



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**ROBOTICKÉ ZAŘÍZENÍ S VYUŽITÍM MODELÁŘSKÝCH
KOMPONENTŮ A SERV**

ROBOTIC DEVICE USING HOBBY COMPONENTS AND SERVOS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ VÁCLAVIČ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. PAVEL ZEMČÍK

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Student: **Václavič Jiří**
Program: Informační technologie
Název: **Zařízení/robot s využitím RC komponentů a serv**
Device/Robot Exploiting RC Components and Servos
Kategorie: Uživatelská rozhraní

Zadání:

1. Prostudujte způsob řízení modelářských serv a možnosti jejich ovládání počítačem. Dále prostudujte existující konstrukce "robotických" zařízení s využitím RC komponentů.
2. Navrhněte jednoduchý model (například robota, případně robotického vozidla) vozidla sestavený s využitím modelářských RC komponentů a případně dalších dostupných "off the shelf" komponentů, případně 3D tisku tak, aby byl snadno opakovatelně sestrojitelný.
3. Navrhněte konstrukci/implementaci vozidla a způsob jeho ovládání s ohledem na to, aby získalo využitím počítače nové lepší vlastnosti.
4. Popište možnosti konstrukce, ovládání i automatizace provozu a diskutujte dosažitelné vlastnosti.
5. Navržený model implementujte a demonstруйте jeho vlastnosti na vhodné úloze.
6. Diskutujte dosažené výsledky a možnosti pokračování práce.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 4 zadání

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

Vedoucí práce: **Zemčík Pavel, prof. Dr. Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 3. listopadu 2021

Abstrakt

Cílem této práce bylo sestavit jednoduché robotické zařízení. Důležitou částí řešení je nastudování již existujících zařízení a způsobů jejich ovládání za pomoci počítače. Bylo nutné pochopit principy řízení modelářských servomotorů a dalších potřebných technologií. S využitím nabytých vědomostí je navržena a zkonstruována robotická paže, která je vymodelována a následně vytisknuta na 3D tiskárně. Řízení jednotlivých servomotorů obstarává mikroprocesor zařízení Arduino Uno. Robotický manipulátor je možné ovládat dálkově pomocí pohybu vlastní paže, k čemuž byla použita hloubková kamera Azure Kinect DK. Celý software je obsluhován za využití vytvořeného grafické uživatelské rozhraní využívající asynchronních procesů v jazyce C++.

Abstract

The aim of this work was to build a simple robotic device. An important part of the solution is the study of existing devices and methods of their control using a computer. It was necessary to understand the principles of control of hobby servomotors and other necessary technologies. Using the acquired knowledge, a robotic arm is designed and constructed, which is modeled and then printed on a 3D printer. The control of individual servomotors is provided by Arduino Uno microprocessor device. The robotic manipulator can be controlled by moving your own arm, which used an Azure Kinect DK depth camera. The entire software is operated using a graphical user interface using asynchronous processes in C++.

Klíčová slova

robotická paže, servomotor, 3D tisk, Arduino, Azure Kinect DK

Keywords

robotic arm, servomotor, 3D print, Arduino, Azure Kinect DK

Citace

VÁCLAVIČ, Jiří. *Robotické zařízení s využitím modelářských komponentů a serv.* Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík

Robotické zařízení s využitím modelářských komponentů a serv

Prohlášení

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

.....

Jiří Václavič
11. května 2022

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Dr. Ing. Pavlu Zemčíkovi za jeho pozitivní motivaci, výborné rady při tvoření mé práce a také za čas, který mi věnoval i mimo standardní pracovní hodiny a dny.

Obsah

1 Úvod	2
2 Existující robotické paže	3
2.1 Klasifikace robotických paží	3
2.2 Ovládání pohybu robotické paže	6
2.3 Konkrétní robotické paže na trhu	8
3 Technologie výroby modelářských robotických paží	13
3.1 Princip modelářských servomotorů	15
3.2 Řízení chodu servomotorů	16
3.3 Kamerová detekce hloubkového pohybu těla	20
3.4 Existující hloubkové senzory na trhu	24
4 Analýza současného stavu a stanovení postupu práce	26
4.1 Analýza současného stavu robotických paží	26
4.2 Stanovení cílů práce	27
4.3 Návrh uživatelského rozhraní a robotické paže	27
5 Realizace řešení robotické paže	30
5.1 Zhotovení mechanických částí	31
5.2 Řídící software	35
5.3 Program kamerové detekce pohybu	37
5.4 Uživatelské rozhraní	39
5.5 Dosažené vlastnosti robotické paže	41
5.6 Testování funkčnosti robotické paže	42
6 Závěr	46
Literatura	47
A Zapojení elektrického obvodu robota	50
B Výpočet transformace souřadnic pohybu kloubů	51

Kapitola 1

Úvod

V současné době se čím dál tím více přechází k automatizaci, zefektivňování našich životů. V průmyslu a v dalších oborech se hojně používají robotické paže, které zlevňují, zrychlují a celkově zjednodušují lidskou práci a výrobní procesy. Existuje spousta faktorů, které však negativně ovlivňují rozhodování při nákupu takovýchto zařízení, zejména vysoká cena, složitý operační systém a způsob ovládání.

Cílem této práce je zkonstruovat robotickou paži za využití modelářských RC komponentů jako je například servomotor. Pro ovládání je zvolen inovativní a velice intuitivní způsob interakce za pomoci pohybu vlastní lidské paže. Jsou použity technologie modelářské výroby za účelem minimalizace výše zmíněných nedostatků spojených zejména s vysokými náklady.

V této práci je popsán současný stav existujících robotických paží, servomotorů, kamer pro snímání pohybu těla a dalších nezbytných technologií, které souvisí s danou tematikou. Za využití popsaných znalostí je provedena analýza, sestaven postup a návrh řešení. Při samotné realizaci je využit Top-down přístup, který je řízen blokovým schématem vytvořeným na začátku vypracování. Motivací k vypracování této práce byla zejména má vášně v oboru robotika, modelářství a 3D tisku. Mým osobním cílem bylo sestavit zařízení, které by bylo pro kohokoli na světě lehce zreplikovatelné a hlavně nenákladné, což se dá zajistit pomocí technologie 3D tisku a využitím modelářských komponent.

Dílčí kapitoly jsou vhodně členěny, aby byl čtenář seznámen se všemi pojmy a technologiemi předtím než budou použity v rámci realizace robota v navazujících kapitolách. Kapitola 2 se zabývá již existujícími robotickými pažemi jejich klasifikací. Technologie jejich výroby, princip servomotoru, jeho řízení a v neposlední řadě i druhy ovládání robotů a kamerovou detekcí pohybu těla se věnuje kapitola 3. V následující kapitole 4 je provedena analýza existujících robotických paží a stanoveny cíle práce, parametry řešení a návrh. Kapitola 5 popisuje realizaci při níž je vytvořena konstrukce robotické paže a naprogramována softwarová část řešení. Funkčnost je následně ověřena. Kapitola 6 shrnuje výsledky práce a udává možnosti jejího budoucího rozšíření.

Kapitola 2

Existující robotické paže

Tato kapitola je zaměřena na popis druhů robotických paží, jejich členění a způsobu ovládní. Technologie popisovaných zařízení je postavená na RC komponentu, jímž je servomotor, které je popsány v kapitole 3. Kapitola nemá encyklopedický charakter a nemusí nutně obsahovat všechny poznatky z dané problematiky, ale pouze informace s bezprostředním vztahem k práci.

2.1 Klasifikace robotických paží

Robotické paže, odborně nazvané robotické manipulátory se dělí do tří generací dle úrovně inteligence. Všechny generace se dodnes používají, starší modely se stále vyrábějí hlavně z důvodu jejich nižší ceny, kdy je průmyslové společnosti upřednostní zejména na pozicích, kde není nutné využití modernějších a vyspělejších robotů 2.3.

Do 1. generace spadají manipulátory s pevně daným programem [16], který lze přepsat v závislosti na účelu, jemuž bude robot sloužit. Jejich funkčnost se dá shrnout slovy *“zdvihni a umísti”*, kdy zařízení slouží převážně pro přesouvání objektů z jednoho místa na druhé, viz obrázek 2.1. Tyto primitivní stroje byly poprvé nasazeny v 60. letech 20. století a zahájily novou fázi přeměny průmyslu.



Obrázek 2.1: Unimate robot - první průmyslový robot (1. generace)¹.

¹Převzato z: <https://artsandculture.google.com/asset/robot-first-unimate-robot-ever-installed-on-an-assembly-line-1961-devol-george-c-1912-2011/GQHHgKp0XejHeg>

Do 2. generace patří manipulátory, které jsou rozšířené o senzory [16], které jim slouží pro monitorování okolního stavu prostředí, viz obrázek 2.2. Čidla mohou být optická (kamery), hmatová, tepelná nebo určená pro snímání tlaku. Výpočetně jsou tyto roboti mnohem složitější zařízení, a tak se neobejdou bez počítače zajišťující jejich řízení.



Obrázek 2.2: FD-B4LS od firmy OTC Daihen (2. generace)².

3. nejmodernější generace patří zejména do 21. století [16], do naší současnosti. Liší se od 2. generace robustností řídicího systému, což je zapříčiněno zejména rozšířením robotů o autonomii, strojového učení a umělou inteligenci, kdy je robot schopný měnit svůj program na základě vstupních podmínek, aby dosáhnul, co nejlepší efektivity nebo jiných sledovaných vlastností. Stroj je schopný pracovat individuálně bez nutné přítomnosti člověka, který by na něj musel dohlížet.

Vedle robotů, kteří jsou zcela samostatní a nejsou závislí na nikom, existují i zařízení, která jsou schopná pracovat v těsné blízkosti lidí a dokonce s nimi i přímo kooperovat, od toho je odvozen název Kobot - Kooperativní robot.

²Převzato z: https://www.daihen-usa.com/wp-content/uploads/2017/08/7_Axis_lineup-shot-1-image360x.png

Symbiózou lidské a robotí práce se zabývá například firma Universal robot 2.3.



Obrázek 2.3: UR16e od firmy Universal robot (3. generace)³.

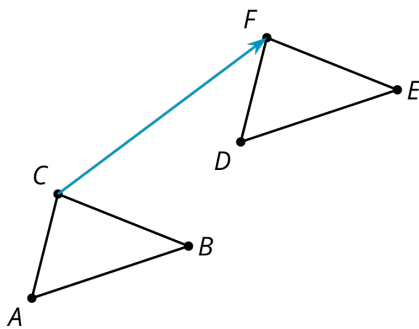
Na trhu existuje již mnoho manipulátorů, které se aktivně využívají. Konkrétní modely jsou popsány v podkapitole 2.3.

Stupeň volnosti

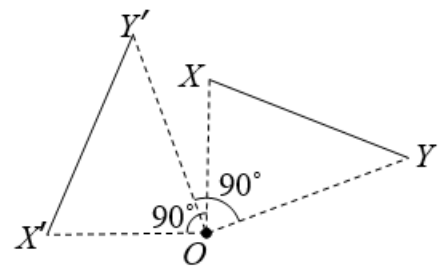
Stupeň volnosti [19] je jeden z hlavních hodnotících kritérií robotických paží a jsou jimi myšleny směry posunů a otáčení, které může manipulátor vykonávat. S rostoucím počtem stupňů volnosti má robot lepší schopnost manipulace v prostoru. Většinou počet stupňů přímo koresponduje s množstvím motorů umístěnými v kloubech paže.

V mechatronice⁴ se z matematiky pro pohyb v prostoru využívají pouze 2 druhy transformací:

- Translace - Posun po přímce nebo v rovině, obvykle se k zápisu využívá souřadný systém. Transformace využívají roboti s lineárním pohybem.
- Rotace - Otočení kolem své osy, rotace je použita u robotů s rameny, kdy se páka servomotoru pohybuje podél bodu otáčení, kterým je hřídel.



Obrázek 2.4: Ukázka translace⁵.



Obrázek 2.5: Ukázka rotace⁶.

³Převzato z: <https://spectrum.ieee.org/media-library/ur16e-robot-arm-from-universal-robots.jpg?id=25589663&width=1500&height=1039>

⁴Obor založený na elektronice, mechanice, informatice. Zabývá se sestrojováním a navrhováním robotických zařízení.

2.2 Ovládání pohybu robotické paže

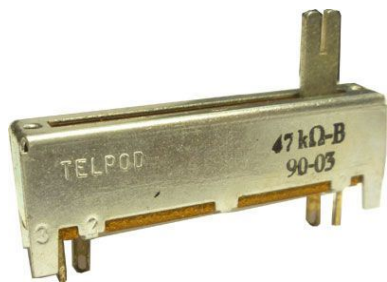
Neodmyslitelnou součástí robotického zařízení je i princip a styl jeho ovládání. V této kapitole jsou uvedeny některé z nich. Nejprve jsou zmíněny způsoby ovládání, které jsou možná ty nejznámější a velice jednoduché na implementaci, následně jsou také uvedeny i o něco složitější technologie, které se i v současnosti pořád vyvíjejí.

Ovládání za pomoci joysticku

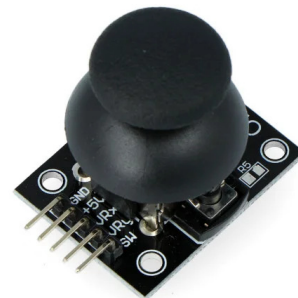
Joystick se skládá z páčky, která je napojena na základnu⁷ a člověk jí může hýbat v rozmezí 360°. Analogový joystick má v základně zabudované dva potenciometry, které jsou schopny měřit velikost vychýlení v jednotlivých osách. Napětí v elektrickém obvodu je závislé na rezistenci potenciometrů, která se mění na základě pohybu páčky joysticku. Napětí je poté počítačem převedeno na digitální signál.

Digitální joystick obsahuje obvod, který neměří velikost vychýlení, ale je dvoustavový, indikující pouze sepnutí v daném směru, proto není příliš vhodný pro ovládání robotických zařízení.

Obor využití joysticku je obrovský od letectví, přes herní průmysl, až po ovládání robotických zařízení. Výhodou joysticku je nízká cena a velice rychlá, snadná implementace do systému. Nevýhodou je obtížnější ovládání, které vyžaduje zkušenosti.



Obrázek 2.6: Tahový potenciometr⁸.



Obrázek 2.7: Analogový joystick⁹.

Ovládání za pomoci kamer pro detekci pohybu

Princip je založen na v prostoru rozmístěné jedné či více kamer, které snímají polohu člověka. Každý pohyb osoby v místnosti může aktivovat naprogramované funkce, které ku příkladu pohnou ramenem robota. Tímto typem ovládání se zabývá tato práce, a proto je princip technologie hloubkových kamer, které dokážou přesně určit polohu člověka v místnosti, probrán podrobněji v podkapitole 3.3.

⁵Převzato z: https://www.pngkey.com/png/full/507-5072874_if-a-rigid-transformation-is-applied-to-a.png

⁶Převzato z: <https://spectrum.ieee.org/media-library/ur16e-robot-arm-from-universal-robots.jpg?id=25589663&width=1500&height=1039>

⁷základna - spodní část přímo napojená na obvodovou desku

⁸Převzato z: <https://www.hadex.cz/img/zbozi/h361.jpg>

⁹Převzato z: https://cdn3.botland.cz/69232-pdt_540/palec-joystick-s-tlacidkem-v2-modul-s-deskou-iduino-st1079.jpg

Brain-computer interface

Idea metody Brain-computer interface (Ovládání nervovými vzruchy) [14] spočívá ve výzkumu chování našeho mozku. Mozkové buňky tzv. neurony jsou mezi sebou propojeny dendrity a axony. Neurony neustále při každé naší činnosti produkují elektrický náboj, jenž slouží jako signál, který si mezi sebou tyto buňky posílají a šíří tak informaci o dané činnosti po celém mozku. Tento dokonalý proces je zapouzdřen v izolantu zvaném myelin, avšak i ten má jistou propustnost, kterou dokážou již moderní senzory zachytit. Senzorem lze také přímo rozpoznat záměr daného signálu (jakou část těla chce člověk zrovna ovládat). Tohoto procesu využívají bioničtí inženýři, kteří nahrazují amputované končetiny robotickými, kde v ideálním případě reagují umělé končetiny na mozkové impulzy stejně jako ty lidské.

Výhodou je možnost ovládání bez jakéhokoliv pohybu uživatele, komfortnost a vysoká rychlost, kdy myšlenka bude vždy rychlejší než jakýkoliv jiný úkon. Nevýhodou je nutnost implementace zařízení na tělo člověka (nebo vlastnit přístroj velkých rozměrů) a velice zdoluhavý, náročný proces učení, kdy uživatel musí myslet zcela soustředěně na daný pohyb nové robotické končetiny, aby se vykonal. Současné senzory se dělí na 3 typy - neinvazivní, částečně invazivní a invazivní.

Různé přístupy [14] čtení informací lidského mozku:

- Elektroencefalograf (EEG) - elektrody, které jsou umístěny po obvodu hlavy měří rozdíly mezi napětím jednotlivých neuronů. Během měření mozkové aktivity jsou pacientovy zasilány např. vizuální podněty a čeká se na adekvátní signál zaslán mezi neurony. Výstupem je graf na počítači. Tento proces je většinou neinvazivní, kdy však měření signálu vadí lebka, takže dochází k částečnému zkreslení. Při invazivní implementaci se elektrody umístí přímo na šedou kůru mozkovou a výsledky jsou pak daleko přesnější.
- Magnetická rezonance (MRI) - záběry mozku a jeho aktivit jsou při použití této technologie velice přesné a ve vysokém rozlišení, to však s sebou nese nevýhodu v rozměrech měřicího zařízení, které není přenosné a nemůže být implantováno přímo na lidský mozek. Jedná se o zcela neinvazivní způsob. V robotice se využívá k měření mozkové činnosti např. při pohybu paže a zjištění, která část mozku za něj odpovídá, to slouží k nalezení vhodného místa pro umístění budoucích elektrod, kterým bude člověk ovládat např. implantát, robotickou paži.

Aplikační software

Nezbytnou součástí aplikačního softwaru pro ovládání robotických zařízení by mělo být jednotné programovací prostředí [23], které podporuje příkazové zadávání instrukcí. Software by měl také obsahovat nástroje pro ladění programu a možnost simulace pohybu dle napsaného kódu. Uživateli by mělo být poskytnuty programové ovladače pro nejrozšířenější druhy robotických zařízení a programová knihovna základních funkcionalit pro robotické vidění, ovládání manipulátorů atd.

Jedním z nabízených softwarů na trhu je od firmy Microsoft s názvem **Microsoft Robotics Studio**. Toto vývojové prostředí provádí spoustu procesů asynchronně na pozadí a uživateli je umožněno provádění simulací a programování za pomoci grafického rozhraní, kde se kód následně převádí do jazyku C#.

Dalším využívaným softwarem zejména pro účely vzdělávání, výzkumu a v neposlední řadě průmyslu je open-source 3D simulátor s názvem **Webots**¹⁰. Uživateli je umožněno využít některých z předdefinovaných objektů nebo vložení vlastního objektu vytvořeného například v CAD modelovacím programu. Veškeré dění se odehrává na vizualizované 3D scéně, kam se vyobrazují jednotlivé komponenty. Kromě zmíněných objektů může uživatel využít i senzory a další zařízení z rozsáhlé kolekce softwaru Webots. Pohyb, funkcionality a interakce jednotlivých objektů na scéně se programují v jazyce C++.

Autonomie, umělá inteligence

Autonomní roboti pracují bez zásahu či s minimálním zásahem člověka, vykonávají činnost, ke které jsou naprogramováni, přičemž je ovlivňuje řada vnějších vjemů na jejichž základe se přizpůsobuje zdrojový kód. K automatizovanému provozu využívají řadu senzorů, jenž jim pomáhají se bezkolizně pohybovat po pracovišti nebo interagovat s jejich prostředím. Obvykle pracují sounáležitě ve větším počtu, kde jsou všechna zařízení připojena do sítě (Internet of Things), aby spolu mohla komunikovat, domlouvat se na procesních postupech a potřebách.

2.3 Konkrétní robotické paže na trhu

Současné robotické paže nebo také manipulátory jsou používány nejvíce v průmyslu, kde i s využitím jednoduchého programu se dá docílit repetitivní činnosti, která je například u pásové výroby vyžadována. Oproti člověku robot nedělá chyby, pracuje bez přestávek a je ve většině případů mnohonásobně levnější než zaměstnanec. Jedinou velkou nevýhodou manipulátorů je jejich pořizovací cena, jejíž návratnost je velice rychlá (již okolo dvou let). Každých 5 let je však potřeba vykonat generální údržbu [12], jejíž cena však dosahuje nanejvýš 15-ti % nákupní ceny .

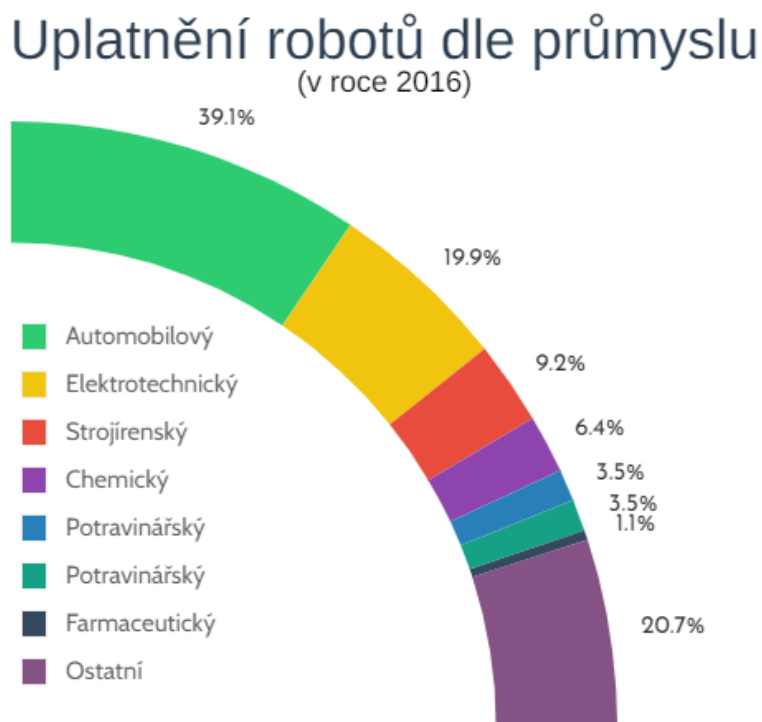
Konstrukci robotických paží mnohdy předchází jejich prototypy v menším měřítku, které využívají malé servomotory a jsou často sestaveny profesionály, aby prezentovali budoucím investorům jejich projekt nebo zkoumali různé vlastnosti či funkční vady. Existuje však i mnoho amatérských kutilů se zájmem o elektroniku, jež si tvoří vlastní zařízení, programují je a někteří své projekty následně i prezentují široké veřejnosti formou například masových médií.

Průmyslové robotické paže

Existuje mnoho firem, které vyrábí průmyslové roboty, zde jsou zmíněny jedny z těch největších a jejich modely. Průmysl není zdaleka jediným odvětvím využívající tyto stroje, ale vůbec tím největším, a proto zde nejsou robotická zařízení z ostatních oborů (lékařství, atd.) zmíněna.

¹⁰<https://cyberbotics.com/>

Nejčastější uplatnění robotů je v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu viz graf na obrázku 2.8, které tvoří téměř 60 % všech využívaných zařízení [24].



Obrázek 2.8: Graf uplatnění robotů dle průmyslu.

FANUC Robotics

Tato japonská firma má celou řadu produktů pro téměř všechny druhy činností v průmyslu. Jejich diverzita je vidět na jejich sortimentu, který obsahuje roboty pro práci s drobnými desetigramovými elektronickými díly, kde je nutná preciznost, ale na druhou stranu jsou v něm také mohutné stroje schopné manipulovat až s 2300 kg závažím, které jsou určeny například pro zvedání a montování aut. Ceny produktů nejsou veřejné, ale v rozhovoru se zaměstnancem firmy bylo zmíněno, že průměrná cena jednoho robota je v rozsahu 675 000 až 1 000 000 Kč [15].

Řada robotů Delta M-1iA je vhodná pro práci s malými elektronickými a dalšími součástkami do 1 kg. Je velice kompaktní, protože jeho maximální pracovní rozsah pohybu je až 420 mm. Do této řady patří roboti od 3 do 6 os (stupňů volnosti).

Jedna z dalších řad je nazvána M-2000iA, která je naopak určena pro zvednutí těžkých závaží, zejména aut. Obsahují 6 os otáčení (stupňů volnosti) a horizontální pracovní plocha je až 4,7 m dlouhá, vertikální je dokonce 6,2 m. Zástupci v této kategorii se liší zejména velikostí zdvihu závaží, kdy ten nejvýkonnější dokáže zvednout již zmiňovaných 2300 kg. Údaje byly převzaty z webových stránek firmy FANUC¹¹.



Obrázek 2.9: Robot Fanuc M-2000iA/2300 se schopností uzvednout až 2,3 tuny¹².

Kuka Robotics

Kuka Robotics je firma s podobným konceptem jako FANUC Robotics, kdy se svými produkty snaží zasáhnout celý ekosystém automatizace výrobních procesů. Kromě standardních manipulátorů je jejich sortiment rozšířen například o robota KR DELTA Robot. Zařízení je určeno pro přemísťování lehkých objektů do hmotnosti 3 kg v maximální vzdálenosti 1200 mm. Robot je cílen pro podniky v potravinářském odvětví, protože jeho části a materiál použitý při výrobě splňuje hygienické předpisy LFGB, FDA.

¹¹<https://www.fanuc.eu/>

¹²Převzato z: <https://novedadesautomatizacion.com/wp-content/uploads/2017/12/fanuc-m-2000-17001-car-lift.jpg>

Zařízení je čtyřosé a doba vykonání jednoho cyklu instrukcí je až 0,5 s s cílem urychlení výrobních procesů produktů malých rozměrů. Zmíněné údaje jsou převzaty z webových stránek firmy Kuka Robotics¹³.



Obrázek 2.10: Robot Kuka využívající translačního pohybu¹⁴.

Jak bylo zmíněno v podkapitole *Stupeň volnosti*, existují dva druhy pohybu os robota, translace a rotace. I přesto, že se z důvodu větší variability staly manipulátory s rotačním pohybem kloubů majoritně využívaným zařízením, vyrábí firma Kuka také robotické paže s translačním pohybem ilustrované na obrázku 2.10. Zástupcem je například např. KR 50L. Výhodou této sorty robotů je menší kolizní prostor, kdy je pracovní plocha robota rozložena do úzkého lineárního pásu. V okolí robota je tak více volného místa, které poskytuje lepší přístupnost k zařízení. Kombinací většího počtu zařízení lze provést zřetězení výrobního procesu, Konkrétním modelem lineárních robotických paží je KR 16L se 3 osami pohybu (stupni volnosti) a nosností 16 kg, přičemž dosahuje přesnosti cca 0,1 mm. Naopak mezi ty nejvýkonnější patří KR 600L, který obsahuje také 3 osy pohybu, ale dokáže uzvednout až 600 kg při nepatrně horší přesnosti 0,3 mm.

Universal Robots

Firma Universal Robots byla založena s cílem poskytnout robotická zařízení malým a středním firmám [2], u kterých není umožněn proces úplné automatizace, ale pořád je ve většině případů potřebný lidský faktor. Hlavním produktem jsou kooperativní roboti menších rozměrů, kteří z velké části ulehčují činnost na lidských pracovištích a jsou schopni po správném nastavení ovládat stroje, které byly původně určeny pouze lidem. Konkrétním modelem je UR16e, který dokáže uzvednout až 16 kg v maximální vzdálenosti 900 mm. Nízká hmotnost 33 kg umožňuje nenáročnou manipulaci a přesun zařízení.

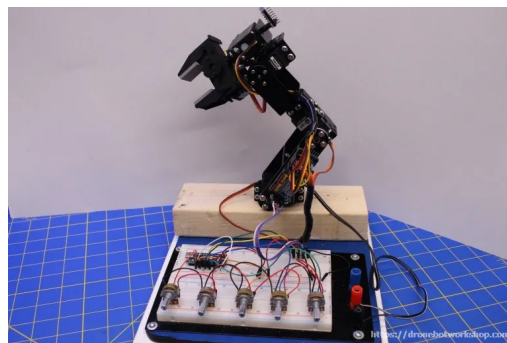
Existuje mnoho dalších firem jako Universal Robots vyrábějící průmyslové roboty např. Yaskawa Electric, ABB atd. Všechny zmíněné firmy spojují vysoké náklady na materiál, režii výroby robotické paže a s tím i spojená vysoká prodejní cena. Protipólem se snaží být modelářské robotické paže, které sice nejsou určeny pro zvedání těžkých závaží, ale za to se dají vyrobit i za minimální investici, která je pro malé začínající firmy klíčová.

¹³<https://www.kuka.com/>

¹⁴Převzato z: <https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/products/robots/cta-images/linear-roboter.png?rev=-1&w=767&hash=337065A8AAB6BD34EA450B25343B10C6>

Modelářské robotické paže

Robot od autora Dejan na obr. 2.11 je ovládaný 5-ti servomotory, které mu také poskytují 5 stupňů volnosti. Zařízení se dá řídit za pomoci mobilní aplikace komunikující s Bluetooth modulem připojeným k počítači Arduino. Celková hmotnost plastové konstrukce vytisknuté na 3D tiskárně je okolo 230g a doba zhotovení je asi 19 hodin. Cena použitých komponentů na platformě Amazon.com je cca 2800 Kč [10].



Obrázek 2.11: Robotické paže - Dejan¹⁵.

Obrázek 2.12: Robotické paže - DFRobot¹⁷.

DFRobot zařízení na obr. 2.12 obsahuje taktěž 5 servomotorů a stupňů volnosti. Robot se ovládá pomocí 5-ti potenciometrů, přičemž každý řídí jeden servomotor (kloub). Komponenty se prodávají za 149\$ ~ 3 300Kč jako sada, kterou si zákazník sestrojí sám.

¹⁶Převzato z: <https://i0.wp.com/dronebotworkshop.com/wp-content/uploads/2018/06/robot-arm-with-controller.jpg?w=768&ssl=1>

¹⁷Převzato z: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/diy-arduino-robot-arm-with-smartphone-control/>

Kapitola 3

Technologie výroby modelářských robotických paží

V této kapitole jsou popsány různé způsoby výroby robotických paží. Nutnou součástí jsou také různé druhy servomotorů, které se řadí k technologii RC. Tato kapitola vysvětluje jejich princip a možnosti řízení za pomoci počítače. Závěr kapitoly je zasvěcen nástrojům pro detekci pohybu a principům jejich fungování. Kapitola nemá encyklopedický charakter a nemusí nutně obsahovat všechny poznatky z dané problematiky, ale pouze informace s bezprostředním vztahem k práci.

Běžné průmyslové robotické paže jsou vyráběny převážně z oceli, kvůli větší výdrži a pevnosti tohoto materiálu. U modelů, kde jsou použity malé servomotory si to nelze dovolit z důvodu, že by výkon těchto motorů nebyl dostačující k váze konstrukce robota. Další nevýhodou oceli je, že k celkovému zhotovení kovu je potřeba velmi vysoká teplota, vhodné vybavení a zejména svářečská praxe nebo velký vstupní kapitál pro delegaci výroby na profesionální firmu.

Dalším materiálem může být dřevo, zde je ale také problém se složitějším výrobním procesem, potřebou vhodných nástrojů a dovedností, navíc dřevo nemá ani ideální vlastnosti a v čase a v nevhodných přírodních podmínkách rychle degraduje.

Nejvhodnější pro modely menších rozměrů je 3D tisk, kdy může mít člověk pod kontrolou všechny fáze výroby. Je potřeba zhotovit vlastní návrh modelu ve vhodném softwaru, převést návrh do jazyka (G-Code) 3D tiskáren pomocí tzv. Slicer programu, následně model vytisknout a provést kontrolu kvality. Velkou předností této technologie je rychlost výrobního procesu od návrhu až po tisk, další výhodou je nízká cena, proto se využívá pro rychlé produktové prototypování.

Druhy modelovacích softwarů

Kvůli složitosti modelování 3D objektů za pomoci instrukcí, byly vytvořeny CAD¹ programy, které umožňují zhotovit finální design produktu bez znalostí instrukcí a jejich zápisu a vytvářet objekt čistě za pomoci vizuálních komponentů jako je krychle, kvádr, jehlan, ve vývojovém prostředí [21].

¹computer-aided design (CAD) - počítačem podporované navrhování

Základní dělení 3D modelovacích programů

- **Solid modelling** - Modelování s pevnými částmi pracuje se základními tvary (krychle, kvádr, atd.) a trojrozměrnou dimenzí, ve které se skládá finální model, nejširší možnost užívání, dají se vytvářet běžné předměty - židle, stůl, nádobí, příbory, ale také složité jako roboti, mechanické součástky, atd.
Konkrétní software: TinkerCAD, SketchUp, SolidWorks, Fusion360
- **Wireframe modelling** - Drátové modelování se využívá pro komplexní modely, kdy uživateli nestačí základní tvary, př. vytváření lidských tváří, zvířat, atd.
Konkrétní software: Blender, Maya, Daz 3D
- **Surface modelling** - Povrchové modelování je nejvíce komplexní. Vhodné pro tvarování objektů s plynulými přechody mezi jednotlivými křivky a vytvoření tvarů, které je příliš složité modelovat v předchozích dvou uvedených programech. Surface modelling je náročný na výpočetní výkon, př. navržení závodních aut s dokonalou aerodynamikou, atd.
Konkrétní software: Catia, FreeCAD, Inventors.

Druhy Slicer programů

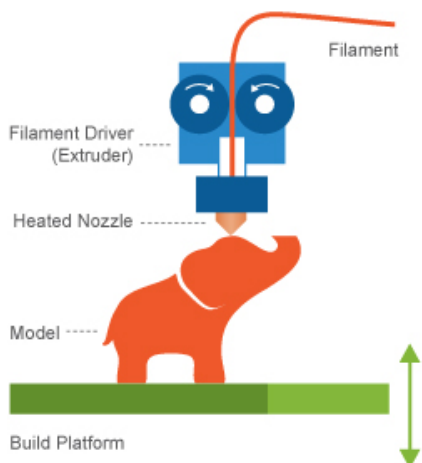
Slicer (krájící) programy [18] slouží jako prostředník mezi modelovacím prostředím a 3D tiskárnou, kdy Slicer převede vstupní model ve formátu STL nebo 3MF do výstupního formátu G-code, který obsahuje instrukce jež tiskárna vykonává.

Příklady konkrétního softwaru: Cura, Slic3r, PrusaSlicer

Druhy 3D tiskáren

Základní členění je dle technologií tisku. Nejběžněji používaná metoda při práci s plastem je tzv. Material Extrusion (vytlačování materiálu), kdy se roztavený materiál (nejčastěji plast) protlačuje skrz trysku a nanáší na podložku.

Fused Deposition Modeling (FDM)



Obrázek 3.1: Princip fungování FDM².

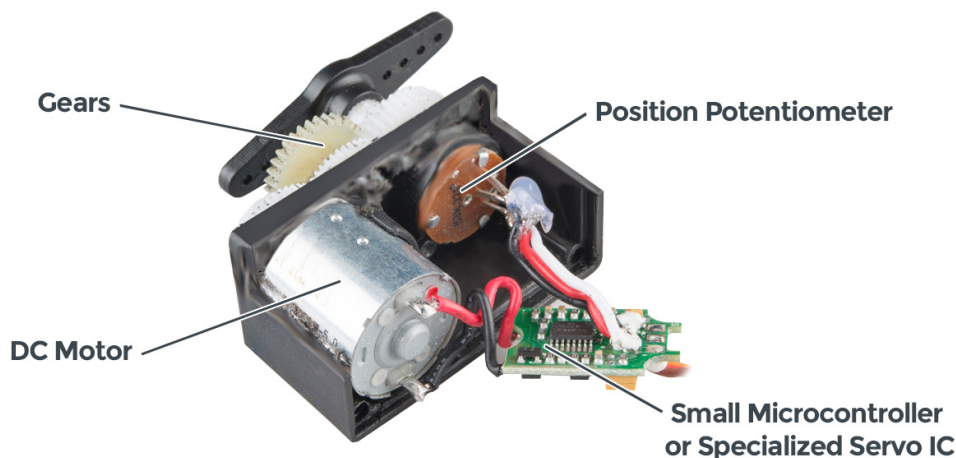
²Převzato z: <https://www.printspace3d.com/wp-content/uploads/2013/12/FDM.jpg>

Tisk probíhá po vrstvách od spodní části objektu po vrchní část. Příkladem je FDM³. U FDM, znázorněno na obrázku 3.1, je cívka filamentu částečně odmotána, to zajišťuje vytlačovač (extruder), následně je filament posunut do komory, ve které je plast roztaven a dále vytlačen do trysky. Z vyhřívané trysky (heated nozzle) je plast nanášen na vyhřátou podložku (bed, build platform).

3.1 Princip modelářských servomotorů

Jedná se o typ motoru malých rozměrů, velikostně cca od 2 do 10 cm, který využívají zejména amatérští a poloprofesionální tvůrci pro své projekty, avšak s postupem času se stává i častým nástrojem profesionálů při prototypovací fázi tvorby nového robotického či jiného zařízení. Jeho hlavní předností je schopnost přesného natočení páky, která může být například napojena na rameno robota, což zapříčiní bezchybnou a na milimetry přesnou manipulaci s objekty [13].

Existují základní dva druhy servomotorů - AC a DC. AC (alternative current) motor využívá střídavý proud a DC (direct current) je napájen stejnosměrným proudem. Modelářský sektor je závislý na mikrokontrolorovém (Arduino,...) typu generovaného elektrického proudu, který funguje na principu DC, a proto modelářské servomotory jsou vyráběny, aby fungovali na stejné podstatě založené na využívání stejnosměrného proudu.



Obrázek 3.2: Modelářský servomotor⁴.

DC motor je napojen na hřídel (gears), jak je vidět na obrázku 3.2, která je tvořena čtyřmi ozubenými koly, jež se roztáčejí a pohybují během toho pákou serva nejčastěji v rozsahu od 0° do 180°. Tento rozsah je limitován pevnými zarážkami, jež mohou být manuálně odstraněny pro kontinuální rozsah pohybu 360°.

Aby bylo možné měřit velikost vychýlení páky servomotoru je k hřídeli také připojen potenciometr, jemuž se na základě pohybu páky mění rezistence a tedy i jeho výstupní napětí.

Všechny hodnoty jsou zpracovány zabudovaným mikrokontrolérem (Small Microcontroller), který je potom poskytne dál specializovanému hardwaru (například řadiči) [13].

³Fused Deposition Modeling - Modelování tavené depozice

⁴Převzato z: https://cdn.sparkfun.com/assets/custom_pages/5/6/0/servo-parts.jpg

Níže jsou uvedené specifikace dvou servomotorů⁵. Byly vybrány z důvodu jejich častého využití v modelářských projektech.

Název motoru	MG90S	MG995
Provozní napětí	4,8 V - 6 V	4,8 V - 6 V
Maximální točivý moment	1,8 kg · cm (4,8 V), 2,2 kg · cm (6,0 V)	3 kg · cm (4,8 V), 15 kg · cm (6,0 V)
Úhlová rychlost	0,10 s / 60° (4,8 V), 0,08 s / 60° (6,0 V)	0,17 s / 60° (4,8 V), 0,13 s / 60° (6,0 V)
Rozměry	22,8 x 12,2 x 28,5 mm	40 x 43 x 19 mm
Hmotnost	13,4 g	69 g

Tabulka 3.1: Specifikace dvou typů modelářských servomotorů

3.2 Řízení chodu servomotorů

Tato sekce popisuje, jakým způsobem komunikuje počítač se servomotory a následně význam a důležitost I²C sběrnice.

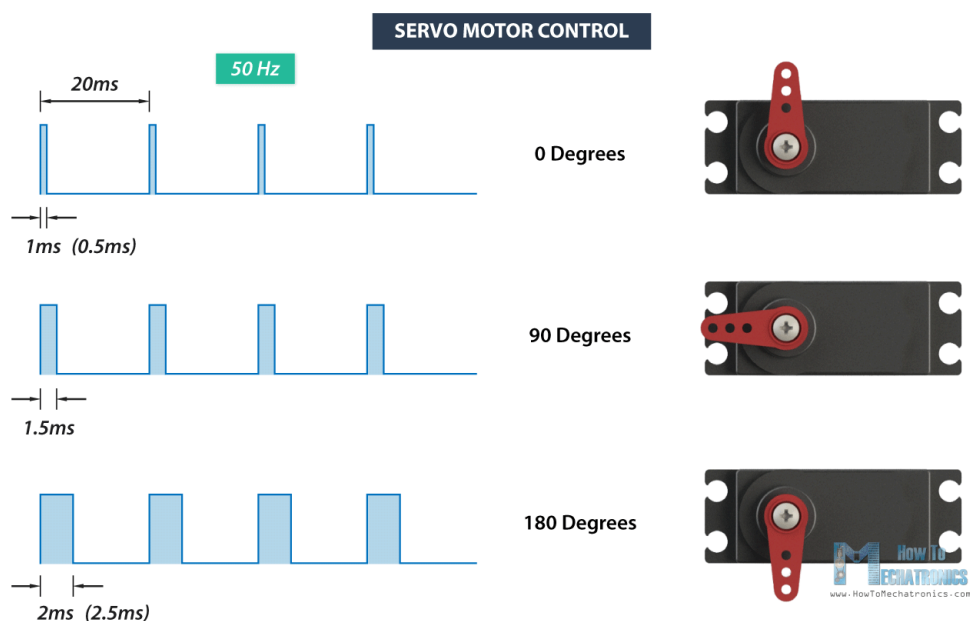
Pulzně šířková modulace

Řídící jednotka zajišťuje pohyb serva vysláním elektrických obdelníkových signálů, které se liší délkou, tento proces se nazývá *Pulzně šířková modulace* (Pulsed width modulation - PWM). Princip PWM [20] je založen na střídě (duty cycle). Střída je poměr signálu nacházejícího se v logické 1 a v logické 0. Perioda mezi jednotlivými obdelníkovými impulzy je typicky u modelářských servomotorů 20 ms, frekvence je 50 Hz (hodnota servomotoru se aktualizuje padesátkrát za sekundu) a délka signálu samotného je v rozmezí 1 - 2 ms.

Na obrázku 3.9 lze vidět, že čím delší je perioda zaslání signálu, tím je natočení páky serva větší. Pokud délka signálu dosahuje maximální hodnoty, tzv. *maximální pulzní odezvy* zpravidla dlouhé 2 ms, je natočení páky serva od základní pozice maximální.

⁵Specifikace motorů byly převzaty se stránky: <https://www.laskakit.cz/>

Hodnota maximálního natočení je u většiny modelářských servomotorů bez kontinuálního pohybu omezena pevnou zarážkou na 180°.



Obrázek 3.3: Řízení servomotoru pomocí PWM⁶.

Naopak pokud je délka zasláního signálu minimální, nazývá se signál *minimální pulzní odezva* a páka serva zrotuje do výchozí pozice 0°.

I²C sběrnice

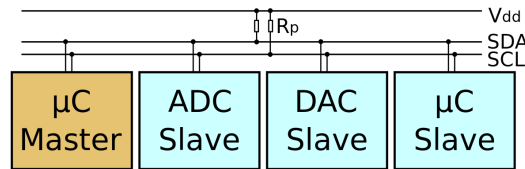
I²C sběrnice [9] je komunikační rozhraní typu half-duplex, kdy je možné zasílat data v daném okamžiku pouze v jednom směru (směr se ale může měnit). Rozhraní je synchronní, obsahuje navíc krom datového vodiče (SDA) i vodič pro hodinový signál (SCL), který je určen pro synchronizaci komunikace.

Funguje na principu master-slave, znázorněném na obrázku 3.4, kdy pouze jedna stanice, která je označena jako master (mistr) řídí komunikaci a umožňuje ostatním zasílat svá data.

⁶Převzato z: <https://hadex.cz/img/zbozi/m534b.jpg>

K hlavní stanici může být připojeno až 127 vedlejších stanic, jež jsou označeny jako slave (sluha).

Do obvodu je také zapojen pull-up rezistor [9], který pokud neprobíhá žádná komunikace nastavuje stav vodiče SCL a SDA do logické 1. Komunikaci vždy zahajuje zařízení master, které generuje startovací hranu (změnou stavu na logickou 0) na vodiči SDA.

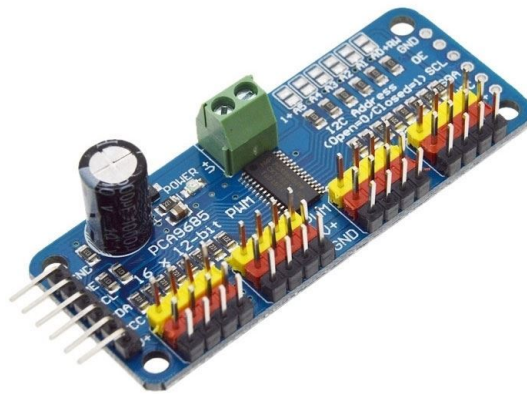


Obrázek 3.4: Princip fungování I²C sběrnice⁷.

Stanice typu master zašle adresový rámec, následně dojde k tzv. *potřesu rukou* (handshake), kdy se obě komunikující stanice utvrdí na zasílání dat. Velikost zasláných rámců je typicky 1 B. Komunikace je dovršena ukončující hranou, kdy se změní logická hodnota vodiče SDA opět na 1.

Řadič PCA9685

Řadič PCA9685 principiálně funguje na principu I²C sběrnici. Je schopen kontrolovat až 16 servomotorů nebo jakýchkoliv jiných PWM výstupů. Vstupní napětí napájení musí být v rozmezí 2,3 V - 5,5 V. Zařízení poskytuje výstupní napětí do 5,5 V.



Obrázek 3.5: Sběrnice PCA9685⁸.

Pro účely ovládání servomotorů za využití tohoto řadiče byla vytvořena programová knihovna v prostředí Arduino IDE s názvem *Adafruit_PWM_Servo_Driver.h*⁹. Knihovna umožňuje nastavení PWM komunikační frekvence a délky rozsahu PWM signálu, který má být zaslán servomotoru připojenému na konkrétním pinu řadiče.

⁷Převzato z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3e/I2C.svg/1200px-I2C.svg.png>

⁸Převzato z: <https://www.printspace3d.com/wp-content/uploads/2013/12/FDM.jpg>

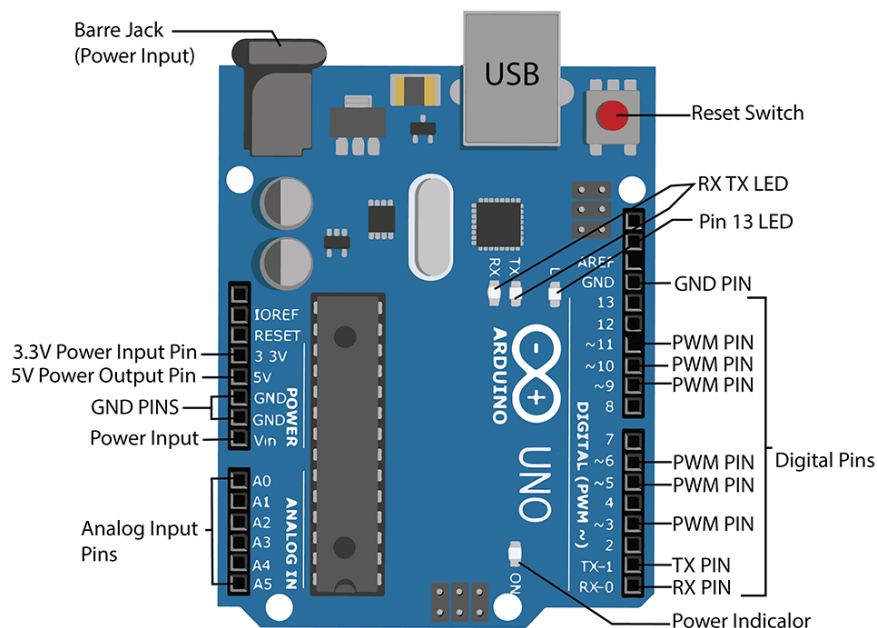
⁹<https://github.com/adafruit/Adafruit-PWM-Servo-Driver-Library>

Arduino Uno

Aby robotická paže mohla vykonávat jakékoliv logické operace a byla programovatelná, je potřeba počítač. U servo zařízení malých rozměrů je jedním z využívaných mikrokontrolerů Arduino z důvodu jeho nízké ceny a přívětivému vývojovému prostředí. Existuje mnoho verzí (Uno, Mega, Nano, Leonardo, atd.) tohoto zařízení, které se liší převážně velikostí a počtem pinů.

Arduino [8] je jednodeskový počítač obsahující mikročip ATmega, je možné k němu připojit spoustu periférií a modulů - např. Ethernet, Bluetooth, Wifi a používat jej v řadě různých projektů. Podstatou této platformy je open-source software (software s volně dostupným zdrojovým kódem), který může kdokoliv s uživateli upravovat a šířit podle svých potřeb, hardware je vydáván pod licenci Creative Commons, což je ekvivalent open-source pro fyzicky existující elektrické komponenty. Arduino je vytvořeno za využití Harvardské architektury, kdy je oddělena paměť pro uložení kódu a dat. Frekvence vnitřního hodinového signálu je 16 MHz. Zařízení neobsahuje operační systém a vždy před využitím je nutné naprogramovat vlastní kód ve speciálním jazyce Wiring, který je nadstavbou jazyka C++.

Na obvodové desce, jak je vidět na obrázku 3.6, je umístěno 14 digitálních pinů (z toho 6 PWM, kde je možné dynamicky nastavovat velikost napětí) a 6 analogových pinů. Periferie mohou být napájeny přímo z Arduina napětím 5 V nebo 3,3 V. Pro komunikace jsou určeny technologie UART (tj. sériová komunikace využívající piny RX, TX), SPI (MOSI, MISO, SCK¹⁰) a I²C (piny SDA - A4, SCL - A5). Napájení samotného zařízení Arduino je umožněno i v rámci komunikace přes USB. Další možností napájení je zdířka typu Jack pro zapojení konektoru např. z externího akumulátoru [8] (potřebné napájecí napětí je 9 V - 12 V).



Obrázek 3.6: Arduino Uno s uvedeným popisem pinů¹¹.

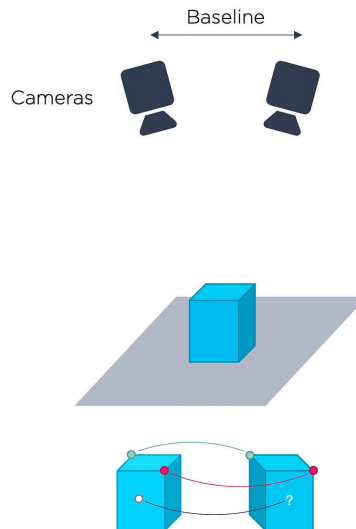
¹⁰MOSI (Master Out Slave In) - linka pro zaslání signálů přidruženým peripetiím, MISO (Master In Slave Out) - linka přidružených stanic pro zaslání dat hlavní stanici, SCK (Serial clock) - hodinový signál pro synchronizace komunikace

3.3 Kamerová detekce hloubkového pohybu těla

Existuje mnoho technologií, které se věnují získávání hloubkových dat z objektů. Všechny spojuje společný cíl, určit vzdálenost objektu od bodu pozorování. V následujících podkapitolách jsou zmíněny 3 nejvýznamnější a v dnešní době nejpoužívanější principy. Technologie Time of Flight (Doba letu) je popsána podrobněji.

Stereo Vision

Technologie Stereo Vision neboli Stereofonní vidění využívá dvou kamer, které jsou od sledovaného objektu ve stejné vzdálenosti. Mezi snímači je vždy fixní rozestup. Každá kamera sleduje objekt z jiného úhlu, následně se porovnají zaznamenané snímky z obou zařízení a je vypočítána hloubková mapa na níž jsou jednotlivé části objektu zbarvené jinou barvou podle vzdálenosti od bodu pozorování (kamer). Čím blíže je objekt umístěn ke kamerám, tím vzniká větší disparita obou snímků a v hloubkové mapě se to projeví tmavším zbarvením povrchu [17].



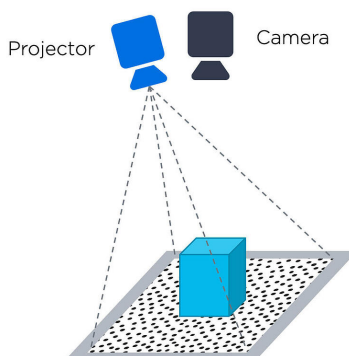
Obrázek 3.7: Princip fungování Stereo vision¹².

¹¹Převzato z: <https://learn.thestempedia.com/wp-content/uploads/2018/08/Arduino-Pins-Description.png>

¹²Převzato z: <https://www.zivid.com/3d-vision-technology-principles>

Structured Light

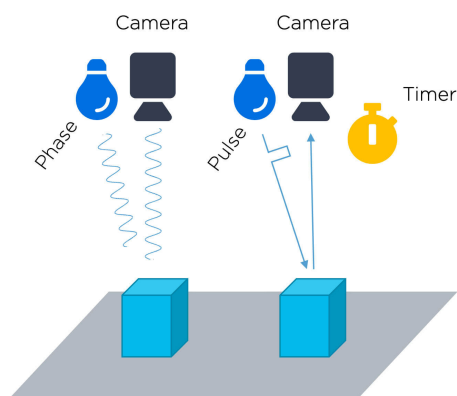
Structured Light neboli Strukturované světlo je technologie využívající projektor a kameru (obvykle jsou oba aparáty zabudované v jednom zařízení). Zařízení jsou umístěna v určité vzdálenosti od sledovaného objektu. Projektorem se na objekt promítají světelné vzory, u kterých je předem známo, jak mají vypadat. Pomocí měření velikosti rozdílů mezi tvarem, který zaznamená kamera a základním vzhledem, který je promítán projektorem, se vypočítá hloubková mapa [17].



Obrázek 3.8: Princip fungování Structured Light¹³.

Time of Flight

Time of Flight neboli Doba letu [17] je technologie založena na principu měření časového intervalu, jenž stráví na cestě emitorem směrem k objektu vyslaný paprsek, kde jej objekt reflektuje zpět k přijímači, který jej zachytí.



Obrázek 3.9: Princip fungování metody Time of Flight¹⁴.

¹³Převzato z: <https://www.zivid.com/3d-vision-technology-principles>

¹⁴Převzato z: <https://www.zivid.com/3d-vision-technology-principles>

Obecný tvar rovnice pro výpočet vzdálenosti za pomoci technologie ToF je uveden v následující rovnici 3.1.

$$L = \frac{c}{2} T_{oF} \quad (3.1)$$

C je rychlost světla a T perioda, neboli čas, který uběhne od vyslání paprsku směrem k objektu a jeho opětovnému zachycení.

Time of Flight technologie se dělí na dva přístupy:

- Pulsed laser light systems.
- Phase-based (nebo také Continuous-wave) systems.

Pulsed laser light systems

Pulsed laser light systems (pulzní laserové světelné systémy) přístup využívá světlo (laserový paprsek) [17], které je vysíláno po dobu trvání Δt směrem na objekt. Senzory označené jako Q_1, Q_2 jsou akumulátory, které se nabíjí z příchozích od objektu odražených paprsků. Signál paprsku se vysílá v obdelníkových funkcích, kdy se rychle v pravidelných intervalech za sebou střídá fáze *vysílání* (emitor je aktivní) a *pauza* (emitor není aktivní), kdy se nevysílá.

Q_1 senzor je aktivní právě, když je aktivní i emitor. Q_2 funguje přesně opačně, tedy je aktivní, když je neaktivní emitor. Q_1 je tedy zcela synchronizován s emitorem a Q_2 naopak plně desynchronizován.

Po odečtení obou hodnot nabitě elektrické energie (tzv. integračního času $\int dt$ - velikost nabití) akumulátorů, se dá přesně rekonstruovat posunutý signál zasláný laserem a zjistit velikost daného posunutí (fázového posunu), tedy i doba letu paprsku od vyslání po přijetí. Výpočet se provádí následující rovnicí 3.2.

$$T_{oF} = \frac{c}{2} \Delta t \left(\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \right) \quad (3.2)$$

C je rychlost, Δt doba trvání vysílání laserového paprsku, Q_1 je akumulátor synchronizovaný s dobou vysílání laseru a Q_2 akumulátor synchronizovaný s pauzou mezi fázemi vysílání laseru.

Phase-based systems

Princip Phase-based systems (fázové systémy) [17] je obdobný jako u předchozí metody, avšak místo dvou senzorů (akumulátorů) Q_1, Q_2 se používají čtyři. Nově přidané senzory Q_3 a Q_4 jsou aktivní v čase, který je fázově posunut o 90° od časů stávajících akumulátorů Q_1, Q_2 .

Měřený úsek je rozdělen mezi více zařízení, díky čemu se zvyšuje přesnost výsledků a naopak se výrazně snižuje velikost chyby z důvodu špatného ambientního (veškerého okolního světla v měřeném prostředí např. stropní zářivky, sluneční svit) osvětlení.

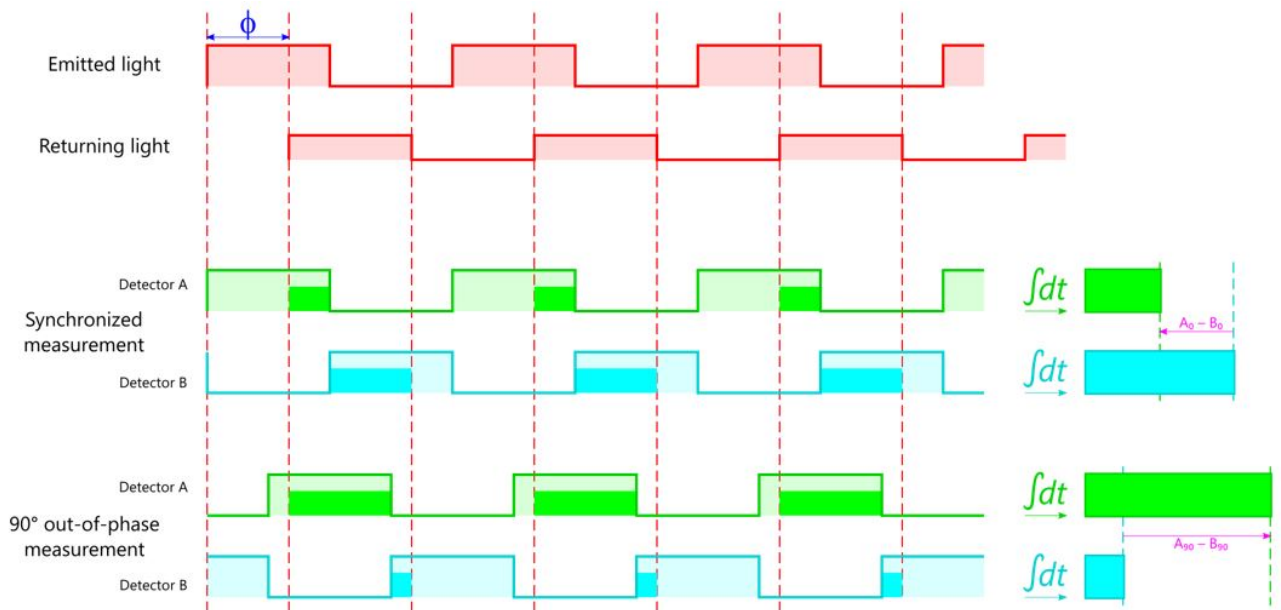
K výpočtu fázového posunu (úhlu) slouží následující rovnice 3.3 a 3.4.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q_3 - Q_4}{Q_1 - Q_2}\right) \quad (3.3)$$

$$ToF = \frac{c}{4\pi f} \varphi \quad (3.4)$$

Q_1 je akumulátor synchronizovaný s dobou vysílání laseru, Q_2 je akumulátor synchronizovaný s pauzou mezi vysíláním laseru, Q_3 je akumulátor fázově posunutý o 90° od Q_1 , Q_4 je fázově posunutý o 90° od Q_2 .

Na obrázku 3.10 jsou znázorněny obě výše popsané metody ToF. Druhá metoda Phase-based systems je rozšířena o dva obdelníkové signály, které jsou posunuté o 90° situované ve spodní části ilustrace. Laser je zapsán jako emitted light (emitované světlo), detector A, B v části Synchronized measurement (synchronizované měření) značí akumulátory Q_1 , Q_2 a detector A, B v části 90° out-of-phase measurement (měření posunuté fázově o 90°) označuje akumulátory Q_3 , Q_4



Obrázek 3.10: Princip fungování Time of Flight¹⁵.

¹⁵Převzato z: <https://www.zivid.com/3d-vision-technology-principles>

3.4 Existující hloubkové senzory na trhu

V dnešní době je na trhu velká variace těchto produktů od specializovaných kamer až po mobilní telefony, který se začínají věnovat tomuto odvětví a instalovat své hloubkové senzory v podobě například Lidar kamer.

V následujících kapitolách jsou zmíněny v projektech hodně využívané a v poměru cena, kvalita velice výhodná zařízení. Vůbec zde není pojednáno o mobilních hloubkových senzorech, protože jejich rozlišení, kvalita obrazu je oproti těmto specializovaným kamerám zanedbatelná. Níže zmíněné zařízení jsou převážně určena pro vývojáře, kterým je poskytnuta rozsáhlá dokumentace a další podklady pro snadnější vývoj aplikací.

Azure Kinect DK

Využívá technologii Time of Flight. Cena kamery je 399 \$, což je v přepočtu cca 9000 Kč, vyžaduje pouze operační systém Windows 10, Ubuntu 18.04 nebo Ubuntu 20.04.

Maximální počet snímků za sekundu je 30. Obsahuje dva módy zorného pole, úzké má velikost $75^\circ \times 65^\circ$ při rozlišení 640×576 a široké $120^\circ \times 120^\circ$ při rozlišení 1024×1024 . Velikost nepřesnosti v měření je maximálně $17 \text{ mm} + 0,1\%$ vzdálenosti od kamery, ve vzdálenosti 4 m se velikost chyby tedy rovná 15 mm, jedná se tedy o jednu z nejpřesněji měřících kamer. Maximální příkon zařízení (spotřeba elektrické energie za hodinu) je 5,9 W [22]. Kamera je ilustrována na obrázku 3.11.



Obrázek 3.11: Kamera Azure Kinect DK využívající technologie ToF¹⁶.

K produktu jsou od firmy poskytnuty dvě volně stažitelné sady vývojářských programů. Azure Kinect Sensor SDK je určena pro zpracování hloubkových, RGB dat. Transformuje získaná data na síť barevných bodů, jež tvoří tzv. hloubkovou mapu.

Body tracking SDK umožňuje zpracování dat o 32 kloubech po celém těle člověka stojícího před kamerou a zaznamenávat pozice a orientaci těchto kloubů. Vývojáři je také poskytnuta datová struktura, díky které lze odlišit datové body většího počtu lidí najednou.

¹⁶Převzato z: <https://cdn.alza.cz/Foto/f5/AZ/AZUREKIN001.jpg>

Intel® RealSense™ D455

Využívá technologii Stereo Vision. Jedná se zatím o nejmodernější hloubkovou kameru od firmy Intel. Zařízení je znázorněno na obrázku 3.12. Těto řadě senzoru RealSense™ D455 předchozí modely s číselným označením D405, D415, D435. Cena se rovná ceně Azure Kinect DK - 399\$, vyžaduje operační systém Windows 10 nebo Ubuntu 16.xx či vyšší.



Obrázek 3.12: Kamera Intel® RealSense™ D455 využívající technologie Stereo Vision ¹⁷.

Maximální počet snímků za sekundu je 90. Nejvyšší rozlišení hloubkových snímků je 1280×720 a zorné pole $87^\circ \times 58^\circ$. Maximální velikost nepřesnosti v měření je nejvýše 2% neboli 80 mm ve vzdálenosti 4 m. Maximální napětí je 5,25 V a proud 700 mA, z toho vyplývá, že nejvyšší možný příkon zařízení je 3,675 W [4].

¹⁷Převzato z: https://images2.patro.cz/original/900/001/948/900001948029_0.jpg

Kapitola 4

Analýza současného stavu a stanovení postupu práce

V této kapitole je provedena analýza existujících řešení robotických manipulátorů a technologií, které byly zmíněny v kapitole 2. Jsou stanoveny cíle, jež jsou definovány vlastnostmi, které musí zařízení splňovat. Na základě provedené analýzy je proveden návrh robotické paže a také je vytvořen koncept uživatelského rozhraní.

4.1 Analýza současného stavu robotických paží

Analýza současného stavu vychází z kapitoly 2. V této sekci jsou zmíněny nejvhodnější přístupy a technologie použité při konstruování robotické paže, jež bude vytvořena v této práci.

Vlastnosti	Kuka KR 50L	UR16e	Dejan Robot
Druh pohybu	translace	rotace	rotace
Generace	třetí	třetí	první
Nákladnost	ano	ano	ne
Materiál	kov	kov	plast (PLA)

Tabulka 4.1: Tabulka porovnání robotických paží.

První generace průmyslových robotů, které slouží pro zdvihání a umístování objektů v prostoru zcela vyhovuje pro tvorbu tohoto projektu. Roboti dalších generací, kteří obsahují dodatečné senzory či umělou inteligenci, která jim umožňuje dělat komplexní rozhodování by byly nadbytečnými, protože tato práce je převážně cílená na uživatelské ovládání. Jelikož je cílem navrhnout robotické zařízení, které bude možné ovládat pohybem vlastní paže je nutné, aby i vzhled a funkčnost byla podobné lidské předloze. Proto bylo zvoleno 6-stupňův volnosti s rotačním pohybem, které poskytnou zařízení téměř identický rozsah pohybu jaký má lidská paže. Některá zmíněná modelářská robotická zařízení využívají při komunikaci Bluetooth modul. Při řešení tohoto projektu není však vhodné využít tuto komunikační technologii, jelikož přidává do systému další nadbytečné zpoždění, které je již v rámci zpracování obrazu z kamery velké. Při porovnání materiálu konstrukce jednotlivých paží, je

pro výrobu modulárního lehce sestrojitelného zařízení nejlepší využít plast, který může být snadno vytisknut na 3D tiskárně. V tabulce 4.1 je vidět, že mému zařízení bude nejlépe vyhovovat podobná konstrukce jako je Dejan robot. Pro účely řízení servomotorů bude použit jednodeskový počítač Arduino a zasílání signálu bude pomocí PWM. K získávání dat o pohybu uživatele bude využita hloubková kamera Azure Kinect DK a její programovací rozhraní pro sledování pohybu jednotlivých kloubů Body tracking SDK.

4.2 Stanovení cílů práce

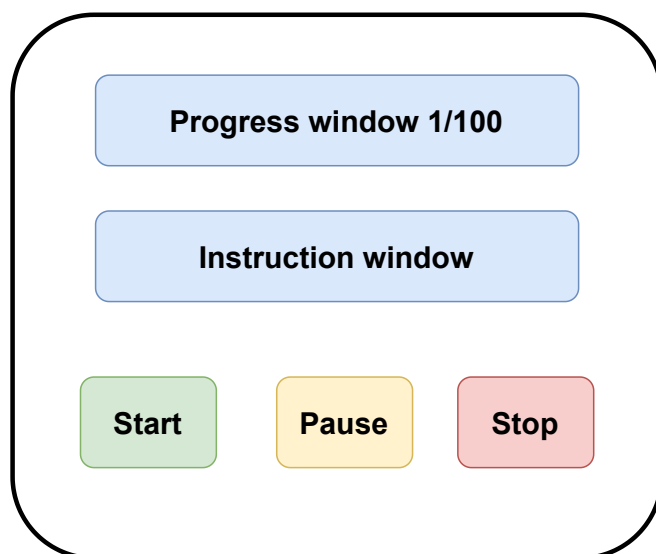
Na základě analýzy uvedené v předchozí sekci a zadání bakalářské práce byly stanoveny následující cíle. Cílem této práce je vytvořit robotické zařízení typu manipulátor za využití servomotorů (RC komponent). Robot bude obsahovat 6 stupňů volnosti a jeho díly budou vyrobeny na 3D tiskárně z materiálu PLA s ohledem na modularitu a lehkou zreplikovatelnost. Ovládání zařízení bude za pomoci pohybu vlastní paže, přičemž bude využita hloubková kamera Azure Kinect DK. K snadnějšímu použití, bude navíc vytvořeno intuitivní grafické uživatelské rozhraní, kde bude možné zahájit, pozastavit či ukončit celý proces ovládání.

Pro účely ověření splnění těchto cílů musí zařízení nabývat následujících vlastností, které budou také otestovány:

- Modulární konstrukce.
- Jednoduchý a lehce zreplikovatelný design.
- Použití levných komponentů a 3D tisku.
- Ovládání za pomoci pohybu vlastní paže.
- Stabilní zařízení, které se nezřítí.
- Funkčnost bez nutnosti připojení do elektrické sítě.
- Funkční uživatelské rozhraní.

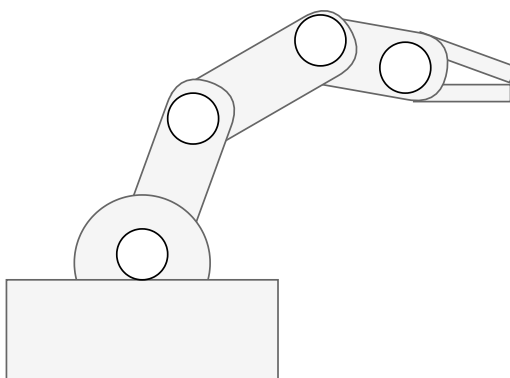
4.3 Návrh uživatelského rozhraní a robotické paže

Před tvorbou grafického uživatelského rozhraní (GUI) byl vytvořen následující návrh 4.1. GUI bude sloužit pro účely zahájení, pozastavení a ukončení vykonávání programu pro ovládání robotické paže. K informování uživatele o probíhajících procesech zde budou implementována i dvě výstupní textová okna.



Obrázek 4.1: Návrh grafického uživatelského rozhraní

Z provedené analýzy existujících řešení byla sestavena koncepce robotické paže, která bude vytvořena v této práci. Jedná se o manipulátor s 5-ti stupni volnosti, jenž bude zakončen klepetovým efektozem. Ilustrace je znázorněna na obrázku 4.2, kde místa upevnění servomotorů jsou vyznačena bílým kruhem.



Obrázek 4.2: Koncept robotické paže

K ovládání jednotlivých servomotorů bude zvolena některé verze zařízení Arduino, které umožňuje externí připojení modulu řadiče pro zaslání PWM signálu. Řadič jsem zvolil z důvodu nutnosti dodatečného napájení všech motorů a nízkého počtu pinů na desce počítače Arduino.

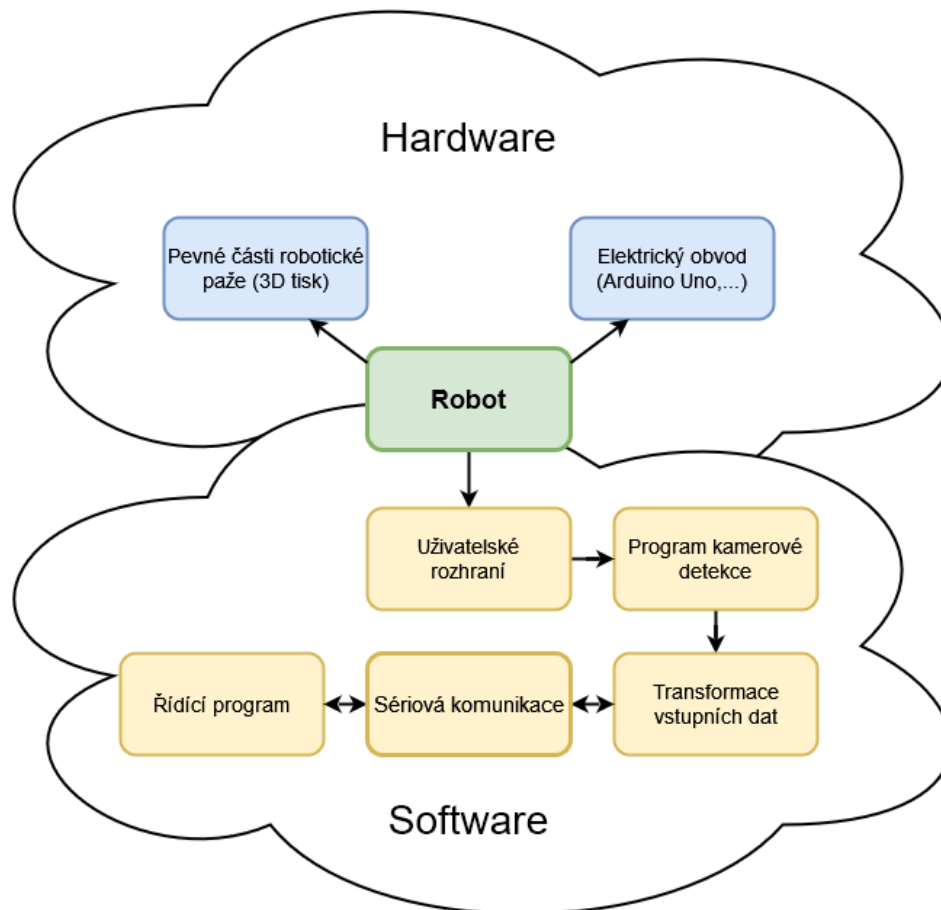
K vypracování práce jsem se rozhodl využít následující technologie:

- Výroba pevných částí robotické paže - 3D tiskárna Creality Ender 3, materiál PLA.
- RC komponent - 7 x servomotor MG90S.
- Řadič pro ovládání servomotorů - PCA9685.
- Logický prvek (počítač) robota - Arduino Uno.
- Kamera pro detekci paže v prostoru - Azure Kinect DK
- Programovací jazyk pro detekci pohybu paže a tvorbu uživatelského rozhraní - C++.

Kapitola 5

Realizace řešení robotické paže

V návaznosti na stanovené cíle v kapitole 4 bylo sestavené blokové schéma na obrázku 5.1, které rozděluje části řešení na jednotlivé bloky vývoje. Dílčí bloky jsou barevně odděleny, přičemž hardwarová část je zbarvená modře a softwarová část žlutě.



Obrázek 5.1: Blokové schéma řešení projektu.

Části vypracování:

- V první hardwarové části bylo nutné vymodelovat a vyrobit mechanické části. Byla využita technologie 3D tisku, poté je zapojen elektrický obvod za pomoci nakoupených volně dostupných elektronických komponentů.
- Druhá softwarová část se věnuje navržení programu, který by správně zachytával obrazová data kloubů paže člověka. Tyto informace jsou v kódu transformovány, aby odpovídaly rozsahu pohybu servomotorům a následně jsou zaslány přes sériový port řídicímu programu, který se stará o obsluhu hardwarových komponentů. Aby měl uživatel větší a snadnější kontrolu nad procesem ovládání průběhu programu je vytvořeno grafické uživatelské rozhraní.

Celková funkčnost projektu je testována na řadě úloh a úkonů při nichž se zjistí nejen celková přesnost zařízení, ale i jeho spolehlivost, durabilita. Na základě výsledků mohou být vyhodnoceny požadované vlastnosti a splnění nebo nesplnění cílů.

5.1 Zhotovení mechanických částí

Před zhotovením bylo nutné promyslet celkovou koncepci robotické paže, hlavní inspirací byla anatomie lidské paže, a proto byla i stavby kostí paže značnou inspirací.

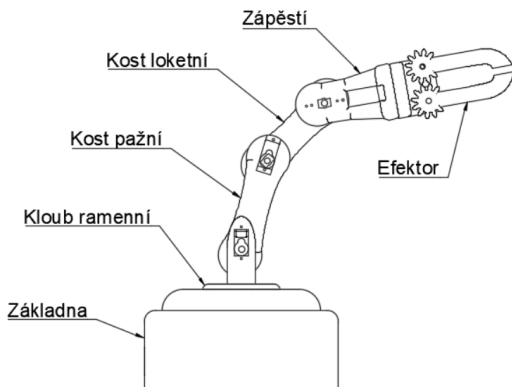
3D tisku předchází velice důležitá část a to modelování, kdy je nutná brát ohled nejen na požadované vlastnosti a rozsah pohybu, ale i na umístění budoucích elektronických komponentů, které budou připevněny na robotické paži.

Náčrt mechanických částí

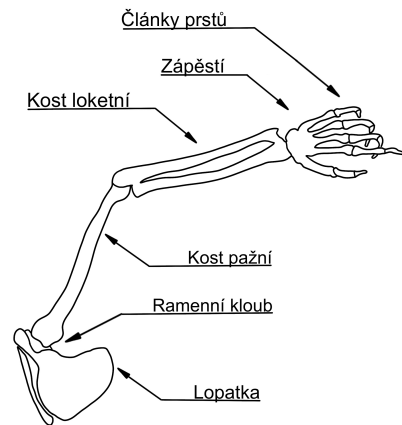
Pro účely 3D tisku bylo nutné navrhnout vlastní 3D tisknutelné modely ve formátu 3MF. Proces vytváření modelů je realizován pomocí softwaru Fusion 360 [6]

Ještě před začátkem bylo nezbytné vytvořit náčrtek, který je vzorem při modelování jednotlivých částí.

Náčrtek 5.2 je inspirován lidskou anatomií, kde jednotlivé části alespoň částečně korespondují s předlohou, kterou se stala lidská paže.



Obrázek 5.2: Náčrtek robotické paže.

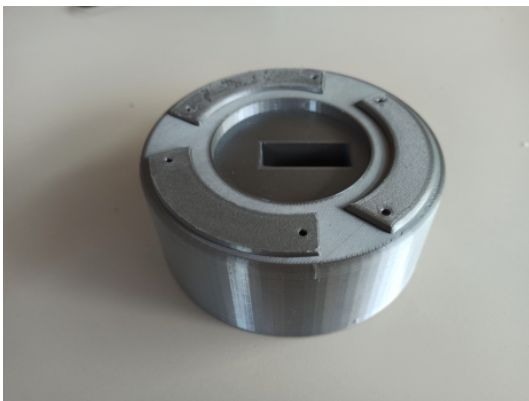


Obrázek 5.3: Anatomie lidské paže, která byla inspirací při tvoření náčrtku.

Model základny

Největší a nejtěžší komponent. Velká hmotnost je nutností pro celkovou stabilitu robota. Obsahuje sedlo pro servomotor, který bude zajišťovat horizontální pohyb paže a také prostor pro usazení další komponenty, jenž bude nad ní.

Tato část byla několikrát předělána, aby dosahovala optimálních, výše uvedených vlastností. Ilustrace na obr. 5.12 a 5.13.



Obrázek 5.4: První vytisknutý model s nedostatečnou hmotností a chybějícím místem pro vložení elektrických komponentů.



Obrázek 5.5: Upravený model, který splňuje požadované vlastnosti.

V novém modelu základny jsou zabudovány dvě komory, kdy jedna je určena pro umístění akumulátoru (powerbanky) a druhá pro zasunutí vytisknutých šuplíků se zařízením Arduino Uno a řadiče PCA9685. Také je zde místo pro uložení kabeláže. V první iteraci základny byla po obvodu stěn zabudovaná komora pro vložení závaží, ta se ukázala sama o sobě jako

málo účinná, ale v druhé iteraci se komora zkombinovala s hmotností vložených elektrických komponentů v dalších dvou nových dutinách.

Nový design napomohl k celkovému zlepšení stability a k ochraně elektrických obvodů před mechanickým či jiným poškozením.

Další části robotické paže:

- **Model ramenního kloubu** - Komponent je připojen k základně za pomoci páky, která je upevněna ke hřídeli servomotoru. Dále se zde vyskytují sedla pro vložení dvou servomotorů, které budou zajišťovat vertikální pohyb. Jediný motor by zde byl příliš namáhán, a proto je nutné jeho výkon zdvojit.
- **Model pažní kosti** - Nejdelší komponent s jedním sedlem pro servomotor, umožňuje vertikální pohyb.
- **Model loketní kosti** - Lehce rozměrově modifikovaný model pažní kosti se stejnou funkcí. Poměr velikostí pažní a loketní kosti koresponduje s realitou.
- **Model zápěstí** - Obsahuje sedlo pro servomotor umožňující horizontální pohyb, který je určen pro lepší variabilitu úchopu klepeta efektoru.
- **Model efektoru** - Část pro uchycení jednoho servomotoru, které zajišťuje pohyb uchopovacího mechanismu neboli efektoru, který funguje na principu ozubených kol. Původní návrh se přímo podobal lidské ruce, obsahoval také prsty, které se dělily na tři samohybné články, jimiž by byl protažen drát upevněný na páce servomotoru, jež by byla upevněna na dlani. Od návrhu bylo upuštěno, kvůli jeho robustnosti vzhledem k nízké výkonnosti servomotorů.

Části robotické paže	Rozměr ve třech dimenzích
Základna	16,7 x 16,7 x 8,5 cm
Ramenní kloub	7,1 x 7,1 x 8,2 cm
Pažní kost	12,5 x 3,5 x 2,2 cm
Loketní kost	11,6 x 3,5 x 1,5 cm
Zápěstí	4,7 x 4,7 x 8,6 cm
Efektor	4,7 x 4,7 x 10,5 cm

Tabulka 5.1: Tabulka rozměrů nejširších částí jednotlivých komponent.

Hmotnost konstrukce robota bez zabudovaných elektrických komponentů: **628 g**

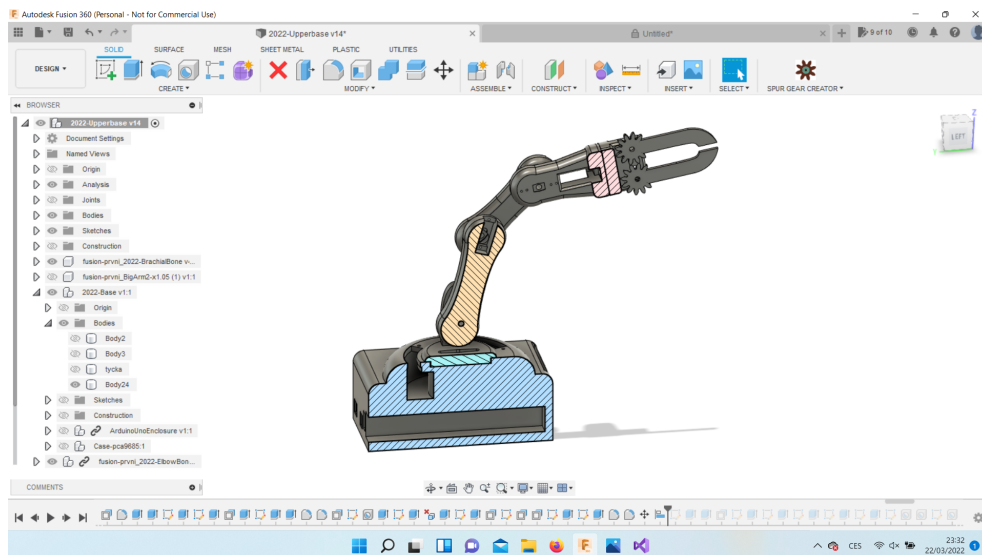
Celková hmotnost robota: **1088 g**

Maximální vzdálenost, ve které může robot operovat: **32,2 cm v rozmezí 180°**

Sestavení robota v softwaru Fusion360

Tento proces dodatečné kontroly před tiskem je třeba provést k minimalizaci chyb u vytištěných částí a tedy k šetření finančních i časových prostředků.

Po zarovnání komponentů na svá místa je provedena důkladná ověření, že části se mezi sebou nevhodně nekříží, tedy pohyb bude bezkolizní a elektronika zapadne na své místo dle plánu. Je vhodné také zkontrolovat, že rozměry úseků pro upevnění pohyblivých částí jsou vždy o 2-3 mm větší z důvodu minimalizace tření a jednoduchého složení modelu.



Obrázek 5.6: Sestavený robot v prostředí Fusion360, kde je využit nástroj úsekové analýzy.

Pomocí nástroje *Úseková analýza* ilustrovaném na obrázku 5.6 je možné v části modelu udělat řez a díky němu odhalit, zda-li jsou jednotlivé části bez chyb a mají dostatek místa na volný pohyb. Po provedení závěrečných úprav je model vytisknut na 3D tiskárně. K sestavení je použitý pouze křížový šroubovák a šrouby obsažené v zakoupeném balení se servomotory. Výsledný vzhled robota je znázorněn na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7: Model robotické paže vytisknuté na 3D tiskárně na němž jsou upevněné servomotory.

Zapojení elektroniky

Po sestavení konstrukce robota je třeba vytvořit funkční elektrických obvod. Servomotory jsou zapojené na jednotlivé piny řadiče PCA9685 pomocí tří vodičů pro VCC, GND a PWM signál. Řadič je připojený k desce zařízení Arduino Uno za využití pinů SDA, SCL a pinů pro napájení, které slouží pouze pro provoz řadiče, pro napájení jednotlivých servomotorů je k PCA9685 zapojený externí akumulátor. Úplné schéma zapojení elektrického obvodu je vyobrazeno v příloze A.

Vybrané servomotory SG90S mají maximální možný odběr elektrického proudu 400 mA každý. Celkový odběr tedy může být v jeden moment nejvýše 2,8 A, přičemž je zapotřebí napětí v rozmezí 4,8 V - 6 V. PCA9685 dokáže servomotorům poskytnout cca 5,5 V, avšak záleží na zdroji napětí. K PCA9685 je přiveden akumulátor s kapacitou 30 000 mAh \sim 3600 Wh, který dokáže napájet periferie proudem velikostí až 10 A při napětí 5 V.

Celkový výkon všech servomotorů bude nejvíce:

$$P = U \cdot I$$

$$P = 5 \text{ V} \cdot 2.8 \text{ A}$$

$$P = 14 \text{ W}$$

Maximální výdrž robota = 3600 Wh / 14 W

Maximální výdrž robota = 257 h

Akumulátor teoreticky dokáže, při plném nabití, napájet zařízení až **257 hodin**.

Samozřejmě tato hranice je pouze teoretická a s výrazným poklesem nabití by se také snižovalo poskytované napětí. To by vedlo ke snížení výkonu servomotorů, které by umožňovaly pouze omezené množství točivého momentu.

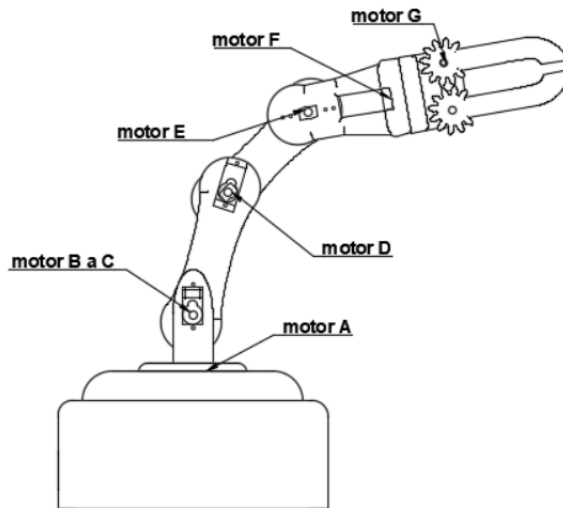
5.2 Řídící software

Hlavní funkcí softwaru je uvádět do pohybu jednotlivé servomotory, které lze vidět na obrázku 5.8 za pomoci hodnot přečtených na vstupu. Funkce využívá zařízení Arduino Uno k čtení příchozích dat z počítače a následnému zasílání signálu přes sběrnici I²C do řadiče PCA9685, dle kterého se řídí pohyb jednotlivých servomotorů. K programování bylo zvoleno prostředí Arduino IDE.

Bezprostředně po zahájení programu je zavolána funkce *setup()*, v níž jsou inicializovány základní hodnoty natočení pák servomotorů, také je nastavena komunikační frekvence sériové komunikace, která je popsána v podkapitole 5.3. Rovněž je provedeno nastavení frekvence zasílání signálu PWM funkcí *setPWMFreq()*.

V hlavním cyklu programu *loop()* probíhá volání funkce *SerialRead()* pro čtení dat ze sériového portu. Kontroluje se, jestli je datový tok ve správném formátu a tedy nebyl přijatý nevalidní segment. Řetězec je poté rozdělen dle identifikátorů motorů (označení A, B, C, D, E, F, G ilustrováno na obrázku 5.8) a uložen do paměti pomocí funkce *saveNewValue()*. V paměti je poté uchována nová, ale i stávající hodnota.

Další volanou funkcí v hlavním cyklu je *moveMotors()*, která slouží pro ověření, jestli se hodnoty uložené v paměti jednotlivých servomotorů nezměnily a pokud ano, je proveden adekvátní pohyb motor o $0,04^\circ$ směrem k nové cílené hodnotě.

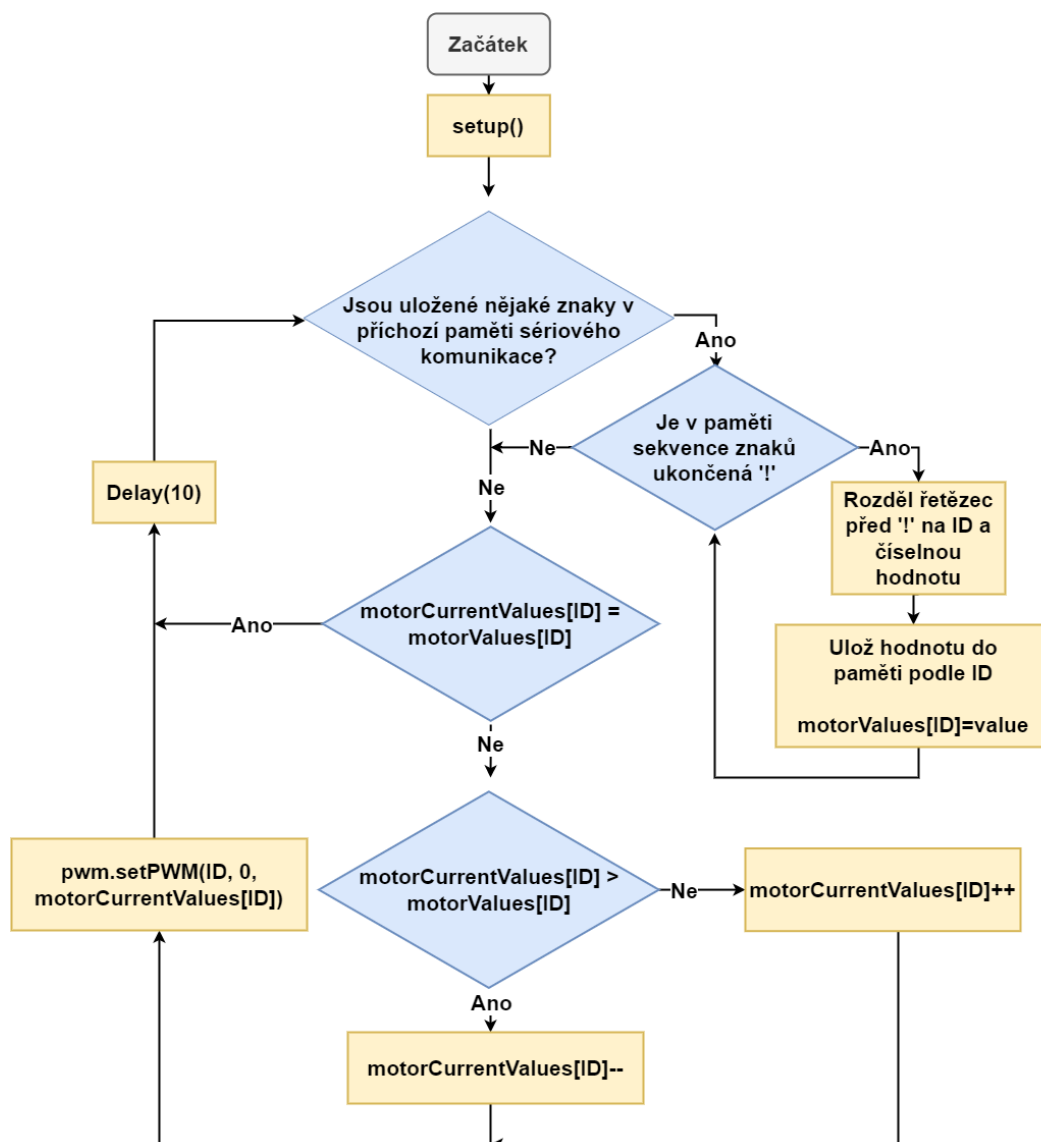


Obrázek 5.8: Robotická paže s označenými servomotory za využití identifikátorů.

Hodnoty natočení pák servomotorů jsou v rozsahu 0-1023, kde 0 značí nulové natočení páky a 1023 je naopak maximální natočení. Daný rozsah je zvolen, kvůli srozumitelnějšímu a přehlednějšímu internímu zápisu kódu, před postoupením dat řadiči musí být rozsah a hodnoty přemapovány na reálnou škálu servomotorů.

Aktualizace hodnot probíhá cyklicky s velikostí kroku 1. Pro přímý zápis hodnot do servomotorů se využívá metoda *setPWM()*, která umožňuje nastavení segmentu signálu PWM v logické 1. Největší hodnota, kterou lze parametricky do funkce zapsat je přitom 4096, což způsobí maximální natočení páky servomotoru o 180° . Je však krok minimálního natočení o velikosti 1, kdy je páka motoru posunuta o úhel $0,04^\circ$. Tento malý inkrement způsobí plynulý pohyb robotické paže a také synchronizaci, které využívají zejména motory B, C, jež jsou umístěny naproti sobě a vykonávají téměř identický pohyb, který se liší pouze ve směru natočení páky.

Na obrázku 5.9 lze vidět průběh algoritmu hlavního cyklu programu, který čte sériovou komunikaci a ukládá ji do paměti, kde se nacházejí nové (*motorValues*), ale i stávající hodnoty (*motorCurrentValues*), který slouží v další funkci programu.



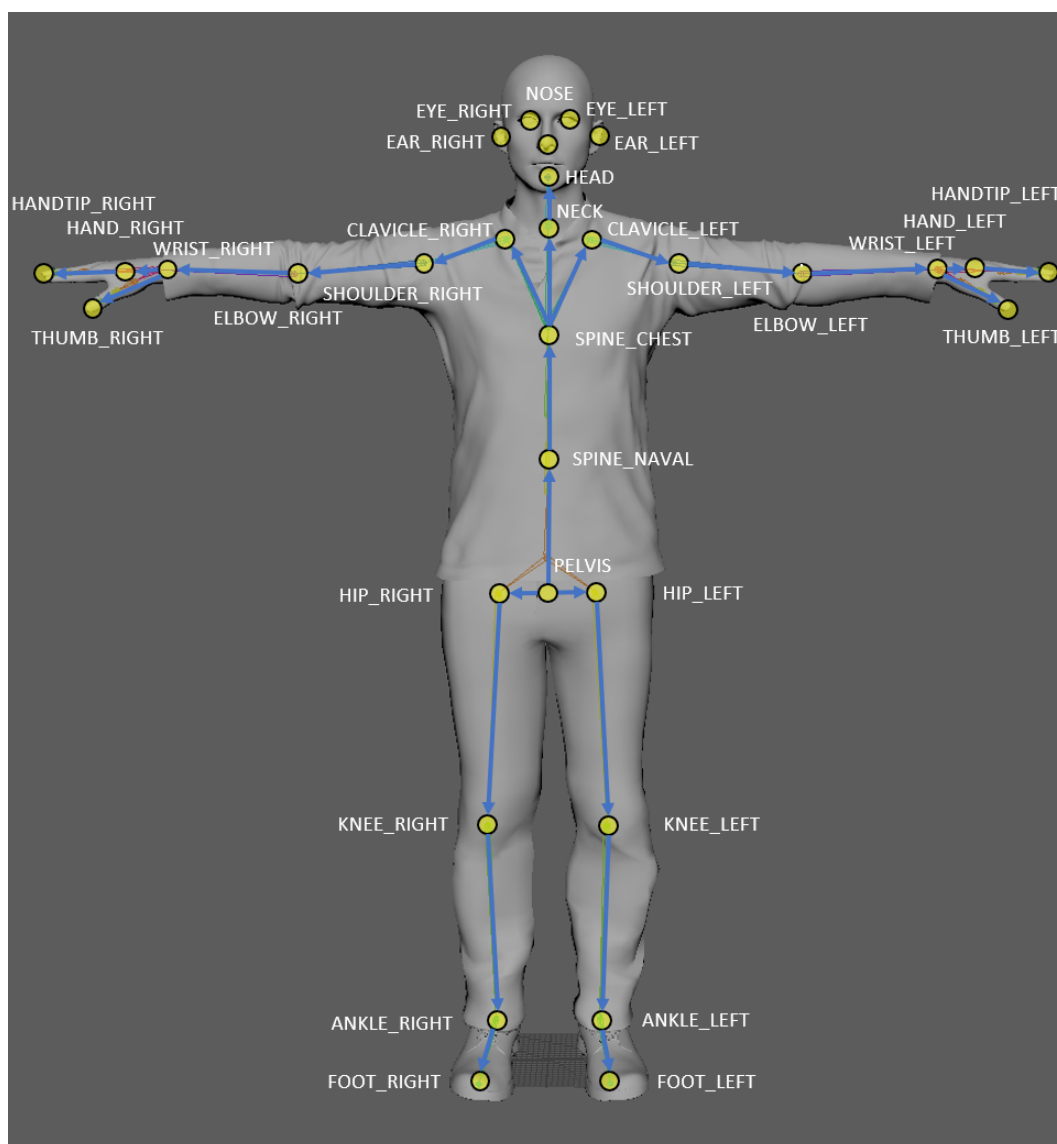
Obrázek 5.9: Vývojový diagram hlavních procesů řídicího programu.

Pro komunikaci s řadičem PCA9685 je použita knihovna *Adafruit_PWMServoDriver.h* [11], která zjednodušuje zasílání PWM (viz kapitola 3.2) signálů přes zabudované funkce. Konkrétně byla využita funkce *setPWM()* a *setPWMFreq()*.

5.3 Program kamerové detekce pohybu

Pro programování zařízení Azure Kinect DK je použita výchozí knihovny od firmy Microsoft s názvem Azure Kinect Body Tracking SDK, jež je poskytnuta zdarma na jejich webových stránkách [5].

Knihovna obsahuje metody a struktury, které jsou velice vhodné pro využití v tomto projektu (popsány dále) z důvodu abstrakce programovacího jazyka a zkrácení zápisu kódu.



Obrázek 5.10: Promítnutí kostlivce obsahujícího body zájmu na siluetu těla člověka.

Během detekce pohybu těla je obraz osoby zjednodušen na kostlivce 5.10, který obsahuje důležité body zájmu, klouby a jejich souřadnice, rotace v prostoru.

Téměř všechny klouby a končetiny jsou zastoupeny ve struktuře API `k4abt_skeleton_t`, ke kterému se dá přistoupit přes tečkovou notaci. V datové struktuře je uložen z kloubů ruky pouze palec a zbylé 4 prsty jsou sloučeny do jednoho celku pod názvem `handtip` (špička ruky), takže není možné zaznamenávat pohyb kloubů všech prstů, ale pouze jejich unifikace. Kamera zaznamenává pouze polohy výše uvedených kloubů do paměti, kdy každému je přiřazena souřadnice v kartézském systému, dále je uložena rotace a hodnota spolehlivosti přečtených vizuálních dat.

⁰Application Programming Interface - rozhraní pro programování aplikací

Intuitivním řešením by mohlo být ukládání do paměti nijak nezpracovaných pozic kloubů v prostoru, kde by motorům s horizontálně rotačním pohybem (například motor umístěný v základně nebo zápěstí), byla přiřazena kartézská souřadnice x z korespondující části ruky uživatele získaná kamerou. Ostatním motorům, které simulují vertikální pohyb paže by byla přiřazena kartézská souřadnice y , dle které by se pohybovaly.

V tomto řešení vyvstává problém, který je již zakomponován v technologii použité hloubkové kamery Azure Kinect. Každý kloub má rozsah hodnot, ve kterém se pohybuje v jednotlivých osách, avšak tento rozsah není neměnný a s různou vzdáleností od kamery je různý. Při použití zmíněného intuitivního řešení by bylo nutné, aby jedinec, jenž bude sledován kamerou byl vždy stejně vzdálen od kamery. Je také nutné, aby zařízení ovládal v ideálním případě pořád ten samý člověk totožné fyzické stavby těla, v opačném případě by docházelo k nepřesnosti při čtení a interpretaci vizuálních dat.

Vhodnější a v této práci použitou metodou je individuální přístup k pohybu jednotlivých kloubů, kde souřadnice slouží pouze jako ukazatel toho, jak jsou klouby paže od sebe vzdáleny. Celý výpočet hodnot jednotlivých servomotorů je uveden v příloze B

V rámci inicializační fáze, která probíhá bezprostředně po spuštění programu, jsou inicializovány hodnoty rozsahů pohybu jednotlivých kloubů. V rámci toho procesu je nutné, aby uživatel stojící před kamerou plnil jednotlivé příkazy, které jsou vypisovány do textového okna uživatelského rozhraní. Jedná se o krouživé pohyby částí paže a přibližování, oddalování palce a prstů ruky. Správnost plnění těchto příkazů je přímo uměrná kvalitě pohybu robota.

Sériová komunikace

Vstupem metody, která zajišťuje sériovou komunikaci mezi počítačem (odesílatelem, jehož program je v jazyce C++) a zařízením Arduino (příjemcem) jsou zpracovaná vizuální data, viz podkapitola 5.3.

Pro komunikaci je vybrána sériová linka na portě COM3. Základní Arduino knihovna obsahuje zabudovanou třídu *Serial* s mnoha metodami určenými pro účely sériové komunikace [3]. Z počátku je nastavena rychlost přenosu na 115 200 (počet odeslaných bitů za vteřinu, angl. baudrate), tento parametr musí mít obě komunikující strany stejný.

Pomocí metody *Serial.available()* je zjištěn počet bytů v komunikačním kanále, pakliže je větší než 0, mohou se data dále zpracovat.

Čtení z portu umožňuje metoda *Serial.readStringUntil()*, které čte znaky řetězce do té doby než není na vstupu znak '|', jenž označuje konec zaslaného řádku.

V rámci programu v jazyce C++, který je druhým komunikačním bodem, byla opět využita třída *Serial*, která je dokumentována na webových stránkách Arduino [1]. Při volání konstruktora je ustanoveno spojení, jehož aktivita se ověřuje pomocí metody *IsConnected()*. Pro zasílání dat na sériový port slouží metoda *WriteData()*.

5.4 Uživatelské rozhraní

Hlavní důvod implementace uživatelského rozhraní je poskytnout uživateli kontrolu na fázi zahájení, pozastavení a ukončení vykonávání programu pro ovládání robotické paže.

Na obrázku 5.11 lze vidět, že grafické rozhraní obsahuje 3 tlačítka a 2 informační okna. Tlačítkem **Start** je zahájeno kamerové zaznamenávání pohybu, komunikace s robotickým

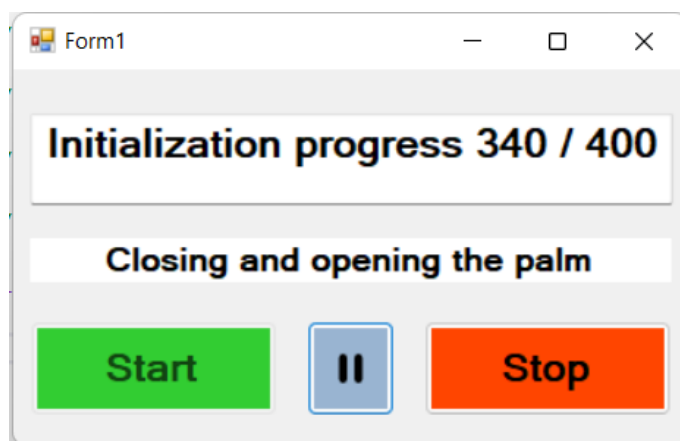
zařizováním a následný pohyb robota. Těmto procesům předchází fáze inicializace, kdy se měří jednotlivé míry uživatele stojícího před kamerou, aby se mohli správně naalokovat hodnoty rozsahů servomotorů.

Tlačítko **Stop** kompletně zastaví procesy robota, přičemž manipulátor dokončí poslední přijatou instrukci. Po znovuspuštění robota tlačítkem **Start** probíhá nová inicializace.

Tlačítkem **Pauza** (dvě svislé čáry na modrém pozadí) se pouze pozastaví proces vykonávání a stisknutím tlačítka **Start** se opět naváže na předchozí místo vykonávání programu. Neprobíhá nová inicializace.

Inicializační okno, které je umístěno bezprostředně nad tlačítky slouží pro výpis instrukcí, které uživatel stojící před kamerou musí vykonávat, aby zařízení správně fungovalo. Jedná se o sadu čtyř příkazů, kdy člověk musí kroužit jednotlivými částmi své paže a během toho stát na jednom místě čelem ke kameře ve vzdálenosti 2 metry.

Okno informující o postupu je umístěno nejvýše ve formulářové aplikaci. Při inicializaci informuje uživatele o délce průběhu této fáze a jejím dokončením. Slouží také pro výpis informací o tom, že robot je pozastaven tlačítkem **Start** nebo zcela uveden do nečinnosti tlačítkem **Stop**.



Obrázek 5.11: Grafické uživatelské rozhraní

Backend uživatelského aplikace

Formulářová aplikace byla vytvořena za využití frameworku .NET v jazyce C++/CLI pro CLR. Tento framework slouží pro zapouzdření C++ a jeho následné interpretaci v .NET prostředí [7]. Tento způsob řešení byl zvolen, kvůli nutnému využití jazyka C++ při použití API kamery Azure Kinect DK. Aplikace je kompatibilní pouze s operačním systémem Windows.

Při implementaci je použité asynchronní programování, kvůli nutnosti oddělení hlavního vlákna programu pro vykreslování grafického rozhraní a odposlouchávání událostí tlačítek od vedlejšího vlákna.

Odštěpení vedlejšího procesu nastane při zmáčknutí tlačítka **Start**, kdy je přesunut na pozadí průběh komunikace mezi kamerou a robotem, uživatelské rozhraní slouží pro výpis výsledků a průběhu procesu na pozadí. Vlákna jsou opět sjednocena po zastavení vykonávání pomocí tlačítka **Stop**.

5.5 Dosažené vlastnosti robotické paže

Bylo sestrojeno robotické zařízení za využití modelářských komponentů a 3D tisku, které je opětovně sestrojitelné. Robot také získal s využitím počítače a hloubkové kamery Azure Kinect DK nové vlastnosti, které souvisí s jeho ovládáním. Robota je možné ovládat pomocí vlastní paže, což je inovativní a progresivní způsob řízení pohybu, kdy robot pouze nereaguje na gesta, ale kopíruje pohyb jako takový.

V následujícím souhrnu jsou uvedeny vlastnosti a nároky, které byly stanoveny v kapitole 4. Všechny předem určené požadavky na zařízení byly splněny, přičemž je u každé vlastnosti udáno zdůvodnění.

Stručný souhrn dosažených vlastností:

- Modularita - díky využití CAD programu Fusion 360 je možné jednotlivé modely robotické paže modifikovat a vyměnit za nové vytisknutím na 3D tiskárně.
- Použití levných komponentů a 3D tisku - hlavním mozkiem robota je jednodeskový počítač Arduino, který cenově dostupný.
- Inovativní způsob ovládání - jelikož robot pouze nedetekuje gesta, ale celkově kopíruje pohyb uživatele je tento způsob inovativní a pouze zřídka ve světě použitý.
- Jednoduchý a lehce zreplicovatelný design - jakýkoliv člověk může využít vytvořené podklady a sám si vyrobit robotickou paži doma.
- Stabilita pohybu - model báze byl přepracován a nyní dosahuje takové hmotnosti, že manipulátor je stabilní a nehrozí mu převržení.
- Funkčnost bez připojení do sítě - díky využití akumulátoru s kapacitou 30 000 mAh je robot schopný být napájen až desítky hodin.

Budoucí vývoj by se měl zaměřit na přidání externích kamerových senzorů na snímání dlaně ruky a naprogramování funkcí pro bezchybné rozpoznávání gest, které by pomohlo pro spolehlivější funkčnost efektoru a uchopovacího mechanismu obecně. Následně by se daly zvětšit rozměry robota a vyrobit jej z odolnějšího materiálu za využití výkonnějších servomotorů. Tato změna by mohla uvést projekt do fáze, kdy by se dal reálně využít při fyzické práci jako náhrada člověka.

5.6 Testování funkčnosti robotické paže

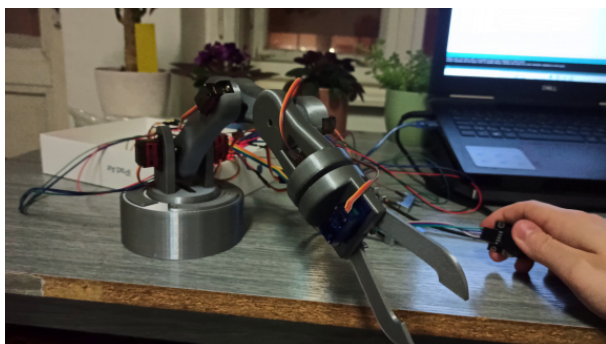
V této části řešení jsou zkoumané podstatné vlastnosti vytvořeného projektu. Software je testován za využití Windows 10, AMD Ryzen 7 1700X, NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti, 32 GB RAM. Pro instalaci programu je potřeba, alespoň 896 MB místa.

Elektrický obvod a navržený design

Při tomto prvním experimentu je cílem verifikovat funkčnost zapojeného obvodu, ověřit stupně volnosti robotické paže a testovat správnost naprogramovaných funkcí pro pohyb jednotlivých servomotorů.

Pro dané testování byl obvod rozšířen o joystick a dva potenciometry. Pohybem páčky směrem nahoru nebo dolů se testuje vertikální pohyb robotické paže a pohybem páčky doleva (doprava) se ověřuje pohyb v horizontálním směru. Potenciometr slouží pro testování funkcí rotace a zavírání (rozevírání) klepeta efektoru.

Funkčnost jednotlivých částí byla úspěšně otestována. Test pomohl odhalit funkční vadu designu modelu, kdy při naklonění robota do krajních mezí docházelo k ztrátě rovnováhy a převržení. Pokud byla paže umístěna na hladkém povrchu, tak při pohybu v horizontální ose, který měl zajistit nejspodněji umístěný servomotor, začala základna rotovat a žádaný pohyb nenastal.



Obrázek 5.12: Test funkčnosti obvodů.



Obrázek 5.13: Joystick a potenciometr pro ovládání robota.

Dané vady souvisely s nedostatečným rozměrem a hmotností základny, takže bylo nutné tuto část přepracovat.

Po přepracování části byl test **úspěšně** opakován.

Velikost odezvy

Tento experiment se zabývá měřením doby, která uběhne od pohybu uživatele po akci provedenou robotem. Za přijatelný výsledek se považuje průměrný čas do $1000 \text{ ms} \pm 200 \text{ ms}$, přičemž v žádném z pěti měření nesmí odezva přesáhnout 2000 ms.

Měření se provádí na horizontálním pohybu, který zajišťuje servomotor v základně a vertikálním pohybu, který je prováděn servomotorem v části zvané pažní kost. Je provedeno 5 měření a spočítán jejich průměr. Výsledky měření lze vidět v tabulce 5.2.

Číslo měření	doba odezvy
1	640 ms
2	710 ms
3	630 ms
4	560 ms
5	690 ms
Průměr	646 ms

Tabulka 5.2: Výsledky měření velikosti odezvy.

Průměr z naměřených hodnot je 646 ms, což těsně **splňuje** stanovený limit 1000 ms s tolerancí ± 200 ms. Odezva také během žádného měření nepřesáhla stanovenou hodnotu 2000 ms.

Spolehlivost pohybu jednotlivých částí

Tento experiment se snaží ověřit hypotézu, že robotická paže se pohybuje dle očekávání v alespoň 60 % případech. Je provedeno 10 testů každé části separátně a výsledky jsou zaneseny do tabulky 5.3 níže.

Části robotické paže	% úspěšnost pohybu z 10-ti pokusů
Základna	100 %
Pažní kost	80 %
Loketní kost	80 %
Zápěstí	60 %
Zápěstí(rotace)	50 %
Efektor	60 %

Tabulka 5.3: Výsledky měření spolehlivosti pohybu.

Experiment ukázal, že spolehlivost snímání se snižuje s klesající velikostí sledované části lidské paže. Rotace zápěstí a pohyb prstů je v rámci použití body-tracking technologie kamery Azure Kinect nepřesné a je třeba, aby uživatel byl vzdálený nejvýše 2 metry od snímače a napřážená paže svírala mezi tělem a umístěnou kamerou úhel 90° .

Navzdory nízké spolehlivosti efektoru, mají ostatní části velmi vysokou spolehlivost, což je uspokojivý výsledek. Hypotéza je **potvrzena**, protože celková úspěšnost je 71,7 %

Test byl proveden na dvou osobách jiných fyzických rozměrů a vedl ke stejným výsledkům. Na obrázku 5.14 je ilustrován proces vykonávání experimentu.



Obrázek 5.14: Uživatelské testování se zaměřením na spolehlivost pohybu jednotlivých částí robota.

Složitost ovládání

Cílem experimentu je prokázat, že ovládání je intuitivní s rychlým učícím procesem. S nárůstem zkušeností uživatele by se měla zlepšovat i rychlost ovládání. Je provedeno deset pokusů, kdy jsou v různých místech v rozsahu pohybu robotické paže umístěny body v prostoru, kam je třeba pohybem vlastní ruky manipulátor umístit. Křivka učení je vynesena do grafu na obrázku 5.15.



Obrázek 5.15: Křivka učení znázorněná jako časová závislost provedeného úkonu na počtu vykonaných pokusů.

Z grafu na obrázku 5.15 je patrné, že s přibývajícím počtem uživatelem vykonaných operací, klesá časová náročnost na provedení úlohy. Ve čtvrtém a dalších pokusech je již uživatel velmi dobře obeznámen s ovládním a je schopný razantně zvýšit rychlost vykonávání úkonů.

Nad následujícím experimentem se dá vynést závěr, že ovládním je intuitivní a i nevyškolený člověk je schopný se s rozhráním rychle seznámit a správně jej používat.

Vyhodnocení experimentů

Provedené testy prokázaly funkčnost daného zařízení, ale také poukázaly na špatnou spolehlivost, přesnost pohybu některých částí jako například efektor, kdy kamera Azure Kinect DK nedokáže za využití *body-tracking* funkcionality (měření polohy těla) spolehlivě snímat polohu malých kloubů jako je palec a zápěstí. Tato nepřesnost by se dalo řešit lepší optimalizací naprogramovaného kódu. Jelikož je efektor funkční pouze v 60 % případů nebyly provedeny testy na zvedání závaží, které by nebyly relevantní vzhledem k tomu, že by efektor upustil závaží dřív než by měl, i přesto, že by výkon servomotorů byl dostatečný.

Výsledky ostatních testů jsou uspokojivé a experimenty dopadly dle očekávání, kdy většina byla úspěšných. Nad rámec této práce by se dala ověřit funkcionality projektu za různých nepříznivých přírodních podmínek, kdy by se testovala, jak dlouho zařízení vydrží než určitá komponenta selže. Tyto experimenty mnou nebyly vykonány z důvodu potřeby velkého množství testovacích subjektů (robotů) a náhradních částí, které jsou postradatelné.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a vytvořit robota za využití modelářských RC komponentů (např. servomotorů). Cíl byl splněn. Byl vytvořen robotický manipulátor. Ovládání je uskutečněno dálkově pomocí pohybu vlastní (lidské) paže.

Nedílnou součástí řešení bylo prostudování již existujících konstrukcí podobných zařízení popsaných v kapitole 2 a způsobu jejich dálkového či jiného řízení. Pro účely projektu byla popsána důležitá teorie týkající se principu výroby robotů, návržení 3D modelů, technologie servomotoru (RC komponent) a jejich řízení, je popsána v kapitole 3.

Na základě nabytých znalostí byla provedena analýza existujících řešení v kapitole 4, která byla základem pro stanovení koncepce a cílů práce. Samotná realizace práce je popsána v kapitole 5. Proces vytváření řešení je řízen blokovým schématem za využití Top-down přístupu. V první fázi je sestrojena konstrukce robota, zapojen elektrický obvod a implementován program do zařízení Arduino Uno, který slouží pro ovládání jednotlivých servomotorů za pomoci řadiče. Bylo využito 7 servomotorů, které umožňují robotovi pohyb v rozmezí 180° až do výšky 32 cm. Celková hmotnost zařízení dosahuje 1088 g. Další fáze řešení je zasvěcena implementaci ovládání za pomoci pohybu vlastní paže, k tomu je využita hloubková kamera pro snímání pohybu člověka. Program zasílá vizuálních data za využití sériové komunikace mezi počítačem a zařízením Arduino Uno. Součástí řešení je také vytvoření uživatelského rozhraní pro ovládání procesu zahájení, pozastavení a ukončení vykonávání programu. Funkčnost robota je ve finále úspěšně otestováno.

Projekt tohoto měřítka pro mě byl velkou výzvou, která mi pomohla se seberealizovat v daném oboru. Získal jsem mnoho zkušeností v oblasti tvorby robotů, 3D tisku a kamerové detekce těla člověka.

Dalším rozšířením této práce by mohlo být vytvoření výkonnější varianty schopné reálně nahradit člověka na pracovišti. Přidáním většího množství hloubkových kamer či jiných snímačů do scény by byl minimalizován chybový faktor v pohybu robota. Pokud by se měl manipulátor prodávat na trhu, musí být provedeny testy funkčnosti mezních hodnot až do selhání zařízení.

Literatura

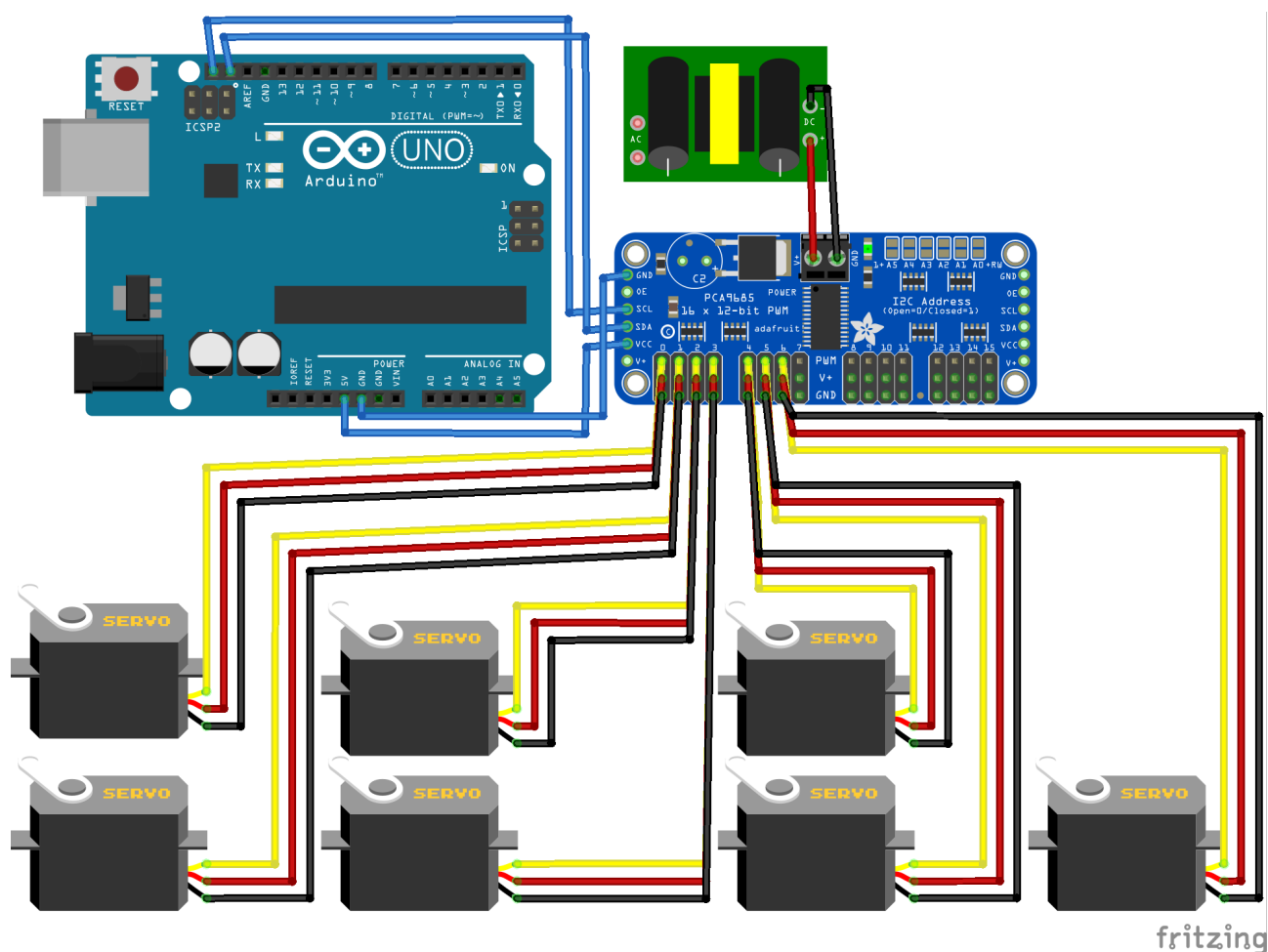
- [1] *Arduino and C++* [online]. Somerville, Massachusetts, Spojené státy americké: Arduino [cit. 2022-26-04]. Dostupné z: <https://playground.arduino.cc/Interfacing/CPPWindows/>.
- [2] *UNIVERSAL ROBOTS UR16e* [online]. Odense, Dánsko: Universal Robots [cit. 2022-24-04]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com>.
- [3] *Serial communication* [online]. Somerville, Massachusetts, Spojené státy americké: Arduino, 2019 [cit. 2022-21-04]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/>.
- [4] *Intel® RealSense™ Product Family D400 Series - Datasheet* [online]. Santa Clara, Kalifornie, Spojené státy americké: Intel Corporation, 2020 [cit. 2022-16-03]. Dostupné z: <https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2020/06/Intel-RealSense-D400-Series-Datasheet-June-2020.pdf>.
- [5] *Azure Kinect DK documentation* [online]. Redmond, Washington, Spojené státy americké: Microsoft Corporation, 2021 [cit. 2022-21-03]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/>.
- [6] *Integrovaný software CAD, CAM, CAE a PCB* [online]. San Rafael, Kalifornie, Spojené státy americké: Autodesk, Inc., 2021 [cit. 2022-23-04]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/fusion-360/overview>.
- [7] *.NET programming with C++/CLI* [online]. Redmond, Washington, Spojené státy americké: Microsoft Corporation, 2021 [cit. 2022-18-04]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/dotnet/dotnet-programming-with-cpp-cli-visual-cpp?view=msvc-170>.
- [8] BADAMASI, Y. A. *The Working Principle Of An Arduino*. Abuja, Nigérie: ICECCO, 2014 [cit. 2022-23-04]. DOI: 10.1109/ICECCO.2014.6997578.
- [9] BIDLO, M. *Principy sériové komunikace, sériová komunikační rozhraní* [online]. Brno, Česká republika: VUT FIT, 2020 [cit. 2022-11-03]. Dostupné z: https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/cfs.php.cs?file=%2Fcourse%2FIMP-IT%2Flectures%2F04-IMP-seriova_kom.pdf.
- [10] DEJAN. *DIY Arduino Robot Arm with Smartphone Control* [online]. 2018 [cit. 2022-17-03]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/diy-arduino-robot-arm-with-smartphone-control/>.

- [11] EARL, B. *Adafruit PCA9685 16-Channel Servo Driver* [online]. New York City, New York, Spojené státy americké: [b.n.], 2012 [cit. 2022-21-03]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/16-channel-pwm-servo-driver/using-the-adafruit-library>.
- [12] EDINA KARABEGOVIC, E. H. *Industrial Robot Application Trend in World's Metal Industry* [online]. Bihac, Bosna and Hercegovina: University of Bihać, 2012 [cit. 2022-23-04]. ISSN 2029-5839. Dostupné z: <https://inzeko.ktu.lt/index.php/EE/article/view/2567>.
- [13] ELLIOTT, R. *Hobby Servos, ESCs And Tachometers* [online]. New South Wales, Austrálie: Elliott Sound Products, 2018 [cit. 2022-23-04]. Dostupné z: <https://sound-au.com/articles/servos.htm>.
- [14] GRABIANOWSKI, E. *How Brain-computer Interfaces Work* [online]. Atlanta, Georgia, Spojené státy americké: HowStuffWorks, 2007 [cit. 2022-19-03]. Dostupné z: <https://computer.howstuffworks.com/brain-computer-interface.htm>.
- [15] HOLEČEK, J. *Jaká je cena průmyslových robotů? Zeptali jsme se, co na ni má vliv* [online]. Praha, Česká republika: FANUC Czech s.r.o., 2015 [cit. 2022-16-03]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/jaka-je-cena-prumyslovych-robotu-zeptali-jsme-se-co-na-ni-ma-vliv/>.
- [16] KOLÍBAL, Z. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno, Česká republika: Akademické nakladatelství, VUTIUM, 2016. ISBN 9788021448285.
- [17] LI, L. *Time-of-Flight Camera – An Introduction* [online]. Dallas, Texas, Spojené státy americké: Texas Instruments, 2014 [cit. 2022-21-03]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>.
- [18] LOCKER, A. *Best 3D Printer Slicer Software of 2021* [online]. Mnichov, Německo: All3DP, leden 2021 [cit. 2022-10-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>.
- [19] NIKU, S. B. *An Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications*. Hoboken, New Jersey, Spojené státy americké: Prentice Hall, 2001. ISBN 9781119527602.
- [20] NOVÁK, P. *Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení*. Brno, Česká republika: Akademické nakladatelství, VUTIUM, 2005. ISBN 9788073001414.
- [21] ORTIZ, L. *The Types of 3D Modeling – Simply Explained* [online]. Mnichov, Německo: All3DP, únor 2020 [cit. 2022-10-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/types-of-3d-modeling/>.
- [22] PHIL MEADOWS, E. T. *Azure Kinect DK hardware specifications* [online]. Redmond, Washington, Spojené státy americké: [b.n.], 2021 [cit. 2022-16-03]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/hardware-specification>.
- [23] SOMBY, M. *Robotics Software Platforms Review* [online]. Durham, North Carolina, Spojené státy americké: Automation.com, 2008 [cit. 2022-15-03]. Dostupné z: <https://www.automation.com/en-us/articles/2008-1/robotics-software-platforms-review>.

- [24] TARIQUE, M. *Mobile Based Robotic Wireless Path Controller* [online]. Las Vegas, Nevada, Spojené státy americké: Macrothink Institute, Inc., 2016 [cit. 2022-23-04]. ISSN 1943-3581. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Applications-of-Robotics-in-the-Industry_fig3_305638494.

Příloha A

Zapojení elektrického obvodu robota



Obrázek A.1: Schéma zapojení elektroniky¹.

¹Schéma vytvořeno v aplikaci Fritzing <https://fritzing.org/>

Příloha B

Výpočet transformace souřadnic pohyby kloubů

Hlavní účel následujících výpočtů je transformace souřadnic pohybu lidských kloubů paže (získaných z hloubkové kamery) na výstupní hodnoty natočení jednotlivých servomotorů.

Označení motorů je dle identifikátorů, které indikují polohu umístění dle obrázku 5.8.

- Hodnota motoru A je získána rozdílem souřadnic z ramenního a pažního kloubu.
- Hodnota motorů B,C je opět výsledkem rozdílu hodnot ramenního a pažního kloubu, nyní však souřadnice y .
- Hodnota motoru D je dána velikostí úhlu mezi 3 body v 3D prostoru(ramenním, pažním kloubem a zápěstím), výpočet je uveden níže v rovnici B.1.
- Hodnota motoru E je dána velikostí úhlu mezi 3 body v 3D prostoru(pažním kloubem, zápěstím a kloubem ruky), výpočet je uveden níže v rovnici B.1.
- Hodnota motoru F je nijak netransformovaná velikost rotace zápěstí přečtená z kamery.
- Hodnota motoru G je vzdálenost palce od ostatních prstů, které jsou zastoupeny jedním bodem, který je snímán kamerou. Výpočet je uveden níže v rovnici B.2.

Konkrétní numerické výpočty dat

Před výpočtem velikosti úhlu mezi 3 body je nutná transformace souřadnice do dvou vektorů, které budou mít stejný bod počátku a budou protilehlé. Souřadnice vektoru $v[v_1, v_2, v_3]$, který je dán orientovanou úsečkou mezi body $A[a_1, a_2, a_3]$, $B[b_1, b_2, b_3]$, kde bod A je počátkem, jsou dány výsledky rovnic:

$$v_1 = b_1 - a_1$$

$$v_2 = b_2 - a_2$$

$$v_3 = b_3 - a_3$$

Jakmile jsou vypočtené souřadnice obou vektorů u, v , odvodí se úhel z následujícího vztahu:

$$\text{úhel} = \cos^{-1} \frac{u \cdot v}{|u| \cdot |v|}, \text{ kde} \quad (\text{B.1})$$

$$u \cdot v = u[u_1, u_2, u_3] \cdot v[v_1, v_2, v_3] = u_1 \cdot v_1 + u_2 \cdot v_2 + u_3 \cdot v_3,$$
$$|u| \cdot |v| = \sqrt{(u_1)^2 + (u_2)^2 + (u_3)^2} \cdot \sqrt{(v_1)^2 + (v_2)^2 + (v_3)^2}$$

Pro výpočet vzdálenosti dvou bodů $A[a_1, a_2, a_3], B[b_1, b_2, b_3]$ v třídímním prostoru je použita následující rovnice pro výpočet Euklidovské vzdálenosti:

$$|AB| = \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2 + (b_3 - a_3)^2} \quad (\text{B.2})$$