovídá účelově mechanickým limitům upevnění pohonné jednotky na EF). Obě metody jsou součástí pomocného souboru `move.py` a součástí tříd `SprayTheHandle` a `MoveWithoutEF`.

Po aplikaci dezinfekce se manipulátor vrátí do původní/domovské pozice a po uplynutí několika sekund vyšle signál na testovací API (<https://api.github.com>). Metoda pro vyslání http požadavku obsahuje podmínku pro otestování stavového kódu a úspěšnosti odeslání daného požadavku. Při úspěšném odeslání se do konzole vypíše zpráva.

Videa z testu aplikace dezinfekce na kliku dveří jsou součástí přílohy Fotogalerie. Níže je obrázek se zachycenou zprávou o úspěšném ukončení sekvence a odeslání http požadavku na cizí API.

Obrázek 56 – Oznámení o odeslání http požadavku na cizí API po úspěšném dokončení autonomní sekvence



```
pi@raspberrypi: ~  
Soubor Upravit Karty Nápověda  
pi@raspberrypi:~$ ps aux | grep armapi.py  
pi          505  1.5  1.9 83284 37292 ?        Sl   22:52   0:03 python3 /home/pi/Desktop/ROBO_ARM/armapi.py  
pi          1974  0.0  0.0  7496   528 pts/2    S+   22:55   0:00 grep --color=auto armapi.py  
pi@raspberrypi:~$ sudo kill -9 505  
pi@raspberrypi:~$ /bin/python3 /home/pi/Desktop/ROBO_ARM/armapi.py  
INFO: Started server process [1998]  
INFO: Waiting for application startup.  
INFO: Application startup complete.  
INFO: Uvicorn running on http://192.168.50.98:8000 (Press CTRL+C to quit)  
Successfully requested! Sequence finished.  
INFO: 192.168.50.87:55921 - "GET /tests/test1 HTTP/1.1" 200 OK  
INFO: 192.168.50.87:55921 - "GET /favicon.ico HTTP/1.1" 404 Not Found  
Claws EF setup: True  
INFO: 192.168.50.87:55957 - "GET /autosetup/start HTTP/1.1" 200 OK  
Successfully requested! Sequence finished.  
INFO: 192.168.50.87:55962 - "GET /tests/test1 HTTP/1.1" 200 OK
```

Zdroj: autor

5 Nedostatky a možnosti vylepšení

5.1 Nedostatky

5.1.1 Plynulost chodu kloubu J3

Před testováním jeden z kloubů vykazoval známky vnitřního poškození způsobujícího vibrace napříč téměř celým robotickým ramenem. Po softwarové úpravě řízení a přidání možnosti malých kroků se chod mírně zlepšil, ale nakonec byl vyměněn. Nový servomotor má mnohem lepší chod, nicméně při pohybu dopředu pod zatížením je jeho pohyb taktéž místy neplynulý, a to i po úpravách jednotlivých parametrů. Oproti původnímu stavu se však jedná o velmi výrazné zlepšení a vibrace jsou zanedbatelné.

Teoreticky by ještě bylo možné nahradit stávající servomotor za programovatelnou verzi, u níž lze pomocí programovací karty definovat deceleraci, ochranu proti přetížení nebo výstupní výkon a tím dosáhnout plynulejšího chodu bez vibrací.

Limitací může být, že takové servomotory mají menší kroutící moment, než je třeba, nebo jsou oproti použitým poměrně drahá. Také je třeba uvažovat o nákupu programovací karty/boxu.

5.1.2 Mechanické vůle

Uchycení jednotlivých ramen a komponentů vyžadovalo přesný model a tisk. Všeobecnou praxí je, že u modelů vyžadujících další spoje se na všech stranách styčných ploch nechává mezera v řádu desetin milimetru (většinou 0,1-0,15 mm), aby bylo možné oba vytisknuté díly spojit bez použití značné síly a zároveň aby oba díly držely pohromadě. Při této toleranci se však vůle mohou v daném řetězci nasčítat a mohou dosáhnout 0,5 – 1 mm.

Mechanickou vůli vykazuje také spojení mezi kruhovou pákou servomotoru J3 a hřídelí, respektive ozubeným kolem, na něž se páka nasazuje. I po přišroubování výrobcem dodaným šroubem nesedí páka zcela pevně na ozubení. Obě zmíněné mechanické vůle mohou mít za následek mírné kývání EF při zastavení.

5.1.3 Singularita

Robotická ramena se mohou dostat do stavu/konfigurace, kdy je jejich další pohyb nemožný nebo velmi obtížný, ačkoli za jiných okolností by jej manipulátor zvládl. Tomuto stavu se říká singularita. [113]

Stavy, do nichž se může rameno dostat, jsou odvislé i od jeho umístění. Předmětný manipulátor je připevněn na desce simulující horní kryt autonomního vozidla, přičemž při určitých kombinacích natočení kloubů J2, J3 a J4 se může dostat například do situace, kdy je EF zablokován pod deskou a manipulátor není schopen vykonat stanovený pohyb. Další situací může být vykování úkonů příliš blízko základny. V takovém případě by mohl potenciálně EF kolidovat se základnou.

Singulárním bodům se lze vyhnout ručním řízením i správným nastavením automatizovaných úkonů, ale je potřeba, aby rameno ovládal zkušenější uživatel a dbal opatrnosti při řízení.

5.1.4 Kabelové rozvody

Nedostatkem může být i vedení vodičů na zadní straně nosiče elektroniky. V současné chvíli vodiče, díky jednoduchému úchytu, nepřekáží pohybu ramene, ale vedení může být do určité míry pro běžného uživatele nepřehledné. Svazky kabelů jsou v aktuálně označeny štítky s názvy servomotorů, které napájí/řídí.

5.2 Možná vylepšení

5.2.1 Proudové senzory

Jednou z možností vylepšení je instalace a připojení proudových senzorů ke všem vodičům napájecím pohonné jednotky. Vzhledem k možnému počtu připojených servomotorů by bylo třeba rovněž vymyslet box pro umístění senzorů a posléze samotný box upevnit na konstrukci ramene, případně pod základnu. Poté by však bylo třeba upravit základnu, aby bylo možné vést svazky vodičů bez rizika překroucení nebo jiného poškození.

Instalací proudových senzorů a např. softwarovým časovačem by se mohl teoreticky vyřešit problém se singulárními body. Knihovna užitá pro řízení sice nedisponuje možností servomotory odstavit, ale bylo by možné nadefinovat při velkém proudovém odběru pohyb zpět. Vhodné určení horní meze proudového odběru by vyžadovalo další

testování pohonných jednotek při plné zátěži a bylo by nutné vzít v úvahu také hodnoty v okamžiku rozběhu motorů.

5.2.2 Senzory pro měření vzdálenosti

Umístěním a připojením senzorů vzdálenosti např. optických infra senzorů, nebo ultrazvukových na end-effector by bylo možné detekovat předměty pro úchop, nebo madlo dveří pro aplikaci dezinfekce. Při správné kalibraci by mohlo rameno, respektive end-effector sám určit např. polohu kliky a na příslušné místo aplikovat antibakteriální roztok. Totéž by platilo pro zjištění polohy předmětu a jeho následný úchop.

Sofistikovanější formou by mohlo být umístění kamery na rameno L4 nebo na speciální nástavec s EF a rozpoznávání obrazu tímto způsobem.

Zapojení a nastavení optických nebo ultrazvukových senzorů by rovněž mohlo pomoci s detekcí potenciální kolize.

5.2.3 Čtení polohy servomotorů bez napájení

U běžné dostupných servomotorů lze vrátit údaj o aktuální poloze a uložit jej případně do jiné proměnné. Pro vrácení tohoto údaje musí být servomotor napájen a je-li pod proudem, není možné (s většinou dostupných servomotorů) ručně otočit.

Pokud bychom chtěli zjistit údaje o poloze servomotoru bez připojení do el. sítě, lze toho dosáhnout úpravou řídicí jednotky uvnitř servomotoru, respektive připájením vodiče k určenému terminálu a připojením k naší řídicí jednotce [114]. Servomotor by poté měl vracet údaje o natočení hřídele. Samozřejmě je nutné upravit pro danou mechaniku kód a data ukládat. V případě předmětného robotického manipulátoru by bylo možné zasáhnout do řídicích jednotek minimálně kloubů J3, J4 a J5.

Nevýhodou tohoto postupu je zásah do vnitřností servomotoru a při neopatrné manipulaci jeho nenávratné poškození.

6 Diskuse a závěr

Definované cíle práce byly následující:

- zkonstruovat robotický manipulátor s:
 - dosahem 900 mm;
 - nosností 500 g;
 - univerzálním ramenem na upevnění nástavců s end-effektorem dle potřeby;
- možností spuštění automatizované sekvence externím požadavkem z robotického autonomního vozidla;
 - provedení sekvence (dezinfekce madla dveří);
 - navrácení do domovské polohy;
 - vyslání signálu, že je sekvence dokončena.

Cíle práce stanoveny autorem:

- vytvoření rozhraní pro ovládání a přepínání režimů mezi autonomním a manuálním;
 - umožnění manuálního řízení manipulátoru.

Konstrukce ramen umožňuje dosah od středu rotace základny 890 mm bez nasazeného end-effectoru, tedy po nasazení jakéhokoli nástavce s end-effektorem je překročena stanovená mez manipulačního prostoru. S dosahem souvisí univerzálnost/otevřenost ramene, neboť je možné na konec ramene L4 jednoduše upnout uživatelský nástavec a upevnit jej dvěma šrouby M4 (autor používá šrouby M4x20) – samozřejmě upnutí závisí také na typu end-effectoru.

V souvislosti s univerzálností se předpokládá, že bude mít uživatel možnost obstarat si end-effector dle vlastních požadavků, například s možností využít vlastní model a následný 3D tisk.

Autor demonstruje použití různých nástavců v průběhu testování stisku čelistí (typ čelistí s možností rotace a statických čelistí), dále v průběhu testování opakovatelnosti, kdy použil nástavec na značkovač pro určení polohy, a také při testu přijetí požadavku

na API a vykonání sekvence pro rozprašení dezinfekce, kdy byl nasazen adaptér s rozprašovačem.

Nosnost byla otestována v rámci testu přesnosti a opakovatelnosti, neboť se v průběhu testování měnilo zatížení EF (od 100 do 500 g) a byly pozorovány změny v chování a přesnosti pohybů manipulátoru. Manipulátor unese zátěž s hmotností 500 g, ale snižuje se přesnost pohybů a ramena se pohybují pomaleji. Při vykonávání komplexnějších pohybů dokáže unést předmětnou hmotnost až s dosahem 900 mm.

Před testování přesnosti a opakovatelnosti bylo třeba vyřešit problém se špatně fungujícím servomotorem kloubu J3, který se netočil správně a při rotaci v rozsahu 85°-95° silně vibroval. Zároveň přenášel vibrace do dalších ramen a tímto způsoboval výkyv EF. Řešením byla výměna pohonné jednotky za novou s obdobnými parametry a naprogramování jemnějšího řízení jejího chodu. Oba tyto zásahy přispěly k lepšímu pohybu ramen.

Samotné testování opakovatelnosti a přesnosti ukázalo, že manipulátor dosahuje lepších výsledků stran opakovatelnosti než přesnosti při polohování EF pro nanesení bodů na horizontální rovinu (vážené průměry jsou 7,6 respektive 6,3 mm) a že na přesnosti ramena ztrácí se zvyšující se zátěží (400 a 500 g), a to v některých případech i o 10 mm. V prvním testu naměřené artefakty u zátěže 300 g na pozici č. 2 (viz Tabulka 14 - Přesnost a opakovatelnost (údaje v mm)) byly dány kratším přerušením mezi pohybem do počáteční pozice a přesunem na pozici č. 3. Po úpravě času pro přesun byly výsledky již srovnatelné.

Při druhém testu manipulátor polohoval end-effector s výslednou přesností do 17,6 mm, přičemž výsledky u první sledované pozice byly výrazně lepší než u druhé, níže položené. Výsledky přesnosti se souhrnně lišily mezi oběma pozicemi o více než 20 mm. Strany opakovatelnosti byly lepší výsledky zjištěny napříč všemi hmotnostmi taktéž u první pozice.

Při testování síly stisku použitých čelistí bylo vyzorováno, že čelisti dosahují lepších výsledků u předmětů s větším průměrem, a to i při zvětšující se zátěži. Naopak malé předměty v čelistech špatně držely, respektive špičky čelistí (prostor 1A) je neudržely téměř vůbec a stisk blíže servomotoru ovládajícím čelisti (v prostoru 2B) vykazoval malé hodnoty.

Čelisti lépe drží hranolovité předměty než válcovité. U válcovitých předmětů také záleží na umístění v prostoru čelistí – lépe drží u špiček čelistí (prostor 1A), než v ostatních vymezených prostorech. Více viz kapitola 4.1.

Během testování síly stisku předmětů s malým průměrem se stisk příliš neměnil ani během prudkých změn pohybu způsobených rotací čelistí. Při testování průměru 30 mm (asi po 90 minutách testování) však došlo ke spálení a zadření servomotoru. Čelisti byly vyměněny, ale další testy byly provedeny bez rotace EF. Vzhledem k tomu, že EF neupustil během rotací předměty s malým průměrem (u 20 mm ani při zátěži 500 g), lze logicky předpokládat, že u větších průměrů úchytů, které držely v čelistech mnohem lépe, by rotaci vydržely obdobným způsobem a nedošlo by k selhání.

Stran ovládání může uživatel přepínat mezi manuálním a autonomním režimem. Posílání http požadavků na API bylo testováno přes nové okno prohlížeče při zadání příslušné URL. Test s rozprašovačem byl proveden na dveřích s klikou ve výši 122 cm, přičemž EF úspěšně aplikoval roztok na dané místo a vrátil se do domovské pozice. Po ukončení sekvence následně manipulátor poslal signál na testovací API (github) a úspěšně vyslaný http požadavek byl potvrzen vypsáním textového řetězce do konzole.

V rámci API manipulátoru jsou definovány další čtyři endpointy s přednastavenými sekvencemi, které si může uživatel upravit dle libosti. Buď pomocí změn parametrů a nebo pomocí volání metod včetně delay tak, jak potřebuje (endpoint `"/tests/test5"`).

Práce na manipulátoru vyžadovala syntézu mnoha činností a řešení různorodých problémů:

- návrh manipulátoru;
- vytvoření 3D parametrického modelu a jeho jednotlivých součástí včetně pohybové simulace;
 - díly bylo nutné navrhnut nejen z hlediska mechanické spolehlivosti, ale také z hlediska tisknutelnosti;
- výběr vhodného materiálu pro konstrukci;
- zjištění potřebného výkonu pohonných jednotek pomocí výpočtů;
- výběr pohonných jednotek a potřebné elektroniky;

- návrh elektrického zapojení a vyřešení napájení celku;
 - návrh a vyfrézování vlastního tištěného spoje;
- fyzické sestavení manipulátoru;
 - vyřešení univerzálnosti ramen pro upnutí různých nástavců;
- navržení softwarové aplikace pro manuální i autonomní řízení;
 - implementaci vhodného komunikačního kanálu;
 - navržení uživatelského rozhraní;
 - implementaci jemnějšího řízení motorů;
- testování.

A to vše za účelem vytvoření jednoho funkčního celku.

Manipulátor má své nedostatky a limity stran pohybu či přesnosti, nicméně disponuje cílovými mechanickými atributy, umožňuje autonomní řízení – provádění uživatelem definovaných sekvencí i manuální řízení, komunikaci s dalším systémem a v neposlední řadě lze na rameno upnout různorodé nástavce dle volby uživatele. V této souvislosti může být vhodným nástrojem pro plnění různých úkolů nevyžadujících velmi precizní práci.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] MOORE, Gordon E. Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from *Electronics*, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff. *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter* [online]. 2006, **11**(3), 33-35 [cit. 2022-03-05]. ISSN 1098-4232. Dostupné z: doi:10.1109/N-SSC.2006.4785860
- [2] TAKAHASHI, Dean. Intel's Gordon Moore speculates on the future of tech and the end of Moore's Law. *VentureBeat* [online]. 2015 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://venturebeat.com/mobile/intels-gordon-moore-speculates-on-the-future-and-the-end-of-moores-law/>
- [3] VAN DOREMALEN, Neeltje, Trenton BUSHMAKER, Dylan H. MORRIS, et al. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine*. Massachusetts Medical Society, 2020/03/17, **382**(16), 1564-1567. ISSN 0028-4793. Dostupné z: doi:10.1056/NEJMc2004973
- [4] STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV. *Nový koronavirus vydrží na povrchu několik hodin* [online]. 2020 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://szu.cz/temata-zdravi-a-bezpecnosti/nemoci-a-jejich-prevence/2019ncov/zakladni-informace-o-covid-19-reinfekce-ockovani/>
- [5] WHITE, Monica J. *Nvidia says falling GPU prices are 'a story of the past'* [online]. 2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com/computing/nvidia-says-falling-gpu-prices-are-over/>
- [6] PTC DIGITAL TRANSFORMS PHYSICAL. *Onshape* [online]. 2014 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.onshape.com/en/>
- [7] FRITZING GMBH. *Fritzing electronics made easy* [online]. 2024 [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://fritzing.org/>. Last Stable Release.
- [8] KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES. How Are Industrial Robots Built? A Guide on the Components and the Movement of Robot Arms. *XYZ Your World + Robots* [online]. 2018 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://robotics.kawasaki.com/ja1/xyz/en/1804-03/>

- [9] SCIAVICCO, L. a B. SICILIANO. *Modelling and Control of Robot Manipulators: Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. Springer London, 2001. ISBN 9781852332211. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=v9PLbcYd9aUC>
- [10] GOUBEJ, Martin, Martin ŠVEJDA a Miloš SCHLEGEL. *Úvod do systémů mechatroniky, robotiky a systémů řízení pohybu*. Západočeská univerzita v Plzni, Katedra Kybernetiky, 2012. Skriptum pro studenty doktorských programů v oboru automatické řízení. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [12] TANEV, Tanio K. Kinematics of a hybrid (parallel–serial) robot manipulator. *Mechanism and Machine Theory*. 2000, **35**(9), 1183-1196. ISSN 0094-114X. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(99\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(99)00073-7)
- [13] XU, Peng, Chi-Fai CHEUNG, Bing LI, Lai-Ting HO a Ju-Fan ZHANG. Kinematics analysis of a hybrid manipulator for computer controlled ultra-precision freeform polishing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017, **44**, 44-56. ISSN 0736-5845. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.08.003> [online]. [cit. 2024-01-21].
- [14] ROBOTS DONE RIGHT. FANUC Arc Mate 120iC. *Robots Done Right* [online]. 2024 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/FANUC/Arcmate-Series/FANUC-Arcmate-120ic.html>
- [15] OMRON PRŮMYSLOVÁ AUTOMATIZACE. X-Delta 2+1 Koncepte vysoce kvalitního robota s minimem mechanických součástí. *Omron Průmyslová automatizace* [online]. 2024 [cit. 2024-01-21]. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/x-delta>
- [16] KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES. What Kinds of Industrial Robots Are There? A Guide on the Features of the Major 6 Types. KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES. *XYZ Your World + Robots* [online]. 2018 [cit. 2024-01-21]. Dostupné z: <https://robotics.kawasaki.com/ja1/xyz/en/1803-01/>
- [17] AZOROBOTICS. What is a Robotic Manipulator? AZOROBOTICS. *AZORobotics* [online]. 2023 [cit. 2023-12-18]. Dostupné z: <https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=138>

- [18] Structure of Industrial Robots or Manipulators: Robotics: Types of Base Bodies – II. *BrightHubEngineering* [online]. 2022 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.brighthubengineering.com/robotics/26370-robotics-structure-of-industrial-robots-or-manipulators-types-of-base-bodies-two/>
- [19] TODD, D. J. *Fundamentals of robot technology: an introduction to industrial robots, teleoperators and robot vehicles*. Kogan Page Ltd 120 Pentonville Road, London N1 9JN, 1986, 244 s. ISBN 978-94-011-6770-3. [online]. [cit. 2024-01-21]. ISBN 978-94-011-6770-3.
- [20] How to Select the Best Motor for a Jointed Arm Robot. *ROZUM ROBOTICS* [online]. 2021 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://rozum.com/how-to-select-the-best-motor-for-a-jointed-arm-robot/>
- [21] SCARPINO, Matthew. *MOTORS for MAKERS A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines*. United States of America: Pearson Education, 2016, 307 s. ISBN 0-13-403283-7.
- [22] FIROOZIAN, Riazollah. *Servo Motors and Industrial Control Theory* [online]. Druhé. Íran: Springer, 2014 [cit. 2023-02-14]. ISBN 978-3-319-07275-3. Dostupné z: doi:DOI 10.1007/978-3-319-07275-3
- [23] Servos Explained. *Sparkfun START SOMETHING* [online]. 2024 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/servos>
- [24] DC Motors. *Electronics Tutorials* [online]. c2024 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_7.html
- [25] Servo MG996 s kovovými převody, kontinuální. *Laskakit by makers for makers* [online]. c2024 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/servo-mg996-s-kovovymi-prevody-kontinualni--extra-silne/>
- [26] HEATH, Janet. Pulse Width Modulation (PWM): what is it and how does it work? *ANALOG IC TIPS An EE World Online Resource* [online]. 2017 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.analogictips.com/pulse-width-modulation-pwm/>
- [27] SCHERZ, Paul a Simon MONK. *Practical electronics for inventors*. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Education, [2016]. ISBN 978-1-25-958754-2.

- [28] LENTIN, Joseph. How to choose a brain for your robot? *ROBOCADEMY* [online]. 2020 [cit. 2023-11-04]. Dostupné z: <https://robocademy.com/2020/04/18/how-to-choose-a-brain-for-your-robot/>
- [29] What is the Best MCU for Robotics in 2020? *Octopart* [online]. 2020 [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://octopart.com/pulse/p/what-is-the-best-mcu-for-robotics-in-2020>
- [30] Choosing the Best Microcontroller For Robotics 2023. *EmbedIC* [online]. 2023 [cit. 2023-11-16]. Dostupné z: <https://www.embedic.com/technology/details/choosing-the-best-microcontroller-for-robotics-2023>
- [31] Robotics - Arduino MKR Vidor 4000. *Arduino Store* [online]. c2021 [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: https://store.arduino.cc/collections/robotics/products/arduino-mkr-vidor-4000?_pos=8&_fid=ac25603f2&_ss=c
- [32] *Arduino® Nano: Product Reference Manual* [PDF]. SKU: A000005. 2024. Dostupné také z: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>
- [33] *Arduino® UNO R3: Product Reference Manual* [PDF]. SKU: A000066. 2024. Dostupné také z: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- [34] Micro. *Arduino Docs* [online]. 2024 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/micro/>
- [35] Raspberry Pi Documentation. *Raspberry Pi* [online]. 2024 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/processors.html#bcm2835>
- [36] BILAL, Muhammad. 6-axis robotic arm runs on Raspberry Pi. *Raspberry Projects* [online]. 2019 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://projects-raspberry.com/6-axis-robotic-arm-runs-on-raspberry-pi/>
- [37] PiArm - SunFounder Robotic Arm for Raspberry Pi. *SunFounder* [online]. 2021 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://docs.sunfounder.com/projects/piarm/en/latest/>
- [38] TAN, Cherie. The 10 Best Raspberry Pi Robotics Projects. *MUO - Make Use Of* [online]. 2022 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.makeuseof.com/best-raspberry-pi-robotics-projects/>

- [39] TAN, Cherie. The 10 Best ESP32 Robotics Projects. *MUO - Make Use Of* [online]. 2021 [cit. 2024-01-21]. Dostupné z: <https://www.makeuseof.com/best-esp32-robotics-projects/>
- [40] TORRONE, Phillip. Why the Arduino Won and Why It's Here to Stay. *MAKE:* [online]. 2011 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://makezine.com/article/technology/arduino/why-the-arduino-won-and-why-its-here-to-stay/>
- [41] Tensilica Controllers and Extensible Processors. *Cadence* [online]. 2024 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: https://www.cadence.com/en_US/home/tools/ip/tensilica-ip/tensilica-xtensa-controllers-and-extensible-processors.html
- [42] *ESP32 Series: Datasheet* [PDF]. 4.4. Espressif Systems, c2023. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [43] RASPBERRY PI. Raspberry Pi Documentation: Raspberry Pi hardware - GPIO and the 40-pin Header. *Raspberry Pi* [online]. 2024 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#gpio-and-the-40-pin-header>
- [44] Raspberry Pi 4B 2GB RAM. *Laskakit by makers for makers* [online]. 2024 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/raspberry-pi-4b-2gb-ram/>
- [45] IoT ESP8266 Lua NodeMcu V2 WIFI modul. *Laskakit by makers for makers* [online]. 2024 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/iot-esp8266-lua-nodemcu-v2-wifi-modul--tcp-ip/>
- [46] Arduino Uno rev3, originál. *Laskakit by makers for makers* [online]. 2024 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-uno-rev3--original/>
- [47] Microprocessors: STM. *DigiKey* [online]. 2024 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/products/filter/embedded/microprocessors/694?s=N4IgjCBcoLQdIDGUBmBDANgZwKYBoQB7KAbRABYBOAdhAF0BfBggNilAEsATKEOA BggEADgBdeIAqICewnLy5ZkTIA>
- [48] Embedded MCU, DSP Evaluation Boards. *DigiKey* [online]. 2024 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/products/filter/evaluation-boards/embedded-mcu-dsp-evaluation-boards/786?s=N4IgjCBcoLQBxVAYygMwIYBsDOBTANCAPZQDaIALAJwDsIhcA>

DFY-

eGAMwIC6Avr4QCsiEAAcoYQqPGQATIIEgAbCICWAEyggYYRhCkAXLWwMB
PUbi3rsKfkA

[49] DETWILER, Bill. Cracking Open the Roomba 980 robot vacuum: We crack open the Roomba 980 for a look at the tech that makes this cloud-connected cleaner iRobot's most significant robot vacuum since the original Roomba. *TechRepublic*. [online]. [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.techrepublic.com/article/cracking-open-the-roomba-980-robot-vacuum/>

[50] Motor driver karty. *RPishop* [online]. 2024 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/1492-motor-driver-karty/>

[51] Shield moduly, Strana 2. *Laskakit by makers for makers* [online]. 2024 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/shield-moduly/strana-2/>

[52] TEXAS INSTRUMENTS. *Technical Reference Manual: TMS320x2833x, TMS320x2823x* [PDF]. SPRUI07. 2020. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ug/sprui07/sprui07.pdf?ts=1705033658591>

[53] DHAKER, Piyu. Introduction to the SPI Interface. *Embedded Computing Design* [online]. [cit. 2024-01-10]. Dostupné z: <https://embeddedcomputing.com/technology/software-and-os/ides-application-programming/introduction-to-spi-interface>

[54] PINI, Art. Why and How to Use the Serial Peripheral Interface to Simplify Connections Between Multiple Devices. *DigiKey* [online]. [cit. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/articles/why-how-to-use-serial-peripheral-interface-simplify-connections-between-multiple-devices>

[55] TEXAS INSTRUMENTS. *KeyStone Architecture Literature Number: SPRUGP1 November 2010 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART): User Guide* [PDF]. SPRUGP1. 2010. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ug/sprugp1/sprugp1.pdf>

[56] PEÑA, Eric a Mary Grace LEGASPI. UART Protocols and Applications in Embedded Systems. *Embedded* [online]. 2021 [cit. 2024-01-12]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/understanding-the-uart/>

- [57] VALDEZ, Jonathan a Jared BECKER. TEXAS INSTRUMENTS. *Understanding the I2C Bus: Application Report* [PDF]. SLVA704. 2015. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>
- [58] SMUTNÝ, Vladimír. *Robotika: Přímá a inverzní kinematika otevřených kinematických řetězců* [PDF]. Centrum strojového vnímání - Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky (CIIRC) - České vysoké učení technické v Praze, 2024. Dostupné také z: <https://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/serial-notecz.pdf>
- [59] CRHA, Jan, Miroslav KIŠ a Jan MAREŠ. *ÚLOHA INVERZNÍ KINEMATIKY – NÁSTROJ PRO ŘÍZENÍ ROBOTICKÉHO MANIPULÁTORU* [PDF]. 2024. Dostupné také z: <http://uprt.vscht.cz/vav/RSoftware/S31help.pdf>
- [60] SODEMANN, Angela. *Robotics I UI (Kinematics) S4 (Displacement Vectors) P1 (Displacement Vectors)* [online, video]. 2017, 2017 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=osC-cuCxn1U&list=PLT_0lwItn0sDBE98BsbaZezflB96ws12b&index=16
- [61] SODEMANN, Angela. *Robotics I UI (Kinematics) S3 (Rotation Matrices) P1 (Rotation Matrices)* [online, video]. 2017, 2017 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=IVjFhNv2N8o&list=PLT_0lwItn0sDBE98BsbaZezflB96ws12b&index=14
- [62] SODEMANN, Angela. *Robotics I UI (Kinematics) S3 (Rotation Matrices) P3 (Rotation Matrix Examples)* [online, video]. 2017, 2017 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=oSyTHbVqGZI&list=PLT_0lwItn0sDBE98BsbaZezflB96ws12b&index=13
- [63] SODEMANN, Angela. *Robotics I UI (Kinematics) S4 (Displacement Vectors) P2 (Displacement Vector Examples)* [online, video]. 2017, 2017 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=l4jHcImSxvg&list=PLT_0lwItn0sDBE98BsbaZezflB96ws12b&index=16
- [64] SODEMANN, Angela. *Robotics I UI (Kinematics) S5 (Homogeneous Transformation Matrix) P1 (HTM from Rotation Matrix)* [online, video]. 2017, 2017 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=fXewWpehAWw&list=PLT_0lwItn0sDBE98BsbaZezflB96ws12b&index=18

- [65] JAZAR, Reza N. *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control* [online]. Druhé. Springer, c2010, 883 s. [cit. 2024-01-14]. ISBN 978-1-4419-1749-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-1750-8
- [66] SODEMANN, Angela. *Robotics 2 U1 (Kinematics) S2 (Denavit-Hartenberg) P1 (Intro)* [online, video]. 2018, 2018 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=BkMQ5Rek_vM&list=PLT_0lwItn0sAfi3o4xwx-fNfcnbfMrXa7&index=3
- [67] CORKE, Peter. Lesson: Denavit-Hartenberg notation. *QUT ROBOT ACADEMY* [online]. 2024 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: <https://robotacademy.net.au/lesson/denavit-hartenberg-notation/>
- [68] PECH, Jiří. *Robotické ruce* [PDF]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2021. Dostupné také z: https://elearning.jcu.cz/pluginfile.php/343070/mod_resource/content/0/04-Roboticke_ruce.pdf
- [69] PECH, Jiří. *Kinematika ve 2D: Základní pohyby* [PDF]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2021. Dostupné také z: https://elearning.jcu.cz/pluginfile.php/342071/mod_resource/content/0/02-Kinematika_2D.pdf
- [70] SODEMANN, Angela. *Robotics 2 U1 (Kinematics) S2 (Denavit-Hartenberg) P3 (Parameter Table)* [online, video]. 2018, 2018 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=D3w3ZANOy3s&list=PLT_0lwItn0sAfi3o4xwx-fNfcnbfMrXa7&index=4
- [71] Robots Done Right: FANUC LR Mate 200ic. *Robots Done Right* [online]. 2024 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/inventory/fanuc-robots/lr-mate-series/fanuc-lr-mate-200ic-f99689.html>. Robot Specifics.
- [72] *FANUC ROBOTICS: LR Mate® 200iC Series & R-30iATM Mate Controller* [PDF]. 2009. Dostupné také z: https://www.fanucamerica.com/cmsmedia/datasheets/LR%20Mate%20200iC%20Series_10.pdf

- [73] FANUC ROBOTICS. *ARC Mate 50iD/7L (Long arm): Datasheet* [PDF]. 2019. Dostupné také z: <https://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/robots/robots-datasheets-en/arcmate/datasheet%20arcmate-50id-7l.pdf?la=en>
- [74] KUKA KR6 R900. *Robots Done Right* [online]. 2024 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: <https://robotsoneright.com/inventory/kuka-robots/kuka-kr6-r900-10020955.html>. Robot Specifics.
- [75] Kurz ČNB. *Česká Národní Banka* [online]. 2024 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/>
- [76] Robotické paže: RoArm-M1 - 5-doF WiFi robotické rameno - ESP32 - Waveshare 23937. *BOTLAND. Botland* [online]. 2024 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://botland.cz/roboticke-paze/22826-roarm-m1-5-dof-wifi-roboticke-rameno-esp32-waveshare-23937.html>
- [77] Waveshare Robotické rameno se sériovou sběrnici. *RPishop* [online]. 2024 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/robot-arm/5972-waveshare-roboticke-rameno-se-seriovou-sbernici.html>
- [78] ST3215 Servo. *Waveshare* [online]. 2024 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: https://www.waveshare.com/wiki/ST3215_Servo
- [79] Robotické paže: Robotické rameno Braccio TinkerKit + ovladač Arduino Shield. *Botland* [online]. 2024 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://botland.cz/roboticke-paze/6362-roboticke-rameno-braccio-tinkerkit-ovladac-arduino-shield-7630049200609.html>
- [80] Tinkerkit Braccio robot. *Arduino Store* [online]. 2024 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/tinkerkit-braccio-robot?queryID=undefined>
- [81] Robotické paže: MyPalletizer 260 Pi - 4-axis arm robot - Raspberry Pi version. *Botland* [online]. 2024 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://botland.store/robot-arms/21489-mypalletizer-260-pi-4-axis-arm-robot-raspberry-pi-version-6971707570278.html>
- [82] TROSSEN ROBOTICS. Robotic Arms - ROS Research Arms: ViperX 300 Robot Arm. *Trossen Robotics* [online]. 2024 [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://www.trossenrobotics.com/viperx-300-robot-arm.aspx>

- [83] U2D2: e-Manual. *ROBOTIS e-Manual* [online]. [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/interface/u2d2/>
- [84] Trossen Robotics X-Series Arms Documentation: Arm Reach. *Trossen Robotics X-Series Arms Documentation* [online]. 2024 [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: https://docs.trossenrobotics.com/interbotix_xsarms_docs/specifications.html#arm-reach
- [85] SVAZ PRŮMYSLU A DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. Jak rozumět konceptu Průmysl 4.0. *Svaz průmyslu a dopravy České republiky* [online]. [cit. 2024-01-21]. Dostupné z: <https://www.spcr.cz/aktivity/z-hospodarske-politiky/12973-jak-rozumet-konceptu-prumysl-4-0>
- [86] KUKA *Hello Industrie 4.0: ...Glossary* [PDF]. I40G/EN/01/0416. 2022. Dostupné také z: <https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/documents/press/industry-4-0-glossary.pdf?rev=-1&hash=6FCBE5337034BDE9D1A4D5DB54E127B3>
- [87] ANANDANON, Tanya M. Příprava robotů a pracovníků na Průmysl 4.0. *Vše o průmyslu: portál pro automatizovanou výrobu* [online]. 2018 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.vseoprumsly.cz/robotizace/kooperativni-roboty/priprava-robotu-a-pracovniku-na-prumysl-4-0.html>
- [88] PETG. *PRUSA RESEARCH by JOSEF PRUSA* [online]. 2022 [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059
- [89] SODEMANN, Angela. *Robotics I U3 (Motion Control) S1 (DC Motors) P4 (Torque Requirements for Manipulators)* [online]. 2017, 2017 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=c-PrGxJQ5OM&t=1316s>. Dr. Sodemann Arizona State University. Engineering Department.
- [90] Torque. *Khan Academy* [online]. c2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/physics/torque-angular-momentum/torque-tutorial/a/torque>
- [91] *ConvertUnits* [online]. c2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.convertunits.com>
- [92] CBENSON. Robot Arm Torque Calculator. *RobotShop Community* [online]. c2024 [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://community.robotshop.com/tutorials/show/robot-arm-torque-calculator>

- [93] 3206 Series Servo Gearbox (7:1 Ratio, Hitec HS-788HB Servo). *SERVOCITY* [online]. c2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.servocity.com/3206-series-servo-gearbox-7-1-ratio-hitec-hs-788hb-servo/>
- [94] 3206 Series Servo Gearbox (9:1 Ratio, Hitec HS-788HB Servo). *SERVOCITY* [online]. c2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.gobilda.com/3206-series-servo-gearbox-9-1-ratio-hitec-hs-788hb-servo/>
- [95] DS5160 SSG 60kg 8.4v High Voltage Waterproof Digital Servo for 1:5 RC Car SAVOX-0236 LOSI XL 5T Robot Arm 180 270 Servo. *AliExpress* [online]. c2023 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/32968147936.html>
- [96] DGI 1/5 steering servo ds5160 high torque 60kg. *Dgi racing* [online]. c2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.dgiracing.com/dgi-1-5-steering-servo-ds5160-high-torque-60kg/>
- [97] PDI-6221MG 20KG High Precision Metal Gear Digital Standard Servo. *JX Shantou JiXian Electronic Technology Co., Ltd.* [online]. c2014 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <http://www.jx-servo.com/en/Product/STANDARD/SD/555.html>
- [98] MG995. *TowerPro.com.tw Online Shop* [online]. c2014 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.towerpro.com.tw/product/mg995/>
- [99] Servo MG995 s kovovými převody 180°. *Laskakit by makers for makers* [online]. c2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/servo-mg995-s-kovovymi-prevody-180---extra-silne/>
- [100] *Raspberry Pi 4 Model B: Product Brief* [online - PDF]. 12/2023. Raspberry Pi, 2023.
- [101] Raspberry Pi OS. *Raspberry Pi* [online]. 2024 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html>
- [102] Raspberry Pi hardware: GPIO and the 40-pin header, Other functions. *https://www.raspberrypi.com/* [online]. 2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#other-functions>
- [103] WAVESHARE. Servo Driver HAT. WAVESHARE. *Waveshare Wiki* [online]. 2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: https://www.waveshare.com/wiki/Servo_Driver_HAT

- [104] EMOS. Bezúdržbový trakční olovený aku. 12 V/15 Ah, faston 6,3 mm. *EMOS: A brand of a legrand* [online]. c2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.emos.cz/bezudrzbovy-trakcni-oloveny-aku-12-v-15-ah-faston-6-3-mm>
- [105] XLSEMI. *12A 180KHz 40V Buck DC to DC Converter: Datasheet* [online - PDF]. 2024. Dostupné také z: <https://www.xlsemi.com/datasheet/XL4016-EN.pdf>
- [106] Step-down měnič s XL4016E1. *Laskakit by makers for makers* [online]. 2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/step-down-menic-s-xl4016e1/>
- [107] TEXAS INSTRUMENTS. *LM25116 Wide-Range Synchronous Buck Controller* [online - PDF]. SNVS509F. 2007. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm25116.pdf>. Revised 2023.
- [108] Step-down měnič 1.2-36V, 20A, 300W, CC/CV. *Laskakit by makers for makers* [online]. 2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/step-down-menic-1-2-36v--20a--300w--cc-cv/>
- [109] SNEAKS. Modular Snap Together Raspberry Pi 2B/3B/3B+/4 Case w/ OLED & Fan Options. *Printables* [online]. c2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.printables.com/cs/model/106225-modular-snap-together-raspberry-pi-2b3b3b4-case-w-/files>
- [110] Digitální maxi 565-HV270 200g/0,16s/72kg BH Servo. *BIG HOBBY* [online]. c2024 [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.bighobby.cz/digitalni-maxi-565-hv270-200g-0-16s-72kg-bh-servo/>
- [111] *FSR® 400 Series Data Sheet: Force Sensing Resistors®*. P/N: PDS-10004-B. 2024. Dostupné také z: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Interlink%20Electronics.PDF/FSR400_Series_RevB.pdf
- [112] INTERLINK ELECTRONICS. *FSR® Force Sensing Resistor® Integration Guide and Evaluation Parts Catalog: 400 Series Evaluation Parts With Suggested Electrical Interfaces* [PDF]. 2024.
- [113] MÜLLER, Andreas. *Singularities of Robots*. In: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, s. 1-10. ISBN 978-3-642-41610-1. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-642-41610-1_138-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_138-1)

[114] Teach Servo Positions with Manual Movement. *Hackster.io* [online]. c2024 [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.hackster.io/news/teach-servo-positions-with-manual-movement-c78b00d715c3>

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Manipulátor vs lidská ruka	6
Obrázek 2 - Sériový robot FANUC Arc Mate 120iC	11
Obrázek 3 – Paralelní robot X-Delta	12
Obrázek 4 - Návrh hybridního robota na přesné leštění povrchů	12
Obrázek 5 - Schéma sférického (vlevo) o a cylindrického manipulátoru.....	14
Obrázek 6 – Modulární roboty angulární – různé konstrukce	15
Obrázek 7 – Schéma kartézského a SCARA manipulátoru.....	16
Obrázek 8 - Schéma DC motorů.....	17
Obrázek 9 - Schéma hobby servomotoru.....	18
Obrázek 10 – PWM a rotace hřídele.....	19
Obrázek 11 - Střída signálu	19
Obrázek 12 - Přímá a řetězová konfigurace SPI.....	22
Obrázek 13 - UART datový paket	23
Obrázek 14 - Schéma připojení přes UART	24
Obrázek 15 - Schéma I2C zapojení	25
Obrázek 16 - Metody výpočtu inverzní kinematiky	31
Obrázek 17 - 3D model statické základny	37
Obrázek 18 – Technické parametry statické základny (v mm)	37
Obrázek 19 - Foto původní základny z ALU.....	38
Obrázek 20 - Foto PETG základny s umístěným servem.....	38
Obrázek 21- 3D model rotační základny	39
Obrázek 22 - Otevřené rameno L3 a EF s rozprašovačem	41
Obrázek 23 - EF s rotačními čelistmi (vlevo) a statickými (vpravo).....	41
Obrázek 24 – Parametry nástavce pro rozprašovač (v mm).....	42
Obrázek 25 - Kompletní EF s rozprašovačem	42

Obrázek 26 - Parametry otevřeného konce ramene L4 pro upnutí nástavců (v mm)	43
Obrázek 27 - Pracovní prostor manipulátoru.....	44
Obrázek 28 - Kinematický model manipulátoru v provedení 5 DOF.....	45
Obrázek 29 - Kinematický model manipulátoru v provedení 4 DOF.....	46
Obrázek 30 - Příklad výpočtu točivého momentu s pomocí kalkulátoru (pro EF rozprašovač).....	49
Obrázek 31 - Hitec HS-788HB Servo 7:1 ratio (vlevo) a HS-788HB Servo 9:1 ratio (vpravo).....	51
Obrázek 32 - Servomotor JX DS5160 SSG.....	52
Obrázek 33 - JX PDI-6225MG-300.....	52
Obrázek 34 - Raspberry Pi 4 Model B.....	55
Obrázek 35 - Waveshare 16-channel Servo Driver HAT	56
Obrázek 36 - Step-down měniče XL4016E1 a LM24116	57
Obrázek 37 - Návrh DPS rozvaděče a vpravo připojený rozvaděč	58
Obrázek 38 - Schéma elektrického zapojení komponent.....	59
Obrázek 39 - Nosič elektroniky s uchycenými boxy (na obrázku bez víka)	60
Obrázek 40 - 3D model nosiče na elektroniku	61
Obrázek 41 - Kryt kloubu J2.....	61
Obrázek 42 - Nový (vlevo) a původní úchyt ramene L3 (vpravo)	62
Obrázek 43 - Schéma SW řízení a komunikace	65
Obrázek 44 - GUI režimy ovládání.....	69
Obrázek 45 - Ovládací prvky pro manuální řízení	70
Obrázek 46 - GUI autonomní režim řízení	71
Obrázek 47 - Ukázka řízení servomotoru kloubu J2 a J3	78
Obrázek 48 - Úchyty pro závaží o různých průměrech (válcové a hranolové)	80
Obrázek 49 – Sensor síly FSR-402 (18 mm).....	80
Obrázek 50 - Prostory pro polohování úchytů v čelistech při testování.....	81

Obrázek 51 - Ukázka výpisu naměřených hodnot (vlevo válec 10 mm s hmotností 400 g, vpravo hranol 45 mm s hmotností 500 g).....	86
Obrázek 52 - Test síly stisku s rotací předmětu (10 mm, 50 g).....	87
Obrázek 53 - Test síly stisku (20 mm, 350 g).....	87
Obrázek 54 - Nástavec na permanentní fix k testování a testování se zátěží 100 g	90
Obrázek 55 - Ukázka z testu přesnosti a opakovatelnosti s hmotností 500 g – pozice ve vertikální rovině.....	93
Obrázek 56 – Oznámení o odeslání http požadavku na cizí API po úspěšném dokončení autonomní sekvence.....	94

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Rozdíly mezi sériovým a paralelním robotickým manipulátorem	10
Tabulka 2 - Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka.....	30
Tabulka 3 - Parametry ramen manipulátoru	40
Tabulka 4 - Maximální dosahy manipulátoru v závislosti na použitých EF	43
Tabulka 5 – Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka pro variantu 5 DOF	45
Tabulka 6 - Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka pro variantu 4 DOF (EF s rozprašovačem)	46
Tabulka 7 - Denavit-Hartenbergova parametrická tabulka pro variantu 4 DOF (EF se statickými čelistmi).....	46
Tabulka 8 - Hodnoty točivého momentu pro jednotlivé servomotory.....	48
Tabulka 9 - Výpočet točivého momentu servomotorů pro zdvih předmětu o váze 0,5 kg se zahrnutím momentu setrvačnosti a vah ramen a dalších komponent	49
Tabulka 10 - Parametry vybraných servomotorů	53
Tabulka 11 - Step-down měniče	57
Tabulka 12 - Výsledky testování stisku čelistí (N) - hranol	81
Tabulka 13 - Výsledky testování stisku čelistí (N) - válec	83
Tabulka 14 - Přesnost a opakovatelnost (údaje v mm) v horizontální rovině	89
Tabulka 15 - Přesnost a opakovatelnost – průměry a vážený průměr (údaje v mm) v horizontální rovině.....	89
Tabulka 16 - Přesnost a opakovatelnost (údaje v mm) ve vertikální rovině.....	91
Tabulka 17 - Přesnost a opakovatelnost – průměry a vážený průměr (údaje v mm) ve vertikální rovině.....	91

Seznam grafů

Graf 1 - Síla stisku čelistí v prostoru 1A – hranolový úchyt (průměry v legendě v mm)	84
Graf 2 - Síla stisku čelistí v prostoru 2B – hranolový úchyt (průměry v legendě v mm)	84
Graf 3 - Síla stisku čelistí v prostoru 1A – válcový úchyt (průměry v legendě v mm) ..	85
Graf 4 - Síla stisku čelistí v prostoru 3C – válcový úchyt (průměry v legendě v mm) ..	85
Graf 5 - Přesnost a opakovatelnost na jednotlivých pozicích EF v závislosti na měnícím se zatížení (g) v horizontální rovině	89
Graf 6 - Přesnost a opakovatelnost na jednotlivých pozicích EF v závislosti na měnícím se zatížení (g) ve vertikální rovině.....	92

Seznam rovnic

Rovnice 1 - homogenní souřadnice vektoru a bodu	26
Rovnice 2 - Vektor zobecněné souřadnice	26
Rovnice 3 - Matice rotace kolem osy X	27
Rovnice 4 - Matice rotace kolem osy Y	27
Rovnice 5 - Matice rotace kolem osy Z.....	27
Rovnice 6 - Výpočet matice rotace end-effectoru vůči LCS prvního kloubu	28
Rovnice 7 - Obecný tvar Homogenní matice transformace.....	29
Rovnice 8 - Homogenní matice transformace po aplikaci pravidel DH.....	30
Rovnice 9 - Výpočet točivého momentu	48
Rovnice 10 - Upravený výpočet točivého momentu	48

Seznam fragmentů kódu

Fragment kódu 1 - Přijetí dat z klientské aplikace.....	66
Fragment kódu 2 - Ukázka funkce pohybu s rozprašovačem.....	68
Fragment kódu 3 - Endpoint pro aktivaci pohybu s rozprašovačem	68
Fragment kódu 4 – Ukázka přiřazení HTML elementů proměnným	72
Fragment kódu 5 – Ovládání servomotorů posuvníkem.....	72
Fragment kódu 6 - Ovládání pomocí textových polí a tlačítkem	73
Fragment kódu 7 - Základní proměnné pro komunikaci přes websockety.....	74
Fragment kódu 8 - Odesílání dat na WebSocket server	74
Fragment kódu 9 – Ukázka mapování hodnot pro pohyb servomotorů	76
Fragment kódu 10 - Zpomalení a úprava chodu servomotoru.....	77

Příloha A

Součástí přílohy A je archiv `Zdrojovy_kod.zip` obsahující složky: `Front-end` a `Back-end`. V první jmenované složce se nachází čtyři soubory (`index.html`, `index.js`, `websoc.js` a `jsApi.js`) a dvě složky s `sliders_style.css` a obrázky.

`Back-end` složka obsahuje pět souborů (`Arm_test.py`, `armapi.py`, `move.py`, `config.py` a `led.py`).

- `Arm-test.py` obsahuje zdrojový kód pro Websocket server
- `Armapi.py` obsahuje zdrojový kód pro API
- `move.py` je pomocným programem (knihovnou) s definovanými metodami pro řízení motorů a inicializaci řídicích kanálů
- `config.py` obsahuje parametry pro řízení a možnou změnu ze strany uživatele
- `led.py` je program pro spuštění led diody k indikaci zapnutého Raspberry Pi

Příloha B

Součástí přílohy B je archiv `Data.zip` s uživatelským manuálem ve formátu pdf (`Manual`), složkou `Fotogalerie` s obrázky a videy, složkou `3D_modely` s exportovanými modely navržených a tisknutých dílů ve formátu `STEP`, složkou `Technicke_vykresy` obsahující nákresy vytvořených a tisknutých dílů a složku `Elektronika` s nákresy či datasheety použitých komponent.