



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VYUŽITÍ SÉRIOVÉHO MANIPULÁTORU PRO PŘEMÍSTĚOVÁNÍ OBJEKTŮ NA ZÁKLADĚ ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

OBJECT MANIPULATION BASED ON IMAGE PROCESSING USING A SERIAL MANIPULATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Cahlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Adámek

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Radim Cahlík
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Roman Adámek
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití sériového manipulátoru pro přemísťování objektů na základě zpracování obrazu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce bude realizována na sériovém manipulátoru, který byl vytvořen studenty Mechatronické laboratoře v rámci několika diplomových prací. Tento manipulátor je v současné době nefunkční a jedním z cílů práce bude jeho zprovoznění. Dále bude s využitím manipulátoru realizována úloha přemísťování objektů, jejichž pozice v pracovním prostoru bude určována na základě zpracování obrazu z kamery.

Cíle bakalářské práce:

1. Analyzujte současný stav manipulátoru a proveďte kroky nezbytné k jeho uvedení do provozu.
2. Navrhněte koncový efektor manipulátoru pro uchopování zvolených objektů.
3. Vytvořte algoritmus pro detekci a lokalizaci přemísťovaných objektů v pracovním prostoru na základě zpracování obrazu z kamery v prostřední MATLAB.
4. Ověřte funkčnost algoritmu a koncového efektoru na praktické úloze.

Seznam doporučené literatury:

CORKE, Peter I. Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB. Berlin: Springer, 2011. Springer tracts in advanced robotics, v. 73. ISBN 9783642201448.

GREPL, Robert. Kinematika a dynamika mechatronických systémů. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3530-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zprovoznění robotického manipulátoru, vytvoření softwaru pro zpracování obrazu a poté propojení obou částí vyústěné v praktickou ukázkou.

V první části je popsáno uvedení manipulátoru do chodu, kde šlo především o nastudování původního stavu a poté opravu poškozených dílů. Dále se pak práce věnuje přestavbě koncového efektoru na elektromagnet tak, aby vyhovoval požadované aplikaci.

Další částí je vytvoření metody pro identifikaci tvaru a polohy objektu. Tento software je vytvořen v prostředí MATLAB.

Poslední částí je pak realizace praktické ukázky.

Summary

The goal of this bachelor thesis is to make a robotic manipulator work, to create a software able to do image processing and to make these two parts collaborate together.

In the first part, commissioning of the robot is described, where the key was to determine the original state and repair damaged parts. Then the thesis focuses on rebuilding the end effector to an electromagnet to fit for the required application.

Next part is about creating a method for object identification and determination of its position. This software is made in MATLAB.

Realization of a practical demonstration is carried out in the last part.

Klíčová slova

manipulátor, koncový efektor, invariantní momenty

Keywords

manipulator, end effector, invariant moments

Bibliografická Citace

CAHLÍK, R. *Využití sériového manipulátoru pro přemísťování objektů na základě zpracování obrazu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 39 s., Vedoucí diplomové práce: Ing. Roman Adámek.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Využití sériového manipulátoru pro přemístování objektů na základě zpracování obrazu* vytvořil sám pod vedením Ing. Romana Adámka, s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Radim Cahlík

Brno

.

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Romanu Adámkovi za jeho ochotu pomoci mi pochopit problematiku a poradit v případě problému. Dále bych rád poděkoval vedení Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky za umožnění pracovat v Laboratoři mechatroniky.

Radim Cahlík

Obsah

1 Úvod	9
2 Formulace cílů a rozdělení úkolů na projektu	10
2.1 Rozdělení úkolů	10
2.2 Formulace cílů	10
3 Rešerše	11
3.1 Konstrukce a řízení manipulátoru	11
3.1.1 Předchozí závěrečné práce zabývající se činností s daným manipulátorem	11
3.1.2 Konstrukce manipulátoru	12
3.2 Koncové efekторы	13
3.2.1 Efekторы vhodné pro manipulaci s objektem	13
3.2.2 Elektromagnety	15
3.3 Zpracování obrazu	16
3.3.1 Úprava obrazu z kamery	16
3.3.2 Metoda rozpoznávání tvaru	18
4 Postup a výsledky řešení	21
4.1 Přestavba manipulátoru	21
4.1.1 Původní stav a kroky k uvedení do provozu	21
4.1.2 Stavba robotického systému	23
4.2 Konstrukce koncového efektoru	24
4.2.1 Návrh	24
4.2.2 Konstrukce ramena koncového efektoru	25
4.3 Zpracování obrazu v MATLABu	26
4.3.1 Editace snímku z kamery	26
4.3.2 Programování rozpoznávací metody	28
4.3.3 Porovnávací mechanismus	28
4.3.4 Výstup	29
4.4 Příprava praktické ukázky	30
4.4.1 Propojení souřadných systémů	30
4.4.2 Řízení robota	31
4.4.3 Postup pro ovládání robota	31
5 Závěr	32
Literatura	33

Seznam zkratek	35
Seznam symbolů	36
Seznam obrázků	37
Seznam tabulek	38

1 Úvod

Automatizace a robotizace je nepopíratelně budoucnost průmyslu. Stále častěji se mluví o průmyslu 4.0 a spousta firem se zaměřuje na implementaci inteligentních autonomních strojů do výroby napříč odvětvími. Dnes už běžným automatizovatelným strojem je robotický manipulátor.

Mezi přední výrobce průmyslových manipulátorů patří například firmy Fanuc, Kuka, ABB a další. Zákazník si může vybrat z široké škály robotů dle požadované aplikace.

Dnes se hodně mluví o tzn. kolaborativních robotech, zkráceně kobotech. Jedná se o roboty, kteří jsou vybaveni bezpečnostními prvky a díky tomu mohou sdílet pracovní prostor s člověkem. Tento fakt umožňuje využití v montážních dílnách a zřejmě v budoucnu nahradí řadu činností dříve prováděných montážním dělníkem. U běžných manipulátorů je z bezpečnostního hlediska často vyžadováno, aby byl pracovní prostor robota ohraničen.

K vytvoření této bakalářské práce byl použit manipulátor se 4 stupni volnosti, jenž byl dříve sestaven studenty FSI VUT. Jeho konstrukce byla předmětem předešlých diplomových prací. Tento manipulátor nedosahuje přesnosti moderních robotů. Obsahuje pouze jednoduchou ochrannou elektroniku, která slouží spíše k ochraně proti poškození konstrukce robota, především vodičů, než k ochraně lidí, kteří s ním operují.

U výrobních zařízení většinou nestačí jen samotný manipulátor. Jde o komplexní systém obsahující senzory, měřidla, přídavné efektory, atd. Příklad moderní výrobní linky lze vidět na obrázku 1.1.

V našem případě bude robot součástí systému s počítačem a kamerou. Tato kamera bude snímat prostředí a detekovat objekty, v tomto případě plechové díly, a jejich polohu.

Tento systém by se dal například využít v průmyslu pro třídění nebo přemísťování různých tvarů plechu stejné výšky.



Obrázek 1.1: Ilustrace robotizace [1]

2 Formulace cílů a rozdělení úkolů na projektu

V této kapitole dojde k hrubému popisu rozdělení práce na projektu. Dále pak budou formulovány cíle, které budou v této bakalářské práci řešeny.

2.1 Rozdělení úkolů

Činnost na tomto projektu je rozdělena na dvě bakalářské práce, z nichž jedna je tato a druhou zpracovával Lukáš Letrik. Jeho bakalářská práce nese název *Realizace rozhraní pro simulaci a řízení pohybu sériového manipulátoru*.

Práce Lukáše Letrika se zabývá softwarovým zprovozněním manipulátoru, řešením inverzní dynamiky a vytvořením knihovny příkazů pro řízení robota v prostředí MATLAB.

Díky tomu, že projekt jako takový je kolaborativní, závisí jeho úspěch na nás obou. Znamená to, že pro správné fungování je nutné, aby byly splněny určité cíle z bakalářské práce Lukáše Letrika.

2.2 Formulace cílů

Projekt navazuje na výsledky několika předchozích diplomových prací a jedním z jeho cílů je obnovení funkce schopnosti manipulátoru a to z hlediska hardwarového i softwarového.

Dále pak využití robota pro zvolenou aplikaci, což je v tomto případě sběr ocelových plechů určitého tvaru. Jedním z cílů je tedy vytvořit koncový efektor vhodný pro uchopování těchto objektů.

Dalším cílem je vytvoření softwaru pro určení tvaru a polohy objektu snímaného kamerou. Je tedy třeba zvolit nějakou metodu pro zpracování obrazu a té pak využít při vytváření softwaru v prostředí MATLAB. Jedním z nutných kroků je i následné propojení souřadných systému kamery a robota.

Posledním cílem je demonstrovat funkci jak rozpoznávacího softwaru, tak i robota a efektoru na praktické úloze. Poloha objektu, tedy plechového dílu, by měla být určena pomocí kamery a softwaru pro zpracování obrazu. Poté by měl manipulátor na získanou polohu najet po určené trajektorii, uchopit plech a umístit jej na jiné místo.

Po dokončení by robot mohl sloužit třeba jako ukázkový projekt v mechatronické laboratoři nebo by mohl být objektem dalšího rozšiřování, například v rámci závěrečných prací.

3 Rešerše

3.1 Konstrukce a řízení manipulátoru

Díky tomu, že robotický manipulátor, se kterým se v této bakalářské práci pracuje, byl již předmětem několika předešlých závěrečných prací, je jeho nynější stav výsledkem činnosti několika bývalých studentů. V této podkapitole dojde k výčtu oněch prací spolu s jejich stručnými charakteristikami.

Cílem je nastudování stavu, v němž by se měl po daných pracích manipulátor nacházet.

3.1.1 Předchozí závěrečné práce zabývající se činností s daným manipulátorem

Ing. David Klimeš – DP 2013 [2]

Diplomová práce se zabývá návrhem a použitím manipulátoru se třemi stupni volnosti. Obsahuje návrh elektroniky pro bezpečný a spolehlivý provoz manipulátoru. Dále se pak věnuje několika praktickým ukázkám. Hlavním cílem bylo vytvoření vhodné edukační platformy.

Ing. Michal Šuranský – DP 2013 [3]

V této diplomové práci se řeší identifikace, modelování a řízení manipulátoru se třemi stupni volnosti. Je v ní vytvořen model stejnosměrných motorů, které byly použity pro výrobu manipulátoru, a řešení inverzní dynamiky celého manipulátoru. V práci je popsáno řízení dopřednou kompenzací.

Ing. Daniel Youssef – DP 2014 [4]

Diplomová práce popisuje další vývoj manipulátoru. Cílem bylo vylepšit manipulátor tak, aby byl schopen hrát hru piškvorky. Byla vylepšena inicializace a polohová regulace. Dále pak byl přidán další stupeň volnosti a vhodný koncový efektor. Poté byl vytvořen algoritmus pro hru piškvorky.

Ing. Tomáš Nejedlík – DP 2015 [5]

Tato diplomová práce se zabývá rozšířením funkcionality robotického manipulátoru. Jsou přidány Hallovy senzory a je vytvořen nový koncový efektor, jímž je uchopovač. Hlavním cílem byla implementace řídicích algoritmů do mikrokontroleru dsPIC. Došlo také k přidání dotykového displeje, který sloužil pro ovládání manipulátoru.

3.1.2 Konstrukce manipulátoru

Z diplomové práce Ing. Davida Klimeše [2] lze zjistit, že původní verze manipulátoru vznikla v roce 2012 jako projekt s názvem *Platforma pro výuku modelování, identifikace a řízení dynamických soustav*. Na projektu pracoval tým složený z Ing. Vejlupka Josefa, Ph.D., doc. Ing. Krejso Jiřího, Ph.D., Ing. Ripela Tomáše, Ph.D., Ing. Šuranského Michala [3] a Ing. Klimeše Davida [2].

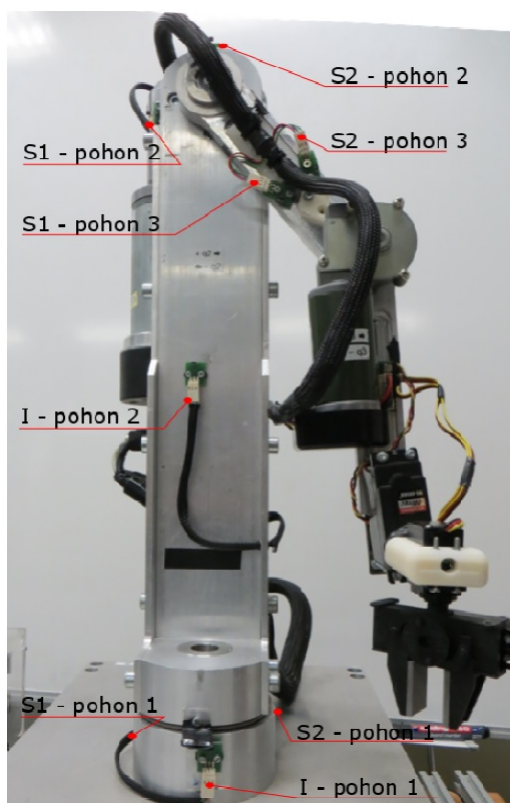
Výsledkem byl manipulátor se třemi stupni volnosti. Pohony zastávaly tři stejnosměrné motory s enkodéry a se šnekovou převodovkou. Motory byly napájeny z jednoho 15 V zdroje stejnosměrného napětí a z jednoho 24 V. Řídící elektronika byla napájena 5 V zdrojem. Pro snadnější zapojování jednotlivých konektorů byla vytvořena konektorová deska. Na tuto desku byla připojena karta MF624, která byla umístěna v PC a generovala požadované signály. Jednotlivé motory byly ovládány pomocí H-můstků, které byly navrženy v diplomové práci Ing. Vejlupka Josefa, Ph.D. [6]. Dále byla implementována ochranná elektronika, která měla zamezit překročení mezních hodnot natočení jednotlivých ramen. Tvořil ji systém vaček a mikrospínačů. Součástí ochranné elektroniky byly i DPS připojené ke konektorové desce a k H-můstkům.

Z hlediska hardwaru došlo v diplomové práci Ing. Daniela Youssefa [4] k přidání jednoho stupně volnosti v podobě servomotoru. Dále byl vytvořen nový koncový efektor, který měl být schopen držet pevně fix a zároveň jej tlačit dopředu. Efektor byl tvaru dutého válce, byla v něm pružina a nahoře byl přilepen magnet. Pružina tlačila ven, aby vznikala tlak na papír, zatímco magnet držel fix s nalepeným kouskem kovu ve válci.

K výraznějším změnám došlo v diplomové práci Ing. Tomáše Nejedlíka [5], a to k odstranění mikrospínačů a jejich nahrazení Hallovými snímači. Manipulátor byl tedy osazen DPS s Hallovými snímači na kritických místech. Poté byl vytvořen nový úchopový koncový efektor, který obsahoval další dva servomotory. Jeden pro další stupeň volnosti a druhý pro uzavírání uchopovače. Byl také přidán dotykový displej. Zásadní změnou byla implementace řízení do platformy dsPIC. Byla vytvořena DPS obsahující dva mikrokontrolery a několik potřebných konektorů. Hlavní mikrokontroler dsPIC33EP512MU810 ovládal ochrannou elektroniku a řízení dvou motorů. Byl v něm také nahrán software pro dotykový displej. Díky tomu, že při regulaci všech pohonů pouze pomocí hlavního mikrokontroleru docházelo při vyšších rychlostech k přetečení paměti funkce input capture a mikrokontroler nestíhal počítat velký počet tiků z enkodérů, byl přidán další pomocný mikrokontroler dsPIC33FJ128MC804, který nahrazuje práci hlavního mikrokontroleru pro jeden pohon.

Deska s konektory vytvořená v práci Ing. Tomáše Nejedlíka [5] je napájena z 5 V zdroje a je napojena na původní konektorovou desku z práce Ing. Davida Klimeše [2]. Mikrokontrolery zastávají funkci karty MF624 a PC, čímž vzniká stav, že k fungování není třeba připojení k PC. I přes tento fakt je součástí konektor USB sloužící ke komunikaci mikrokontroleru s PC.

Podobu manipulátoru po práci Ing. Tomáše Nejedlíka [5] lze vidět na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Výstupní stav po diplomové práci Ing. Tomáše Nejedlíka [5]

3.2 Koncové efekty

V této podkapitole dojde ke studiu koncových efektorů vhodných pro manipulaci s objektem. Je zřejmé, že se konstrukce významně mění v závislosti na typu objektu. Bude proto ukázáno několik koncepčních řešení vyráběných velkými společnostmi zaměřujícími se na výrobu koncových efektorů.

3.2.1 Efektory vhodné pro manipulaci s objektem

Po procházení webů známých výrobců efektorů, jako jsou například Zimmer group [7], Destaco [8], ABB [9] a další [10], bylo vidět, že nejčastější formou efektoru pro manipulaci s předměty je vakuová přísavka a určitý druh robotického chapadla. Tato řešení se pak dále specializují pro konkrétní aplikace a výrobci jich nabízejí širokou škálu. Další běžně používaný koncept využívá magnetických sil pro držení předmětu.

Robotické chapadlo se v průmyslu používá pro universální přemísťování pevných předmětů v pracovním prostoru robota. Není ovšem příliš vhodné pro manipulaci s plochými tělesy a s křehkými tělesy, a to i přesto, že dnes jsou již běžné grippery schopné měřit sílu stisku.

Tyto moderní efekty (obrázek 3.3) mají spoustu bezpečnostních prvků, které rozpoznávají, kdy by sevření mohlo být příliš silné. Příkladem takového moderního efektoru je řada HRC od firmy Zimmer group [11], která je vidět na obrázku 3.2. Jde o chapadlo, které se používá na kolaborativních robotech, což jsou roboti, kteří jsou konstruováni pro přímou interakci s člověkem ve sdíleném prostoru.



Obrázek 3.2: Chapadlo řady HRC [11]



Obrázek 3.3: Robotická ruka firmy Robotiq [12]

Pro ploché objekty se běžně používá systém přísavky, který lze vidět na obrázku 3.5. S tímto řešením se lze běžně v průmyslu setkat u manipulace s plechy, se sklem a s lehkými díly, viz. obrázek 3.4. Díky tomu, že se přísavka musí přisát na relativně rovný povrch, je zjevnou nevýhodou špatná funkce u tvarově složitých předmětů.



Obrázek 3.4: Přísavka na robotovi Fanuc [13]



Obrázek 3.5: Přísavka firmy Robotiq [14]

Pro manipulaci s objekty z feromagnetických kovů se někdy využívá efektor s elektromagnetem, který lze vidět na obrázku 3.6 a 3.7. Inženýrka Catherine Bernier popsala ve svém článku [15] výhody a nevýhody takových efektorů. Dalo by se říct, že hlavní výhodou je minimální potřeba údržby a možnost uchopit předměty různých tvarů a to včetně těch, které obsahují díry. Tato schopnost je hlavní výhodou oproti přísavkám. Naopak nevýhodou je možnost manipulace pouze s feromagnetickými kovy a náchylnost na příčné zrychlení, při němž může objekt sklouznout.



Obrázek 3.6: Magnetický efektor Zimmer[16]



Obrázek 3.7: Efektor ve formě elektromagnetu[15]

3.2.2 Elektromagnety

V této podkapitole dojde k bližšímu prozkoumání druhů elektromagnetů, které by mohly být využity v koncových efektech. V již zmiňovaném článku inženýrky Catherine Bernier [15] je standardní rozdělení na elektromagnety bez permanentního magnetického jádra a elektromagnety s permanentním magnetickým jádrem.

Elektromagnety s permanentním magnetickým jádrem mají výhodu, že pro jejich funkci není třeba dodávat proud z elektrického zdroje. Tento fakt zapříčiňuje jednak menší spotřebu elektrické energie a menší zahřívání, ale poskytuje i jakýsi bezpečnostní prvek v případě, že by došlo k přerušení dodávky proudu. V takovém případě by nedošlo k uvolnění drženého objektu. Na webu distributora takových magnetů, firmy Schmachtl [17], můžeme zjistit princip funkce, citují: *Magnetický obvod je otevřený ve vypnutém stavu bez proudu a umožňuje bezpečné držení magnetických předmětů. Pokud je přivedeno stejnosměrné napětí do budicí cívky, permanentní magnetického pole je neutralizováno a magnetický předmět odpadne.*

Naopak elektromagnety nemající permanentní magnetické jádro musí být napájeny elektrickou energií po celou dobu, kdy chceme předmět držet. Magnetické pole vzniká v budicí cívce, jíž protéká proud. Dle webu Schmachtl [17] lze soudit, že tyto druhy elektromagnetů mají výhodu ve větší přídržné síle. Firma Schmachtl [17] nabízí model až se silou 30000 N, oproti maximální síle 3500 N u elektromagnetů s permanentním magnetickým jádrem.

3.3 Zpracování obrazu

Tato podkapitola se bude věnovat metodám zpracování obrazu z kamery. Cílem těchto metod je identifikace tvaru objektů.

3.3.1 Úprava obrazu z kamery

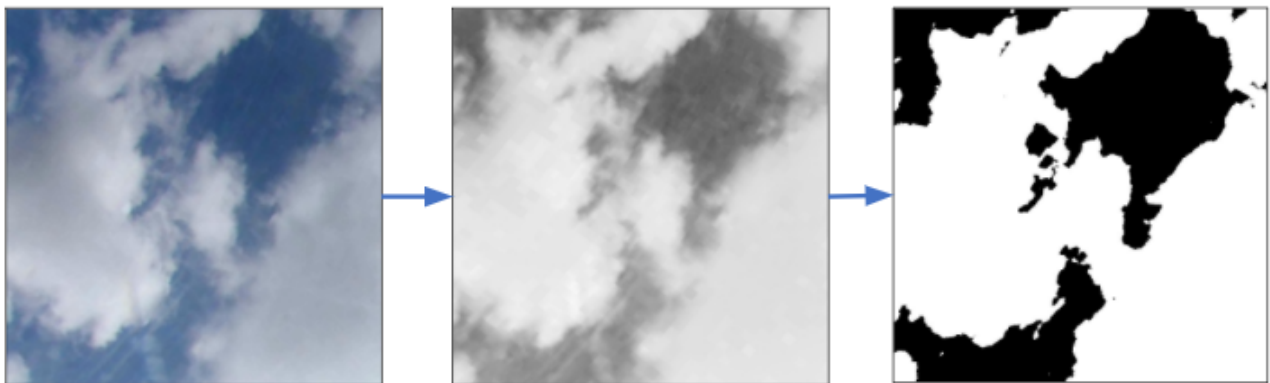
Obraz, tedy nějaká forma záznamu z kamery, který dostaneme, je ovlivněn optickými parametry tohoto zařízení, například rybím okem. V případě, že záleží na přesné identifikaci objektů na snímku, musíme tento obraz softwarově upravit.

Další často používanou úpravou snímku je nějaká forma segmentace obrazu. Jde především o to, abychom eliminovali rušivé a nechtěné tvary a naopak aby nám tvary, které chceme, více vystoupily. Funguje to na principu rozdělování obrazu na oblasti, uvnitř kterých mají pixely navzájem blízké vlastnosti.

Nejjednodušší formou segmentace je prahování. Funguje na principu rozdělení pixelů na dvě skupiny podle hranice jasu, tedy prahu. Hledá se buď globální hranice, což je práh, který platí pro celý snímek, nebo se využívá adaptivního prahování, při němž se hledá práh pro každou určenou oblast snímku zvlášť.

Další metody segmentace jsou různé regionální metody, detekce hran, atd.

Na obrázku 3.8 lze vidět rozdíl mezi originálním obrázkem (vlevo) a obrázkem po úpravě prahováním s fixním prahem (vpravo). Mezikrokem procesu prahování je převod barevného snímku na obrázek ve stupních šedi (uprostřed).



Obrázek 3.8: Ukázka prahování [18]

Rybí oko a jiné optické vady lze eliminovat pomocí kalibračního softwaru. Software MATLAB má pro takovou potřebu toolbox, jehož výstupem je matice kamery sloužící pro úpravu snímku. Postup kalibrace je dobře vysvětlen na stránce MathWorks [19].

Pro určení matice kamery stanovujeme venkovní souřadnice, souřadnice kamery a souřadnice pixelů. Externí parametry slouží k přepočtu mezi souřadnicemi venkovními a kamery a jsou definovány následující maticí $\begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix}$, kde R je rotace a t je translace .

Interní parametry slouží pro přepočítání mezi souřadnicemi pixelů a kamery a jsou vyjádřeny maticí 3.1:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ s & f_y & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

, kde $[c_x, c_y]$ je optický střed obrazu, (f_x, f_y) je ohnisková vzdálenost a s je koeficient zkosení, který je při kolmých osách snímku nulový.

Matice kamery se dále získá součinem těchto dvou matic, tedy vztahem 3.2:

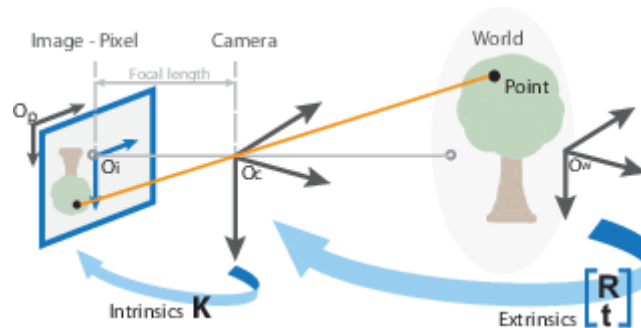
$$P = \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} K \quad (3.2)$$

Toolbox pro kalibraci kamery, který je součástí MATLABu, tuto matici kamery P stanoví automaticky na základě několika fotek šachovnice o známé velikosti čtverců. Poté pro přepočítání mezi souřadnicemi objektu a pozicí pixelů slouží vztah 3.3:

$$w[x \ y \ 1] = [X \ Y \ Z \ 1]P \quad (3.3)$$

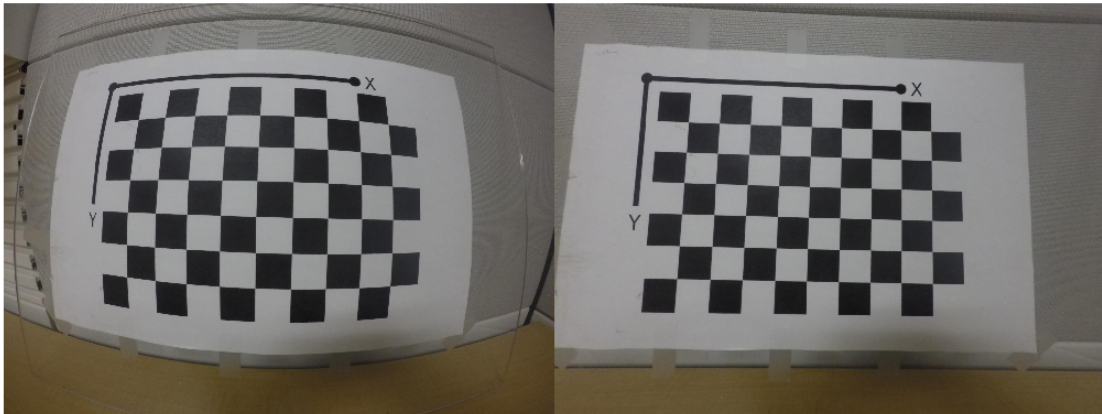
, kde w je faktor měřítka, $[x \ y \ 1]$ je pozice pixelu, $[X \ Y \ Z \ 1]$ je pozice objektu a P je matice kamery.

Celý princip je ilustrován na následujícím obrázku 3.9:



Obrázek 3.9: Ilustrace principu kalibrace [19]

Na obrázku 3.10 lze vidět rozdíl mezi upraveným snímkem (vpravo) a neupraveným (vlevo).



Obrázek 3.10: Rozdíl mezi upraveným a neupraveným snímkem z kamery [20]

3.3.2 Metoda rozpoznávání tvaru

Další částí je metoda pro rozpoznávání tvaru. Bude se zde hovořit o metodě, která využívá výpočtu obrazových momentů invariantních vůči rotaci, translaci, zvětšení a zrcadlení. To znamená, že dané momenty jsou charakteristické pro určitý tvar. Tento fakt přináší velkou výhodu, protože v praxi je často náročné zachytit objekt na snímku dvakrát se stejným měřítkem, a to díky perspektivě. Tyto momenty byly definovány v roce 1962 Ming-Kuei Huem [21].

Pro identifikaci se využívá sedm těchto momentů. Nyní budou uvedeny základní rovnice sloužící k výpočtu těchto momentů a jejich popis.

Máme snímek z pixelů $I(x, y)$. V první řadě je třeba určit momenty určující tvar. Ty se vypočtou dle následující rovnice 3.4:

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y) \quad (3.4)$$

Jde tedy o sumu součinu souřadnice a hodnoty pixelu. Pro binární obraz je to obsah. U grayscale $I(x, y)$ vytváří jakousi hustotu.

Tyto momenty ovšem nejsou invariantní, a proto dochází k transformaci do centrálních momentů, které jsou invariantní vůči translaci, pomocí rovnice 3.5:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q I(x, y) \quad (3.5)$$

Souřadnice těžiště \bar{x} , \bar{y} se vypočtou dle následujících rovnic 3.6:

$$\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}} \quad \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (3.6)$$

Díky tomu, že chceme mít momenty invariantní i vůči zvětšení, musí dojít k dalšímu přepočtu (rovnice 3.7), a to na normalizované centrální momenty:

$$\eta_{rt} = \frac{\mu_{r,t}}{\mu_{00}^{(r+t)/2+1}} \quad (3.7)$$

Dále se pak sedm požadovaných momentů vypočte přes sedm rovnic (rovnice 3.8–3.14) určených Huem [21]:

$$h_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \quad (3.8)$$

$$h_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \quad (3.9)$$

$$h_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad (3.10)$$

$$h_4 = (\eta_{30} + \eta_{12}) + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \quad (3.11)$$

$$h_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} + \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (3.12)$$







$$h_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \quad (3.13)$$

$$h_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} - \eta_{03})^2] - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (3.14)$$

Vektor těchto Huových momentů definuje tvar objektu. Vzájemně se tato čísla ovšem řádově výrazně liší, a proto se využívá přepočít pomocí rovnice 3.15 [22].

$$H_i = -\text{sing}(h_i) \log |h_i| \quad (3.15)$$

Z článku Satya Mallicka [22] byl převzat následující obrázek 3.10 s tabulkou ukazující hodnoty Huových momentů pro dané obrazce. Je vidět, že pro tvar písmene S se absolutní hodnoty téměř neliší, nezávisle na velikosti, orientaci anebo zrcadlení.

id	Image	H[0]	H[1]	H[2]	H[3]	H[4]	H[5]	H[6]
K0		2.78871	6.50638	9.44249	9.84018	-19.593	-13.1205	19.6797
S0		2.67431	5.77446	9.90311	11.0016	-21.4722	-14.1102	22.0012
S1		2.67431	5.77446	9.90311	11.0016	-21.4722	-14.1102	22.0012
S2		2.65884	5.7358	9.66822	10.7427	-20.9914	-13.8694	21.3202
S3		2.66083	5.745	9.80616	10.8859	-21.2468	-13.9653	21.8214
S4		2.66083	5.745	9.80616	10.8859	-21.2468	-13.9653	-21.8214

Obrázek 3.11: Huovy momenty po přepočtu pro dané obrazce [22]

Pro identifikaci tvaru je tedy postup již docela intuitivní. Stačí zjistit tyto momenty pro daný tvar a pak je porovnávat s nově získanými. V případě relativní shody se dá konstatovat, že objekt je identifikovaný.

4 Postup a výsledky řešení

V této kapitole dojde k popisu práce na projektu. Dále budou uvedeny kroky, které byly pro splnění cílů provedeny. Nebude zde popsáno vše, co bylo na manipulátoru provedeno v rámci projektu, neboť některé části popisuje ve své práci Lukáš Letrik.

Byl zvolen koncept, kde koncový efektor bude tvořit elektromagnet, který bude sloužit pro manipulaci s plechem. Dané plechové díly budou umístěny vhodně v pracovním prostoru a budou snímány kamerou. Pomocí snímku z kamery a softwaru pro zpracování obrazu dojde k určení tvaru a polohy plechových objektů, se kterými se bude manipulovat.

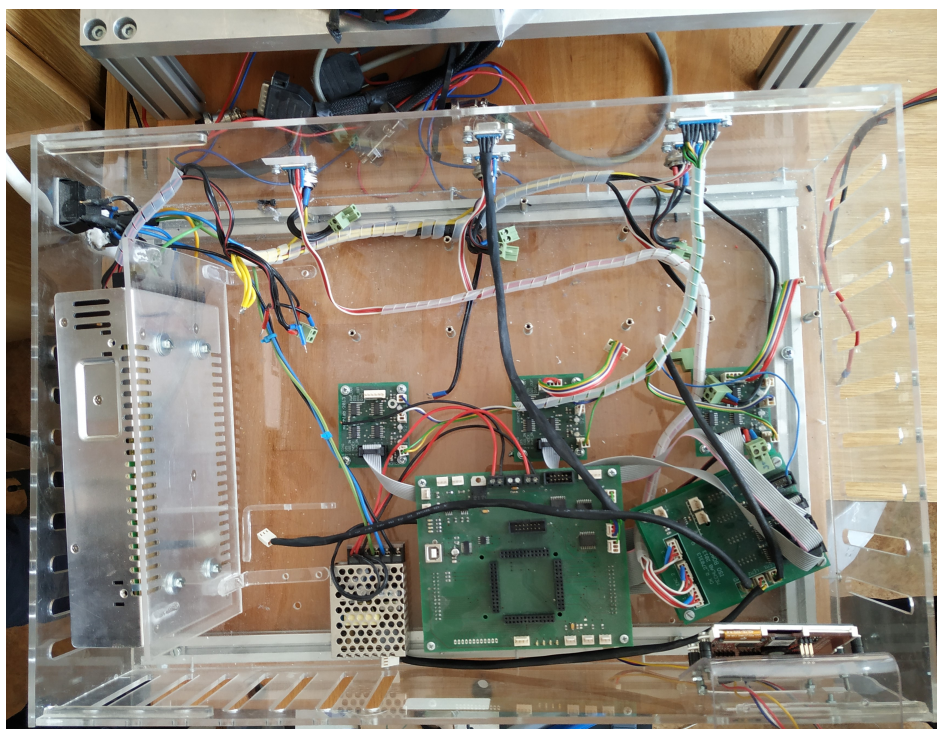
Lukáš Letrik bohužel nedokončil svoji práci v řádném termínu a nestihl dokončit některé části na projektu, které mu byly přiřazeny. Díky tomu, že tato práce je na těchto částech závislá, došlo k jejich nahrazení jednodušší alternativou, než bylo původně plánováno.

4.1 Přestavba manipulátoru

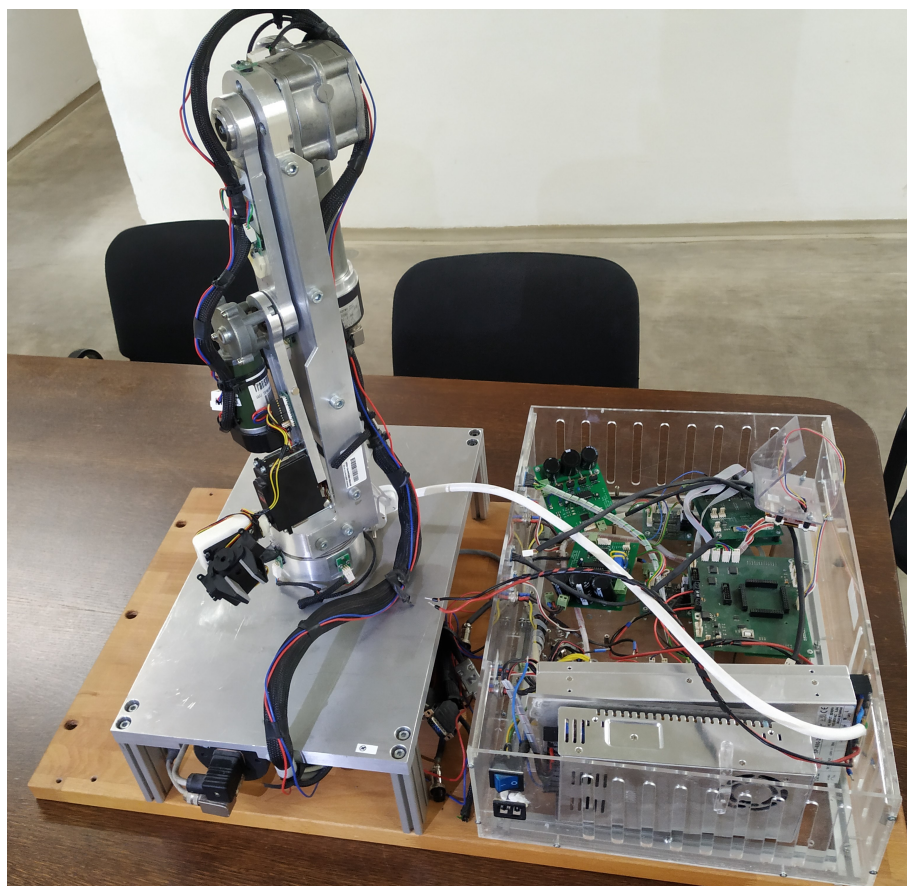
V této podkapitole bude zhodnocen stav, ve kterém byl manipulátor při převzetí a budou uvedeny kroky, které byly provedeny při uvedení do provozu. Dále bude popsána stavba robotického systému vhodného pro umístění kamery a plechových dílů.

4.1.1 Původní stav a kroky k uvedení do provozu

Manipulátor při převzetí nebyl zapojen, byl dosti zaprášěn a na první pohled bylo zřejmé, že dlouhou dobu nebyl činný, viz. obrázek 4.2. Při detailnějším prozkoumání šlo vidět, že některé elektronické součásti chybí (obrázek 4.1) a některé kabely jsou potrhaneé.



Obrázek 4.1: Stav elektroniky při převzetí



Obrázek 4.2: Stav manipulátoru při převzetí

V první řadě bylo třeba opravit zapojení a diagnostikovat, které součásti elektronika robota postrádá.

V rámci oprav došlo k přepojení napájení 24 V zdroje, výměny řady koncovek a doplnění několika kabelů. Časově náročná byla především oprava konektoru z enkodéru na pohonu 3, kde původní konektor zcela chyběl a i s použitím datasheetu enkodéru [23] bylo náročné zjistit funkci jednotlivých vodičů.

Co se týče chybějící elektroniky, bylo zjištěno, že chybí DPS s primárním mikrokontrolerem dsPIC33EP512MU810. Dále pak chyběly všechny H-můstky.

Později bylo tedy sehnáno pět H-můstků z mechatronické laboratoře, u nichž nebyl znám jejich stav. Následovalo tedy jejich testování, které probíhalo pomocí softwaru Simulink, karty MF624 a osciloskopu. U několika H-můstků byl vyměněn podezřelý tranzistor. Nakonec bylo dosaženo tří zdánlivě funkčních H-můstků, avšak po připojení k robotovi vykazovaly nestejnou voltampérovou charakteristiku v různých směrech a chovaly se nespolehlivě. Bylo uznáno za vhodné použití dvou nových H-můstků z mechatronické dílny, u nichž byly připájeny nové konektory, a jednoho H-můstku Pololu G2 High-Power Motor Driver 24v13. Tyto tři H-můstky fungují bezproblémově a spolehlivě.

DPS s primárním mikrokontrolerem byla využita na jiném projektu a byla navracena.

Každý motor byl zvlášť testován za sníženého napájecího napětí pomocí signálů generovaných z karty MF624 a ze softwaru Simulink. Generované signály vstupovaly do H-můstků. Šlo především o signál PWM, pomocí něhož se řídí velikost výstupního napětí, poté logické 1 nebo 0 vstupující do vstupu DIR a ENA, kde DIR slouží pro změnu směru proudu jdoucího z H-můstku do motoru a ENA slouží k přerušení toku proudu do elektromotoru. U žádného z motorů ani u servomotoru nebyla zjištěna žádná vada.

Manipulátor jako takový nepotřeboval prakticky žádnou opravu. Veškeré opravné činnosti

byly prováděny na řídicí a výkonové elektronice.

4.1.2 Stavba robotického systému

Pro zvolenou aplikaci, tedy přemísťování plechových dílů, bylo nutné upravit prostředí pracovního prostoru. Bylo třeba vyrobit nějakou konstrukci, na niž by se dala umístit kamera tak, aby směřovala ideálním směrem. Dále bylo nutné vytvořit plochu, již bude kamera snímat a na níž budou plechové díly ležet. Tato plocha musela být umístěna ideálně v pracovním prostoru, protože manipulátor má docela malý dosah. Byla tedy snaha posadit tuto plochu do výšky, v níž má manipulátor největší pracovní rozsah.

Byl tedy vytvořen stolek (obrázek 4.3), jenž je přichycen k plexisklu, které zároveň tvoří horní stěnu bedny s elektronikou. Ke stolku je připojeno rameno z kovového profilu, na němž je upevněna kamera. Materiál pro výrobu pochází z mechatronické laboratoře a jedná se o zbytky. Výsledný produkt není tedy nikterak vzhledný ani přesný, avšak účel splňuje. Celý manipulátor včetně elektroniky i stolku byl umístěn na pojízdný vozík, na kterém je manipulátor zafixován.

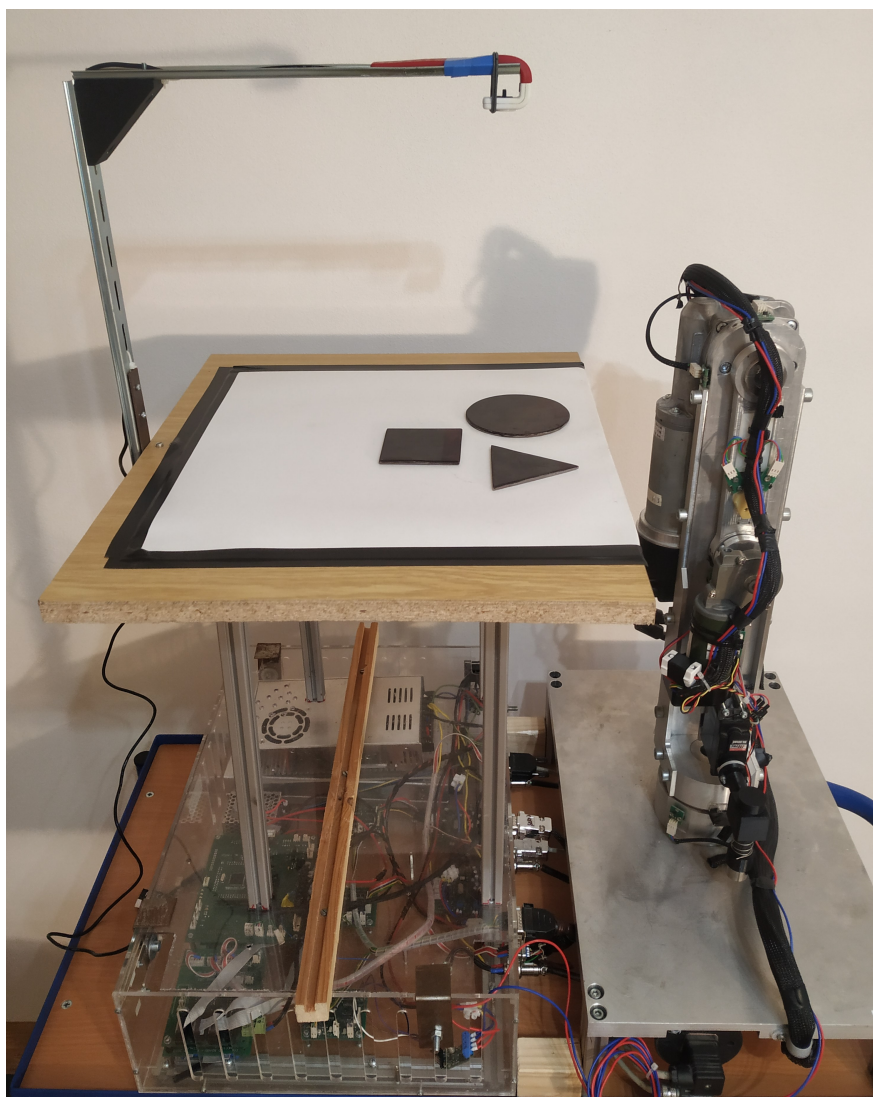
Plocha stolku byla kvůli optickým vlastnostem potažena papírem a leží zhruba 440 mm nad základovou deskou manipulátoru, která je dále považována za plochu s nulovou výškou. Plochy jsou navzájem prakticky rovnoběžné.

Kamera je umístěna na rameni tak, aby její čočka byla ve výšce zhruba 275 mm nad plochou stolku. Rameno je zpevněno plastovou výztuhou, která byla vytištěna na 3D tiskárně.

Plexisklo, na němž stolek stojí, se opírá o dřevěnou lať a je přidržováno k bedně s elektronikou pomocí ocelových pacek. V místě nad zdroji byly vyvrtány díry pro lepší proudění vzduchu.

Bedna s elektronikou, na níž je stolek instalován, je vůči robotovi vymezena pomocí dvou dřevěných kvádrů o stejné délce. V druhé ose se bedna na pojízdném vozíku pohybuje minimálně.

Plechové díly určené pro manipulaci jsou celkem tři a byly vyrobeny z ocelového feromagnetického plechu o tloušťce 4 mm. Zvolené tvary jsou kruh, čtverec a trojúhelník. Díly byly kvůli optickým vlastnostem natřeny matně černou barvou.



Obrázek 4.3: Robotický systém

4.2 Konstrukce koncového efektoru

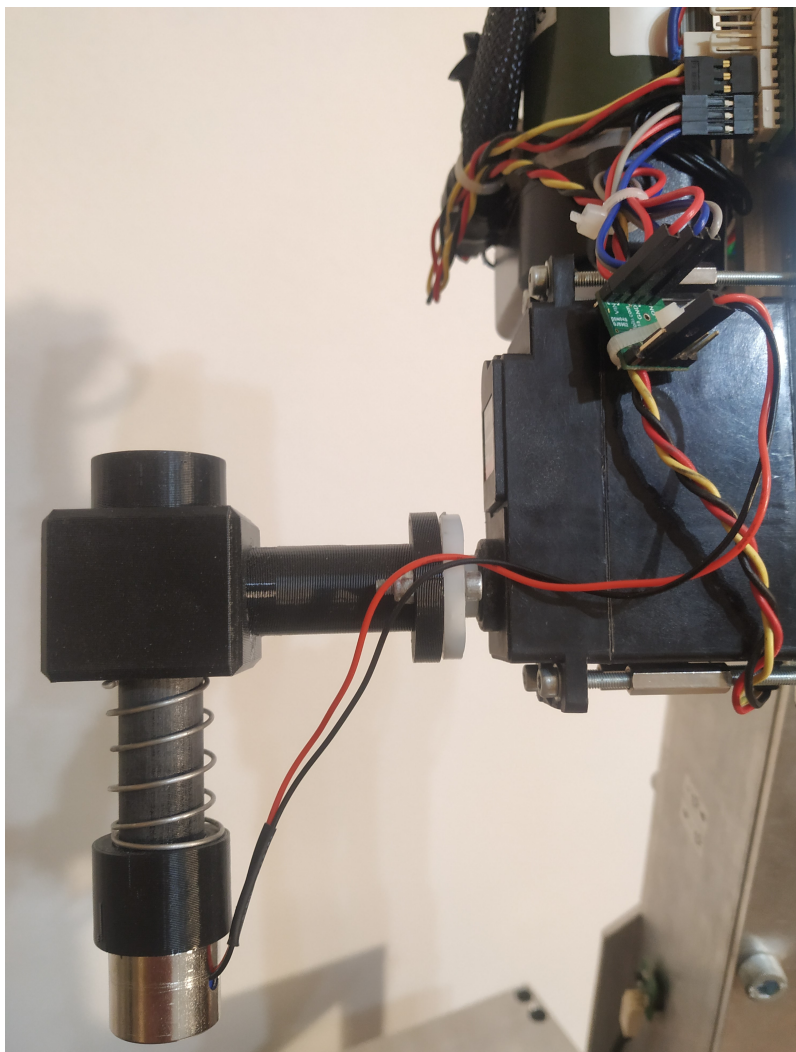
V této podkapitole bude popsána konstrukce koncového efektoru vytvořeného pro manipulaci s plechovými díly.

4.2.1 Návrh

Na začátku bylo třeba zvolit koncept. Jelikož se jedná o ploché, téměř rovinné útvary, přicházela v úvahu buď přísavka, nebo elektromagnet. Nakonec byl zvolen koncový efektor s elektromagnetem především proto, že je konstrukčně i finančně výhodnější a splní požadovanou aplikaci.

Prvním krokem byl nákup elektromagnetu. Na výběr byl buď elektromagnet s permanentním magnetickým jádrem nebo bez permanentního magnetického jádra. Jelikož ale magnety bez permanentního jádra většinou potřebují napájecí napětí alespoň 24 V a bylo výhodné použít napájení z 5 V zdroje, který napájel servomotory a kabely již byly přivedeny do blízkosti koncového efektoru, byl vybrán elektromagnet s permanentním magnetickým jádrem. Konkrétně jde o elektromagnet SELOS ZHI-2016 s doporučeným napájecím napětím 6 V a přídržnou silou 10 N. I když je doporučené napájecí napětí vyšší, než napětí zdroje, znamená to pouze to, že magnetické pole se zcela nevyruší, ale pouze oslabí natolik, že plechový díl bezpečně odpadne. Při pozdějším testování bylo zjištěno, že přídržná síla při vypnutí elektromagnetu je prakticky nulová.

Ke spínání elektromagnetu byl objednáán kompletní modul s MOSFETem od firmy Pololu, který slouží jako switch. Vstupuje do něj napájení z 5 V zdroje a řídicí kabel z primárního mikrokontroleru, který posílá buď digitální 1, tedy 5 V, nebo 0, viz. obrázek 4.4. Z modulu vystupují napájecí kabely do elektromagnetu. Při sepnutém stavu, tedy když obvodem prochází proud, je magnetické pole vyrušeno. To znamená, že switch je sepnut v případě, kdy chceme plechový díl upustit.



Obrázek 4.4: Zapojení efektoru

4.2.2 Konstrukce ramena koncového efektoru

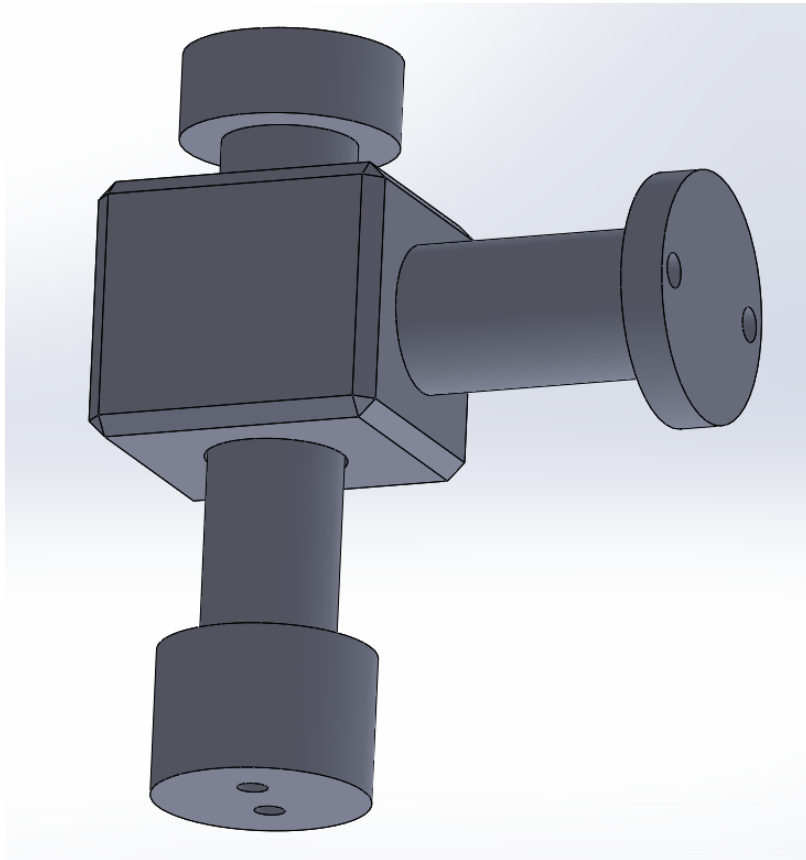
Další částí byla konstrukce ramene koncového efektoru, na něž je elektromagnet přichycen.

Toto rameno má několik významů, které byly při konstrukci brány v potaz. Slouží pro upevnění elektromagnetu a pro tlumení dosednutí elektromagnetu na plechový díl, což zajišťuje pístek s pružinou. Dále vytváří určitý offset od osy manipulátoru.

Rameno je upevněno k jednomu servomotoru, který byl zachován. Ostatní dva servomotory včetně chapadla byly odstraněny.

Díly byly vymodelovány v softwaru Solidworks, viz. obrázek 4.5, a poté vytištěny na 3D tiskárně. Celkem byly vytisknuty dvě varianty, z nichž první neobsahovala některé později předtištěné díry a měla větší offset. Tato varianta nevyhovovala ze dvou důvodů. Jednak vrtané díry byly značně nepřesné a nevhledné a jednak díky velké délce ramena, tedy offsetu, vznikala v místě napojení na servomotor velký ohybový moment.

Druhá verze má zkrácenou délku a veškeré díry jsou předtištěny. Celkem obsahuje dva lepené spoje a skládá se ze čtyř dílů, nepočítaje pružinu a elektromagnet. Není rozebiratelná, avšak od servomotoru se dá lehce odmontovat pomocí dvou šroubů s maticemi.



Obrázek 4.5: Model efektoru v softwaru Solidworks

4.3 Zpracování obrazu v MATLABu

V této podkapitole bude popsáno vytvoření metody pro rozpoznávání tvaru a určení polohy objektů na snímku z kamery.

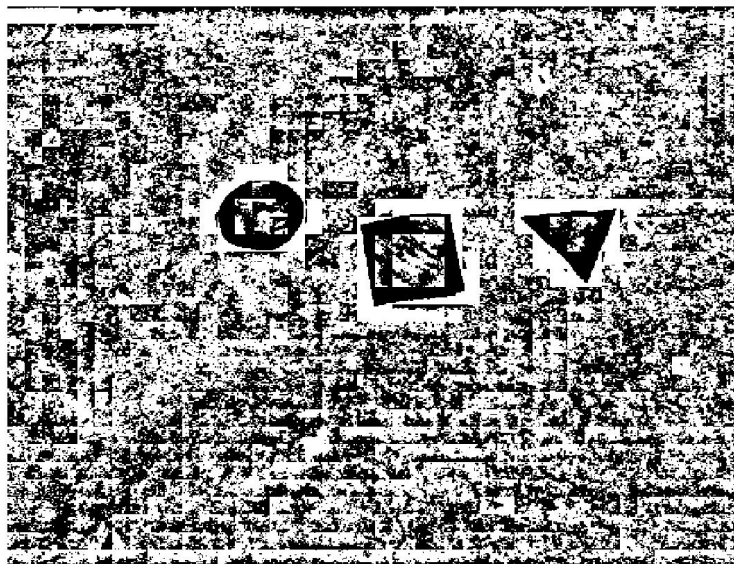
4.3.1 Editace snímku z kamery

Ke snímání plochy stolku s objekty je využito kamery Hercules HD Twist, která byla poskytnuta Mechatronickou laboratoří. Kamera má maximální rozlišení 1280x720 pixelů, avšak její rozlišení je sníženo pouze na 640x480 pixelů. Toto rozlišení je zcela dostatečné pro danou aplikaci a zmenšuje výpočetní náročnost. Kamera je dále nastavena, aby snímala obraz v odstínech šedi.

Předtím, nežli je použita metoda pro rozpoznání tvaru a polohy, je snímek z kamery softwarově upraven. První úpravou je zbavení snímku optických vad. K tomu byl použit kalibrační toolbox softwaru MATLAB. Pomocí dvaceti pěti snímků šachovnice s rozměrem stran čtverců 30 mm byly určeny parametry kamery. S jejich využitím je obrázek zbaven optických vad. Tato operace nicméně vytvoří černé oblouky na stranách fotky, a proto je snímek mírně oříznut.

Poté je provedeno prahování, při němž dojde k převedení obrázku na černou a bílou. Původně byl záměr vytvořit pokročilejší metodu prahování. Zkoušelo se adaptivní prahování, které pro danou aplikaci bylo nevhodné (obrázek 4.6) především proto, že se na obrázku nevyskytují detaily, ale pouze velké části výrazně tmavé, tzn. plechové objekty, a výrazně světlé, tzn. bílý papír. Dále bylo testováno stanovení prahu pomocí Otsuovi metody [24]. Tato metoda fungovala,

avšak v případech, že se na obrázku objevovala větší plocha stínu, byl práh stanoven nevhodně, což způsobovalo například uříznutí části objektu. Nakonec byl tedy zvolen práh empiricky, což pro daný případ, kde na snímku nejsou žádné detaily, ale jde spíše o zachování přesného tvaru, nejvíce vyhovuje. Po mnoha testech se dá konstatovat, že se chová v běžných světelných podmínkách spolehlivě.

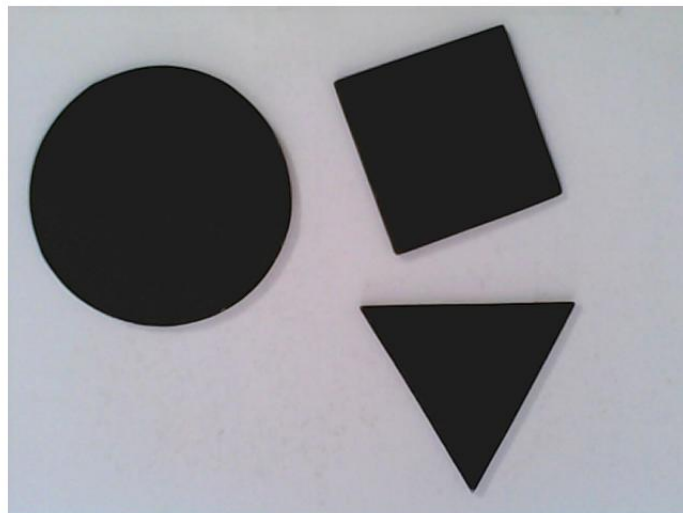


Obrázek 4.6: Ukázka výsledku adaptivního prahování

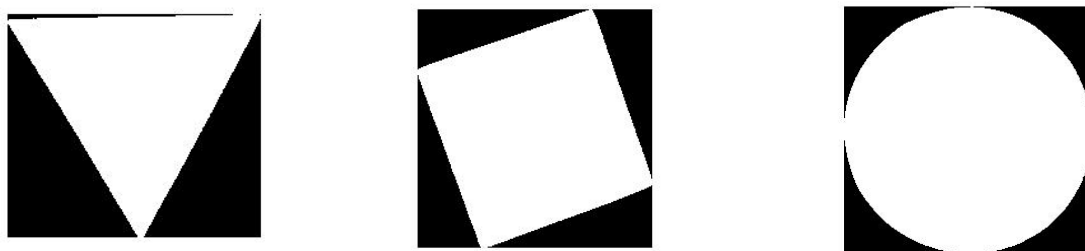
Dále dochází k určení počtu a poloh objektů na snímku. K tomu slouží v MATLABu funkce `bwlabel`. Pro přehlednost je využita funkce `vislabels` [25], která byla převzata z webu Mathworks a umožňuje dané objekty na fotce označit. Poté jsou pomocí funkce `regionprops` zjištěny vlastnosti jednotlivých objektů. Jedná se o průměry, obsahy, polohu těžišť a takzvaný `BoundingBox`, což jsou souřadnice určující obdélníkový rámeček, jehož hrany se objektu tečně dotýkají a ohraničují ho.

Díky tomu, že do rozpoznávací metody je třeba vkládat pouze dané objekty a ne celý snímek, dochází k vyřezání objektů z celé fotky na základě souřadnic `BoundingBoxu`. Tím vzniknou malé fotky, v nichž jsou pouze chtěné objekty. Tato operace probíhá jenom pro objekty s obsahem větším než 10000 pixelů čtverečních, což zaručuje, že kdyby byly na fotce určeny nějaké malé nechtěné objekty, vzniklé například stínem, tak nebudou uvažovány.

Níže lze vidět neupravený snímek z kamery (obrázek 4.7) a poté tři upravené vyřezané snímky objektů (obrázek 4.8).



Obrázek 4.7: Neupravený snímek z kamery



Obrázek 4.8: Vyřezané a upravené snímky objektů

4.3.2 Programování rozpoznávací metody

V této chvíli jsou známy vlastnosti objektů a máme jednotlivé vyřezané snímky.

Nyní dochází k výpočtu sedmi invariantních momentů popsanych Huem [21] pomocí funkce `feature_vec` spolu s `cent_moment` [26]. Tyto funkce byly převzaty z webu Mathworks. Vstupem jsou jednotlivé vyřezané snímky daných objektů, které jsou vidět na obrázku 4.8.

Poté, co je získáno těchto sedm momentů pro každý objekt, jsou momenty převedeny na absolutní hodnotu. Díky tomu, že se navzájem řádově významně liší, dochází k využití rovnice 3.15 pro přepočet na vyšší řády [22].

Dalším krokem je porovnání získaných momentů s nahranými. Tím se zabývá následující podkapitola.

4.3.3 Porovnávací mechanismus

Pro rozlišení tvaru daného objektu je třeba porovnat vypočtené momenty s těmi, které byly pro dané tvary získány testováním a nahrány.

Získání těchto momentů probíhalo měřením a to tak, že bylo provedeno deset spuštění softwaru pro výpočet momentů s deseti různými vstupními snímky, na nichž byly objekty v různých náhodných polohách. Tím bylo získány tři matice, každá pro jeden objekt. Každá matice obsahovala deset řádků a sedm sloupců, kde každý řádek reprezentoval sedm získaných hodnot momentů pro jednotlivé měření.

Poté byl pro každý objekt vytvořen aritmetický průměr pro každou ze sedmi hodnot. Byla také spočítána maximální horní a dolní odchylka od tohoto průměru. Získané hodnoty pro dané objekty jsou v následující tabulce 4.1, kde jsou jednotlivé momenty označeny H1,...,H7:

objekt	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
trojúhelník	1.6481	11.6142	5.3928	14.9622	26.2332	21.1598	26.6035
horní odch.	0.0015	2.5318	0.01267	3.1767	4.0257	4.0894	4.1002
dolní odch.	0.0019	1.3001	0.0070	1.3159	3.1725	2.2070	2.2795
čtverec	1.7928	12.3071	14.5554	18.7586	35.9000	25.6135	36.0021
horní odch.	0.0011	1.5853	1.8360	4.2462	6.8546	5.9921	8.2849
dolní odch.	0.0011	1.1778	2.2581	2.4258	3.5814	2.3825	4.4540
kruh	1.8377	12.7212	14.4439	25.4297	46.3155	32.3262	46.8281
horní odch.	0.0006	1.694	0.4838	3.4552	5.0486	4.1922	7.3540
dolní odch.	0.0004	0.8564	0.4772	2.3655	2.8914	3.3295	3.6135

Tabulka 4.1: Naměřené hodnoty pro dané objekty

Pomocí těchto hodnot byl vytvořen interval pro každou ze sedmi hodnot momentů pro každý objekt. Tento interval dále slouží k porovnávání.

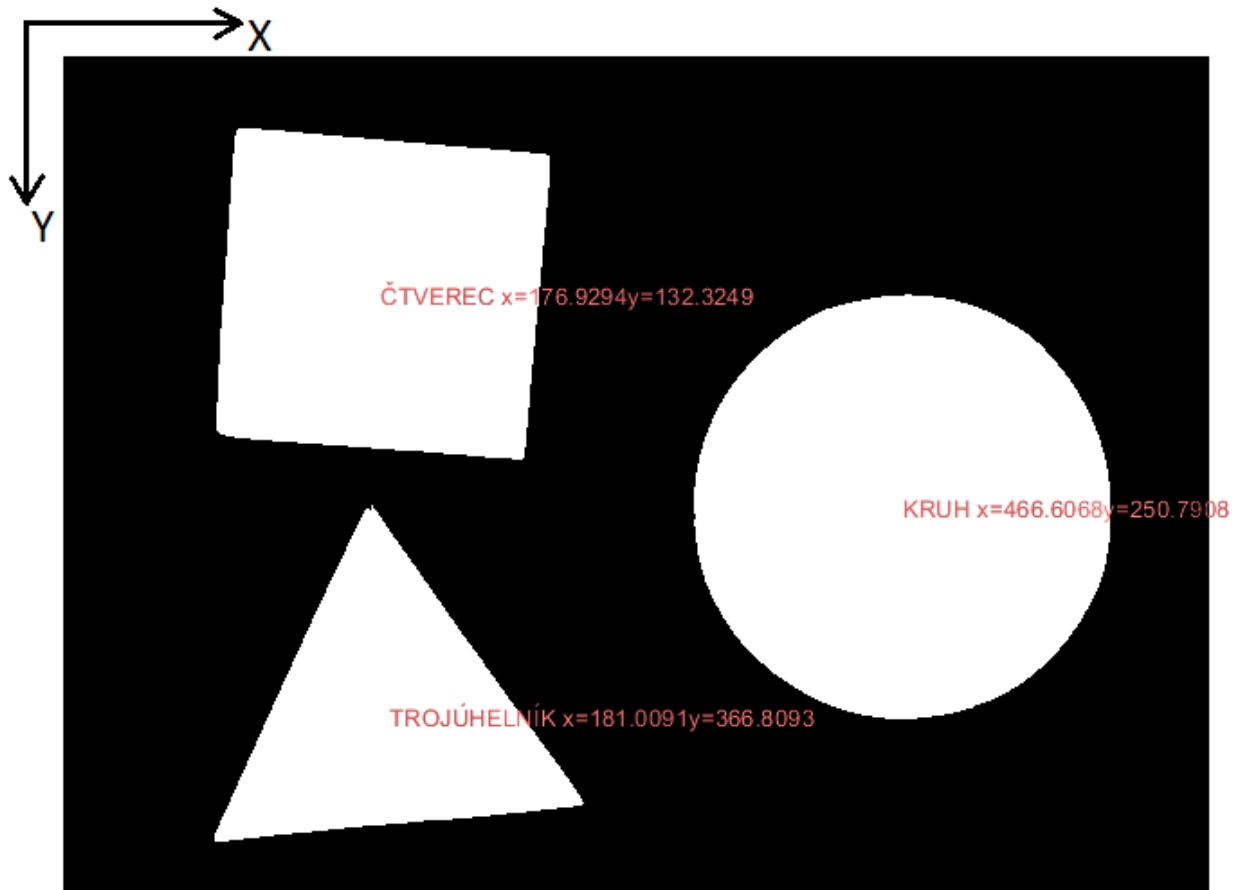
Nyní máme vše potřebné k tomu, abychom byli schopni objekt identifikovat. Identifikace probíhá tak, že pro každý moment každého objektu, který získáme výpočtem, dojde k porovnání tohoto momentu se všemi nahanými intervaly momentů.

Pro lepší stanovení dochází k vytváření matic, které by se daly nazvat jako podobnostní. Tyto matice jsou tři pro každý objekt, v našem případě tedy matice podobnosti trojúhelníku, čtverce a kruhu. Do matice se na danou pozici zapíše 1 v případě, že vypočtený moment leží v nahaném intervalu. Naopak pokud neleží, zapíše se 0. U našich třech objektů nám tedy vznikají matice 7x3. Nyní už jen stačí určit, pro který sloupec je největší shoda, tzn. obsahuje nejvíce jedniček.

Objekt, jehož vypočtené momenty při porovnání vytvořily tento sloupec, je tedy nejvíce podobný danému naměřenému útvaru. Můžeme již tedy konstatovat, o jaký útvar se jedná.

4.3.4 Výstup

V této chvíli známe tvary jednotlivých objektů. Nyní přiřadíme souřadnice těžiště objektu, který zrovna hledáme, výstupní proměnné, v našem případě s názvem poloha. Jedná se o vektor dvou čísel, kde první reprezentuje pozici pixelu těžiště ve směru x kamery a druhé ve směru y, viz. obr 4.9.



Obrázek 4.9: Obrázek s identifikací tvaru a určením polohy

4.4 Příprava praktické ukázky

V této podkapitole bude popsáno propojení softwaru pro zpracování obrazu a řízení manipulátoru. Dále pak bude rozebrána příprava praktické ukázky.

4.4.1 Propojení souřadných systémů

Souřadnice pixelů, jejichž získání je popsáno v předešlé podkapitole, se ovšem liší od souřadnic v kartézském souřadném systému robota, což jsou ty souřadnice, které jsou požadovány. Musí se tedy provést přepočet.

Kartézský souřadný systém robota je určen tak, že základová rovina manipulátoru tvoří rovinu xy tohoto systému. Osa z míří směrem nahoru a je v ose manipulátoru, tzn. ve středu rotace pohonu 1. Osa y směřuje směrem k řídicí elektronice rovnoběžně s hranou základové desky. Jedná se o kolmý pravotočivý systém, tudíž lze osu x již jednoduše určit. Jedna jednotka odpovídá zhruba 1 mm.

Souřadný systém kamery je rovinný, tudíž obsahuje pouze dvě osy. Počátek tohoto souřadného systému se nachází na souřadnicích $xyz=[120,140,440]$ souřadného systému manipulátoru. Osa y kamery směřuje stejným směrem a je rovnoběžná s osou y manipulátoru. Osa x kamery je rovnoběžná s osou x robota, avšak směřuje opačným směrem.

Testováním bylo zjištěno, že 1 mm na snímané ploše, tedy jedna jednotka souřadného systému manipulátoru, se rovná zhruba 2.39 pixelu na snímku z kamery.

Do softwaru byl tedy přidán jednoduchý výpočetní mechanismus, který polohu objektu v pixelech převede na souřadnice manipulátoru.

4.4.2 Řízení robota

V rámci projektu se uvažovalo, že souřadnice, jejichž získání bylo právě popsáno, budou výstupem této práce. Zamýšlelo se, že tyto souřadnice budou vloženy do funkce pro řízení robota, kterou vytvoří ve své práci Lukáš Letrik, a že robot již po vygenerované trajektorii dojde na dané místo, uchopí objekt a poté ho umístí jinde.

Komunikace by tedy probíhala mezi PC, kde by se k řízení využíval software MATLAB, a mikrokontrolery pomocí USB portu umístěném na DPS vytvořené Ing. Tomášem Nejedlíkem [5].

Bohužel se Lukáši Letrikovi ve své práci nepodařilo stihnout zprovoznit komunikaci přes USB, díky čemuž je pro ovládání robota třeba neustále reprogramovat mikrokontrolery.

V Simulinku vytvořil jednoduchý software pro řízení manipulátoru, jenž má fixně dané natočení pro každý pohon a využívá PID regulace. Tento software se nahrává pomocí programátoru PIC KIT 4 od firmy Microchip přímo do jednotlivých mikrokontrolerů. Jeho program neobsahoval řízení servomotoru ani spínání elektromagnetu.

Dále se mu podařilo vytvořit software pro výpočet inverzní kinematiky.

Díky koronavirové krizi byl studentům odepřen přístup do Laboratoře mechatroniky. Celý manipulátor byl tedy převezen do mého domu a Lukáš Letrik k němu neměl přístup.

Bylo tedy využito jeho softwaru, u kterého došlo k empirickému odladění regulátorů. Dále byl software doplněn o řízení servomotoru a spínání elektromagnetu. Místo konstantní hodnoty natočení je natočení určeno pomocí vektoru z workspace.

Tento vektor je generován pomocí softwaru, který byl pro tuto činnost naprogramován v MATLABu. V tomto programu je v první řadě vytvořen časový vektor o určité délce a kroku. Dále je pak každému časovému okamžiku přiřazena určitá hodnota natočení, pro jejíž generování je využito Robotics toolboxu od Petera Corkeho [27], konkrétně funkce `jtraj`. V případě malého kroku, tzn. méně než 0.1 s, je pohyb manipulátoru relativně plynulý.

Tato metoda je důsledkem improvizace, která byla vyvolána jednak koronavirovým stavem a jednak nedokončením práce Lukáše Letrika.

Pro splnění praktické ukázky bylo dále třeba vytvořit trajektorii, po níž se bude robot pohybovat. K tomuto účelu bylo využito softwaru pro inverzní kinematiku vytvořenou Lukášem Letrikem a Robotics toolboxu [27].

4.4.3 Postup pro ovládání robota

Nynější postup pro ovládání manipulátoru v rámci praktické ukázky začíná získáním souřadnic zvoleného plechového dílu. Poté dojde k manuálnímu naplánování trajektorie robota pomocí programu pro inverzní kinematiku a pro vytváření časového vektoru natočení. Dále dojde k naprogramování jak primárního tak sekundárního mikrokontroleru pomocí programátoru PIC KIT 4 od firmy Microchip a spuštění robota.

Po několika testech se dá říct, že se robot pomocí této metody dá spolehlivě ovládat a dokáže uchopit a přemístit plechový díl.

Do budoucna by však bylo vhodné zprovoznit komunikaci přes USB.

5 Závěr

V rámci této bakalářské práce byl uveden do provozu sériový manipulátor, na němž bylo v minulosti provedeno několik závěrečných prací. Došlo k opravě a případnému nahrazení poškozených částí. Dá se konstatovat, že robot nyní funguje spolehlivě a bez obtíží.

Došlo také k přetvoření robotického systému tak, aby vyhovoval pro uchycení kamery a obsahoval plochu, na níž mohou ležet plechové díly, jež jsou předmětem, se kterým je manipulováno.

Dále byl nahrazen původního koncový efektor, který byl vytvořen v rámci diplomové práce Ing. Tomáše Nejedlíka [5], za nový. Ten byl z velké části vytisknut na 3D tiskárně, obsahuje elektromagnet, pružinu a je napojen na servomotor. Aplikaci, pro niž byl zkonstruován, to jest manipulace s plechovými díly, vyhovuje.

Jednou z hlavních částí bakalářské práce je vytvoření metody pro zpracování obrazu. Byl tedy vytvořen software v MATLABu, který využívá výstupu z kalibračního toolboxu a slouží k určení polohy a identifikaci tvaru objektů. K rozpoznávání tvaru využívá sedmi invariantních momentů definovaných Huem [21]. Tento software funguje za běžných světelných podmínek a je vytvořen pro rozpoznávání třech modelových plechových dílů. V případě využití jakýchkoliv jiných dílů, není úspěšnost zaručena.

Poslední částí práce je příprava praktické ukázky. Došlo k popisu kroků, které byly provedeny, aby manipulátor spolu s kamerou komplexně pracoval a ukázka tedy mohla být provedena.

Cíle bakalářské práce byly splněny, avšak díky vzniklým okolnostem, což byla koronavirová krize a nedokončení bakalářské práce Lukáše Letrika, na niž byl projekt závislý, muselo dojít k jisté improvizaci a zjednodušení. Tento fakt vedl k tomu, že ovládání není příliš pohodlné. Do budoucna je na projektu rozhodně prostor pro vylepšení.

Literatura

- [1] Roboty SCARA. In: *Fanuc* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/bg/en/robots/robot-filter-page/scara-series/selection-support>
- [2] KLIMEŠ, David. *Hardwarové a softwarové řešení diagnostiky a bezpečnosti provozu robotického manipulátoru* Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí práce doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D..
- [3] ŠURANSKÝ, Michal.: *Modelování, identifikace a řízení robotického manipulátoru*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí práce doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D..
- [4] YOUSSEF, Daniel.: *Návrh aplikace pro výukový model manipulátoru se třemi stupni volnosti* Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí práce Ing. David Klimeš.
- [5] NEJEDLÍK, Tomáš.: *Rozšíření funkcionality výukového robotického manipulátoru*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí práce Ing. David Klimeš.
- [6] VEJLUPEK, Josef.: *Vývoj elektroniky pro řízení trakce experimentálního vozidla*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí práce doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D..
- [7] Handling technology. In: *ZIMMER group* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.zimmer-group.com/en/technologies-components/handling-technology>
- [8] End effectors for robotic tooling. In: *DESTACO* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.destaco.com/products/end-effectors>
- [9] Equipment and accessories. In: *ABB* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories>
- [10] Robot accessories. In: *Fanuc* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/en/robots/accessories>
- [11] HRC-03. In: *Zimmer group* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.zimmer-group.com/en/technologies-components/handling-technology/grippers/hrc/collaborative/2-jaw-parallel-grippers/translate-to-english-hrc-03>
- [12] 3-Finger Adaptive Robot Gripper. In: *Robotiq* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper?ref=nav_product_new_button
- [13] iRPickTool. In: *Fanuc* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/si/en/robots/accessories/robot-vision/ir-pick-tool>

- [14] Vacuum Grippers. In: *Robotiq* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://robotiq.com/products/vacuum-grippers?ref=nav_product_new_button
- [15] Magnetic Robot End Effector: Top 5 Pros and Cons. In: *bloq.robotiq* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/bid/65794/Magnetic-Robot-End-Effector-Top-5-Pros-and-Cons>
- [16] HM1097NC. In: *Zimmer group* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.zimmer-group.com/en/technologies-components/handling-technology/grippers/pneumatic/grippers-for-special-tasks/series-hm1000/products/hm1097nc>
- [17] Přídržné permanentní elektromagnety. In: *SCHMACHTL* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.schmachtl.cz/permanentni-elektromagnety>
- [18] Fixed and Adaptive Thresholding. In: *Washington University in St. Louis* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://sites.wustl.edu/clouddetection/cloud-detection/fixed-and-adaptive-thresholding/>
- [19] What Is Camera Calibration? In: *MathWorks* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>
- [20] Fisheye Calibration Basics. In: *MathWorks* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/fisheye-calibration-basics.html>
- [21] Ming-Kuei Hu, "Visual pattern recognition by moment invariants," in *IRE Transactions on Information Theory*, vol. 8, no. 2, pp. 179-187, February 1962, doi: 10.1109/TIT.1962.1057692.
- [22] Shape Matching using Hu Moments (C++/Python). In: *Learnopencv* [online]. 2018 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.learnopencv.com/shape-matching-using-hu-moments-c-python/>
- [23] Optical encoder. In: *TRANSMOTEC* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.transmotec.com/Download/Catalog/Transmotec-EN-WD-2019.pdf>
- [24] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, Jan. 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [25] Visualize output of BWLABEL. In: *MathWorks* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19665-visualize-output-of-bwlabel>
- [26] The Seven Invariant Moments. In: *MathWorks* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33975-the-seven-invariant-moments>
- [27] Robotics Toolbox. *PeterCorke.com* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://petercorke.com/toolboxes/robotics-toolbox/>

Seznam zkratek

3D	Three-Dimensional
DIR	Direction
DP	Diplomová Práce
DPS	Deska Plošných Spojů
ENA	Enable
FSI	Fakulta Strojního Inženýrství
HD	High-Definition
MATLAB	Matrix Laboratory
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PC	Personal Computer
PID	Proporcionální, Integrační, Derivační
PWM	Pulse Width Modulation
USB	Universal Serial Bus
VUT	Vysoké Učení Technické

Seznam symbolů

Symbol	Název
R	Rotace
t	Translace
K	Matice interních parametrů
c_x	Souřadnice optického středu obrazu v x-ovém směru
c_y	Souřadnice optického středu obrazu v y-ovém směru
f_x	Ohnisková vzdálenost v x-ovém směru
f_y	Ohnisková vzdálenost v y-ovém směru
s	Koeficient zkosení
P	Matice kamery
w	Faktor měřítka
[x y 1]	Pozice pixelu
[X Y Z 1]	Pozice objektu
I(x,y)	Matice pixelů tvořící snímek
M_{ij}	Moment určující tvar
μ_{pq}	Centrální moment
$[\bar{x}, \bar{y}]$	Souřadnice těžiště
η_{rt}	Normalizovaný centrální moment
h_1, \dots, h_7	Momenty určené Huem [21]
H_i	Moment určený Huem přepočtený do vyšších řádů

Seznam obrázků

1.1	Ilustrace robotizace [1]	9
3.1	Výstupní stav po diplomové práci Ing. Tomáše Nejedlíka [5]	13
3.2	Chapadlo řady HRC [11]	14
3.3	Robotická ruka firmy Robotiq [12]	14
3.4	Přísavka na robotovi Fanuc [13]	14
3.5	Přísavka firmy Robotiq [14]	14
3.6	Magnetický efektor Zimmer[16]	15
3.7	Efektor ve formě elektromagnetu[15]	15
3.8	Ukázka prahování [18]	16
3.9	Ilustrace principu kalibrace [19]	17
3.10	Rozdíl mezi upraveným a neupraveným snímkem z kamery [20]	18
3.11	Huovy momenty po přepočtu pro dané obrazce [22]	20
4.1	Stav elektroniky při převzetí	21
4.2	Stav manipulátoru při převzetí	22
4.3	Robotický systém	24
4.4	Zapojení efektoru	25
4.5	Model efektoru v softwaru Solidworks	26
4.6	Ukázka výsledku adaptivního prahování	27
4.7	Neupravený snímek z kamery	28
4.8	Vyřezané a upravené snímky objektů	28
4.9	Obrázek s identifikací tvaru a určením polohy	30

Seznam tabulek

4.1	Naměřené hodnoty pro dané objekty	29
-----	---	----

Přílohy

Elektronické přílohy

- Modely dílů koncového efektoru a jejich sestava v Solidworksu
- Model vzpěry ramene v Solidworksu
- Software pro zpracování obrazu v MATLABu spolu s pomocnými soubory
- Software pro určení časového vektoru natočení v MATLABu