



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH A VIRTUÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ VÝUKOVÉ ROBOTICKÉ BUŇKY

DESIGN AND VIRTUAL COMMISSIONING OF AN EDUCATIONAL ROBOTIC CELL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Štěpán Novák
Studijní program:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Jan Vetiška, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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 diplomové práce:

Návrh a virtuální zprovoznění výukové robotické buňky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stále aktuálním cílem průmyslu je zvyšování produktivity práce a jakosti výroby. Možností jak tohoto cíle dosáhnout je robotizace rutinních činností. Tato práce se zaměřuje na robotizovanou manipulaci s díly a strojové vidění. Cílem práce je zjistit aktuální stav v oblasti virtuálního zprovoznění robotizovaných manipulačních systémů a strojového vidění, a zpracovat výukovou robotickou buňku.

Cíle diplomové práce:

Rešerše dané problematiky.
Návrh layoutu buňky.
Systémový rozbor.
3D konceptuální model.
Virtuální zprovoznění.
Simulační ověření.

Seznam doporučené literatury:

SICILIANO, Bruno a Oussama. KHATIB. Springer handbook of robotics. Berlin: Springer, c2008. ISBN 978-3-540-23957-4

HORNBERG, Alexander. Handbook of Machine Vision. 1. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. ISBN 978-3-527-40584-8

NOF, S. Y. Springer Handbook of Automation. Springer, 2009. 1812 s. ISBN 978-3-540-78830-0

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o vytvoření virtuálního zprovoznění demonstračního programu strojového vidění v edukační robotické buňce. První část práce se zabývá teorií v oblasti robotiky, virtuálního zprovoznění a strojového vidění. V druhé části byl vytvořen systémový rozbor řešeného problému. Třetí část práce obsahuje návrh celku robotické buňky. Ve čtvrté části je popsán návrh jednotlivých částí buňky, tvorba programu a samotné virtuální zprovoznění buňky.

ABSTRACT

This master's thesis discusses the creation of a virtual commissioning of a machine vision demonstration program in an educational robot cell. The first section of this thesis deals with the theory in robotics, virtual commissioning and machine vision. Systemic analysis of the problem was addressed in the second section. The third section contains the design of the cell. The fourth section describes the design of some individual parts of the cell, the process of creating the program and virtual commissioning itself.

KLÍČOVÁ SLOVA

Virtuální zprovoznění, strojové vidění, edukační robotická buňka, Roboguide

KEYWORDS

Virtual commissioning, machine vision, educational robot cell, Roboguide

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, Štěpán. *Návrh a virtuální zprovoznění výukové robotické buňky* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149470>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Vetiška.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Janu Větiškovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc v průběhu vypracování práce. Poděkování si zaslouží také Minna Lanz, Jyrki Latokartano a Niko Siltala z Tampere University, kteří mi umožnili na tomto projektu pracovat a v průběhu mi pomáhali. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Větišky, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26.5.2023

.....

Štěpán Novák

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	17
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	19
3.1	Robotizace	19
3.1.1	Robotické edukační buňky	21
3.2	Programování robotu	22
3.2.1	Online programování	23
3.2.2	Offline programování	23
3.3	Virtuální zprovoznění	23
3.3.1	Způsoby virtuálního zprovoznění	23
3.3.2	Software pro virtuální zprovoznění	24
3.4	Strojové vidění	25
3.4.1	Způsob lokalizace součástí	25
3.4.2	Kamera.....	26
3.4.3	Osvětlení	27
4	NÁVRH BUŇKY	30
5	SYSTÉMOVÝ ROZBOR – PŘÍPADOVÁ STUDIE	31
5.1	Problémová situace	31
5.2	Formulace problému	31
5.3	Formulace cílů a řešení	31
5.4	Popis řešené soustavy	31
5.5	Systém podstatných veličin	31
6	VLASTNÍ ŘEŠENÍ	33
6.1	Návrh gripperu	33
6.1.1	ER-4iA.....	33
6.1.2	CRX-10iA.....	35
6.2	Manipulované součásti	35
6.3	Návrh layoutu buňky	37
6.3.1	ER-4iA.....	37
6.3.2	CRX-10iA.....	39
6.4	Strojové vidění	41
6.4.1	ER-4iA.....	41
6.4.2	CRX-10iA.....	45
6.5	Program.....	49
6.5.1	Offline programování	49
6.5.2	Přenesení programu na fyzický robot	50
6.5.3	ER-4iA.....	50
6.5.4	CRX-10iA.....	53
6.5.5	Prvky programu	55
6.6	Virtuální zprovoznění a simulace	58
7	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	61
8	ZÁVĚR	63
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	67
10.1 Seznam zkratk.....	67
10.2 Seznam obrázků.....	67
11 SEZNAM PŘÍLOH.....	71

1 ÚVOD

Výroba se od dob průmyslové revoluce stále rychlejším a rychlejším tempem zdokonaluje. V poslední době prožívá rozmach robotizace pracovišť. Od osmdesátých let, kdy začaly být roboty ve výrobě v širší míře využívány, do dnešních dní počet robotů nasazených do výroby stále stoupá. Robotizace je pro podniky výhodná, a to zejména pro výrobu kusů ve větších sériích. Oproti lidské pracovní síle nabízejí roboty vyšší přesnost a opakovatelnost a rychlejší provedení. Už jen tyto aspekty jsou v sériové výrobě ekonomicky výhodné. Navíc však robotu nekolísá výkonnost z důvodu únavy a pracovat může bez přestávek a bez nároků na dovolenou.

Požadavky na robotizovaná pracoviště jsou čím dál vyšší, převážně na optimalizaci výrobního času robotu. Z toho důvodu je v dnešní době stále více využíváno offline programování a virtuální zprovoznění výrobních systémů. Offline programování umožňuje vytvoření programu pro daný robot na dálku z počítače. Samotný robot tak nemusí vůbec přerušovat výrobu a hotový program je do něj pouze nahrán. Tím je zamezeno dlouhým prostojům způsobeným vytvářením a testováním programu přímo na robotu. Virtuální zprovoznění umožňuje vytvořený offline program věrně simulovat na kopii fyzického výrobního systému. Tím se čas nutných prostorů dále snižuje, protože většina testování programu proběhla již v simulaci.

Čím dál více využívanou technologií v průmyslu je strojové vidění. Za nepříliš vysokou pořizovací cenu lze strojovým viděním zefektivnit výrobu v mnoha odvětvích. V robotice se využívá zejména k lokalizaci objektů a následnému navádění robotu. Uplatňuje se například u odebírání součástí z dopravníku, na kterém jsou po předchozí operaci náhodně orientovány.

Tato diplomová práce se zabývá virtuálním zprovozněním robotické buňky využívající strojové vidění a ověřením tohoto virtuálního zprovoznění na reálné robotické buňce. V rešeršní části práce byl popsán přehled současného stavu poznání všech používaných technologií. V praktické části práce byl popsán postup tvorby virtuálního zprovoznění a jeho následné ověření na fyzickém robotu. V závěru práce je navržené řešení shrnuto a zhodnoceno.

2 MOTIVACE

Tato diplomová práce byla vytvořena ve spolupráci s Tampere University, která disponuje mnoha moderními technologiemi v oblasti robotizace a automatizace. Univerzita se snaží tyto moderní technologie ukazovat zájemcům z řad firem na veletrzích nebo akcích pořádaných univerzitou.

Jednou z těchto technologií je 2D strojové vidění. V této diplomové práci jsem byl pověřen vytvořením programu, pomocí kterého bude moci univerzita v budoucnu demonstrovat výhody a nevýhody této technologie. Strojové vidění je relativně novou rozvíjející se technologií s velkým potenciálem využití při výrobě. Zájem o prohloubení znalostí o této technologii a o možnostech využití technologie v jejich výrobě jevíli zástupci firem z celého Finska.

Demonstrační program měl být nejprve vytvořen offline, co nejvěrněji virtuálně zprovozněn a až poté přenesen na fyzický robot a ověřen. Virtuální zprovoznění je také relativně novou metodou, ale rychle se v oboru programování robotických pracovišť rozvíjí, protože výraznou měrou šetří čas i peníze.

Vše naznačuje tomu, že obě tyto technologie se budou v budoucnu ještě dále rozvíjet a svoje zkušenosti s nimi nabyté při vytváření diplomové práce bych rád využil v mém následném pracovním životě.

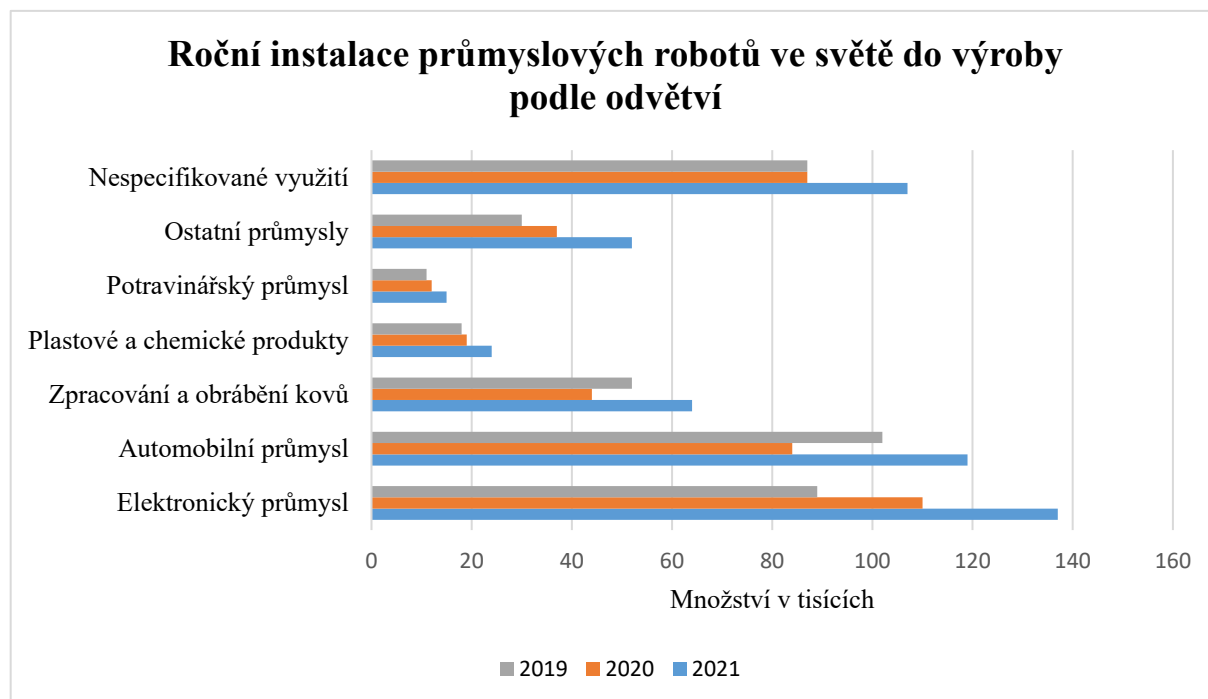
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Robotizace

Robotizace v průmyslu je na svém dosavadním vrcholu a nic nenaznačuje tomu, že její význam měl v dohledné době klesat. Snižuje se porodnost a zvyšuje se doba dožití, což nevyhnutelně znamená postupné snižování podílu pracujících lidí. Robotizace je řešením tohoto problému, robot dokáže zastat práci nekvalifikovaných pracovníků. Práce robotu je konzistentní, není náchylná na pokles kvality výroby vlivem například únavy pracovníků. Oproti lidským pracovníkům je robotická výroba v naprosté většině případů také rychlejší, přesnější a také levnější. Pořizovací cena robotické linky je sice vysoká, ale levnější provoz linky a zvýšená produktivita výroby nakonec vedou k cenově rozumnějšímu řešení.

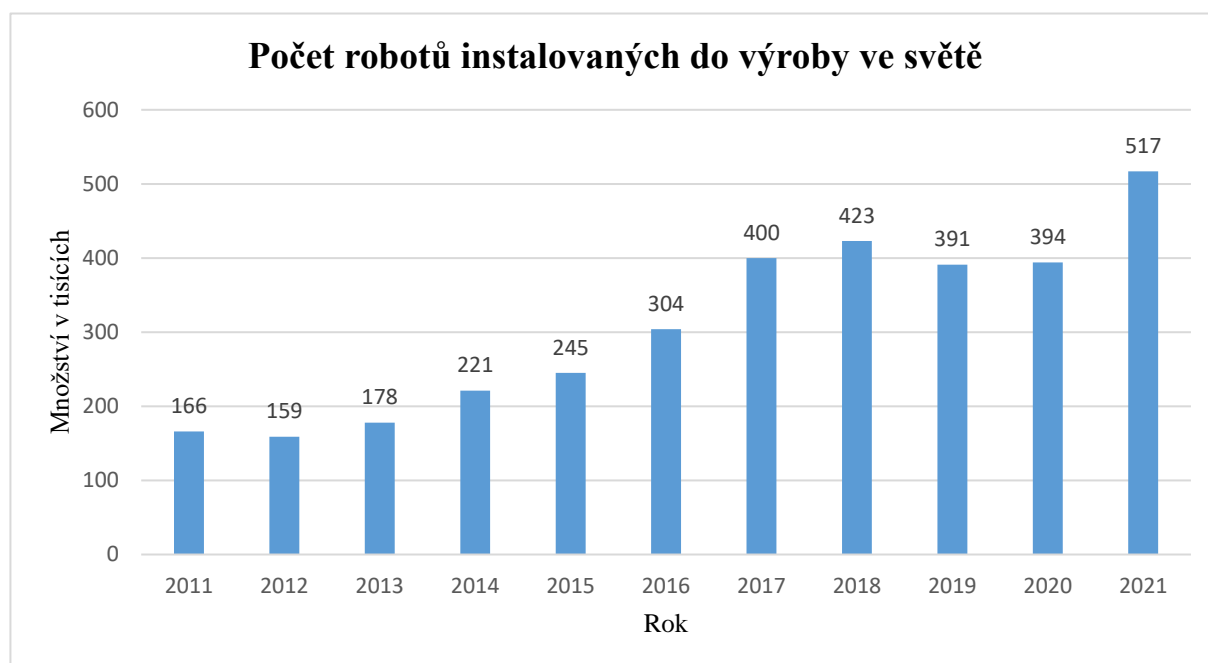
Další výhodou robotizace je zvýšená bezpečnost při výrobě. Fyzicky náročnější práce či přímo práce nebezpečné lze v takovém provozu přenechat robotu a lidský operátor pouze výrobu podporuje prováděním méně nebezpečných činností. Kolaborativní roboty byly navrženy přímo pro bezpečnou souběžnou spolupráci robotu s člověkem. Kolaborativní roboty tvořily v roce 2021 přes 8 % všech používaných robotů ve výrobě. Jedná se o velký nárůst v porovnání s rokem 2017, kdy jejich podíl činil pouze necelé 3 %. [1]

Robotizace je aplikovatelná napříč mnoha odvětvími. Největší podíl nově instalovaných robotů je v elektronickém a automobilním průmyslu, avšak i v ostatních průmyslových odvětvích jsou roboty instalovány, jak lze vidět na obr. 1). [1]

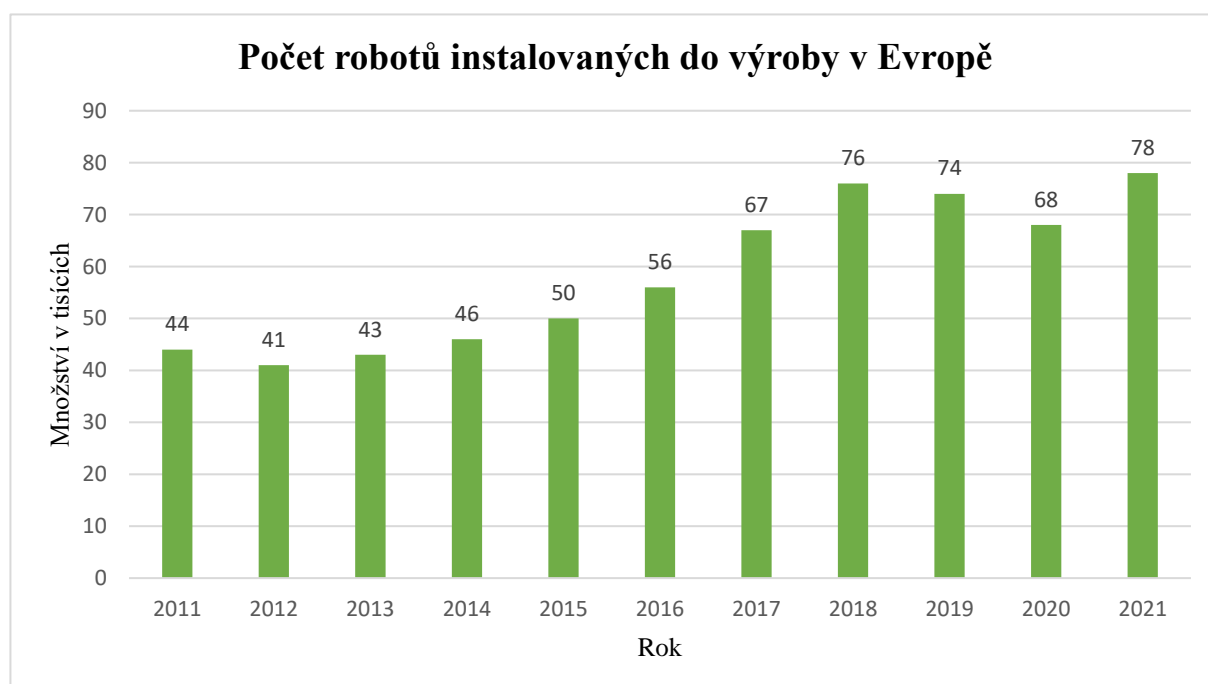


Obr. 1) Srovnání počtu instalovaných robotů napříč odvětvími [1]

Na obr. 2) lze vidět počet průmyslových robotů zavedených do výroby ročně v rozmezí let 2011 až 2021. Z grafu je patrné, že počet nově instalovaných robotů do výroby s malými výjimkami stoupá, za deset let byl tento počet více než ztrojnásoben. Nejmarkantnější nárůst v instalacích robotů zaznamenává Čína a další Asijské země. I v případě Evropy však jde o nezanedbatelný nárůst v období posledních deseti let, jako lze vidět na obr 3). V posledních letech se však nárůst v Evropě téměř zastavil. [1]



Obr. 2) Počet robotů v tisících instalovaných do výroby po celém světě v čase [1]



Obr. 3) Počet robotů v tisících instalovaných do výroby v Evropě v čase [1]

3.1.1 Robotické edukační buňky

Edukační robotické buňky jsou robotickým systémem navrženým pro použití ve výuce. Vyznačují se zejména nižší cenou a jednodušším a přímočařejším rozhraním. Tyto robotické buňky distribuují převážně do škol a univerzit, kde si mohou žáci na takovýchto pracovištích vyzkoušet práci s roboty, například při vytváření projektu. Jedná se o již sestavené buňky, jejichž součástí bývá zpravidla robot, řídicí jednotka, teach pendant, rám, na který je robot pevně zafixován, pracovní plocha a ochranné prvky. Edukační buňka je zajímavým způsobem, jak nalákat studenty a mladé lidi k práci s hardwarem a softwarem dané firmy a seznámit je s jejich prostředím, proto alespoň jednu formu takovéto propagace nabízí většina větších výrobců robotů.

Fanuc Educational Package Standard

Společnost Fanuc nabízí dva modely edukační buňky. Prvním z nich je standardní edukační buňka, která má tyto parametry:

- Robot ER-4iA – dosah 550 mm, užitečné zatížení 4 kg
- Řídicí jednotka R-30iB Mate Plus
- Rozměry 1300 x 700 x 1800 mm
- Hmotnost 170 kg
- Software Roboguide pro offline programování
- iPendant

Součástí edukační robotické buňky je také 2D kamera připevněná na rám robotu. Dále je součástí balení několik součástí, které jsou zamýšleny pro použití při pick and place operacích, ale zároveň i pro použití při strojovém vidění. [2]

Fanuc Educational Package Collaborative

Druhou edukační buňkou od firmy Fanuc je buňka obsahující kolaborativní robot. Edukační buňka nabízí:

- Robot CRX-10iA – dosah 1249 mm, užitečné zatížení 10 kg
- Řídicí jednotka R-30iB Mini Plus
- Rozměry 1200 x 800 x 2500 mm
- Software Roboguide pro offline programování
- Tablet teach pendant

Součástí této robotické buňky je též 2D kamera, která je však připevněna na zápěstí robotu. I tato buňka obsahuje součásti, které lze použít při robotických operacích. [3]

ABB Robotics Education Package

Společnost ABB má v nabídce edukační buňku Robotics Education Package. Edukační buňka nabízí:

- Robot GoFa CRB 15000 – dosah 950 mm, užitečné zatížení 5 kg
- Řídicí buňka OmniCore
- Elektrický paralelní gripper
- Rozměry 1143 x 838,2 x 863,6 mm
- Hmotnost 300 kg
- Software Robotstudio pro offline programování
- FlexPendant s možností rozšíření o B&R Power Panel C50

Dále je součástí balení rovněž velké množství pomůcek pro vyučování a zkoušení různých robotických operací, jako součásti pro pick and place operace a pro další úlohy. K buňce je možné zakoupit také několik rozšíření. První rozšíření je o strojové vidění, čili kameru a potřebné součásti k její obsluze. Další rozšíření je o dopravník. [4]

KUKA ready2_educate

Společnost KUKA nabízí edukační buňku, jejíž základní parametry jsou:

- Robot KR 4 AGILUS – Dosah 600 mm, užitečné zatížení 4 kg
- Řídící jednotku KR C5 Micro
- SmartPad
- Paralelní gripper
- Hmotnost 390 kg
- Rozměry 1860 x 1200 x 900 mm
- Software KUKA.Sim pro offline programování

Dále KUKA nabízí balíčky, kterými si může zákazník přiojednat dodatečné vybavení. Jedním balíčkem jsou pomůcky pro programování a tvoření robotických úloh, jako například kostky pro pick and place operace, papír a fixa pro simulování svářecích operací a další pomůcky pro programování pohybu robotu. V dalším balíčku si lze přiojednat PLC rozšíření, které nabízí licenci do programování TIAportal, digitální I/Os a rozhraní pro Siemens HMI. V dalším balíčku si lze přiojednat rozšíření pro strojové vidění. V tomto balíčku se nachází pevně umístěná kamera, pomůcky pro kalibraci a nastavení kamery, ještě jeden vakuový gripper, čočky a autofokus, osvětlení a kabely pro připojení. [5], [6]

Yaskawa TeachMe Cell

Společnost Yaskawa nabízí dva typy edukačních buněk. Lépe vybavená varianta se nazývá TeachMe Cell a nabízí:

- Robot MOTOMAN GP8 – dosah až 727 mm a užitečné zatížení až 8 kg
- Rozměry 1770 x 1130 x 778 mm
- Hmotnost 412 kg
- Řídící jednotku YRC1000
- Výběr mezi klasickým teach pendantem a Smart pendantem
- Software MotoSim VRC Offline Simulation
- Bezpečnostní skener
- Paralelní gripper Schunk

Součástí buňky jsou bloky a palety pro pick and place operace. Yaskawa nabízí pro použití v edukační buňce také robot HC10. Žádná z variant edukačních buněk Yaskawa však zatím nenabízí strojové vidění. [7], [8]

3.2 Programování robotu

Programování robotu je činnost, při které jsou vytvářeny instrukce pro daný robot. Instrukce jsou zapsány v kódu a definují prováděné akce robotu. Mezi prováděné akce se řadí například pohyb robotu v kartézských souřadnicích nebo v jeho kloubech, ovládání gripperu, ovládání vstupů a výstupů nebo akce související se strojovým viděním nebo práce s hlášením

o chybách. Kolaborativní roboty nabízí také možnost ovládání silových či momentových senzorů. Robot je možné programovat dvěma způsoby, online a offline. [25]

3.2.1 Online programování

Online programováním se rozumí programování robotu způsobem, kdy je fyzický robot přímo programován nejčastěji skrze teach pendant. Takový způsob programování umožňuje okamžitý test na fyzickém robotu, monitorovat jeho chování, a lze tak provádět změny okamžitě. Velkou nevýhodou však je, že při vytváření a testování programu při online programování není robot v provozu a dlouhé pauzy ve výrobě jsou velice neekonomické. [25]

3.2.2 Offline programování

Problém se zastavením provozu z důvodu programování se snaží řešit offline programování. Celý proces vytváření programu probíhá na počítači v softwaru k tomu určeném. V softwaru je vytvořen 3D model robotu a na něm je vytvářen program. 3D model robotu simuluje vlastnosti reálného robotu, takže vytvořený program je snadno převaditelný na fyzický robot a zde spuštěn. Tímto způsobem je možné vytvářet robotické programy, aniž by musel být fyzický robot z provozu odstaven. Virtuálních modelů jednoho fyzického robotu může být zároveň neomezené množství, a tak může více programátorů ve stejnou chvíli vytvářet robotické programy pro robot, který je v tom čase stále zapojen do provozu. [25]

Offline programování je možné rozdělit podle programovacího rozhraní softwaru. Některé softwary umožňují programování v grafickém uživatelském rozhraní. Programování v takovém softwaru může působit jako jednodušší možnost, kde je program tvořen skládáním bloků příkazů za sebe. Programování v jiných softwarech však funguje na bázi psaní textu, využívající programovacích jazyků jako C++ nebo Python. [25]

3.3 Virtuální zprovoznění

Virtuální zprovoznění se dá označit za nadstavbu offline programování. Nejedná se pouze o vytváření programu, ale o simulaci celé výrobní buňky nebo výrobního systému. Při virtuálním zprovoznění jsou řešeny vztahy s ostatními prvky systému, jako například s PLC, dopravníky nebo různými senzory. Virtuální zprovoznění je využíváno při tvorbě výrobních buněk a linek. Protože lze díky virtuálnímu zprovoznění simulovat vztahy mezi všemi členy systému, je možné připravit a testovat výrobní buňku nebo linku ještě před samotnou instalací. Většina chyb v návrhu buňky je tak odstraněna bez testování v reálném prostředí, což šetří velké množství času i peněz. [26]

3.3.1 Způsoby virtuálního zprovoznění

Virtuální zprovoznění lze rozdělit podle jeho principu do jednotlivých stupňů:

- **Software-in-the-loop**
Simulace modelu zařízení v reálném čase na simulovaném virtuálním řídicím systému.
- **Hardware-in-the-loop**
Simulace běží na reálném řídicím systému v reálném čase.
- **Reality-in-the-loop**
Simulace dostává data z reálného systému. [27]

3.3.2 Software pro virtuální zprovoznění

Pro virtuální zprovoznění robotů a robotických buněk existuje celá řada softwarů, které lze rozdělit podle různých kritérií. Základním dělením je podle výrobce daného softwaru. Nejvýznamnější výrobci robotů vyvíjí vlastní software pro virtuální zprovoznění vlastních robotů. Software přímo od výrobce robotu zajišťuje autentickou simulaci nabízející originální řídicí systém. Díky tomu se simulace v softwaru a program na reálném robotu liší pouze minimálně. Příkladem může být Roboguide od Fanucu, Robotstudio od ABB, KUKA.Sim od Kuky nebo MotoSim od Yaskawy. Druhou možností je pak software vytvořen třetí stranou. Výhodou použití softwaru třetích stran je jejich univerzálnost, při simulaci lze použít roboty většiny výrobců a je možné je kombinovat i v jediné simulaci. Příkladem těchto softwarů je RoboDK, Process Simulate nebo Visual Components.

Roboguide

Roboguide je software vyvinutý japonskou firmou Fanuc pro práci s jejich roboty. V knihovně softwaru se nachází všechny roboty od tohoto výrobce včetně jejich řídicích systémů, což zaručuje přesnou a autentickou simulaci. Do simulace je možné nahrávat CAD soubory a vytvářet tak přesné kopie výrobní buňky. Software slibuje dokonce věrnou simulaci kabeláže robotu. Funkce Autoplace dokáže zase vypočítat ideální pozici pro odložení součásti s ohledem na výrobní čas. Roboguide nabízí nadstavbové balíčky funkcí například pro srážení hran, svařování nebo lakování. [9]

RobotStudio

Software RobotStudio vyvinula švédsko-švýcarská firma ABB pro virtuální zprovoznění robotů ABB. Jedná se o nejpoužívanější software pro simulaci robotických pracovišť. RobotStudio disponuje obsáhlou knihovnou robotů z portfolia ABB s vlastním řídicím systémem. Samozřejmostí je také možnost nahrávání CAD souborů do simulace. RobotStudio Cloud umožňuje současnou spolupráci při virtuálním zprovoznění robotických buněk s lidmi po celém světě. [10]

KUKA.Sim

Německá společnost KUKA vyvinula pro virtuální zprovoznění vlastních robotů software KUKA.Sim. Knihovna KUKA.Sim disponuje všemi roboty od značky KUKA s vlastním řídicím systémem, které lze doplnit importem CAD souborů pro vytvoření autentické simulace buňky. Nadstavbové balíčky softwaru umožňují například simulaci sváření nebo modelování součástí přímo v softwaru. [11]

MotoSim

Software MotoSim byl vyvinut japonskou firmou Yaskawa pro možnost virtuálního zprovoznění robotů jejich výroby. V knihovně softwaru se nachází všechny roboty výrobce a jejich řídicí systém. Programování probíhá v jazyce INFORM. Do simulace je možné vložit CAD soubory. V softwaru je možné vytvářet virtuální zprovoznění pro obloukové i bodové svařování, dělení materiálu, lakování či manipulaci s materiálem. [12]

RoboDK

Kanadský software RoboDK je již z řady softwarů třetích stran. Knihovna softwaru disponuje počtem přes 800 robotů od přes 40 výrobců, včetně všech nejznámějších. Finální program je možné exportovat do jednoho z formátů, který je podporován řídicí jednotkou daného fyzického robotu. V softwaru lze jednoduše vytvářet virtuální zprovoznění pro

obrábění, svařování, dělení materiálu, lakování, srážení hran nebo kontrolu kvality. Společnost nabízí okleštěnou webovou verzi softwaru zcela zdarma. [13]

Process Simulate

Software Process Simulate je vyvinut německou firmou Siemens a slouží k vytváření virtuálního zprovoznění robotických systémů. Simulace pracuje s roboty obsaženými v knihovně softwaru, umožňuje import CAD souborů a nabízí také možnost simulace lidských operátorů. V kombinaci se simulací řady robotických operací tak lze vytvářet detailní a propracované simulace robotických systémů. [14]

Visual Components

Software Visual Components pocházející z Finska je populární možností pro virtuální zprovoznění převážně v severských zemích. Knihovna softwaru nabízí přes 2700 předdefinovaných komponent. K nim je možné importovat další CAD soubory pro vytváření simulace. Software je kompatibilní s řídicími jednotkami všech větších výrobců robotů. Propojením s řídicí jednotkou robotu lze dosáhnout přesnějších výsledků simulace. [15]

3.4 Strojové vidění

Strojovým viděním je nazývána technologie zachycování, analyzování a vyhodnocování informací z obrázků či videí. Použití kamer či dalších zařízení zachycujících obraz v kombinaci s algoritmy zpracovávající obraz umožňují řídicí jednotce s nadsázkou „vidět“ skrze kameru. Cílem strojového vidění je vnímat daný obraz tak, jako by ho vnímal pracovník vykonávající daný úkol, a využít ono vnímání obrazu pro splnění daného úkolu. Strojové vidění má široké využití, lze jej použít například při:

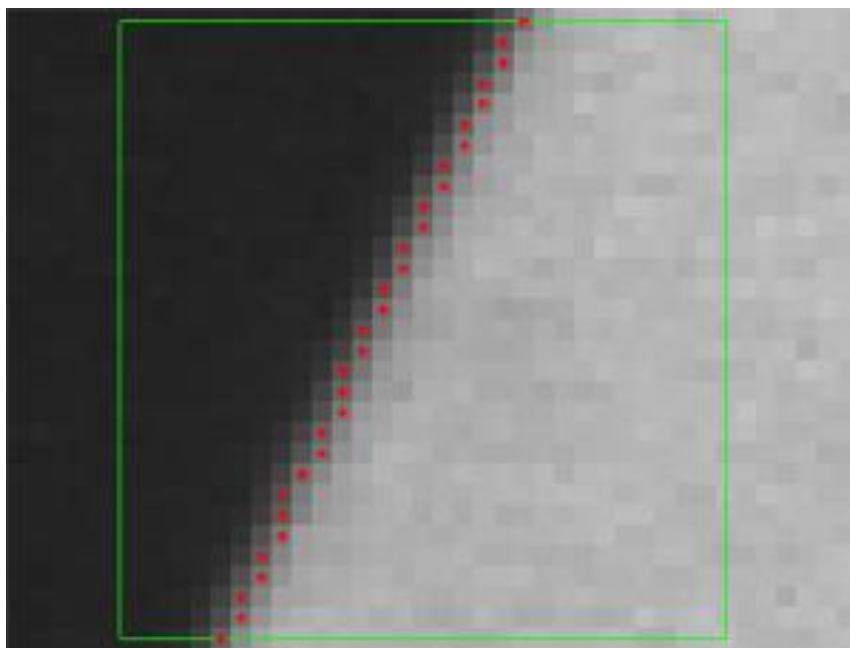
- Rozpoznání a lokalizování součástí
- Třídění součástí
- Kontrole kvality výrobku
- Měření
- Čtení čárových a jiných kódů

Pro správnou funkci strojového vidění je zapotřebí minimálně kamera zachytávající obraz osazená objektivem a řídicí jednotku, na které běží software s algoritmy zodpovědnými za zpracování obrazu a vyhodnocení. Strojové vidění je citlivé na světelné podmínky, proto je v mnoha aplikacích nutné použít i přídavné osvětlení pro přisvětlení scény. [16]

3.4.1 Způsob lokalizace součástí

Spolehlivým a rychlým způsobem lokalizace součástí je hledání jejich hran. Způsob je vhodný jak pro lokalizaci, tak i pro měření součástí. Hrany jsou vyhledávány výpočtem rozdílu velikosti jasu mezi pixelem a jednotlivými pixely v jeho blízkém okolí. Nejprve je zaznamenána hodnota jasu každého pixelu. Poté jsou porovnány hodnoty vzájemně si blízkých pixelů. Pokud je zaznamenaný rozdíl jasu vyšší než předem stanovená hodnota, je mezi nimi nalezena hrana součástí. [17]

Velkou výhodou detekce hran je možnost přesnosti více než pouze na jeden pixel. Ne vždy musí být hrana jednoznačně viditelná, jas na pixelech může klesat postupně v rozmezí několika pixelů, jako je vidět na obr 4). Pozice hrany je pak určena derivací křivky hodnot jasu na pixelech. V pozici nejvyšší hodnoty derivace je pak určena pozice hrany. [17]



Obr. 4) Detekovaná hrana [17]

3.4.2 Kamera

Kamerou se rozumí zařízení, které je schopné zachycení následného uložení či přenesení snímku. Světlo vstupuje do uzavřeného prostoru skrze soustavu čoček a dopadá na světločivný snímač. Doba, jak dlouho světlo vstupuje do kamery, určuje závěrka. Tento čas se nazývá doba expozice. [18]

Průmyslové kamery využívané pro aplikaci při strojovém vidění lze rozdělit do dvou kategorií podle tvorby obrazu na plošnou a řádkovou, a podle typu snímače na CCD a CMOS.

Plošná kamera

Plošné kamery jsou při strojovém vidění používány častěji, protože nabízí řadu výhod. Plošné kamery jsou levnější a jsou jednodušší na nastavení. Plošné kamery snímají 2D plochu a výstupem je 2D obraz. [19]

Řádková kamera

Řádková kamera pracuje pouze v jedné dimenzi a vytváří řadu pixelů v jednom směru, kdežto v druhém směru je poměrově mnohem nižší počet pixelů, často dokonce pouze jeden pixel. Řádkové kamery mají oproti plošným kamerám množství nevýhod, a tak jsou používány převážně ve specifických aplikacích. Řádkové kamery disponují oproti plošným kamerám vyšším rozlišením. Použití řádkové kamery je vhodné například nad dopravníkem, kdy je při pohybu dopravníku postupně zaznamenáván obraz řádek po řádku a následně skládán dohromady. [19]

CCD (Charge-Coupled Device)

Tento typ snímače převádí světlo na elektrické signály, které jsou dále zpracovány, a je z nich vytvořen digitální obraz. Snímač je tvořen pasivními světločivnými pixely, které zachycují fotony. Fotony jsou převedeny na náboj velikostně úměrný intenzitě světla. CCD je efektivní i při špatných světelných podmínkách, snímač je velice citlivý. Rychlost vytváření snímků je však nízká a také jsou tyto snímače dražší. [20]

CMOS (Complementary metal-oxide semiconductor)

CMOS také zachytává fotony a převádí je na elektrický signál. Skládá se však z pixelů obsahujících aktivní senzory, které přímo převádějí světlo na elektrický signál. Tento snímač dosahuje vyšší rychlosti vytváření snímků. Díky přímému převodu jsou snímače tohoto typu levnější a úspornější. Snímače CMOS jsou v aplikaci strojového vidění častěji využívanou variantou. [20]

Uzávěrka

Uzávěrka určuje, kolik světla projde do kamery při pořízení snímku. Množství světla je regulováno otevřením a následným uzavřením uzávěrky na stanovený čas. Právě tímto časem je regulováno množství světla. Uzávěrka může být řízena buď mechanicky, nebo elektronicky. Dále se uzávěrka dělí na rolovací a globální. U rolovací uzávěrky jsou pixely světlu vystaveny řada po řadě, kdy však každý pixel je světlu vystaven na stejnou dobu. Pouze mají jednotlivé řady pixelů zpoždění vůči řadě sousední. To může působit potíže při zachycení obrazu součásti v pohybu, obraz může být kvůli tomu rozmazaný. Globální uzávěrka je otevřena i uzavřena pro všechny pixely v jeden okamžik, čímž zaniká riziko rozmazání snímku. [19]

Barevnost obrazu

Snímaný obraz může být černobílý nebo barevný. V černobílém obrazu má každý pixel nějaký stupeň šedosti, vyjádřený číslem od 0 po 255 v případě osmibitového rozlišení. Číslo 0 reprezentuje černou barvu, číslo 255 reprezentuje barvu bílou. Černobílé kamery mohou být i vyššího než osmibitového rozlišení. V takovém případě kamera rozlišuje větší množství stupňů šedé. [19]

Barevný obraz je zachycen za použití Bayerova filtru. Filtr se skládá z malých sekcí barevných filtrů uspořádaných do šachovnice. V šachovnici je poměr barev 2:1:1 (zelená:červená:modrá). Filtr je umístěn přes světločivné pixely a do každého pixelu tak projde pouze světlo o barvě daného filtru. Barevné kamery je vhodné ve strojovém vidění používat pouze tehdy, má-li jejich použití praktický význam. Pokud použití barevné kamery praktický význam nemá, pouze je tím strojové vidění zpomaleno, protože systém zpracovává třikrát více dat, pro každou barvu jednou. [19]

Doba expozice

Jedná se o čas, po který je otevřena uzávěrka kamery, aby mohlo dovnitř proniknout světlo. Doba expozice je kritický údaj pro správnou funkci strojového vidění. Nastavení doby expozice výrazně ovlivňuje kvalitu zachyceného snímku. Čím delší je doba expozice, tím světlejší je snímek. Delší doba expozice ale zároveň znamená i více nežádoucího šumu. Může vést také k rozmazání snímku, pokud je snímaný objekt v pohybu. Samozřejmě též prodlužuje dobu vytváření snímku. Je důležité, aby byla doba expozice nastavena správně. V případě extrémních hodnot, ať už nízkých či vysokých, bude výsledný snímek pro strojové vidění nepoužitelný, protože na snímku nebude dostatek kontrastu mezi objektem a pozadím. [16]

3.4.3 Osvětlení

Aby mohlo strojové vidění správně a konzistentně úspěšně fungovat, je potřeba použít dodatečné osvětlení. Výběr vhodného osvětlení je často experimentální. Funkcí osvětlení je co možná nejvíce zvýšit kontrast mezi součástí a podložkou. Správně zvolené osvětlení dokáže řádově zvýšit úspěšnost a opakovatelnost strojového vidění. Nejčastějším zdrojem světla jsou v dnešní době LED diody, používají se však také laserová, xenonová nebo halogenová osvětlení. [16]

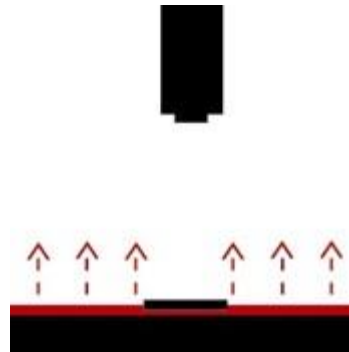
Důležitými aspekty osvětlení jsou:

- Směr světla – jeden paprsek světla může kolem součásti vytvářet nežádoucí stíny, které zkreslují výsledky. Z toho důvodu se často používají světla působící z více směrů.
- Světelné spektrum – Na výsledný kontrast může mít vliv také infračervené či ultrafialové světlo. Světelné spektrum má větší vliv v případě barevného strojového vidění.
- Polarizace – Zvyšuje kontrast mezi součásti a podložkou zejména u povrchů, které odráží světlo, jako kovy nebo sklo. [16]

Základní dělení osvětlení je podle jeho polohy na backlight a frontlight.

Backlight

Backlight je panel generující světlo umístěný přímo proti kameře. Součást se nachází mezi světelným panelem a kamerou a tím je vytvářen kontrast. Často bývá součást na panel přímo položena. Součást na snímku tvoří temnou siluetu oproti světlému pozadí. Funkce je znázorněna na obr. 5). Nejčastějším využitím je při kontrole kvality součásti nebo měření. [21]



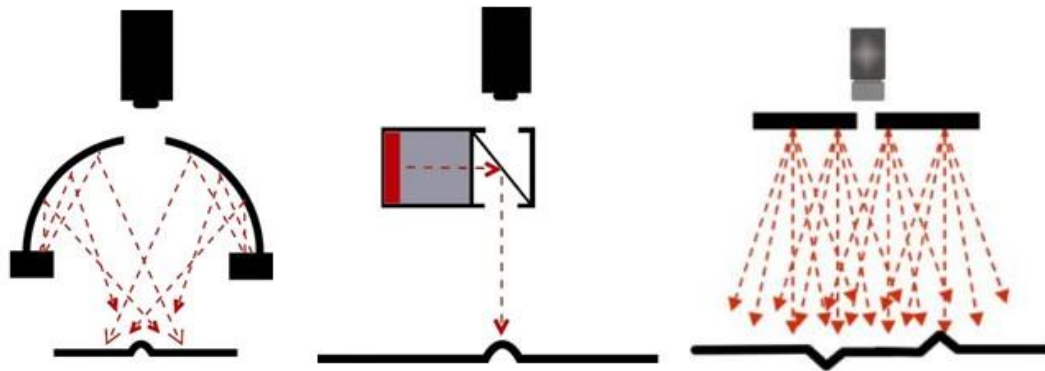
Obr. 5) Backlight [21]

Frontlight

Frontlight osvětlení působí na součást ze stejného směru, ze kterého je snímán kamerou. Frontlight osvětlení je více typů a můžeme je rozdělit na:

Rozptýlené osvětlení (Plné světelné pole)

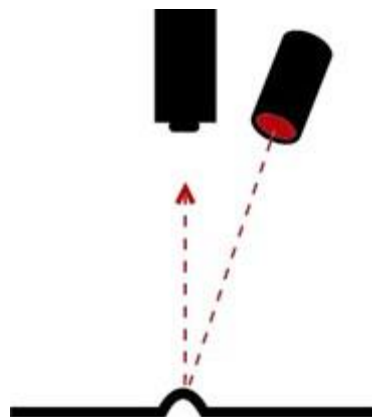
Světlo působí z mnoha směrů. Nejčastějšími typy jsou kupolové, koaxiální a ploché osvětlení. Jejich princip lze vidět na obr. 6). Kupolové osvětlení je vhodné pro aplikaci na součásti se zakřiveným povrchem. Koaxiální je vhodné pro relativně ploché součásti, na kterých dokáže zvýraznit texturu a topografické prvky. Rozptýlená osvětlení jsou nejefektivnější, když jsou blízko nasvětlované součásti. [21]



Obr. 6) Rozptýlené osvětlení kupolové, koaxiální a ploché [21]

Směrové osvětlení (Částečné světelné pole)

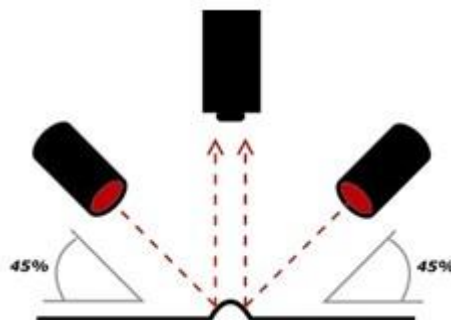
Jedná se o nejčastěji používaný typ osvětlení ve strojovém vidění i v běžném životě. Tímto typem osvětlením se rozumí také sluneční záření. Směrové osvětlení je velice efektivní. Oproti rozptýlenému osvětlení se liší tím, že zdrojem světla je bod, ze kterého vychází světlo určitým směrem. Jeho princip je znázorněn na obr. 7). Osvětlení vytváří dobrý kontrast a zvýrazňuje topografii součástí. Není však vhodné pro lesklé součásti při použití koaxiálně. Na součásti se objeví světelné odrazy a strojové vidění přestává být efektivní. [21]



Obr. 7) Směrové osvětlení [21]

Osvětlení temné pole

Osvětlení není přímé, ale pod úhlem. Tím jsou nasvíceny převážně hrany součástí. Využívá se například při kontrole kvality. Osvětlení je znázorněno na obr. 8). [21]



Obr. 8) Temné pole [21]

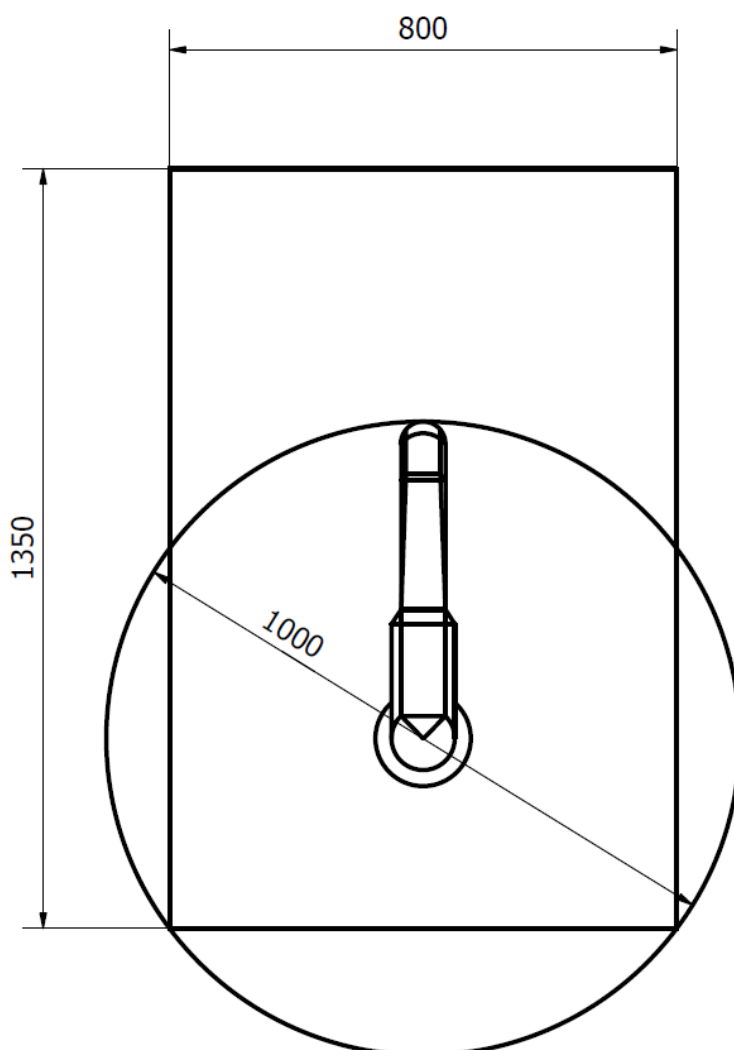
4 NÁVRH BUŇKY

Pro návrh robotické buňky musí být respektovány omezení a nároky vycházející z prostoru, ve kterém se buňka nachází, ale také z úlohy, kterou bude buňka vykonávat. Obě robotické buňky budou umístěny v robotické laboratoři přístupné studentům. Tato místnost tak vytváří omezení na rozměry robotické buňky.

Maximální povolená šířka buňky je 800 mm z důvodu stěhování buňky. Buňka musí být schopna projít standardními dveřmi, aby s ní bylo možné manipulovat. Jako maximální povolená délka buňky byl určen rozměr 1350 mm. S buňkami bude manipulováno nejen po jedné budově, ale bude i převážena do jiných míst. Proto je potřeba zvolit kompaktnější rozměr.

Pro správné vykonání úlohy je třeba také určitý dosah robotu. Jako minimální dosah robotu pro úspěšné vytvoření demonstračního programu se jeví 500 mm. Protože je demonstrační program zaměřen na 2D strojové vidění, součástí robotické buňky musí být také 2D kamera.

Na obr. 9) lze vidět schéma robotické buňky, na kterém jsou znázorněny maximální rozměry buňky a minimální dosah robotu.



Obr. 9) Návrh robotické buňky

5 SYSTÉMOVÝ ROZBOR – PŘÍPADOVÁ STUDIE

5.1 Problémová situace

Tampere University vlastní velkou škálu průmyslových robotů, které často disponují různými nadstavbami použitelnými při výrobě. Na univerzitu pak jezdí zástupci firem z celého Finska, aby se o těchto technologiích dozvěděli více jak teoreticky, tak i praktickou ukázkou. Já jsem byl proto pověřen, abych vytvořil právě takový demonstrační program pro dva z jejich robotů. Programy by měly demonstrovat hlavně výhody a schopnosti 2D strojového vidění. Oba dva roboty jsou vybaveny 2D kamerou, jeden z nich fixně umístěnou na rámu robotu a druhý má kameru upevněnou na zápěstí robotu.

5.2 Formulace problému

Vytvoření dvou demonstračních programů 2D strojového vidění, virtuální zprovoznění dvou robotů a následné ověření na jejich fyzických protějšcích.

5.3 Formulace cílů a řešení

Cíle této diplomové práce jsou:

- Rešerše dané problematiky.
- Návrh layoutu buňky.
- Systémový rozbor.
- 3D konceptuální model.
- Virtuální zprovoznění.
- Simulační ověření.

5.4 Popis řešené soustavy

Základním prvkem každé robotické buňky je robot, který je řízen řídicí jednotkou a ovládán skrze teach pendant. Pro aplikaci strojového vidění je nutná i kamera, která je řízena taktéž řídicí jednotkou. Strojové vidění je ovládáno také skrze teach pendant, kde se zároveň dají zobrazit i výsledky strojového vidění. Pro pick and place operace je potřeba mít na robot připojený gripper, který může být několika typů. Pohyby robotu a gripperu a funkce kamery jsou řízeny instrukcemi programu z řídicí jednotky.

5.5 Systém podstatných veličin

S0 – Okolí objektů

Obě robotické buňky jsou umístěny vevnitř, tudíž teplota se dá považovat za stálou. V průběhu dne se ale v místnosti mění světelné podmínky v závislosti na aktuální hodině, počtu a poloze rozsvícených světel v místnosti a okolo stojícími lidmi a předměty, kteří mohou vytvářet stíny. Všechny tyto proměnné zásadně ovlivňují výsledek strojového vidění. Pro virtuální zprovoznění je však uvažováno s ideálními světelnými podmínkami.

S1 – Geometrie a topologie objektů

Objekty jsou trojrozměrné, každý má svůj 3D model, který popisuje jejich rozměry a tvarové prvky.

S2 – Vazby objektů s okolím

Robotické buňky jsou umístěny v místnosti, kam mají přístup pouze proškolení lidé, kteří budou dbát bezpečnostních zásad.

S3 – Aktivace objektů okolím

Robotické buňky ovládá a programy spouští pověřená osoba skrze teach pendant.

S4 – Působení okolí na objekty

Prázdná množina.

S5 – Oborové vlastnosti struktury objektů

Prázdná množina.

S6 – Popis procesů a stavů objektů

Robotická pracoviště provedou po spuštění obsluhou demonstrační program podle vytvořených programů. Programy sestávají z pohybu robotu, uchopení a položení dílů a pořízení a zpracování obrazu pracovního prostoru.

S7 – Projevy objektu

Pokud je program na teach pendantu spuštěn a neobsahuje žádné chyby, bude proveden demonstrační program.

S8 – Důsledky projevů objektů na okolí či na samy objekty

Pokud byl program správně spuštěn a nebyl přerušen vnějšími vlivy, byl demonstrační program dokončen a je možné s robotickou buňkou dále pracovat.

6 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

V této části diplomové práce jsou popsány kroky podniknuté k vytvoření virtuálního zprovoznění. Jako první byly určeny roboty, které budou v této diplomové práci používány. Roboty byly vybrány z těch, které byly v Tampere University k dispozici a vyhovovaly pro danou aplikaci. Dalším krokem je vymodelování všech potřebných součástí robotických buněk. Následujícím krokem je výpočet gripperů pro danou operaci. Poté je možné již vytvořit program pro robota v programu Roboguide a virtuálně jej zprovoznit. Posledním krokem je ověření virtuálního zprovoznění spuštěním na reálném robotu a doladění všech problémů a nepřesností.

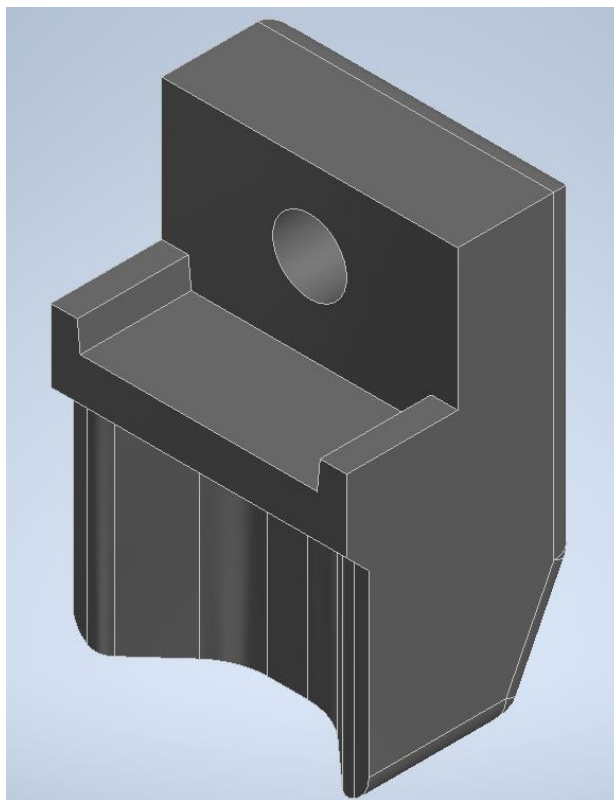
6.1 Návrh gripperu

Pro zajištění správné uchopovací funkce je třeba provést výpočet správného gripperu pro použití v dané aplikaci.

6.1.1 ER-4iA

Robot ER-4iA je používán v Tampere University již delší dobu a je vybaven gripperem s prsty. Gripper je od firmy Shunk, model EGP 40-N-N-B. Jedná se o elektrický gripper pro menší součástky se zdvihem 6 mm na každé čelisti. Jeho maximální úchopová síla je 140 N a jeho hmotnost je 320 g. [22]

Prsty připevněné na gripper byly vytvořeny původně pro jinou aplikaci, jsou však vhodné i pro použití v tomto demonstračním programu. Tvaru prstů musel být uzpůsoben tvar manipulované součásti, aby byla uchopitelná. Návrh uchopované součásti je popsán dále v kapitole 6.2. Prsty jsou tištěné na 3D tiskárně z materiálu PLA. Model prstu lze vidět na obr. 10).



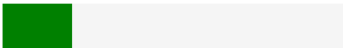



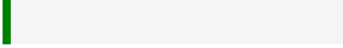
Obr. 10) Prst gripperu pro robot ER-4iA

Pro ověření, zdali je tento gripper dostatečný pro naši žádanou aplikaci, byl použit konfigurátor přímo od firmy Schunk. Písmena L a T mají velice srovnatelnou hmotnost, obě váží jen lehce pod 30 gramů (L váží 29,85 g a T 29,58 g). Písmeno L ale bude vytvářet větší moment na gripper z toho důvodu, že jeho těžiště se nachází ve větší vzdálenosti od úchopového bodu. Proto jsem pro následující kalkulace použil pouze písmeno L.

Prvním krokem je určení bezpečnostního faktoru. Běžně se volí z rozmezí 1 až 6. Pro vyšší bezpečnost byla zvolena hodnota 5. Do konfigurátoru byly zadány parametry jako poloha bodu vyvíjené síly vůči gripperu, poloha těžiště písmene L vůči gripperu a hmotnost písmene L. Poloha těžiště byla získána z modelu v Inventoru a hmotnost přímo ze softwaru PrusaSlicer, protože se jedná o tištěnou součást. V dalším kroku byly zadány parametry prstů gripperu. Konkrétně jejich hmotnost a poloha těžiště, které byly získány stejným způsobem, jako údaje písmene. V dalším bodě byly zadány parametry styku prstů a písmene L, a to plocha kontaktního povrchu, délka mezi prsty v zavřené poloze a hodnota koeficientu tření v kontaktním bodě. [23]

V dalším kroku je potřeba zadat procesní síly. Ty ale nejsou v naší aplikaci vytvářeny, a proto byl tento krok přeskočen. Na uchopení bude mít ale vliv gravitační zrychlení. Jako bezpečnější varianta bylo zvoleno gravitační zrychlení působící ve všech třech směrech, v případě manipulování s písmenem v jiné než vodorovné poloze. Dále je potřeba počítat také se zrychlením gripperu. V každé ose bylo zvoleno zrychlení $2,5 \text{ m/s}^2$.

Konfigurátor od Schunku doporučil velké množství gripperů, které lze pro aplikaci použít. Zvolen byl gripper EGP 40-N-N-B, který je na robotu připevněn. Výsledné vypočítané hodnoty jsou vidět na obr. 11). Z výsledků vyplývá, že je gripper pro tuto aplikaci dostatečný. Dokonce je z výsledků patrné, že gripper je pro tuto konkrétní aplikaci až příliš silný a bylo by možné použít gripper menší a slabší, jako například EGP 25-N-N-B, jehož výsledky byly pro danou aplikaci vhodnější. Robot ale není určen pouze pro jednu aplikaci, a proto i gripper na něj připevněný musí být univerzální. Robot tak spolehlivě může manipulovat i s těžšími součástmi.

		%	Vypočítané	Jmenovité	Bezpečnostní faktor
Uchopovací síla		20.2 %	27.6 N	136.7 N	5.0
Fz		0.8 %	1.3 N	170.0 N	5.0
Mx		0.0 %	0.0 Nm	1.5 Nm	5.0
My		5.0 %	0.1 Nm	2.0 Nm	5.0
Mz		2.5 %	0.1 Nm	4.0 Nm	5.0

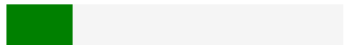
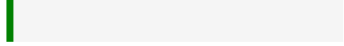
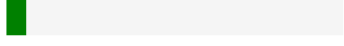
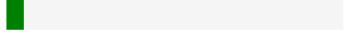
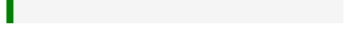
Obr. 11) Výsledné síly a momenty použitého gripperu EGP 40-N-N-B

6.1.2 CRX-10iA

Tento robot byl sice nově objednan, ale i on bude sloužit pro více projektů, tudíž i pro tento robot byl objednán gripper s univerzální nosností. Jedná se o elektrický gripper pro menší součásti, který má zdvih 10 mm na každé čelisti. Jeho maximální úchopová síla je 230 N a jeho hmotnost je 1,11 kg. Jde o kolaborativní gripper, tudíž aplikace na kolaborativní robot CRX-10iA je výhodná. [24]

Postup výpočtu byl stejný jako u předchozího gripperu. Bezpečnost byla určena 5, jako v předchozím případě. Obdobně jako v předchozím případě byla získána data také z Inventoru a PrusaSliceru. Zrychlení bylo zvoleno rovněž stejné, $2,5 \text{ m/s}^2$. Pouze součinitel tření byl nepatrně navýšen, protože prsty gripperu nejsou tištěné, ale jsou plastové s měkčeji vyvedenými stykovými plochami.

Z výpočtu konfigurátoru vyplývá, že gripper Co-act EGP-C 64-N-N-FCRXID je pro danou aplikaci vhodný, a proto byl zvolen. Ale stejně jako u předchozího robotu i v tomto případě platí, že je výrazně silnější, než by bylo potřeba, jak je patrné z obr. 12). Zároveň pro tuto konkrétní aplikaci není potřeba kolaborativní gripper, robot pracuje sám a obsluha pouze spustí program. Proto pokud by byl gripper volen pouze za účelem této práce, jako nejvhodnější se jeví gripper EGK 25-EC-N-B, který stále vyhovuje požadavkům, ale nemá zbytečně tak velké výkonnostní rezervy. Při použití nekolaborativního gripperu by bylo samozřejmě potřeba dbát zvýšenou pozornost na bezpečnost, hlavně při chodu robotu v kolaborativním režimu.

		%	Vypočítané	Jmenovité	Bezpečnostní faktor
Uchopovací síla		19.5 %	44.8 N	230.0 N	5.0
Fz		2.0 %	5.0 N	250.0 N	5.0
Mx		5.7 %	0.2 Nm	3.5 Nm	5.0
My		5.0 %	0.3 Nm	6.0 Nm	5.0
Mz		2.2 %	0.2 Nm	9.0 Nm	5.0

Obr. 12) Výsledné síly a momenty pro zvolený gripper Co-act EGP-C 64-N-N-FCRXID

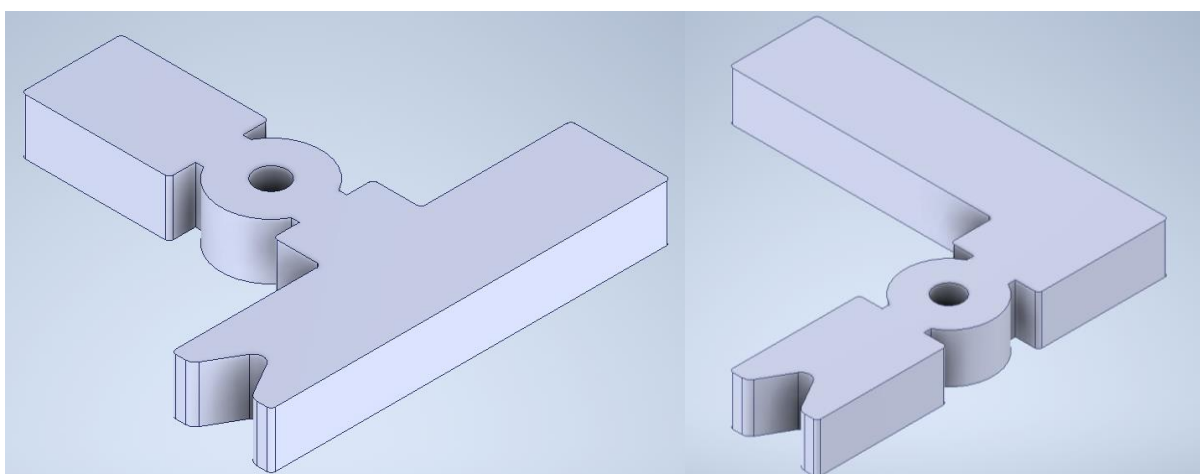
6.2 Manipulované součásti

Design manipulovaných součástí byl navržen s ohledem na limity 2D strojového vidění. Jedná se o 2D kameru, tudíž výška součásti by měla být co nejméně proměnlivá. Pro diplomovou práci jsem všechny součásti vymodeloval zcela ploché, abych minimalizoval nepřesnosti v lokalizaci daných objektů.

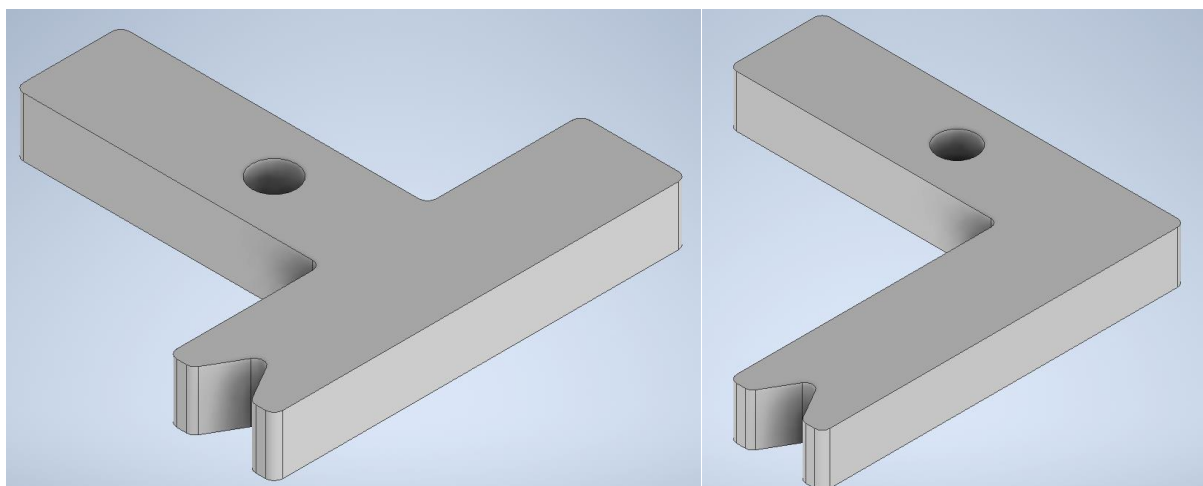
Pro každou robotickou buňku byla vytvořena sada dvou písmen, L a T. Tato dvě písmena mají jednoduché přímé tvary, zaujímají relativně stejný objem a je mezi nimi mírná vzájemná podobnost. Celkový vzhled písmen byl navržen tak, aby obsahoval rovné i kulaté čáry, aby bylo strojové vidění řádně otestováno. Aby byl objekt rozpoznán, musí mít kontrast s pozadím. Proto byla písmena navržena pouze v jedné barvě. Jednobarevná písmena jsou zároveň jednodušší na výrobu. Rozměry úchopových bodů písmen byly navrženy podle vzdálenosti mezi prsty zavřeného gripperu a ostatní rozměry písmen byly navrženy podle velikosti pracovního prostoru a také podle vzhledu, aby tvar připomínal dané písmeno.

Na každé písmeno byly přidány dva tvarové prvky. Prvním prvkem je vykrojení ve tvaru písmene V na jednom z konců. To proto, aby bylo zajištěno, že robot pozná, jestli písmeno leží na „rubu“ nebo na „líci“. Druhým tvarovým prvkem je díra uprostřed uchopovacího bodu písmene. Její funkcí je zvýšit přesnost lokalizace v bodě úchopu.

Písmena pro menší robot ER-4iA jsou také menší, ale mají i jeden tvarový prvek navíc, oproti písmenům pro větší CRX-10iA. Úchopový bod je kulatý, protože prsty gripperu na robotu ER-4iA mají uchopovací plochu ve tvaru kruhu. Rohy všech písmen jsou zaoblené, abych předešel zraněním způsobeným při práci s robotem. Všechna písmena byla vytištěna na 3D tiskárně z materiálu PLA. Modely písmen lze vidět na obr. 13) a obr. 14).



Obr. 13) a) Písmeno T pro robot ER-4iA, b) Písmeno L pro robot ER-4iA



Obr. 14) a) Písmeno T pro robot CRX-10iA, b) Písmeno L pro robot CRX-10iA

6.3 Návrh layoutu buňky

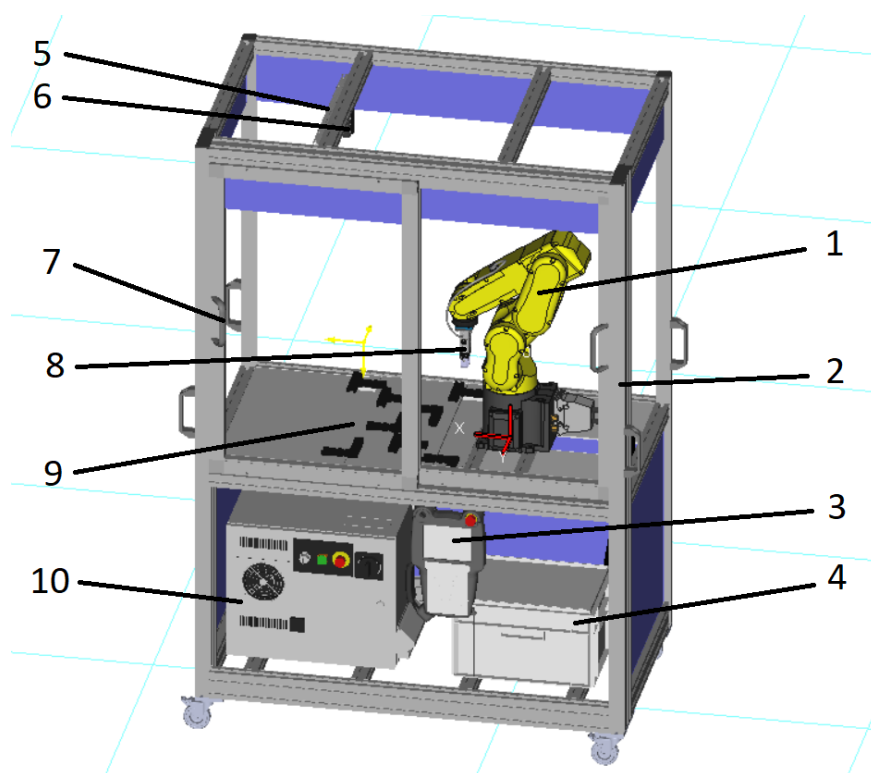
Při tvorbě layoutu byly respektovány všechny požadavky ze strany Tampere University a zároveň fyzické limitace prostředí, ve kterém se roboty nacházejí.

6.3.1 ER-4iA

Robot je umístěn v robotické laboratoři Tampere University s ostatními roboty, kde je studenty při výuce využíván k různým projektům. Tato skutečnost byla limitující v možnostech provádění různých změn v buňce. Výuková robotická buňka ale obsahuje všechny důležité součásti, které jsou pro diplomovou práci potřeba, proto nebylo potřeba velké množství změn. Celá operace se odehrává na pracovním stole a pouze jedním gripperem. Kamera je součástí robotické buňky. Součástí robotické buňky je také ochranný rám, tudíž není třeba přidávat bezpečnostní prvky. Na robotickou buňku bylo umístěno dodatečné LED světlo. Proces výběru a umístění světla je detailněji popsán v kapitole 6.4 Strojové vidění.

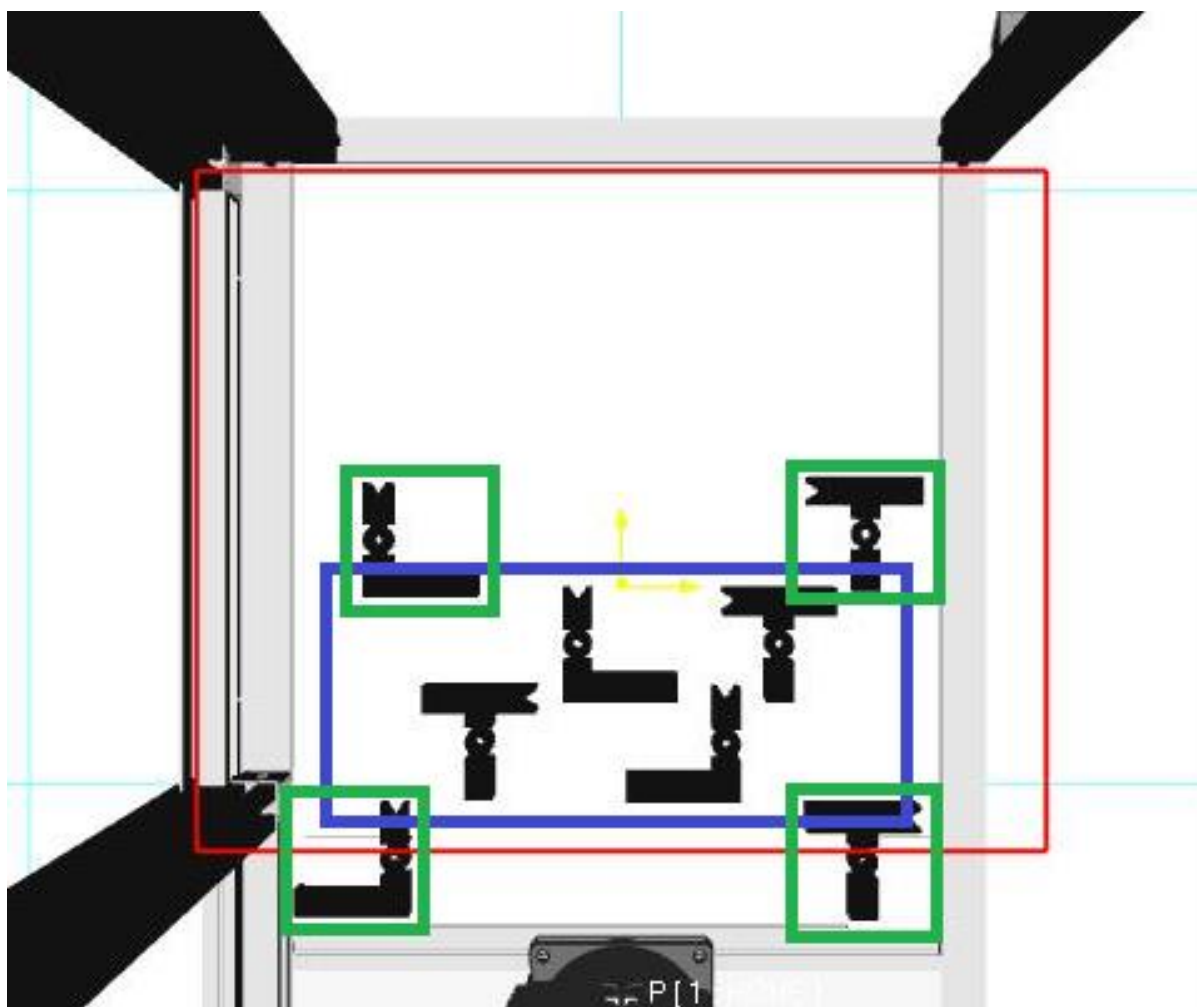
Robotická buňka ER-4iA je vyobrazena na obr. 15). Robotická buňka se skládá z několika částí:

- 1) Robot ER-4iA, který vykonává daný demonstrační program
- 2) ochranný rám robotu
- 3) teach pendant pro ovládání robotu
- 4) úložný prostor pro odkládání součástí
- 5) LED světlo připevněné na rámu
- 6) 2D kamera připevněná na rámu
- 7) ochranné posuvné dveře do pracovního prostoru robota
- 8) Elektrický gripper a úchopové prsty
- 9) pracovní prostor robota, kde je demonstrační program prováděn
- 10) řídicí jednotka buňky



Obr. 15) Popis robotické buňky ER-4iA

Na obr. 16) lze vidět pohled na pracovní plochu robotické buňky. Pohled je přímo z pozice kamery. Červeným obdélníkem je vyznačeno zorné pole kamery při její současné konfiguraci. Kamera tak zabírá celou pracovní plochu. Velikost plochy pro demonstrační program tak není limitován vlastnostmi kamery. Je však limitován dosahem robotu, který nedokáže ve vzdálenější polovině pracovní plochy operovat. S tímto vědomím tak byly určeny body, do kterých bude robot nalezená písmena odkládat. Místa pro odložení nalezených písmen jsou vyznačena zelenými čtverci. Plocha mezi těmito body je tedy považována za operační plochu robota pro demonstrační program. Plocha pro vyhledávání součástí proto byla zredukována na plochu vyznačenou modrým obdélníkem. Vyhledávání pouze v potřebné oblasti urychlí vyhodnocování výsledků strojového vidění.



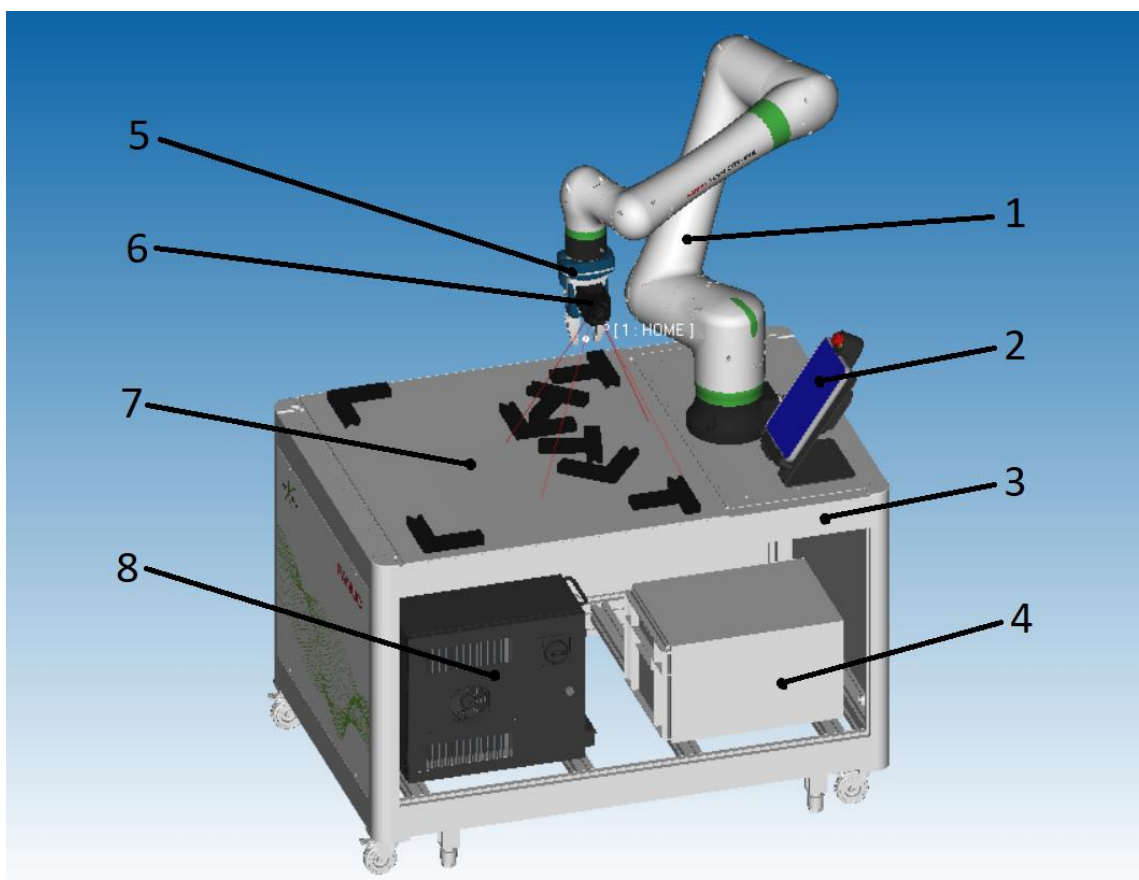
Obr. 16) Layout pracovní plochy robotické buňky ER-4iA

6.3.2 CRX-10iA

Robotická výuková buňka CRX-10iA je novou výbavou robotické laboratoře v Tampere University. Demonstrační program vytvářený v této diplomové práci je prvním využitím robotické buňky. V budoucnu bude tato buňka využívána pro výzkumné projekty a také pro studenty a jejich školní projekty. Tyto další projekty jsou limitující jak na prostor, tak na možné dodatečné úpravy. Úpravy byly navrženy a schváleny, v diplomové práci však nakonec použity nebyly, a to z toho důvodu, že potřebné součásti nebyly doručeny včas. Konkrétně se jedná o laserový 3D scanner a dopravník. Po testování strojového vidění na reálném robotu s nekonzistentními výsledky bylo navrženo použití dodatečného světla jako v případě buňky ER-4iA. Bylo však rozhodnuto, že na tuto robotickou buňku světlo namontováno nebude, jak je zmíněno v kapitole 6.4 Strojové vidění. Pro diplomovou práci tak byla buňka použita beze změn.

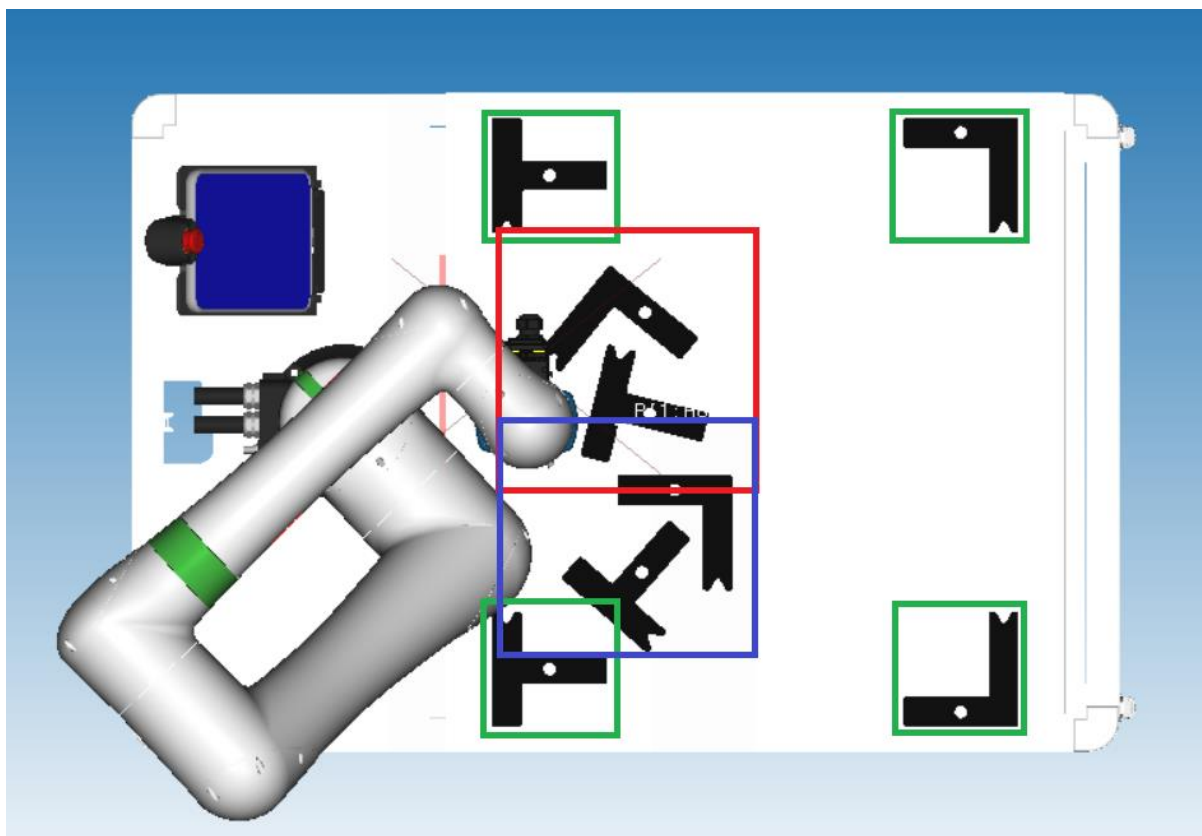
Na obr. 17) je vidět robotická buňka CRX-10iA. Tato robotická buňka se skládá z několika částí:

- 1) robot CRX-10iA, vykonávající daný demonstrační program
- 2) tablet teach pendant, skrze který je robot ovládán
- 3) stůl robotu
- 4) úložný prostor pro odkládání součástí
- 5) Elektrický kolaborativní gripper a úchopové prsty
- 6) 2D kamera připevněná na gripper
- 7) pracovní prostor robotu
- 8) řídicí jednotka robotu



Obr. 17) Popis robotické buňky CRX-10iA

Pracovní plocha robotické buňky CRX-10iA je vidět na obr. 18). Červeným a modrým obdélníkem jsou označena zorná pole kamer v jednotlivých vyhledávacích pozicích. Zelenými čtverci jsou opět označeny pozice pro odložení nalezených písmen. Body pro odložení písmen dále od robotu byly na reálném robotu později přesunuty blíže, protože vzdálenější polovina pracovního prostoru robotu byla později přidělena jinému projektu. Tato změna byla však provedena již pouze na reálném robotu změnou souřadnic daných dvou bodů.



Obr. 18) Layout pracovní plochy robotické buňky CRX-10iA

6.4 Strojové vidění

Správná lokalizace dílů je klíčovým prvkem demonstračního programu, a tudíž i této diplomové práce. Proto je nutné dobře zvážit lokalizované součásti. V případě této diplomové práce byly lokalizované součásti navrhovány přímo za účelem demonstračního programu, jak bylo již popsáno v kapitole 6.2 Manipulované součásti. Důležitými vlastnostmi lokalizovaných součástí, které je třeba brát v potaz, jsou velikost součásti, barva a členitost povrchu a také materiál a způsob výroby součásti. Ideální součást pro lokalizaci strojovým viděním je vyvedena v jednom odstínu jedné barvy. Členitost povrchu je také důležitý aspekt, protože součásti s členitějším povrchem mohou odrážet světlo více směry, což může způsobovat chyby v obrazu. Materiál součásti je důležitý zejména kvůli odrazivosti povrchu součásti. Ale dvě stejné součásti, vyrobené ze stejného materiálu, pouze jiným způsobem dokončování povrchu, mohou mít také odlišnou odrazivost světla.

Neméně důležitým prvkem, který má vliv na výsledek strojového vidění, je pozadí, na kterém se součásti nachází. Barva pozadí by měla být co nejvíce v kontrastu s barvou součásti. Pokud by byl kontrast mezi součástí a pozadím příliš nízký, splývala by na obrazu součást s pozadím a strojové vidění by bylo neefektivní, neschopné součást lokalizovat. Pro potřeby diplomové práce byla zvolena dvojice černá součást a bílý podklad. Nízká odrazivost světla od pozadí je ještě důležitější než odrazivost součásti. Nepřesnosti ve vnitřních částech součásti je snazší zamaskovat než nepřesnosti na pozadí, které mohou splývat s krajem součásti a narušovat tak tvar jejího obrysu. Přímo pro demonstrační program byla pro každý robot navržena deska bílé barvy, kterou lze jednoduše zakládat do pracovního prostoru robota. Deska má na povrchu vyfrézované díry, do kterých bude robot zakládat písmena lokalizovaná strojovým viděním. Bohužel, desky jsou stále ve výrobě, tudíž jsem pro aplikaci na reálném robotu jakožto dočasné řešení použil jako pozadí list bílého papíru. Hranice papíru zároveň vymezují odběrový prostor robota pro daný demonstrační program.

6.4.1 ER-4iA

Pozice kamery jsou určena již z výroby, a to 874,9 mm nad pracovní plochou. Kamera se sice nenachází v dosahu robota, ale s nasazeným gripperem již v dosahu je. Kamera je tedy chráněna bezpečnostní zónou, která nedovolí robotu se ke kameře přiblížit. Prostředí, ve kterém se kamera nachází, nevyžaduje speciální IP krytí kamery ani další ochranné prvky. Protože se jedná pouze o demonstrační program, ne o průmyslové zadání, není podstatný takt robotické buňky, tudíž ani čas strojového vidění.

O strojové vidění a jeho chod se v robotech od firmy Fanuc stará doplněk iRVision. Protože Roboguide obsahuje virtuální kopii robota i s virtuálním ovladačem a teach pendantem včetně iRVision, lze strojové vidění simulovat i offline.

Kalibrace v Roboguide

Prvním krokem při nastavení strojového vidění je kalibrace kamery. Protože je kamera zafixovaná a zkalibrovaná již od dodání robota, není potřeba vytvářet kalibraci novou, alespoň při práci s iRVision v softwaru Roboguide.

Nastavení strojového vidění v Roboguide

Druhým krokem strojového vidění při použití iRVision je naučení tvaru součásti. Po vytvoření procesu strojového vidění jej lze upravit. Jako první je třeba zvolit správnou kalibraci kamery. Dále počet kusů součástí, které je třeba lokalizovat. Jako další je třeba zvolit user frame, od které se bude počítat odsazení, a také způsob počítání tohoto odsazení. Další

nastavení jsou grafická, jako zúžení zorného pole kamery pouze na velikost pracovního prostoru, redukce rozlišení kamery pro rychlejší zpracování obrazu a nastavení doby expozice.

Naučení tvaru součásti

Pak už následuje samotné učení součásti. Pro účely učení součásti je dobré součást vložit přímo doprostřed záběru kamery, aby bylo zamezeno deformacím obrazu snímáním pod úhlem. Po použití funkce Teach a volbě prostoru, kde se učená součást nachází, iRVision zpracuje obraz a vyznačí obrys součásti podle rozdílu kontrastů. Po získání obrýsu součásti, pokud je to třeba, je možné tento obrys upravit. Lze zamaskovat prvky, které by neměla kamera hledat. Zejména jsou tyto chyby tvořeny ve vnitřních částech součásti odlesky nebo zvenčí součásti tvořeny stíny. Také lze přimodelovat prvky obrýsu součásti, které iRVision nevypočítalo správně, jako například mezera v linii obrýsu nebo otvor, který má kulatý tvar, ale vytvořený obrys otvoru kulatý není. Až vyznačený obrys součásti koresponduje s danou součástí, je třeba určit souřadný systém obrýsu součásti. Jedná se zároveň o úchopový bod součásti.

Další funkcí pro lokalizaci správné součásti je funkce povinnosti nalézt určitý prvek součásti. Žádná nalezená součást při reálné aplikaci nebude stoprocentně shodná s jejím naučeným protějškem. Aby mohlo být zamezeno mýlce mezi dvěma velice podobnými součástmi, které se liší jedním detailem, lze tento detail uvést jako podmínku, kterou musí iRVision rozpoznat.

Po naučení tvaru součásti je třeba určit hranice pro nalezení a nenalezení součásti. Nalezení součásti v případě diplomové práce omezují zejména tři hranice: hranice shody, tedy procentuální hodnota shody nalezené součásti s naučenou součástí, hranice kontrastu, tedy minimální rozdíl kontrastu mezi podložkou a nalezenou součástí a elasticita, tedy tolerance naučené součásti určená hodnotou plus mínus množství pixelů.

Další nastavitelnou podmínkou pro nalezení a nenalezení součásti je orientace součásti, tedy možnost zakázat nalezení součásti od jejího určitého natočení. Podobným způsobem funguje také podmínka nalezení součásti i po jejím zvětšení či zmenšení nebo deformací poměru stran součásti například pohledem z úhlu. Protože je ale kamera pevně připevněna, deformace těmito způsoby nebudou nastávat a pro urychlení času hledání součásti tyto funkce nebyly použity.

Posledním krokem je už určení výšky hledané součásti a nastavení referenční pozice X, Y a R, aby mohla být správně vypočítána poloha a orientace nalezené součásti.

Tvorba snímku

Na obr. 19) lze vidět rozhraní iRVision, ve kterém bylo strojové vidění realizováno. Na pravé straně se nachází strom nastavení popsaných výše. V dolní části stromu je vidět pozice referenčního bodu. Ta se automaticky vypočítá po stisknutí tlačítka „set“ a určuje vzdálenost v ose x a y od použité user frame a jejich vzájemné natočení.

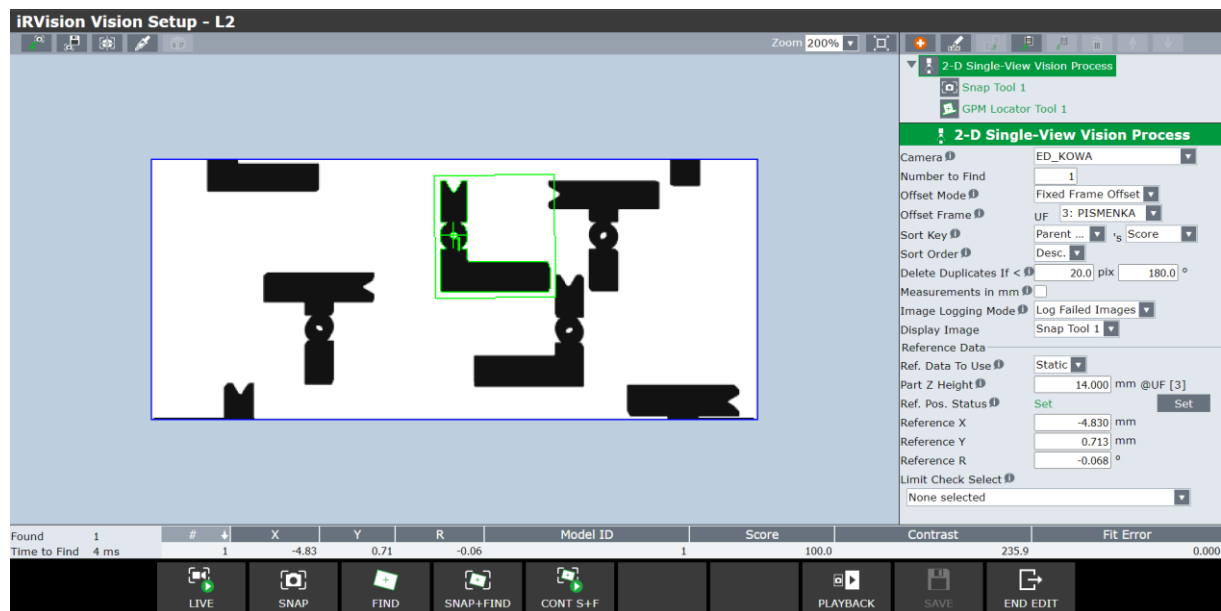
Na levé straně se nachází pohled na pracovní plochu skrz kameru. Po naučení součásti, vytvoření obrázku a hledání součásti (funkce snap + find) bude nalezená součást uprostřed zeleného čtverce, shodující se obrys součásti bude vyznačen zelenou barvou a neshodující obrys bude vyznačen červenou barvou. Střed souřadného systému nalezené součásti je označen zeleným křížem. Vedle označení středu souřadného systému se vždy nachází číslo, které odpovídá číslu nalezené součásti v případě, že kamera objevila více součástí, které odpovídají danému tvaru při zohlednění zadaných podmínek. Pro případ diplomové práce je více nalezených součástí nežádoucí, protože na pracovním stole bude vždy od každého druhu pouze

jedna součást, kterou je třeba pomocí strojového vidění nalézt. Více nalezených součástí tedy znamená chybu.

Ve spodní liště jsou všechny nalezené součásti a jejich číselné údaje. Z původního nastavení jsou seřazeny podle shody, ale lišta ukazuje i další údaje o nalezených součástech. Zleva se jedná o počet nalezených součástí a čas potřebný k jejich nalezení, číslo nalezené součásti, vzdálenost souřadného systému vůči nastavené referenční poloze součásti v ose x a y a natočení souřadného systému vůči referenční poloze. Důležitou hodnotou je dále shoda, které určuje míru podobnosti s naučeným obrysem součásti. Protože se součástí nebylo pohnuto v období mezi naučením součásti a vytvořením obrázku kamerou, a protože v softwaru Roboguide jsou ideální světelné podmínky, shoda nalezené součásti je na maximální hodnotě 100. Dále je ve spodní liště i hodnota kontrastu a hodnota chyby vůči naučené části. Ze stejného důvodu je chyba nulová.

Způsoby postupu

Při tvorbě postupu rozpoznávání součástí bylo uvažováno více variant, mezi kterými byly různé možnosti postupného rozpoznávání společných rysů písmen, následné zužování daných rysů pouze pro určitou část těchto písmen a finální rozpoznání celé součásti. Jako příklad může sloužit možnost prvotní lokalizace středové díry, která je společným prvkem pro obě písmena i pro obě jejich varianty otočení. Příkladem zúžení může být část tvaru písmene T, pro zúžení vyhledávání pouze písmen T. Pro finální rozpoznání konkrétní varianty písmene T by pak sloužilo vykrojení na jedné straně písmene. Tento postup je však mnohem komplikovanější než naučení kompletní součásti a nepřináší žádnou výraznou výhodu. Proto bylo postupně od dílčích vyhledávání u robotu ER-4iA ustoupeno a součásti byly naučeny jako celek ve všech jejich variantách.



Obr. 19) Nastavení strojového vidění ER-4iA

Kalibrace

Na reálném robotu kalibrace nebyla provedena správně, tudíž po přenesení dat z Roboguide do robotu bylo nutné vytvořit kalibraci novou. Kalibraci kamery je možné provést dvěma způsoby. První způsob spočívá v upevnění kalibračního terče na robot a jeho následným pohybem v zorném poli kamery. Druhý způsob spočívá v upevnění kalibrační mřížky na pracovní desku buňky a vytvoření user frame podle dané mřížky. Robot poté sám dopočítá polohu kamery vůči user frame podle zadaných parametrů mřížky. Zvolen byl druhý způsob kalibrace kamery z důvodu vyšší přesnosti kalibrace, zejména na ploše pracovní desky. Pro tuto kalibraci ale napřed robot musí uchopit kalibrační nástroj, který je třeba také nejprve zkalibrovat a vytvořit pro něj nový tool frame. Poté je třeba vytvořit user frame korespondující s kalibrační mřížkou postupným najížděním špičky kalibračního nástroje robotem na body kalibrační mřížky. Až poté lze úspěšně robot zkalibrovat.

Nastavení strojového vidění na reálném robotu

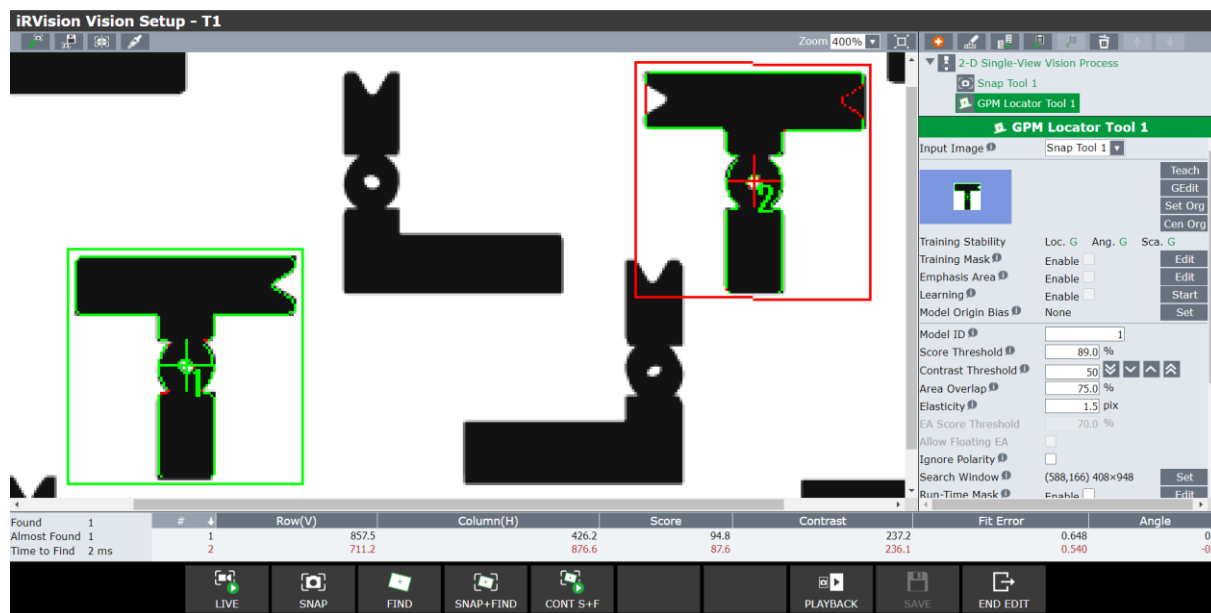
Po kalibraci je možné otestovat naučené součásti z Roboguide na reálném robotu s reálnými součástmi. Protože v Roboguide jsou ideální světelné podmínky, je třeba nastavení strojového vidění upravit. Po spuštění na robotu nacházejícím se v robotické laboratoři byly výsledky proměnlivé. Odvíjely se od množství světla v místnosti. Při zhasnutých světlech byl obraz příliš tmavý. Při rozsvícené polovině světel byl výsledek lepší, nalezený tvar dosahoval nižších hodnot shody, ale rozhodně ne použitelných hodnot. Při rozsvícení všech světel byl výsledek lepší, obrys dosahoval vyšších hodnot shody. Problémem ale je, že obě strany jednotlivých písmen jsou si vzájemně výrazně podobné, liší se jen ve straně, ve které je výřez. To znamená, že aby byla u písmene rozlišena strana, na které leží, musí jeho shoda dosahovat konzistentně hodnot převyšujících 90, jinak budou strany písmen zaměnitelné a písmena nebudou umístěna na jejich správné místo. Na obr. 20) lze vidět nalezené písmeno, které je otočeno na správnou stranu. Písmeno otočené na stranu druhou bylo označeno jako téměř nalezené, protože hodnota jeho shoda se blíží hranici pro nalezení, přestože ne celý obrys písmene byl správně nalezen. Proto je potřeba dosahovat přesných výsledků při této aplikaci. S osvětlením pouze z místnosti bylo dosaženo nekonzistentních výsledků, kdy jednou bylo písmeno rozpoznáno správně a jindy zase zaměněno. To bylo způsobeno natočením písmene a stíny, které písmeno vrhalo.

Osvětlení

Při pokusu o zlepšení výsledků upravením času expozice sice došlo k vytvoření vyššího kontrastu mezi podložkou a písmenem, zároveň se však objevily odlesky na povrchu písmene. Bylo proto rozhodnuto, že bude do robotické buňky přidán zdroj světla. Pro test, zdali přidání světla povede k lepším výsledkům strojového vidění, byl do buňky dočasně nainstalován menší, ale výkonný LED pásek. Pomocí LED pásku byla objevena ideální poloha světelného zdroje a bylo ověřeno, že přidáním světelného zdroje se razantně zlepšily výsledky strojového vidění. Zároveň bylo strojové vidění otestováno i při zhasnutí ostatních světel a ukázalo se, že strojové vidění bylo nezávislé na okolním světle. LED pásek byl proto vyměněn za větší LED světlo, které bylo zapojeno přímo do ovladače robotu, aby mohlo být rozsvěcováno a zhasínáno robotickým programem. Zvažováno bylo kruhové světlo, které by limitovalo vytvářené stíny, a delší pásovité světlo, které má větší svítivou plochu a nasvěcuje tak pracovní prostor z více úhlů. Vybráno bylo pásovité světlo SANGEL LED SL 280, Machine light, IP69k, 280 mm, 1206 lm. Toto světlo bylo s kruhovým světlem srovnatelné z hlediska výsledného světla, ale svým tvarem umožňovalo pohodlnější a jednodušší montáž na rám hned vedle kamery, aby na

pracovní ploše z pohledu kamery nevytvářelo stíny. Světlo bylo ale příliš ostré a také neumožňovalo, i přes deklaraci výrobcem, světlo rozostřit. Na světlo tak musela být nalepena rozostřující fólie, která vytvořila pro kameru přívětivější světlo.

Po zapojení světla byla přenastavena doba expozice pro každou součást, aby co nejlépe odpovídala novým světelným podmínkám. Výsledkem tak byly konzistentně a opakovaně nalezené součásti strojovým viděním.



Obr. 20) Součást správně otočená nalezena, součást nesprávně otočená téměř nalezena, hodnota shody nenalezené součásti se blíží hranici shody pro nalezení součásti.

6.4.2 CRX-10iA

Kamera se v této robotické buňce nachází připevněná na zápěstí robotu. Montáž nebyla nutná, protože kamera byla na robot upevněna již při dodání. Kamera má ochranný kryt, který brání před fyzickým poškozením kamery a před nárazem. Ani při tomto demonstračním programu není požadavek na takt nebo čas provedení strojového vidění.

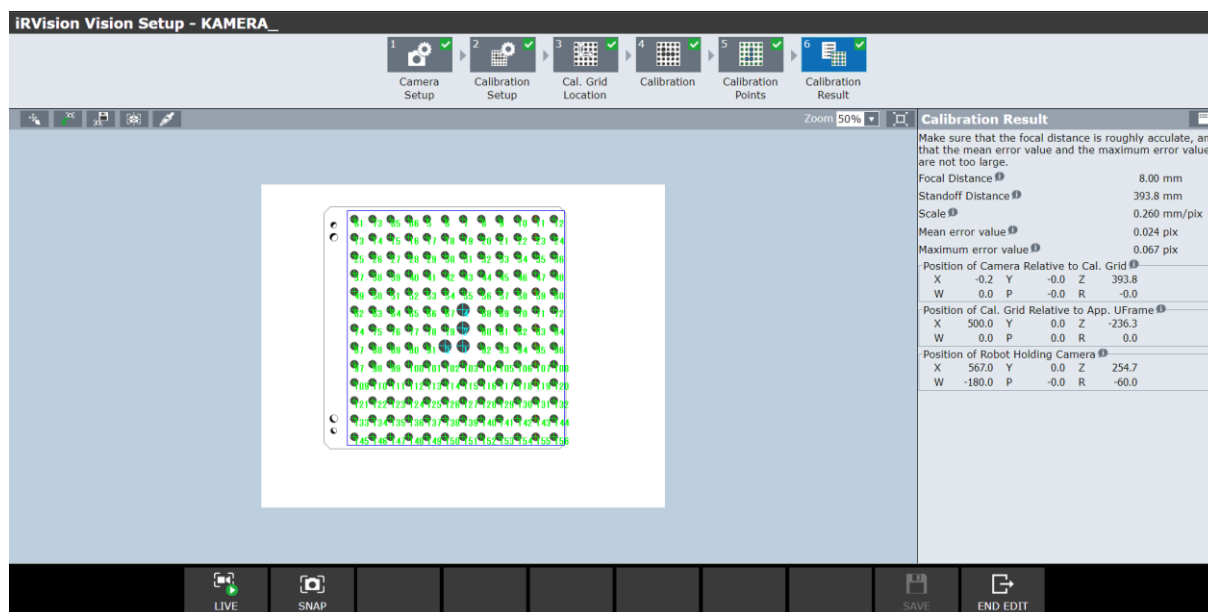
Kalibrace v Roboguide

Kalibrace kamery vytvořená Fanucem nebyla pro daný program ideální ani v softwaru Roboguide, proto byla vytvořena nová kalibrace, pro kterou byla zároveň vytvořena nová user frame, která bude používána pro celý program. Kalibrace v iRVision byla vytvořena stejným způsobem jako kalibrace fyzického robotu. Jedním rozdílem však je, že není potřeba kalibrační nástroj. Robot lze jednoduše přemístit přesně na bod kalibrační mřížky.

Kalibrace má několik kroků. V prvním kroku jsou upřesněny informace o kameře, jako jestli je pevně umístěna na rám nebo připevněna na robot, doba expozice kamery a také způsob kalibrace. V druhém kroku jsou upřesněny informace o kalibrační mřížce, a to, jestli je mřížka držena robotem a jaký je rozestup mezi jednotlivými body mřížky. V dalším kroku je určena kalibrační user frame a je vypočtena vzdálenost od dané user frame. V následujícím kroku je určen počet kalibračních rovin. V tom se liší kalibrace pevné kamery od kamery umístěné na robotu. Pro pevnou kameru stačí pouze kalibrace v jedné rovině, v té pracovní. Pokud ale bude kamera měnit svou vzdálenost od pracovní plochy, je lepší kameru zkalibrovat ve dvou rovinách, aby mohl software dopočítávat lépe vzdálenost kamery od podložky. Proto byly

pořízeny dva snímky kalibrační mřížky, jeden v kalibrační rovině a druhý 100 mm nad kalibrační rovinou. Tím je zabezpečeno správné vypočítání vzdálenosti kamery od podložky.

Tím je kalibrace téměř hotová, další krok zobrazí všechny body, které kamera zaznamenala jako kalibrační. V jejich tabulce je vidět přesné souřadnice každého bodu zároveň s jejich vypočtenou chybou. Pokud bylo jako kalibrační bod zaznamenáno něco, co kalibrační bod není, je možné tento bod odstranit. Pokud mezi kalibračními body nejsou chybné body a vypočtená chyba je dostatečně nízká, je možné přejít k poslednímu bodu kalibrace, ke kalibračním výsledkům. Z výsledků pak lze vyčíst mnoho vypočtených údajů, jako ohniskovou vzdálenost, vzdálenost kamery od podložky, měřítko převodu pixelu na milimetry, průměrnou a maximální chybu na kalibračním bodu, pozice kamery vůči kalibrační mřížce, pozici kalibrační mřížky vůči user frame a pozici robotu, na který je upevněna kamera, v momentu kalibrace. Výsledek kalibrace s vypočtenými hodnotami lze vidět na obr. 21).



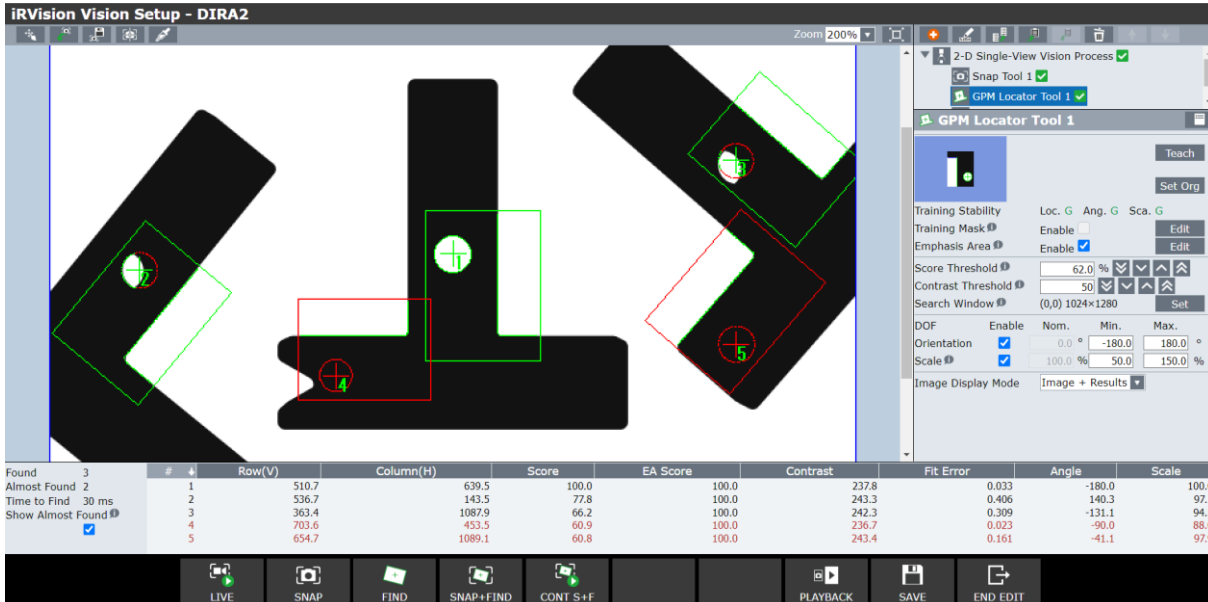
Obr. 21) Výsledek kalibrace, nalezené kalibrační body a vypočítané hodnoty

Naučení tvaru součásti

Naučení součásti bylo provedeno v Roboguide pro jednodušší a přesnější manipulaci s robotem i součástmi. Pracovní plocha robotu je větší, takže pro záběr celé pracovní plochy robotu by kamera byla daleko od podložky. To by mohlo způsobovat nepřesnosti strojového vidění, a proto byl vytvořen program, ve kterém se rozdělí pracovní plocha do několika sektorů, které bude kamera zabírat postupně. Protože nebude pro demonstrační program využita celá pracovní plocha robotu, byla používaná pracovní plocha rozdělena do dvou částí, které kamera postupně zabere. Protože je plocha takto rozdělená, může se stát, že bude součást přesně na rozhraní těchto dvou ploch a nebude rozpoznána. Proto byly plochy snímané kamerou navrženy tak, aby se vzájemně mírně překrývaly. Ani to však není ideálním řešením, protože střed pracovní plochy se tím nachází v okrajových částech snímaného obrazu. Ideální výsledky snímané součásti jsou přímo kolmo na kameru a s každým milimetrem od tohoto bodu se nepřesnost strojového vidění zvyšuje.

Nastavení strojového vidění v Roboguide

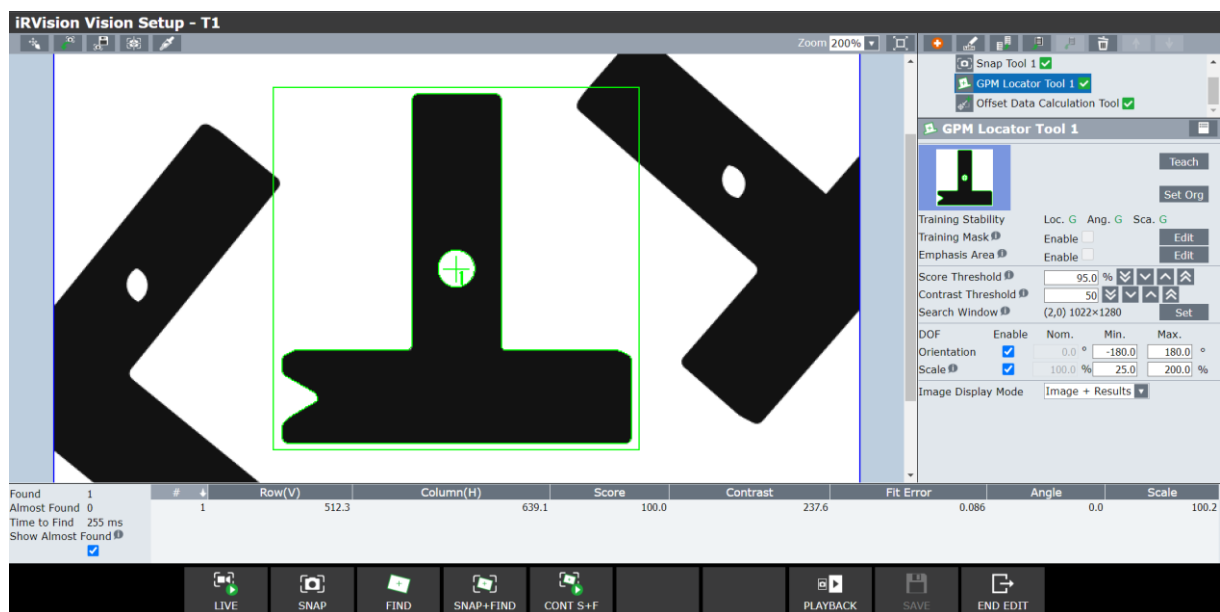
Proto byl namísto jednoho vizuálního programu zvolen způsob rozdělení do dvou programů. První program strojového vidění nalezne prvek, který je pro všechny součásti společný, tedy díru v úchopovém bodu a stěnu nacházející se v blízkosti, jak lze vidět na obr. 22). Pokud je v zorném poli kamery více takových objektů, budou nalezeny všechny. Jako výsledný ale bude vybrán ten s nejvyšší shodou. Protože se jedná o menší prvek, je tím zaručeno, že bude nalezen i ve středu pracovního stolu, kde se dva pohledy kamery překrývají. Tato nalezená součást ale nebude určena přímo k odebrání součásti, protože z tohoto nalezeného obrysu není možné zjistit, o jakou součást se jedná. Slouží tak primárně k vycentrování pohledu kamery přímo nad nalezenou součást, aby mohl být spuštěn druhý vizuální program, který již určí správnou variantu součásti. Nalezená součást je vidět na obr. 23). Tak je zajištěn přesnější výsledek strojového vidění. Postup učení těchto dvou kroků je ale stejný jako v předchozím případě. I první část programu, hledání společné části písmen, je učeno stejným způsobem, tedy jako nový vizuální program. Funkcí potlačení části naučeného obrysu tak bylo docíleno takového tvaru obrysu, který odpovídá oběma písmenům. Aby strojové vidění nacházelo písmena otočená, byl vytvořen druhý vizuální program naprosto identický prvním, pouze zrcadlově otočen.



Found	#	Row(V)	Column(H)	Score	EA Score	Contrast	Fit Error	Angle	Scale
3	1	510.7	639.5	100.0	100.0	237.8	0.033	-180.0	100.0
Almost Found 2	2	536.7	143.5	77.8	100.0	243.3	0.406	140.3	97.1
Time to Find 30 ms	3	363.4	1087.9	66.2	100.0	242.3	0.309	-131.1	94.5
Show Almost Found	4	703.6	453.5	60.9	100.0	236.7	0.023	-90.0	88.0
	5	654.7	1089.1	60.8	100.0	243.4	0.161	-41.1	97.9

Obr. 22) Nalezené a téměř nalezené prvky z prvního kroku strojového vidění. Upřednostněn bude nalezený objekt s nejvyšší shodou.

Na obr. 23) ve spodní liště nalezených objektů se v pravé části nachází sloupec „scale“. Jedná se o prvek využívaný v této diplomové práci pouze u robotu CRX-10iA, protože nemá kameru pevně umístěnou.



Obr. 23) Nalezená součást po druhém kroku strojového vidění

Kalibrace

Na fyzickém robotu byla též provedena kalibrace. Pro novou kalibraci byla vytvořena nová user frame, stejným způsobem jako u robotu ER-4iA. Další postup kalibrace byl pak stejný jako při kalibraci v Roboguide. Po zkalibrování kamery mohly být vizuální programy vytvořené v Roboguide otestovány na reálném robotu.

Nastavení strojového vidění na reálném robotu

Výsledky strojového vidění byly opět silně závislé na intenzitě a směru okolního světla. Protože je buňka CRX-10iA umístěna blíže oknu, na výsledky strojového vidění má vliv i intenzita svitu slunce. Nejlepší výsledky byly zaznamenány přes den se zapnutými všemi světly v místnosti. Pro nedokonalé výsledky strojového vidění bylo navrženo použití dodatečného světla i v této výukové robotické buňce. Bylo však rozhodnuto, že na tuto robotickou buňku světlo namontováno nebude. Bylo tak rozhodnuto z toho důvodu, aby zástupcům firem a dalším zájemcům o demonstrační program strojového vidění mohly tímto způsobem být demonstrovány limitace 2D strojového vidění.

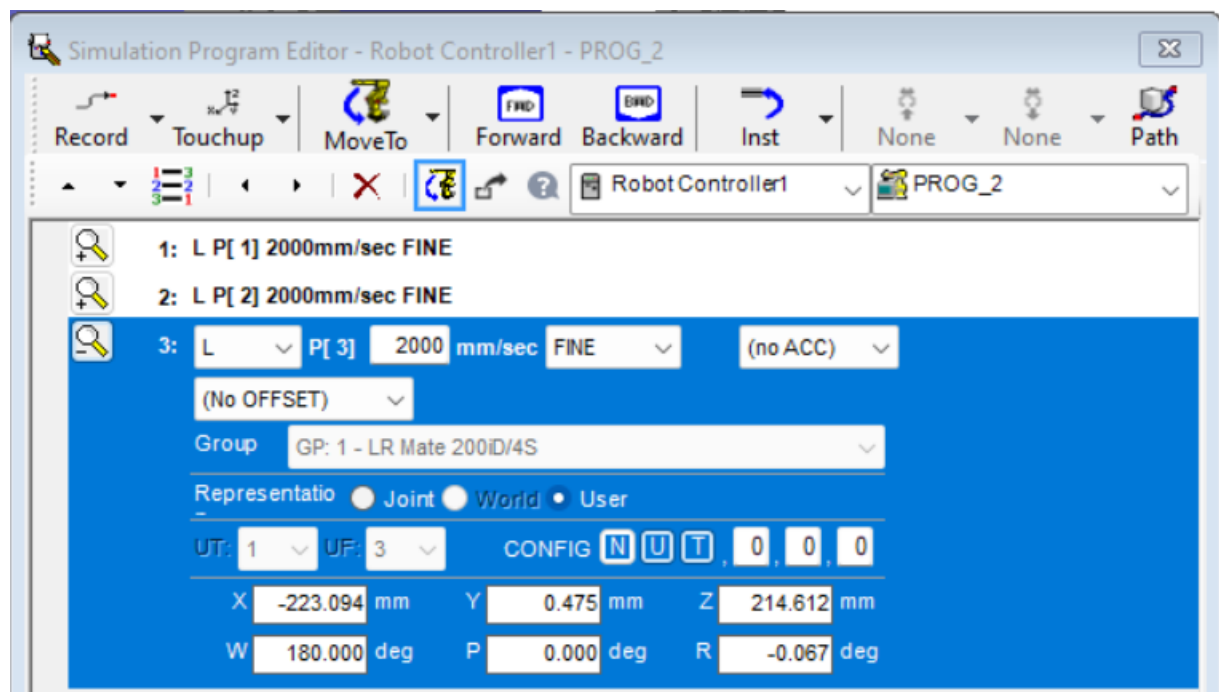
6.5 Program

Vytvoření programu je hlavním cílem této diplomové práce. Program byl vytvářen nejprve offline v softwaru Roboguide a později přenesen na fyzického robota a na něm odzkoušen a doladěn.

6.5.1 Offline programování

Pro programování v softwaru Roboguide existují dvě možnosti. První možností je simulační programování a druhou možností je programování přímo ve virtuálním teach pendantu, jako u fyzického robota. V simulačním programování jsou body dané simulace určeny přímo v simulaci buď pohybem robotu nebo přesným zadáním souřadnic. Simulační programování je však omezeno a nenabízí všechny funkce, které jsou k dispozici na virtuálním teach pendantu. Pro tvorbu demonstračního programu byla zásadním nedostatkem absence prvků virtuálního zprovoznění. Prostředí simulačního programování lze vidět na obr. 24), kde byl vytvořen pohyb robotu do vytvořeného bodu. Při programování na teach pendantu jsou body pohybu robotu volány z registru pozic, kde byly pozice předem vytvořeny. Virtuální teach pendant nabízí všechny funkce potřebné pro vytvoření demonstračního programu. Pro simulaci pohybu součástí však teach pendant funkce nenabízí, jedná se pouze o program.

V této diplomové práci tak byla pro programování demonstračních programů využita kombinace těchto dvou metod. Tím bylo zamezeno nedostatkům obou metod a lze použít jak funkce strojového vidění, tak lze vytvořit simulaci celého programu. Základ programu byl vytvořen na virtuálním teach pendantu. V simulačním programování byly vytvořeny pouze externí programy pro uchopení a položení součástí. Pouze tímto způsobem mohlo být docíleno simulování pohybu součástí. Pro každou součást existuje program pro uchopení a pro položení součástí, které jsou v potřebný okamžik volány hlavním programem.



Obr. 24) Prostředí simulačního programování v Roboguide

6.5.2 Přenesení programu na fyzický robot

Robot nebyl propojen s počítačem přímo, proto bylo přenášení programu na robot realizováno skrze USB disk. V programu nebyly prováděny žádné změny po přesunutí na robot, program fungoval stejně jako na virtuálním robotu. Pozice bodů však byly upraveny tak, aby program fungoval co nejlépe.

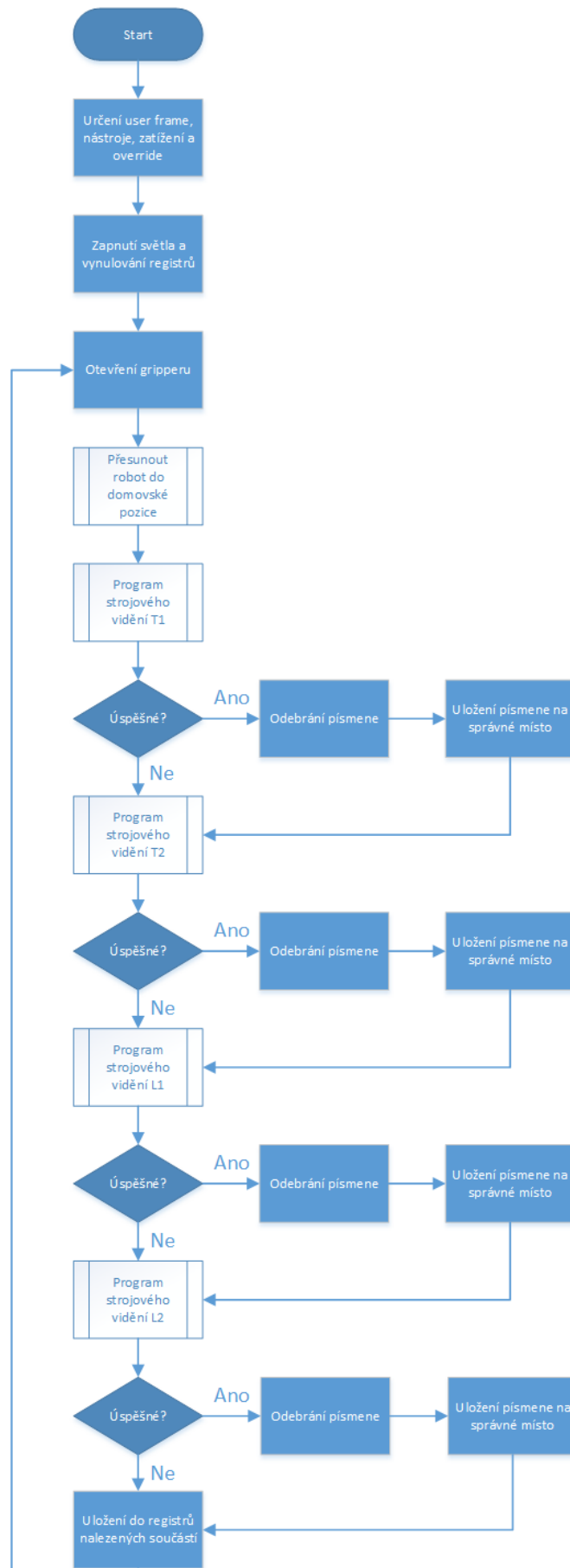
6.5.3 ER-4iA

Demonstrační program spočívá v lokalizaci dvou písmen, T a L, a určení strany, na které dané písmeno leží. Lokalizace je docílena jedním kompletním vizuálním programem. Po úspěšné lokalizaci bude písmeno odebráno a uloženo na správné místo. Každá strana každého písmene má vlastní určenou pozici. Po přesunutí písmene je lokalizováno další písmeno, které je následně také umístěno na své místo. Tímto způsobem jsou z pracovní plochy odklizená všechna písmena. Poté jsou všechna písmena postupně uchopena, pod úhlem zvednuta nad pracovní plochu a upuštěna, aby jejich nová pozice byla jiná, než byla jejich pozice na začátku programu. Poté se vrací cyklus zpět na začátek a písmena jsou opět lokalizována. Vržením písmen na pracovní plochu je docíleno nové pozice písmen při každé iteraci programu.

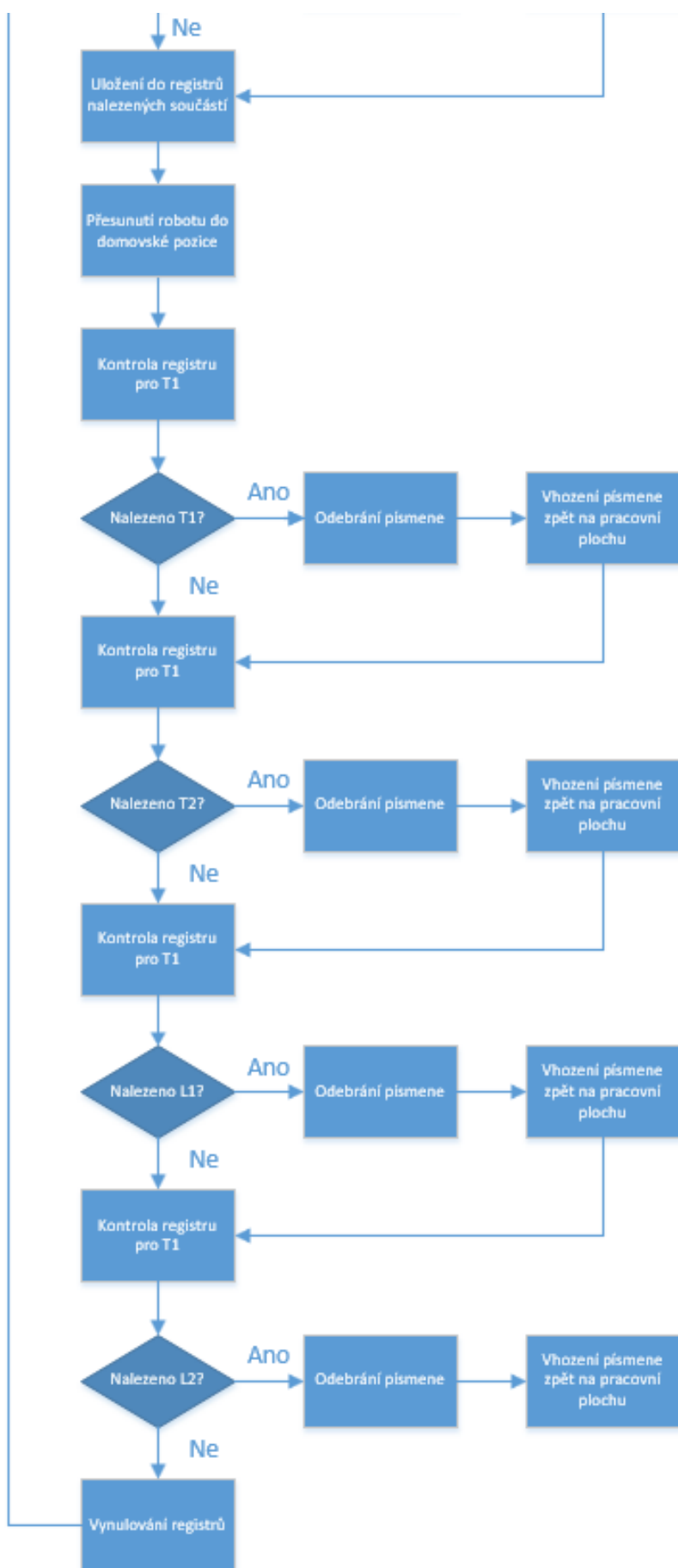
Princip programu

Obsluha spustí program, který určí user frame, na které bude program probíhat. Určí také parametry nástroje, který bude při programu používán, a to jeho souřadný systém a jeho zatížení. Dále je určen override, tedy příkaz, na kolik procent má robot vykonat daný úsek programu. V testovací fázi programu byl override nastaven na 10 % z důvodu bezpečnosti. Po odladění programu na nižší override byla pak hodnota postupně zvyšována, dokud nebyl robot schopen pracovat bezpečně na hodnotě 100 %. Dalším prvkem programu je zapnutí světla a vynulování všech používaných datových registrů, aby se nestalo, že by předchozí použití robota nějak ovlivnilo spouštěný program. Posledním přípravným prvkem programu je otevření gripperu a následné přesunutí robota do domovské pozice. V domovské pozici robot nepřekáží pohledu kamery na pracovní plochu. Přesunutí do domovské pozice je učiněno vyvoláním externího programu.

Poté již začíná postupné volání vizuálních programů. Pokud program úspěšně lokalizoval danou variantu daného písmene, je toto písmeno uchopeno a umístěno na své místo. Jak již bylo zmíněno dříve, pohyb robota je součástí hlavního programu, ale uchopení a položení součásti je řízeno vyvoláním programu k tomu určenému. Pokud vizuální program danou variantu daného písmene neobjevil, je uchopovací část programu přeskočena a je spuštěn vizuální program pro jinou variantu písmene. Tímto způsobem jsou vyhledávány všechny varianty písmen. Při správné funkci strojového vidění a při limitu jedné součásti pro každou variantu by na pracovní ploše robota nemělo zůstat žádné písmeno. Po lokalizaci a přesunutí součástí jsou do datových registrů zapsány údaje o tom, která písmena byla lokalizována. Poté je robot přesunut do domovské pozice a je čteno z datových registrů o tom, zdali byla jednotlivá písmena lokalizována. Pokud dané písmeno bylo lokalizováno, hodnota registru je 1 a je spuštěn externí program, ve kterém robot písmeno odebere z jeho pozice a vhodí jej na pracovní plochu. Tímto způsobem jsou ověřena všechna písmena a postupně vhozena na pracovní plochu. Pokud je však hodnota registru 0, externí program spuštěn není a je kontrolován následující registr. Po vrácení písmen zpět na pracovní plochu jsou používané registry vynulovány a program je znovu spuštěn od momentu otevření gripperu. Průběh celého programu je znázorněn na vývojovém diagramu, který byl rozdělen mezi obr. 25) a obr. 26).



Obr. 25) Vývojový diagram pro program na robotu ER-4iA, první část



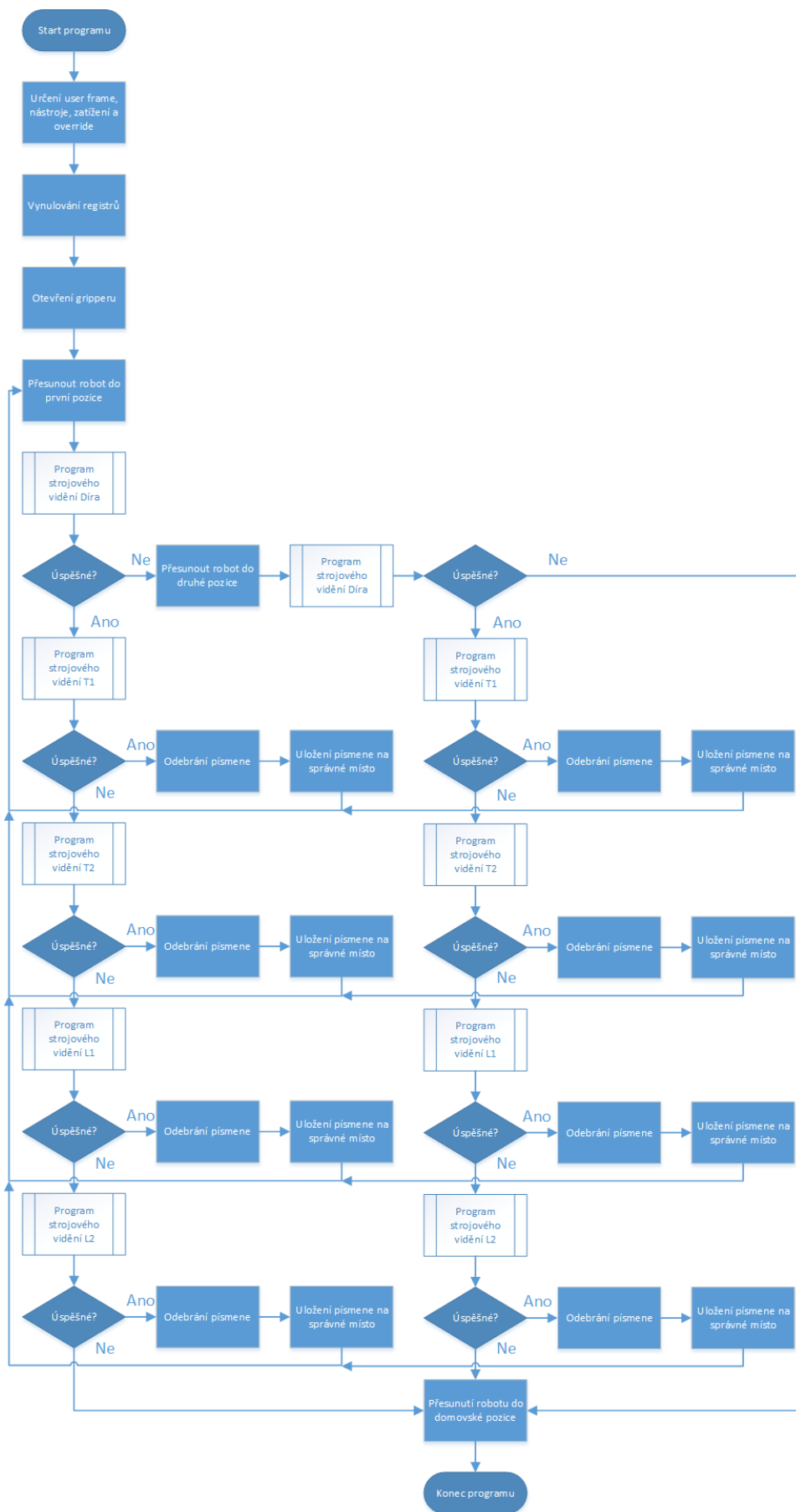
Obr. 26) Vývojový diagram pro program na robotu ER-4iA, druhá část

6.5.4 CRX-10iA

Demonstrační program na robotu CRX-10iA je v základu velmi podobný předchozímu demonstračnímu programu. Cíl má tento program stejný, lokalizovat písmena T a L a určit stranu, na které dané písmeno leží. V tomto případě má však lokalizace písmen dva kroky. Nejprve je lokalizována část písmene, kterou disponují všechny čtyři varianty písmen, proto je pro všechny varianty první vizuální program identický. Druhý vizuální program využívá souřadnic získaných z prvního vizuálního programu, aby kameru umístil nad rozpoznávanou součást. Po umístění kamery proběhne druhý vizuální program, který identifikuje žádanou součást. Po identifikaci je písmeno přesunuto na jeho určené místo. Poté je robot umístěn znovu do pozice pro hledání a opět je spuštěn první vizuální program. Pracovní plocha je rozdělena do dvou částí, takže pokud kamera už nemůže najít v prvním místě žádné písmeno, robot se přesouvá do druhého místa pro hledání a scénář se opakuje. Je spuštěn první vizuální program, součást je lokalizována, robot s kamerou je přemístěn nad součást a písmeno je identifikováno. Po identifikaci je písmeno opět přeneseno na jeho vytyčené místo a lokalizace se opakuje, dokud je kamera schopna identifikovat písmena na pracovní ploše. Robot CRX-10iA není vybaven světlem, tudíž se může stát, že nějaká součást nebude lokalizována. Z toho důvodu není program v nekonečné smyčce, ale je ukončen oknem tázajícím se, zdali chce obsluha program opakovat a upravit pozici nenalezených součástí nebo program ukončit.

Princip programu

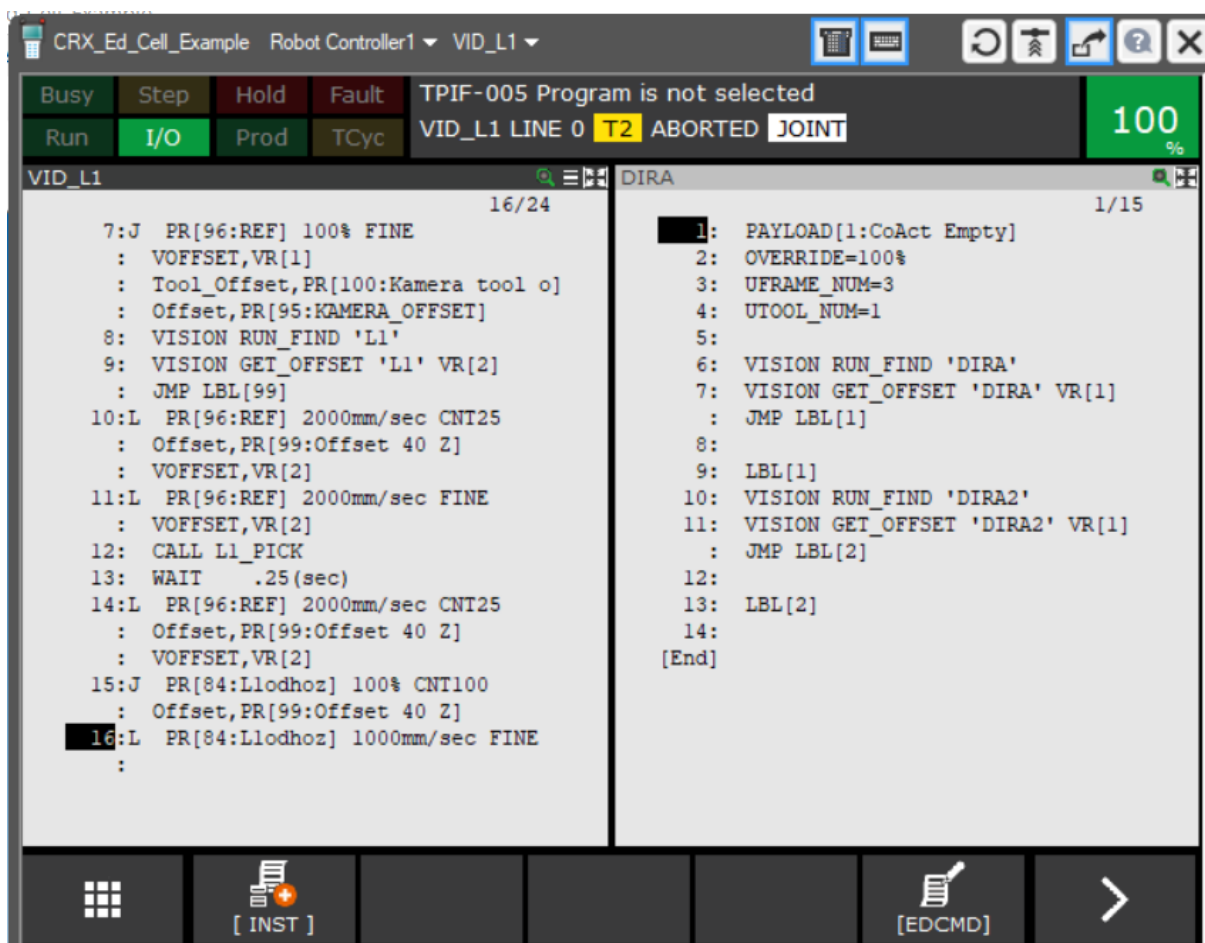
Začátek programu je stejný jako u robotu ER-4iA. Přípravnými pokyny jsou určeny user frame používané v daném programu, souřadného systému a zatížení nástroje pro tuto aplikaci, override robotu, vynulování používaných registrů a otevření gripperu. Úvodním pohybem robotu je pohyb do první pozice pro vytvoření snímku kamery. Ten je pořízen vyvoláním vizuálního programu Díra, který má za úkol lokalizovat společný prvek pro všechny hledané součásti. Pokud byl alespoň jeden takový prvek nalezen, přesune se robot nad nalezený prvek a postupně jsou volány externí programy. Tyto externí programy obsahují vizuální program na hledání celého obrysu součásti. Pokud je součást úspěšně lokalizována, externí program ji odebere a přesune na její určené místo. Pokud však vizuální program selže a součást lokalizována není, pohybová část externího programu je přeskočena a je vyvolán nový externí program hledající jinou variantu součásti. Po nalezení a umístění součásti se robot vrací na první místo pro hledání a je znovu vyvolán vizuální program Díra. Pokud byl lokalizován další společný prvek pro všechny součásti, proces se opakuje. Pokud však již na první pozici pro hledání žádný prvek nalezen nebyl, robot se přesouvá do pozice druhé. V druhé pozici je následně vyvolán vizuální program Díra, který nyní lokalizuje společný prvek v dané oblasti. Po lokalizaci je opět robot přesunut nad součást a je spuštěna sekvence externích programů pro identifikaci součásti. Po identifikaci součásti je součást přesunuta na její určené místo a robot přesunut opět do první pozice pro hledání, kde se celý proces opakuje. Pokud se však na pracovní ploše nenachází žádná hledaná součást, robot je po neúspěšné sekvenci strojového vidění poslán do domovské pozice. Po dosažení domovské pozice se objeví okno, ve kterém lze zvolit, jestli má být program ukončen nebo si obsluha přeje znovu rozmístit písmena na pracovní plochu a program znovu spustit. Vývojový diagram popsaného programu lze vidět na obr. 27).



Obr. 27) Vývojový diagram pro program na robotu CRX-10iA

6.5.5 Prvky programu

Na obr. 28) jsou vyobrazeny dva podprogramy. V pravé části obrázku se nachází podprogram, který volá vizuální program Díra. Jedná se o dva jednotlivé vizuální programy, které jsou řazeny za sebou. První ze dvou programů lze vidět na obr. 22), kde úspěšně lokalizoval několik součástí. Druhý program je velice podobný, pouze zrcadlově otočený. Tím je alespoň jeden program aplikovatelný na každou variantu písmene. Pro varianty písmene T jsou aplikovatelné oba programy. Příkaz VISION RUN_FIND spouští vizuální program vytvořený předem skrze iRVision. Příkaz VISION GET_OFFSET zpracovává data získaná z výsledku vizuálního programu a vypočítá polohu nalezené součásti. Ta je vyjádřena odsazením od použité user frame a uložena do vizuálního registru souřadnic. V případě úspěchu vizuálního programu program pokračuje, ale v případě neúspěchu vizuálního programu je součástí příkaz JUMP_LBL, který při nenalezení součásti posune program na řádek určený danou LBL.



Obr. 28) Na pravé straně podprogram pro vyhledávání společné části, na levé straně část podprogramu pro nalezení a přesun písmene L.

V levé části obrázku se nachází podprogram, který po lokalizaci součásti předchozím podprogramem využije souřadnice nalezené součásti, aby kameru přesunul nad součást. Pro přesnou pozici kamery nad nalezenou součástí se zároveň v programu využívají tři odsazení. Každé z nich je vůči naučenému referenčnímu bodu součásti, na kterou má kamera mířit. První odsazení, VOFFSET, VR, je vizuální odsazení získané z vizuálního registru souřadnic z předchozího podprogramu. Jde o pozici nalezené součásti na ose X, Y a její rotaci. Dalším odsazením je nástrojové odsazení Tool_Offset, PR. Jedná se o odsazení souřadného systému kamery vůči souřadnému systému nástroje. Posunutí je na rovině XY. Toto odsazení je zde pro zajištění správné pozice v případě rotace robotu, aby se souřadný systém kamery otáčel podle správné osy. Posledním odsazením je odsazení Offset, PR. Jedná se o odsazení v ose Z, neboli vzdálenost souřadného systému kamery od referenčního bodu součásti. Příkaz VISION RUN_FIND nalezne danou součást a příkaz VISION GET_OFFSET uloží souřadnice do druhého vizuálního registru. Ten je použit obdobným způsobem k přiblížení se a k odebrání součásti. Pro odebrání součásti je vytvořen další samostatný podprogram, který je následně vyvolán.

Na obr. 29) je vidět podprogram pro odebrání písmene po jeho nalezení. Jedná se o podprogram druhého stupně, není totiž vyvolán hlavním programem, ale již jeho podprogramem. Podprogram pro odebrání součásti vznikl ze simulačního programování. Tento vzniklý program byl doplněn o krátkou řadu příkazů, aby byl použitelným i při chodu na fyzickém robotu. Prvním doplněným příkazem je změna užitého zatížení na součet hmotnosti gripperu a uchopené části. Robot pak může správně vypočítávat vlastní dráhu. Správné zadání užitého zatížení je obzvláště důležité u kolaborativního robotu, aby mohl správně počítat se silami působícími na robot a kolaborativní funkce tak nebyly ničím ovlivňovány. Nesprávné určení užitého zatížení má negativní vliv na bezpečnost robotu. Dalšími příkazy je dvojice změn outputů ovládajících otevření a zavření gripperu. Pro zavření gripperu musí být oba outputy ve správné poloze.


```

CRX_Ed_Cell_Example Robot Controller1 L1_pick
Busy Step Hold Fault SYST-212 Need to apply to DCS param 100%
Run I/O Prod TCyc L1_PICK LINE 0 T2 ABORTED JOINT
L1_PICK 1/10
1: !FANUC America Corp.
2: !ROBOGUIDE Generated This TPP
3: !Run SimPRO.cf to setup frame and
4: !This program will be overwritten
5: ! Pickup ('L_velky') From ('Podlo
6: !WAIT 0.00 (sec)
7: PAYLOAD[3:CoAct + Letter]
8: RO[1:Open Gripper]=OFF
9: RO[2:Close Gripper]=ON
[End]

```

Obr. 29) Podprogram pro odebrání písmene

Na obr. 30) je vidět úsek kódu, který je zodpovědný za navrácení přesunutých součástí zpět na pracovní plochu. Protože při demonstračním programu na fyzickém robotu je manipulováno pouze s jednou sadou písmen, je potřeba určit, kterými variantami písmen bylo manipulováno. Každá varianta má totiž jiné přidělené místo pro odložení. Příkaz VISION GET_NFOUND zapisuje do zvoleného registru počet nalezených součástí ve zvoleném vizuálním programu. Tento příkaz byl tedy použit pro všechny vizuální programy. Dalším krokem je pak vyvolání podprogramu pro navrácení součástí zpět na pracovní plochu. Pokud je hodnota daného registru rovna 1, tedy pokud byla daná součást nalezena, je spuštěn podprogram, který písmeno z jeho místa odebere, robot s ním najede pod úhlem několik centimetrů nad pracovní plochu a tam jej upustí, aby písmeno dopadlo hranou na pracovní podložku a odrazilo se tak, aby byla nebyla jeho pozice při každé iteraci programu stejná a aby tak použití strojového vidění mělo reálný význam. Po dokončení všech podprogramů jsou všechny registry opět nastaveny na hodnotu 0, aby mohl program proběhnout opět v pořádku.



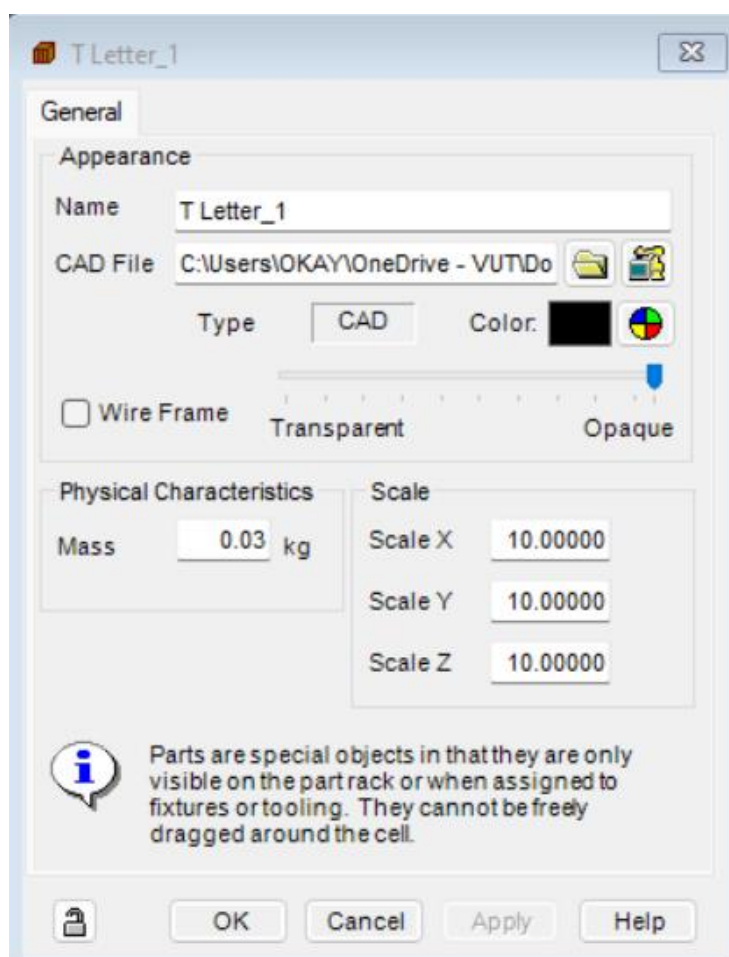
```

84:
85: LBL[96]
86:
87: VISION GET_NFOUND 'T1' R[44]
88: VISION GET_NFOUND 'T2' R[45]
89: VISION GET_NFOUND 'L1' R[46]
90: VISION GET_NFOUND 'L2' R[47]
91:
92:L @PR[47:Dom] 1000mm/sec CNT25
93:
94: IF R[44]=1,CALL VIDENI_T1
95: IF R[45]=1,CALL VIDENI_T2
96: IF R[46]=1,CALL VIDENI_L1
97: IF R[47]=1,CALL VIDENI_L2
98:
99: R[44]=0
100: R[45]=0
101: R[46]=0
102: R[47]=0
103:
  
```

Obr. 30) Úsek programu pro zjištění, které součásti byly nalezeny při demonstračním programu a jejich zpětné vhození na pracovní plochu

6.6 Virtuální zprovoznění a simulace

Po vytvoření robotického programu je nejvýznamnější část demonstračního programu hotová. Aby však byl demonstrační program ještě před přechodem na fyzický robot důkladně odsimulován, bylo z robotického programu vytvořeno virtuální zprovoznění. Po importování 3D modelů součástí do Roboguide je třeba nastavit jejich fyzické parametry, jako je vidět na obr. 31). Z důvodu nesprávného přepočtu jednotek mezi Inventorem a Roboguide muselo být měřítko nastaveno na hodnotu 10, aby byla součást v její skutečné velikosti. Dále byla určena hmotnost součásti.

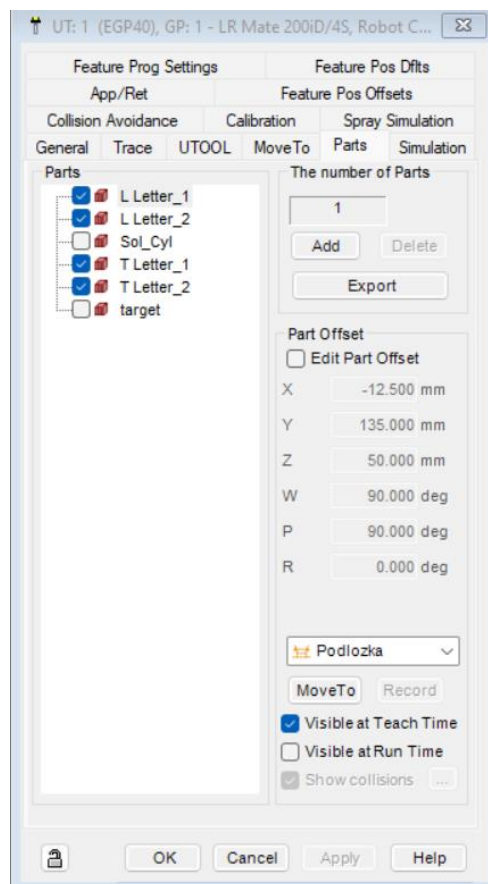


Obr. 31) Parametry vložené součásti

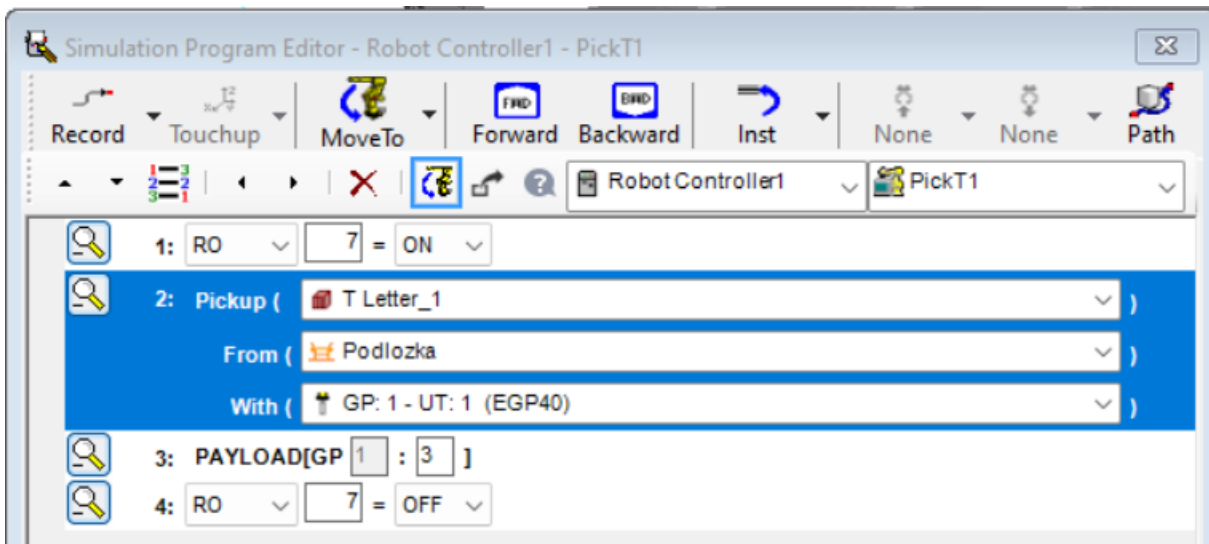
Na obr. 32) lze vidět vazbu dané součásti na gripper, který ji bude uchopovat. Pro správné uchopení musí být nastaveny souřadnice součásti vůči gripperu tak, aby byla součást uchopena v určeném uchopovacím bodě. Dále je také určena plocha, ze které je součást odebírána a plocha, na kterou je součást pokládána.

Vazba mezi součástmi a podložkou je vidět na obr. 34). Bohužel v softwaru Roboguide nelze součást odebrat a položit zpět na jednu a tu samou podložku. Z toho důvodu byla podložka rozdělena na dílčí podložky, z jedné podložky byly součásti odebírány a na další byly jednotlivě pokládány. Pro každou podložku byla přidělena její součást a zadány souřadnice, na kterých se nachází odběrové, respektive odkladové místo součásti. Také byla tato vazba propojena ještě s vazbou na gripper. Při demonstraci na fyzickém robotu byla náhodná pozice zajištěna dopadem součásti na pracovní plochu z výšky. To však v Roboguide není možné nasimulovat, a tak byla u odebíraných součástí nastavena výchozí pozice s náhodným odsazením v ose X, Y a náhodným otočením v této rovině. Na obr. 34) lze vidět nastavený limit pro toto náhodné odsazení. Odsazení je nastaveno v ose X a Z, protože tyto osy na součásti odpovídají osám X a Y na souřadném systému robotu.

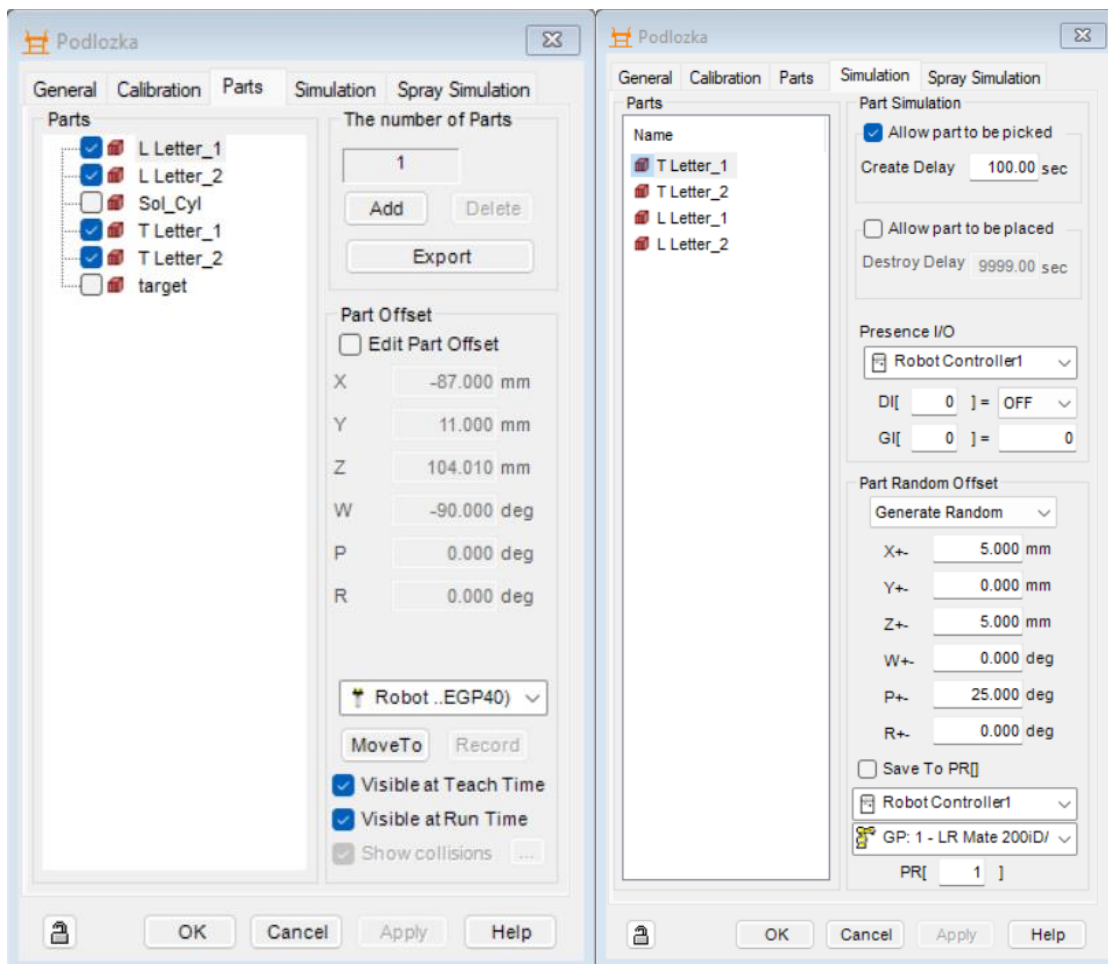
Samotné uchopení a položení součásti bylo programováno v simulačním programování, jako je již popsáno v kapitole 6.5 Program. Vytvoření takového programu lze vidět na obr. 33), kde se nachází program pro uchopení součásti v prostředí simulačního programování. Obsahuje příkazy pro virtuální zprovoznění, a to informace, kterou součást odebrat, z jaké podložky a jakým gripperem. Dále také obsahuje příkazy pro daný program, a to kontrolní příkaz pro otevření gripperu, změnu zatížení robotu na hmotnost gripperu a součásti, a příkaz pro uzavření gripperu.



Obr. 32) Vazba součásti na gripper



Obr. 33) Program pro uchopení součásti v prostředí simulačního programování



Obr. 34) Vazba součásti s podložkou

7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

V této diplomové práci jsem vytvářel virtuální zprovoznění dvou robotických edukačních buněk. Virtuální zprovoznění bylo vytvořeno v softwaru RoboGuide od firmy Fanuc. Obě robotické buňky byly osazeny robotem Fanuc, RoboGuide byl proto zvolen pro zajištění největší přesnosti simulace. V tomto softwaru byl nejprve sestaven 3D model buňky, pro robot byl vytvořen program a následně byla vytvořena simulace celé práce buňky.

Výstupem této diplomové práce jsou dvě virtuálně zprovozněné robotické edukační buňky, které vykonávají demonstrační program na ukázkou strojového vidění. Nad rámec práce byly tyto dvě robotické buňky oživeny i v reálném prostředí a vykonávají daný program podle zadání.

Na výstup této diplomové práce má Tampere University v plánu navázat, na robotickou buňku CRX-10iA bude přidán dodatečný hardware pro rozmanitější ukázkou schopností strojového vidění. Buňka bude doplněna o kvalitnější 2D kameru, laserový 3D senzor a dopravník. Buňka bude také doplněna o bezpečnostní prvky jako například laserový scanner.

Program byl vytvářen za účelem demonstrace schopností 2D strojového vidění v nižší cenové kategorii. V případě využití ve výrobě by byl kladen větší důraz na zlepšení taktu buňky. Toho by bylo docíleno optimalizací robotických drah a nastavením strojového vidění pro co nejrychlejší zpracování obrazu. Při vytváření práce byl kladen důraz spíše na kvalitu snímaného obrazu a jeho úspěšnost.

Demonstrační program by bylo možné rozšířit o další komponenty, které by hlouběji testovaly schopnosti použitého strojového vidění. Například použití komponent s různými typy povrchu. Lesklý povrch by například znesnadňoval lokalizaci součástí a bylo by pro ni vhodnější použít jiný typ strojového vidění. Další možností je namísto bílého pozadí a černých součástí použít pozadí černé a součásti bílé. Výsledky strojového vidění by v takovém případě neměly být rozdílné.

8 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvoření virtuálního zprovoznění robotické edukační buňky. Edukační buňka je vybavena strojovým viděním a úkolem této práce bylo vytvořit demonstrační program na ukázkou schopností této technologie. Pro dvě různé edukační buňky byly vytvořeny dva demonstrační programy založené na stejné bázi, ale každý uzpůsoben pro použití na konkrétní buňce.

Práce je koncipována do čtyř kapitol. V první kapitole byl shrnut současný stav poznání všech důležitých témat týkajících se zadaného úkolu. Byla vytvořena rešerše robotizace obecně, robotických edukačních buněk, programování robotů, virtuálního zprovoznění a strojového vidění. Získané poznatky z rešerše byly později využity při samotné tvorbě virtuálního zprovoznění.

Druhá kapitola se zabývá návrhem buňky. Jsou v ní zmíněny všechny nároky na robotickou buňku, které mají vliv na design buňky a tvorbu programu. Nejedná se o buňku určenou do výroby, takže požadavky na buňku nebyly ani tak na produktivitu jako na demonstrativnost.

Ve třetí kapitole byl proveden systémový rozbor, ve kterém byl popsán řešený problém, byly stanoveny cíle práce a byl vypracován systém podstatných veličin. Na základě systémového rozboru pak mohlo být vypracováno vlastní řešení.

Čtvrtá kapitola pak pojednává o tvorbě vlastního řešení. Nejprve byl navržen pro každý robot gripper a jeho prsty. Dále je popsán návrh manipulovaných součástí. Poté byl navržen layout jednotlivých robotických buněk a byl vytvořen jejich 3D model. Ten byl kompletován v softwaru RoboGuide, kde byl následně pro každou buňku vytvořen offline program. Na něj pak bylo navázáno s vytvořením samotného virtuálního zprovoznění buněk a byla provedena jejich simulace, to vše stále v programu RoboGuide. Simulace byla provedena tak, aby věrně kopírovala vlastnosti reálné robotické buňky. Strojové vidění však lze virtuálně simulovat pouze orientačně. Po převedení programu na fyzický robot tak bylo strojové vidění intenzivně testováno a jeho nastavení bylo změněno. Na jednu buňku bylo nainstalováno přídatné osvětlení. Dále byly popsány jednotlivé programy a byly přiblíženy některé jejich funkce. Posledním krokem pak byl popis tvorby virtuálního zprovoznění a simulace.

Diplomová práce splnila všechny předem stanovené cíle. Vytvořené simulace jsou virtuálními kopiemi reálných robotických buněk. Nad rámec cílů diplomové práce byly obě vytvořené simulace úspěšně ověřeny a odladěny na reálných robotických buňkách.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Welcome To The Presentations of World Robotics 2022* [online]. Frankfurt nad Mohanem: Internatinal Federation of Robotics. Poslední změna říjen 2022 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: [PowerPoint-Präsentation \(ifr.org\)](#)
- [2] Industrial Educational Package. *The Factory Automation Company* [online]. In: Fanuc.eu [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/de/en/robots/educational-package/crx-educational-package>
- [3] CRX Educational Package. *The Factory Automation Company* [online]. In: Fanuc.eu [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/de/en/robots/educational-package/crx-educational-package>
- [4] Education Package [online]. *ASEA Brown Boveri*. In: Abb.com. 17.5.2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: [ABB Robotics Education Package | ABB Robotics](#)
- [5] KUKA ready2_educate [online]. *KUKA Deutschland GmbH*. In: Kuka.com. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/ready2_use/kuka-ready2_educate
- [6] Celllule Ready2_Educate [online]. *ERM Automatismes*. In: Erm-automatismes.com. Poslední změna 2021 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.erm-automatismes.com/p462-eng-cellule-ready2-educate.html?g=4>
- [7] Education Program Teach Me Cell [online]. *Roboplan*. In: Roboplan.pt. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.roboplan.pt/en/products/education-program/you-teach-me>
- [8] „You Teach Me“ Robot [online]. *Roboplan*. In: Roboplan.pt. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.roboplan.pt/upload/flyer-escolas-cell-mototraining-e-06_6076d2104cb3f.pdf
- [9] Intelligent 3-D Robot Simulation. *The Factory Automation Company* [online]. In: Fanuc.eu [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/en/robots/accessories/roboguide>
- [10] RobotStudio [online]. *ASEA Brown Boveri*. In: Abb.com. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio/robotstudio-desktop>
- [11] KUKA.Sim [online]. *KUKA Deutschland GmbH*. In: Kuka.com. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%c5%beby/robotick%c3%a9-syst%c3%a9my/software/pl%c3%a1nov%c3%a1n%c3%ad-projektov%c3%a1n%c3%ad-servis-bezpe%c4%8dnost/kuka,-d,-sim>
- [12] MotoSim EG-VRC [online]. *YASKAWA Czech s.r.o.* In: Yaskawa.eu.com. Poslední změna 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: https://www.cz.yaskawa.eu.com/products/software/productdetail/product/motosim-eg-vcrc_1686
- [13] Simulate And Program Your Robot In 5 Easy Steps [online]. *RoboDK Inc.* In: Robodk.com. Poslední změna 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://robodk.com/simulation>
- [14] Verify manufacturing processes in 3D environments [online]. *Siemens PLM Software*. In: Sw.siemens.com [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/tecnomatix/products/process-simulate-software/>

- [15] Visual Components 4.6 [online]. *Visual Components Oy*. In: Visualcomponents.com. Poslední změna 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.visualcomponents.com/products/>
- [16] HORNBERG, Alexander. *Handbook of Machine Vision*. 1. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. ISBN 978-3-527-40584-8
- [17] SUN, Qiucheng, Yueqian HOU a Qingchang TAN. A subpixel edge detection method based on an arctangent edge model. *Optik* [online]. 2016, **127**(14), 5702-5710 [cit. 2023-05-26]. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2016.03.058
- [18] BATCHELOR, Bruce G. *Machine vision handbook: with 1295 figures and 117 tables* [online]. London: Springer, 2012 [cit. 2023-05-20]. ISBN 978-1-84996-169-1.
- [19] Opto-E Basics – Cameras [online]. *Opto Engineering*. In: Opto-e.com. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/en/basics/cameras>
- [20] Scan Cameras Vs. Area Scan Cameras – Microfilm Scanning [online]. *Digital Check Corp*. In: Nextscan.com. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.nextscan.com/line-scan-cameras-vs-area-scan-cameras-microfilm-scanning/>
- [21] A Practical Guide To Machine Vision Lighting [online]. *National Instruments Corp*. In: Ni.com. Poslední změna 24.03.2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.ni.com/cs-cz/shop/choosing-the-right-hardware-for-your-vision-applications/a-practical-guide-to-machine-vision-lighting.html?fbclid=IwAR3CsDz7ieBP2LmnwxNq8iFl_dcQzrUWHZ24tjr64-bGHlaVY8Lzb1_YskQ
- [22] Gripper for small components [online]. *SCHUNK SE & Co. KG*. In: Schunk.com. Poslední změna 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://schunk.com/de/en/gripping-systems/parallel-gripper/egp/egp-40-n-n-b/p/000000000000310940>
- [23] Coefficient of friction, Rolling resistance and Aerodynamics [online]. In: Tribology-abc.com. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.tribology-abc.com/abc/cof.htm>
- [24] Collaborating Gripper for small components [online]. *SCHUNK SE & Co. KG*. In: Schunk.com. Poslední změna 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://schunk.com/de/en/gripping-systems/parallel-gripper/co-act-egp-c/co-act-egp-c-64-n-n-fcrxid/p/000000000001441948>
- [25] SICILIANO, Bruno a Oussama. KHATIB. *Springer handbook of robotics*. Berlin: Springer, c2008. ISBN 978-3-540-23957-4
- [26] HOFFMAN, Peter, SCHUMANN, Reimar, MAKSOU, Talal M.A., GIULIANO, C.Premier. Virtual commissioning of manufacturing systems. A Review And New Approaches For Simplification [online]. *European Council for Modeling and Simulation*. 2010. DOI: 10.7148/2010-0175-0181 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.scs-europe.net/conf/ecms2010/2010%20accepted%20papers/ibs_ECMS2010_0041.pdf
- [27] LECHLER, Tobias, FISCHER, Eva, METZNER, Maximilian, MAYR, Andreas, FRANKE? Jörg. Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems [online]. *Institute for Factory Automation and Production Systems*, 2023. [cit. 2023-05-21]. DOI: [10.1016/j.procir.2019.03.278](https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.278). Dostupné z: [Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1546179819300000)

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam zkratk

2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
F	Síla
g	gram
HMI	Human Machine Interface
I/O	Input/Output
IP	Ingress protection
LBL	Label
LED	Light-Emitting Diode
M	Moment
mm	Milimetr
N	Newton
PLA	Polylactic Acid
PLC	Programmable Logic Controller
PR	Position Register
USB	Universal Serial Bus
VR	Visual register

10.2 Seznam obrázků

OBR. 1) SROVNÁNÍ POČTU INSTALOVANÝCH ROBOTŮ NAPŘÍČ ODVĚTVÍMI [1]	19
OBR. 2) POČET ROBOTŮ V TISÍCÍCH INSTALOVANÝCH DO VÝROBY PO CELÉM SVĚTĚ V ČASE [1]	20
OBR. 3) POČET ROBOTŮ V TISÍCÍCH INSTALOVANÝCH DO VÝROBY V EVROPĚ V ČASE [1]	20
OBR. 4) DETEKOVANÁ HRANA [17]	26
OBR. 5) BACKLIGHT [22]	28
OBR. 6) ROZPTÝLENÉ OSVĚTLENÍ KUPOLOVÉ, KOAXIÁLNÍ A PLOCHÉ [22] 29	29
OBR. 7) SMĚROVÉ OSVĚTLENÍ [22]	29

OBR. 8) TEMNÉ POLE [22].....	29
OBR. 9) NÁVRH ROBOTICKÉ BUŇKY	30
OBR. 10) PRST GRIPPERU PRO ROBOT ER-4IA	33
OBR. 11) VÝSLEDNÉ SÍLY A MOMENTY POUŽITÉHO GRIPPERU EGP 40-N-N-B 34	
OBR. 12) VÝSLEDNÉ SÍLY A MOMENTY PRO ZVOLENÝ GRIPPER CO-ACT EGP-C 64-N-N-FCRXID	35
OBR. 13) A) PÍSMENO T PRO ROBOT ER-4IA, B) PÍSMENO L PRO ROBOT ER-4IA	36
OBR. 14) A) PÍSMENO T PRO ROBOT CRX-10IA, B) PÍSMENO L PRO ROBOT CRX-10IA	36
OBR. 15) POPIS ROBOTICKÉ BUŇKY ER-4IA	37
OBR. 16) LAYOUT PRACOVNÍ PLOCHY ROBOTICKÉ BUŇKY ER-4IA	38
OBR. 17) POPIS ROBOTICKÉ BUŇKY CRX-10IA	39
OBR. 18) LAYOUT PRACOVNÍ PLOCHY ROBOTICKÉ BUŇKY CRX-10IA ..	40
OBR. 19) NASTAVENÍ STROJOVÉHO VIDĚNÍ ER-4IA	43
OBR. 20) SOUČÁST SPRÁVNĚ OTOČENÁ NALEZENA, SOUČÁST NESPRÁVNĚ OTOČENA TĚMĚŘ NALEZENA, HODNOTA SHODY NENALEZENÉ SOUČÁSTI SE BLÍŽÍ HRANICI SHODY PRO NALEZENÍ SOUČÁSTI.	45
OBR. 21) VÝSLEDEK KALIBRACE, NALEZENÉ KALIBRAČNÍ BODY A VYPOČÍTANÉ HODNOTY	46
OBR. 22) NALEZENÉ A TĚMĚŘ NALEZENÉ PRVKY Z PRVNÍHO KROKU STROJOVÉHO VIDĚNÍ. UPŘEDNOSTNĚN BUDE NALEZENÝ OBJEKT S NEJVYŠŠÍ SHODOU.....	47
OBR. 23) NALEZENÁ SOUČÁST PO DRUHÉM KROKU STROJOVÉHO VIDĚNÍ 48	
OBR. 24) PROSTŘEDÍ SIMULAČNÍHO PROGRAMOVÁNÍ V ROBOGUIDE .	49
OBR. 25) VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRO PROGRAM NA ROBOTU ER-4IA, PRVNÍ ČÁST	51
OBR. 26) VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRO PROGRAM NA ROBOTU ER-4IA, DRUHÁ ČÁST	52
OBR. 27) VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRO PROGRAM NA ROBOTU CRX-10IA.	54
OBR. 28) NA PRAVÉ STRANĚ PODPROGRAM PRO VYHLEDÁVÁNÍ SPOLEČNÉ ČÁSTI, NA LEVÉ STRANĚ ČÁST PODPROGRAMU PRO NALEZENÍ A PŘESUN PÍSMENE L.....	55
OBR. 29) PODPROGRAM PRO ODEBRÁNÍ PÍSMENE.....	56
OBR. 30) ÚSEK PROGRAMU PRO ZJIŠTĚNÍ, KTERÉ SOUČÁSTI BYLY NALEZENY PŘI DEMONSTRAČNÍM PROGRAMU A JEJICH ZPĚTNÉ VHOZENÍ NA PRACOVNÍ PLOCHU	57

OBR. 31) PARAMETRY VLOŽENÉ SOUČÁSTI.....	58
OBR. 32) VAZBA SOUČÁSTI NA GRIPPER	59
OBR. 33) PROGRAM PRO UCHOPENÍ SOUČÁSTI V PROSTŘEDÍ SIMULAČNÍHO PROGRAMOVÁNÍ.....	60
OBR. 34) VAZBA SOUČÁSTI S PODLOŽKOU	60

11 SEZNAM PŘÍLOH

1. 2023_DP_Novak_Stepan_200817_video_ER-4iA
Video demonstrující virtuální zprovoznění a ověření na reálném robotu ER-4iA
2. 2023_DP_Novak_Stepan_200817_video_CRX-10iA
Video demonstrující virtuální zprovoznění a ověření na reálném robotu CRX-10iA