



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

KOLABORATIVNÍ ROBOT S ADAPTIVNÍMI UCHOPOVAČI

COLLABORATIVE ROBOT WITH ADAPTIVE GRIPPERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Vondráček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Najman

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Jakub Vondráček
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Jan Najman
Akademický rok:	2020/21

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

Kolaborativní robot s adaptivními uchopovači

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kolaborativní robotika je moderním trendem v automatizaci výroby a Průmyslu 4.0.

Mechatronická laboratoř nově disponuje novým robotem UR5e od firmy Universal Robots, která je lídrem v oblasti kolaborativní robotiky a dlouhodobě určuje trendy.

Kromě robotu jsou k dispozici i dva adaptivní uchopovače (grippery) – dvouprstý se snímáním síly a tříprstý.

Tato práce umožní studentovi důkladně se seznámit s tímto robotem a kolaborativní robotikou obecně. Cílem pak bude prozkoumat a prakticky otestovat všechny hlavní funkce ramene i uchopovačů.

Cíle bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši v oblasti snímání síly u kolaborativních robotů a využití adaptivních uchopovačů v průmyslové praxi.
2. Na vybraném robotickém rameni a adaptivních uchopovačích jednotlivě otestujte jejich hlavní funkce a vytvořte ukázkové úlohy demonstrující tyto funkce v praxi.
3. Proveďte rešerši dostupných softwarových nástrojů, umožňující simulaci funkcí a pohybu robota UR5 a jeho interakci o okolním prostředí. Ve vybraném software pak naprogramujte ukázkovou úlohu.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

GREPL, Robert. Kinematika a dynamika mechatronických systémů. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 158 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-3530-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kolaborativními roboty a adaptivními uchopovači se zaměřením na praktické testování robota UR5 od Universal robots s adaptivními uchopovači Onrobot RG2 a Robotiq 3F, které jsou k dispozici v mechatronické laboratoři Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

V první části práce je provedena rešerše, která představuje základní problematiku kolaborativních robotů, adaptivních uchopovačů, snímání síly a dále také možnosti softwarové simulace zaměřené na testování uvedeného dostupného kolaborativního robota.

V druhé části práce je uvedena metodika a vypracování praktické práce s robotem, která je zaměřená na otestování všech základních funkcí robota na jednoduchých úlohách. V poslední sekci práce je zpracována simulace komplexnější úlohy robota z inženýrské praxe za pomoci vybraného softwaru.

Klíčová slova

Universal robots UR5, Onrobot RG2, Robotiq 3F, kolaborativní robot, adaptivní uchopovače, simulační software CoppeliaSim

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with collaborative robots and adaptive grippers with a focus on practical testing of the UR5 robot from Universal robots with adaptive grippers Onrobot RG2 and Robotiq 3F, which are available in the mechatronic laboratory of the Faculty of Mechanical Engineering of Brno University of Technology.

In the first part of the work, a search is performed, which presents the basic issues of collaborative robots, adaptive grippers, force sensing, as well as the possibility of software simulation aimed at testing the available collaborative robot.

The second part of the work presents the methodology and development of practical work with the robot, which is focused on testing all the basic functions of the robot on simple tasks. The last section of the thesis shows a simulation of a more complex robot task from engineering practice using selected software.

Key words

Universal robots UR5, Onrobot RG2, Robotiq 3F, collaborative robots, adaptive grippers, simulation software CoppeliaSim

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VONDRÁČEK, Jakub. *Kolaborativní robot s adaptivními uchopovači*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132338>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jan Najman

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Kolaborativní robot s adaptivními uchopovači vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. května 2021

.....
Datum

.....
Jakub Vondráček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Janu Najmanovi za vedení, ochotu, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vytváření této závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Rešeršní studie.....	11
1.1 Kolaborativní roboty.....	11
1.1.1 Bezpečnost.....	13
1.1.2 Snímání síly u kolaborativních robotů.....	14
1.1.3 Robot UR5 od Universal Robots.....	15
1.2 Adaptivní uchopovače.....	18
1.2.1 Využití adaptivních uchopovačů v praxi.....	19
1.2.2 Onrobot RG2.....	20
1.2.3 Robotiq 3F.....	21
1.3 Základní funkce robota UR5 s uchopovači.....	23
1.4 Možnosti simulačních prostředí pro robota UR5 s uchopovači.....	26
1.4.1 CoppeliaSim.....	26
1.4.2 Webots.....	28
1.4.3 Gazebo.....	29
1.4.4 Další možnosti.....	30
2 Řešení a výsledky.....	31
2.1 Použité uspořádání.....	31
2.2 Základní vytvořené úlohy.....	32
2.2.1 Optimalizované přenášení s kontrolou.....	32
2.2.2 Automatizované třídění sloupců.....	33
2.2.3 Nastavení bezpečnostní hranice.....	34
2.2.4 Skládání stavebnice.....	35
2.2.5 Nanášení lepidla.....	36
2.3 Komplexní úloha v prostředí CoppeliaSim.....	37
2.3.1 Popis konfigurace a funkce robota.....	37
2.3.2 Programování simulace.....	39
ZÁVĚR.....	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	43

ÚVOD

Se současným trendem Průmyslu 4.0 se kolaborativní roboty dostávají postupně do všech odvětví průmyslové výroby. S postupným zmenšováním a zlevňováním těchto robotů se objevují čím dál tím častěji také v menších firmách, kde se tímto způsobem často daří snižovat výrobní náklady a zvyšovat přesnost a produktivitu. Hlavní výhodou kolaborativních robotů přitom je fakt, že mohou spolupracovat s lidskými pracovníky, aniž by došlo ke ohrožení jejich bezpečnosti a nahrazovat je takto při procesech, které by byly pro člověka příliš náročné. Při kombinaci robota s adaptivními uchopovači se jeho možnosti uplatnění ještě násobí.

Můžeme tedy vidět, že tematika kolaborativních robotů se stává stále aktuálnější. Mechatronická laboratoř VUT FSI v Brně pro primárně vzdělávací účely nově disponuje také robotem UR5 od firmy Universal Robots, která představuje jednu z předních společností pro vývoj tohoto typu robotů. Dále byly k robotu pořízeny také dva adaptivní uchopovače pro větší univerzálnost využití robota. Studentům je tedy umožněno seznámit se s touto technologií ve kvalitní podobě, která se reálně používá v průmyslové praxi.

Této možnosti bylo využito při zpracování této práce, jejímž hlavním účelem je otestovat hlavní funkce tohoto robota. Pro lepší porozumění fungování tohoto robota je v první části této práce provedena rešerše kolaborativních robotů a adaptivních uchopovačů se zaměřením na ty, které jsou zde testovány.

Druhou významnou kapitolou je rozbor možností využití softwaru pro simulaci tohoto robota. Tato možnost simulace může být užitečná v případech, kdy není možné testovat některé funkce přímo s robotem. Tohoto faktu je také využito v poslední části této práce, kde je provedena simulace komplexnější úlohy se zmíněnými nástroji.

Na začátku praktické části byly testovány ty nejběžnější a reálně nejpoužívanější funkce robota, které byly formulovány do jednoduchých praktických úloh. Na závěr praktické části byla testována úloha komplexnější, která měla jednotlivé funkce ukázané v první části spojovat dohromady v úlohu, která je již podobnější průmyslové praxi. Z důvodu omezení byla tato úloha provedena za pomoci simulace v programu CoppeliaSim.

1 Rešeršní studie

1.1 Kolaborativní roboty

Jsou to zjednodušeně roboty uzpůsobené spolupráci s člověkem. Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, kolaborativní roboty mají rozhodně v průmyslu svoje místo. Obecně, jak již vyplývá z jejich názvu, se využívají zejména v případech, kdy je nutná kooperace s člověkem. Zároveň to musí být případy, kdy není nutné pracovat při tak velkých zatíženích nebo při tak velkých rychlostech. Využití také představují procesy, kdy funkce nelze zcela automatizovat bez přítomnosti člověka a procesy pro malé série produktů, kdy je třeba konfiguraci často měnit [1].



Obrázek 1 - Comau Aura – kolaborativní robot s momentálně největším možným zatížením [2]

Oproti tomu využití konvenčních průmyslových robotů se zaměřuje primárně na plně automatizované výrobní linky, které jsou velmi časté například v automobilovém průmyslu. Vhodnější jsou také v případech, kdy je třeba manipulovat s velmi těžkými břemeny.



Obrázek 2 - M-2000iA/2300 – průmyslový robot s momentálně největším možným zatížením [3]

Výhody kolaborativních robotů

Hlavní výhody kolaborativních, ale i konvenčních průmyslových robotů oproti lidským pracovníkům využijí zejména majitelé firem. Kolaborativní roboty výrazně zvyšují produktivitu, jelikož pro ně neplatí stejná omezení jako na člověka a mohou tedy pracovat bez přestávky. Výhodou je také naprostá přesnost, která se ani přes nepřetržitý provoz nezhorší.

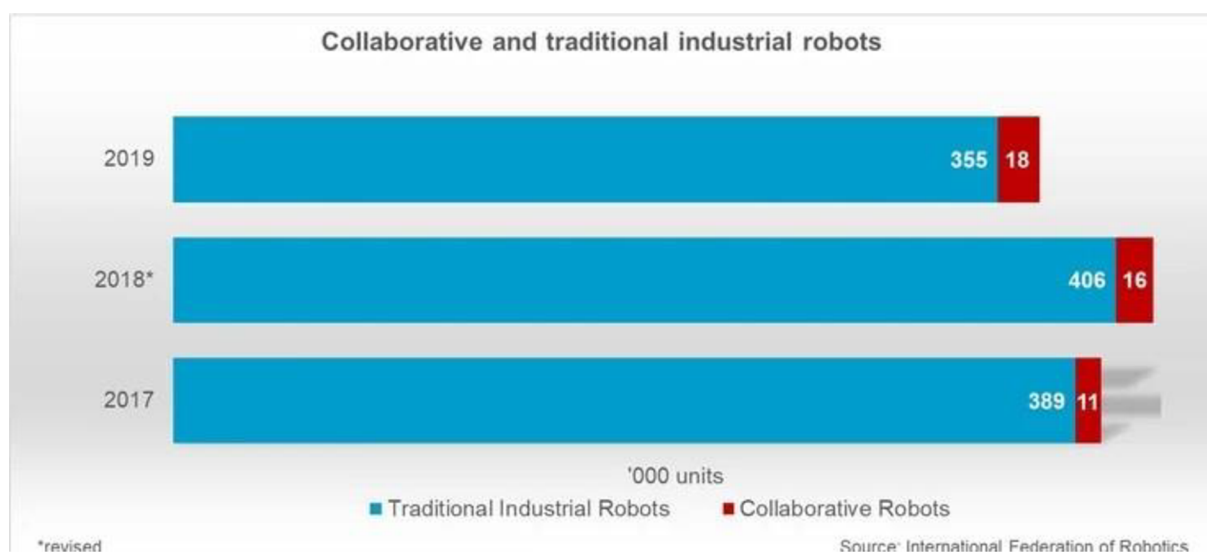
Co se týče výhod oproti jiným typům průmyslových robotů, tak zde se jedná především právě o fakt, že kolaborativní roboty mohou bez problému pracovat v těsné blízkosti s lidskými pracovníky. Tento typ robotů je obecně také výrazně mobilnější a tím flexibilnější, jelikož obecně bývá menší a nemusí kolem sebe mít žádné ochranné zábrany. Dále je důležité zmínit, že pro práci s tímto typem robotů je obvykle potřeba daleko menší kvalifikovanost personálu, který s ním zachází, jelikož je robot uzpůsoben tak, aby fungoval v prostoru s běžnými pracovníky a obvykle je ovládán přes srozumitelné uživatelské prostředí.

Nevýhody kolaborativních robotů

Nevýhodou jsou tyto roboty zejména pro zaměstnance s nižší kvalifikací, protože právě tento typ zaměstnanců roboty nahrazují.

Mezi nevýhody, kvůli kterým však velká část firem kolaborativní roboty nepoužívá se řadí zejména jejich specifikace. Vzhledem k požadovaným bezpečnostním opatřením na kolaborativní roboty, nejsou schopni pracovat ani zdaleka s takovou zátěží, rychlostí nebo takovým rozsahem jako některé ostatní průmyslové roboty. Některé průmyslové roboty jsou schopny pracovat s maximálním zatížením až 2,3 tun u robota M-2000 od firmy Fanuc, který můžeme vidět na obrázku 2. U kolaborativních robotů je toto maximum 170 kg u robota Aura od společnosti Comau (viz obrázek 1). Výrazně obvyklejší jsou však tyto roboty s maximálním zatížením 5–20 kg.

I z tohoto důvodu můžeme vidět na následujícím obrázku ze světové roční zprávy od Mezinárodní robotické federace, že v celkovém objemu robotů, jsou ty kolaborativní stále v menšině, přestože se jejich podíl každým rokem zvětšuje [4].



Obrázek 3 - Podíl konvenčních a kolaborativních robotů na celkovém počtu prodaných robotů [4]

1.1.1 Bezpečnost

Velkým rozdílem mezi konvenčními a kolaborativními roboty je bezpečnost. Přestože u všech robotů je ošetřena minimálně bezpečnostní normou ČSN EN ISO 10218, u obou typů je zajištěna odlišným způsobem.

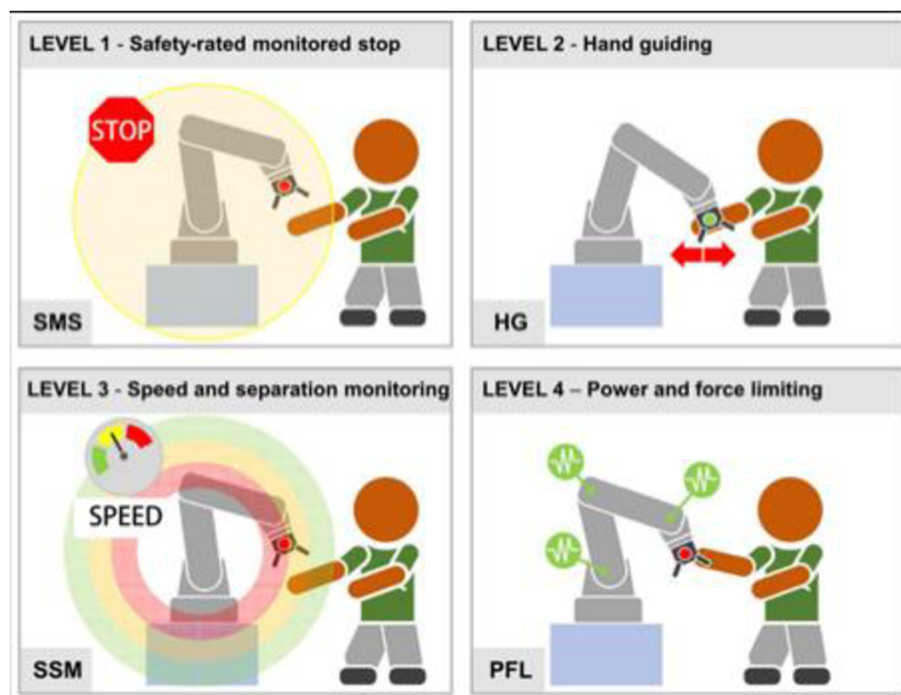
Pro kolaborativní roboty navíc byla postupně přidána další opatření jako je například specifikace ISO/TS 15066, jejíž hlavním východiskem je, že robot při kontaktu s člověkem nesmí způsobit zranění nebo bolest. Vzhledem k tomu, že kolaborativní roboty jsou relativně nová záležitost, bude pravděpodobně opatření přibývat a během roku 2021 by mělo dokonce dojít k obnově normy 10218 [5].

U kolaborativních robotů je typicky bezpečnost na základě těchto opatření zaručena za pomoci omezení síly, výkon a momentu. Tyto faktory musí být omezeny právě na takovou hodnotu, aby nemohl robot u případné kolize způsobit zranění.

Norma také vymezuje možnost ručního vedení robota nebo případně monitorování rychlosti a odstupu okolních pracovníků s tím, že pokud monitorovací systém vyhodnotí, že se nachází pracovník příliš blízko robota, změní se automaticky jeho rychlost a výkon zpět na přijatelnou hodnotu, která zaručuje, že nedojde ke zranění při kolizi.

Naopak u konvenčních průmyslových robotů se nejčastěji používá pro zaručení bezpečnosti oplocení, tak aby se člověk do kontaktu s robotem nemohl dostat v žádném případě. To by mělo také být zaručeno bezpečnostním zastavením, kdy v případě, že se člověk musí v určitý moment pohybovat v rámci oplocení, dojde k zastavení robota. [6]

Všechny zmíněné módy používání robotů, které specifikuje vyhláška TS 15066 můžeme vidět v ukázce na následujícím obrázku.



Obrázek 4 - módy používání kolaborativních robotů dle specifikace TS 15066 [6]

1.1.2 Snímání síly u kolaborativních robotů

Snímání síly v prostředí kolaborativních robotů je jednou z nejvyužívanějších možností vylepšení funkčnosti těchto robotů. Je možné jí využít v případech, kdy je třeba přesné působení síly v určitém směru nebo například pro zlepšení bezpečnostní charakteristiky robota. V praxi robotická ramena pro snímání síly využívají nejčastěji jednu z následujících možností:

Přídavný sensor síly/momentu – Tento typ sensoru je nejčastěji připojen před koncový nástroj robota. Toto uspořádání umožňuje robotu pracovat s velmi velkou přesností, která je potřeba například při obrábění či broušení materiálu. Případně pro šroubování v případě využití sensoru momentu. Předností tohoto typu sensoru je velmi jednoduchá instalace, lehká výměna a zároveň zaručení vysoké přesnosti. Malým nedostatkem však může být, že jej nelze použít pro omezení kolize robota, jelikož je připevněn až na koncový efektor [7]. Příkladem takového 6-osého sensoru pro robot UR5 může být sensor síly a momentu od společnosti Onrobot (viz obrázek 5).



Obrázek 5 - sensor síly a momentu od firmy Onrobot [8]

Sensor momentu pro jednotlivé klouby robota – Tento typ sensoru je integrovaný přímo v kloubech robota. To je výhodné zejména pro zlepšení bezpečnosti a funkci nouzového zastavení robota při kolizi. Snímač získává přímo hodnotu momentu na základě měření deformace v jednotlivých kloubech.

Virtuální sensor síly – Tento typ sensoru využívá k měření přesného kinematického a dynamického modelu v kombinaci s měřením proudu motorů v jednotlivých kloubech. Na základě těchto hodnot dopočítává sensor jednotlivé síly [7]. Tato možnost je v praxi pro mnoho případů ideálním řešením, jelikož umožňuje monitorovat moment na všech kloubech robota, aniž by bylo potřeba přidávat dodatečné sensory. Tento typ sensoru je opět využíván primárně pro zaručení bezpečnosti a funkci nouzového zastavení, a tak pro využití přesné manipulace s nástrojem je vhodné použít ještě přídavný sensor síly a momentu na koncový efektor. Virtuální sensor síly využívají momentálně všechny roboty od společnosti Universal Robots.

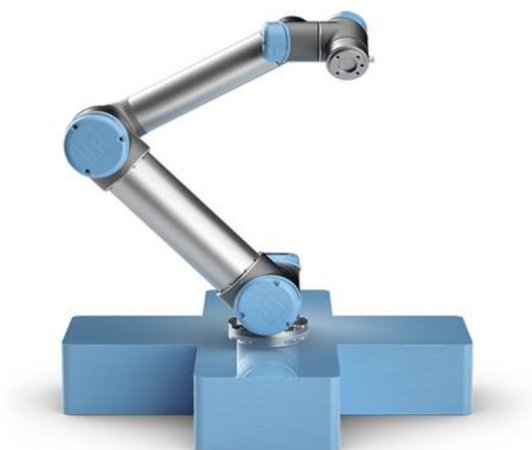
1.1.3 Robot UR5 od Universal Robots

UR5 je robot, který byl při vytváření této práce používán, jelikož je nyní k dispozici zejména pro vzdělávací účely studentů v mechatronické laboratoři FSI VUT v Brně. Robot je pro vzdělávací účely vhodný také proto, že práce s ním by měla být bezpečná a ovládání relativně jednoduché.

Dánská firma Universal Robots patří v tomto odvětví mezi přední výrobce a vývojáře. Samotný model UR5 má také dlouhou historii, jelikož se jedná o celosvětově první kolaborativní robot, který byl na trh uveden v roce 2008. Odstartoval tak celou éru tohoto typu robotů [9].

Specifikace robotického ramena UR5e

Toto rameno patří do řady robotů UR (3,5,10,16), kde číslo 5 odpovídá manipulačnímu zatížení, které je zde maximálně 5 kg. Hmotnost samotného robota je přitom 18,4 kg, půdorys jeho základny má pouze necelých 15 cm a radius, ve kterém se od této základny může pohybovat je 85 cm. Rameno má 6 otočných kloubů, které se mohou otáčet rychlostí 180° za sekundu. Samotný nástroj se pak může pohybovat rychlostí 1 m/s [10].



Obrázek 6 – Robotické rameno UR5e [11]

Uživatelské rozhraní

Pro ovládání robota je určeno primárně rozhraní na dotykovém tabletu, který k němu je připojen od výrobce. Universal Robots zavedl platformu UR+, pod kterou zařazuje ve spolupráci s dalšími výrobci stovky produktů (uchopovačů, koncových nástrojů apod.), které jsou s operačním systémem tohoto tabletu plně kompatibilní. Což znamená, že po jednoduché instalaci je možné plně ovládat přes rozhraní nejen robotické rameno, ale také všechno jeho příslušenství. Před zavedením tohoto systému museli vždy koncoví uživatelé před použitím naprogramovat jednoduché aplikace pro ovládání konkrétního zakoupeného příslušenství [12].

Přes dotykovou obrazovku je možné ovládat všechny funkce robota i uchopovačů, které jsou blíže popsány v kapitole 1.3 této práce.



Obrázek 7 - Ovládací panel pro UR5 [13,14]

Jak můžeme vidět z obrázku 7, ovládací panel má kromě dotykové obrazovky tři tlačítka:

- Nouzový vypínač (červené)
- Tlačítko napájení
- Tlačítko pro umožnění ručního vedení robota (černé zespodu)



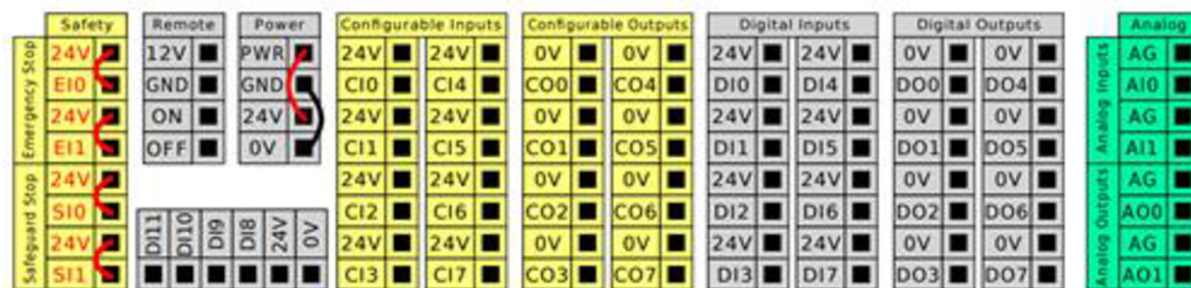
Obrázek 8 - hlavní menu (zvětšené) [13]

Samotná obrazovka je pak rozdělena na několik hlavních sekcí:

- Spustit – zde se nachází
- Program – programování jednotlivých pohybů robota pro automatizaci
- Instalace – nastavení primárně bezpečnostních prvků robota, jednotlivé sběrnice a připojení dalšího příslušenství (například uchopovačů)
- Pohyb – zde se znázorňuje graficky pohyb a je možné individuálně pohybovat všemi klouby robota
- V/V – nastavení jednotlivých analogových a digitálních vstupů/výstupů
- Protokol/Log – protokol data, chybové zprávy a informace o stavu robota

Komunikace s dalšími zařízeními

Robotické rameno UR5 umožňuje komunikaci s dalšími zařízeními jako jsou například dopravníky či sensory, což umožňuje zvýšit míru automatizace. Všechny vstupy a výstupy jsou umístěny v ovládací skřínce, kde se nachází bezpečnostní ovládací deska, která zpracovává komunikaci.



Obrázek 9 - vstupy a výstupy robota RG5 [15]

Vstupy a výstupy	Využití	Barevné znázornění
4 dedikované bezpečnostní vstupy [24 V]	Připojení externího nouzového zastavení	žluté s červeným písmem
konfigurovatelné bezpečnostní – 8 IN, 8 OUT [24 V]	Konfigurovatelné pro bezpečnost	žluté s černým písmem
Digitální – 8 IN, 8 OUT [24 V]	Externí zařízení (senzory, dopravníky,..)	šedé
Analogové – 2 IN, 2 OUT [0-10 V]	Externí zařízení (např. některé senzory)	zelené
4 vysokorychlostní digitální vstupy [24 V]	Externí zařízení (senzory, dopravníky,..)	šedé horizontálně
Vzdálené zapnutí/vypnutí [12 V]	Možnost externího zapnutí/vypnutí	šedé - označeno Remote
Externí zdroj napájení [24 V]	Možnost externího napájení V/V	šedé - označeno Power

Tabulka 1 – popis jednotlivých vstupů a výstupů ovládací skřínky

V této bezpečnostní skřínce je dále možnost připojení přes ethernet či USB konektor. Nachází se zde také SD karta, která obsahuje veškerý předinstalovaný software včetně operačního systému a nahrávají se zde též všechny programy vytvořené uživatelem.

Na konci robotického ramene je také jeden 8 pinový konektor pro jednoduché připojení některých nástrojů.

Využití

Využití je velmi široké a velmi podobné jako u ostatních kolaborativních robotů. Vzhledem k použitému nástavci lze robota využít na montáž, dávkování, dokončovací práce, manipulace s materiály, obsluhu strojů, odstraňování materiálu, kontrolu kvality či například svařování. V tomhle ohledu by se dalo říct, že zvládne prakticky vše, co zvládne lidská ruka, záleží pouze od možností daného nástroje a zatížení nesmí překročit 5 kg. Některé možnosti využití pro s konkrétními nástroji jsou dále popsány v kapitole 1.2.1.

1.2 Adaptivní uchopovače

Přestože základním kamenem kolaborativního robota je samotná robotická ruka, bez přidavných nástrojů s ní nelze provádět prakticky žádné úkony. Existuje mnoho typů těchto nástrojů jako například kamerové nástavce, 3D scannery či speciálně uzpůsobené brusky nebo pistole na lepidlo a barvu. Jednou z kategorií nástavců jsou právě uchopovače, ty jsou nejčastěji přísavkové nebo mechanické adaptivní s dvěma až třemi jednotlivými robotickými prsty. Všechny zmíněné varianty jsou dostupné i pro robota UR5 v rámci platformy UR+.

Rozdíl mezi adaptivními a jinými druhy uchopovačů je ten, že ačkoliv například neadaptivní přísavkové uchopovače v principu splňují stejnou funkcionalitu, není možné, aby měnily své uspořádání a přizpůsobily se tak materiálu, se kterým zacházejí. Proto jsou výrazně častěji používány v situacích, kdy je sice potřeba velká plocha úchopu, ale samotná plocha je vždy do určité míry podobná a plochá, takže přísavky nemají problém udržet materiál, který má větší rozměry, než je rozpětí mezi prsty běžných adaptivních uchopovačů.



Obrázek 10 – přísavkový (neadaptivní) uchopovač pro UR5 [16]

Jak již bylo zmíněné, nejběžnější typ adaptivních uchopovačů jsou mechanické se dvěma až třemi prsty. Pod tento typ se řadí také RG2 od společnosti Onrobot a 3F od společnosti Robotiq, které byly využity v praktických úlohách této práce a jsou blíže popsány dále. S vývojem technologií můžeme však také narazit na specializované adaptivní uchopovače s měkkým zakončením jako jsou například Soft Gripper od Onrobot nebo Festo Adaptive Shape Gripper od firmy Festo.



Obrázek 11 - Festo Adaptive Shape Gripper [18]



Obrázek 12 - Soft Gripper Onrobot [17]

Tento typ uchopovačů je schopen kompletně nebo částečně obklopit součástku, se kterou manipuluje, což umožňuje přenášení objektů se zcela odlišnými tvary. Limitací je zde však váha a velikost objektu.

1.2.1 Využití adaptivních uchopovačů v praxi

Adaptivní uchopovače se v praxi používají pro velké množství aplikací, těmi nejčastějšími jsou:

Manipulace s materiálem

Manipulace s materiálem na výrobní lince je obvykle velmi opakující se činnost, to v praxi znamená, že je velmi jednoduché pro ni naprogramovat robota. Adaptivní uchopovače umožňují automatizaci v tomto ohledu, jelikož roboty díky nim mohou u výrobní linky přesouvat, paletizovat a balit jednotlivé produkty.

Ovládání strojů

Dalším krokem k automatizaci fabrik je ovládání jiných strojů pomocí robotů. V tomto ohledu jsou adaptivní uchopovače velmi výhodné, jelikož jsou schopny se přizpůsobit různým ovládaním různých robotů. Mohou tak nejen zmáčknout tlačítko pro vypnutí/zapnutí stroje, ale také otevírat dveře k CNC strojům, vyměňovat jednotlivé obrobky či vyčkat na signál od konkrétního přístroje, že vykonal potřebnou činnost a robot může pokračovat v procesu obsluhy.



Obrázek 13 - obsluha CNC stroje s využitím adaptivních uchopovačů [19]

Inspekce materiálu

Při veškerých automatizovaných procesech může dojít k náhodné chybě, proto je důležité v různých fázích výroby provádět kontroly. Adaptivní uchopovače toto umožňují v mnoha ohledech. Většina těchto uchopovačů má například možnost měřit velikost uchopených produktů na základě rozevření svých prstů, což umožňuje vyřadit velikostně nevyhovující materiály z výrobní linky či ji zastavit úplně. Dalším příkladem může být kontrola úchopu, kdy v případě, že uchopovač nezaznamená žádný předmět, tam kde by měl být, může dojít k upozornění a zastavení procesu.

1.2.2 Onrobot RG2

Tento dvouprstý uchopovač je sice principiálně jednoduchý, nabízí však poměrně velké množství dodatečných vestavěných funkcí. Používá se nejčastěji na manipulaci s materiálem a obsluhu strojů. Jeho velkou výhodou je také velmi jednoduché připojení k robotu, kdy stačí uchopovač přišroubovat a připojit k 8 pinovému konektoru na konci robotického ramene.



Obrázek 14 - adaptivní uchopovač RG2 [20]

Specifikace

Má rozsah rozevření až 110 mm, dají se mu individuálně nastavit koncovky jednotlivých prstů a dodává se s integrovaným systémem, který se jednoduše nainstaluje do uživatelského prostředí od Universal Robots. Je schopen uchopovat předměty do hmotnosti 2 kg, a to se silou až 40 N a rychlostí uzávěru 127 mm/s, tuto sílu je však také možné nastavit dle potřeby [21].

Mezi jeho další funkce patří:

- Automatický výpočet zatížení – U většiny jiných uchopovačů je třeba jimi vytvořené zatížení dopočítat a nastavit pro všechny body programu
- Signalizace přilnavosti – rozpozná, když mu uchopený předmět vypadne a přes uživatelské rozhraní se dá na tuto situaci vytvořit reakce
- Automatický výpočet TCP (působíště nástroje) – U většiny ostatních uchopovačů je opět třeba manuálně změřit a zadat do softwaru
- Automatická korekce hloubky – je schopen automaticky posouvat robotickou ruku tak, aby se uzavřel přesně ve stejné hloubce bez ohledu na míru sevření

Bonusem je zde také fakt, že není příliš těžký, takže neubírá tak značnou část z maximálního zatížení robotické ruky, které je v našem případě 5 kg.

1.2.3 Robotiq 3F

Tento tříprstý uchopovač je již od prvního pohledu výrazně komplexnější než RG2. Používá se primárně pro stejné účely, v ostatních ohledech se však výrazně liší, a to v mnoha ohledech pozitivně, ale i negativně.



Obrázek 15 - Robotiq 3F [22]

Základní specifikace

Má rozsah rozevření až 155 mm, samotný váží 2,5 kg a je schopen uchopit předměty o váze až 10 kg, přestože to v našem případě nelze s ohledem na možnosti robotického ramene. Je schopen uchopovat předměty nastavitelnou silou od 30 do 70 N a rychlostí od 22 do 110 mm/s. Stejně jako RG2 i tento uchopovač umožňuje funkci signalizaci přilnavosti a pozná tedy, zda došlo k uvolnění předmětu [22].

Nevýhody v porovnání s RG2

Prvním rozdílem může být například připojení k robotu, které je v tomto případě výrazně náročnější. Je zde potřeba uchopovač připojit na externí zdroj napájení (viz obrázek 9) a také připojit k robotovi přes port Ethernet, který umožní komunikaci mezi robotem a uchopovačem skrze jeho primární komunikační protokol Modbus RTU. Pro správné spárování je také potřeba sjednotit IP adresy v nastavení uživatelského prostředí robota.

Další nevýhodou je absence některých funkcí jako je například automatický výpočet zatížení a TCP nebo automatická korekce hloubky. Nevýhodou je pak také velká váha, nemožnost snížit sílu uzavírání pod 30 N nebo fakt, že pro fyzickou instalaci uchopovače na robot UR5 je třeba dvou adaptérů a velké množství ukotvení, což způsobuje zdlouhavost samotného upevnění.

Výhody v porovnání s RG2

Výhodou zde je možnost většího zatížení, použití větší síly a větší rozpětí mezi jednotlivými prsty.

Primární výhodou je však zejména výrazně zvýšená flexibilita způsobená tříprstou konfigurací. Ta je posílena několika přednastavenými módy úchopu, které umožňují uchopovat objekty o velkém množství různých tvarů a velikostí. To pomáhá přizpůsobit chování robota pro konkrétní požadované situace. Jednotlivé typy úchopu můžeme vidět na obrázku 16.



		TYPES OF GRIP	
		Fingertip Grip	Encompassing Grip
OPERATION MODES	Basic		
	Wide		
	Pinch		N/A
	Scissor		N/A

Figure 1.6 : Operation Modes vs. Types of Grip.

Obrázek 16 - Možnosti úchopu pro Robotiq 3F [23]

1.3 Základní funkce robota UR5 s uchopovači

V této sekci práce je shrnutí základních funkcí robota v uspořádání, které je dostupné v mechatronické laboratoři – robotická ruka UR5 + uchopovače 3F a RG2. Tento průzkum funkcí je tedy základním východiskem pro jejich testování v praktické části této bakalářské práce.

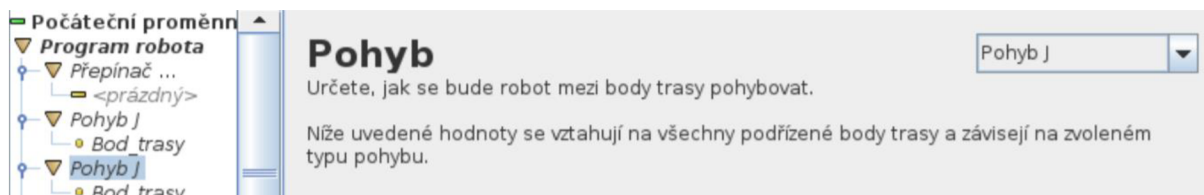
Robot má kromě zde popsaných funkcí také některé další funkce jako například: Vytvoření složky, vlákna či skriptu, přidání komentáře nebo nastavení časovače a přepínače. Veškeré funkce a jejich detailní popis je možné najít v uživatelské příručce, která se nachází mezi přílohami této bakalářské práce.

Funkce lze z jejich podstaty rozdělit na tři základní skupiny: funkce pohybové, funkce pro běh programu a ostatní funkce, kam řadíme například bezpečnostní funkcionality robota a jednotlivé funkce uchopovačů.

1. Pohybové funkce využíváme v programu robota skrze záložku Program → Základní (viz kapitola 1.1.3 – uživatelské rozhraní). Řadí se mezi ně například:

Tři druhy pohybů

Všechny druhy pohybů se nastavují pro konkrétní body trasy v programu. Při použití příkazu Bod trasy automaticky přibude nadřazená funkce Pohyb, ve které můžeme měnit mezi typy pohybu skrze menu v kartě tohoto příkazu.



Obrázek 17 - nastavení pohybu programu robota [13]

- Pohyb J – robot se pohybuje mezi dvěma zadanými body po trajektorii, která je nejrychlejší. Tento pohyb je z tohoto důvodu výchozí a používá se pro situace, kdy se robot pohybuje ve volném prostředí bez překážek.
- Pohyb L – robot se pohybuje mezi zadanými body v přímých trajektoriích, což je vhodné zejména když jsou v jeho okolí překážky a je tedy nutná přesná trasa pohybu.
- Pohyb P – tento pohyb je přizpůsoben tak, že si robot udržuje konstantní rychlost ve všech bodech trajektorie, toho dosahuje zaoblením své trasy v jednotlivých zvolených bodech.

Směr

Tato funkce je nejlépe použitelná s podfunkcí Až do. Tato kombinace umožňuje pohyb robota v daném směru až do námi zvoleného momentu, tím může být například kontakt robota s materiálem.

Zastavit

Jak již vychází z názvu této funkce, pokud dojde program do bodu, kdy ho chceme celý ukončit, je s tímto cílem možné zařadit do něj tuto funkci.

Domů

V nastavení robota můžeme navolit výchozí bezpečnou pozici, pokud v rámci programu poté zavoláme funkci domů, robot se přesune do této předvolené pozice.

Optimalizace pohybu

Prakticky všechny pohyby robota lze nějakým způsobem optimalizovat, to je důležité zejména pro zvýšení efektivnosti. Ovlivnit pohyb takto můžeme například změnou akcelerace, rychlosti nebo zaoblení trajektorie u bodů, u kterých vyloženě nepotřebujeme přesný průchod robota. Toto nastavení můžeme najít přímo v kartě konkrétního Bodu trasy.

2. Další kategorií jsou **funkce pro běh programu**. Tyto funkce z velké části byly převzaty z klasického programování a jejich funkcionalita pouze částečně upravena, aby byla pro uživatele co nejjednodušší pro aplikaci s v programem s robotem. I tyto funkce jsou zařazeny do záložky Program. Řadí se mezi ně například:

Funkce čekání

Tato funkce umožňuje čekání robota na zadaný pokyn. Pokynem může být signál z analogového nebo digitálního vstupu (pokyn dopravníku, signál senzoru), uživatelem zvolená funkce případně pouze pevně daný časový úsek čekání.

Vyskakovací okno a funkce zadání

Tyto dvě podobné funkce umožňují vstup obsluhy robota přímo do procesu přes uživatelské rozhraní tabletu.

Vyskakovací okno umožňuje obsluze zvolit, jestli má robot ve svém programu pokračovat nebo se ukončit – hodí se například při potřebě přípravy materiálu lidským pracovníkem, robot tak čeká, dokud nemá povolení pokračovat.

Funkce zadání dává možnost zvolit jednu z naprogramovaných možností, v reakci na volbu obsluhy se poté vykoná zadaná část programu dle aktuální potřeby.

Příkazy typu jestli (if, elseif, else)

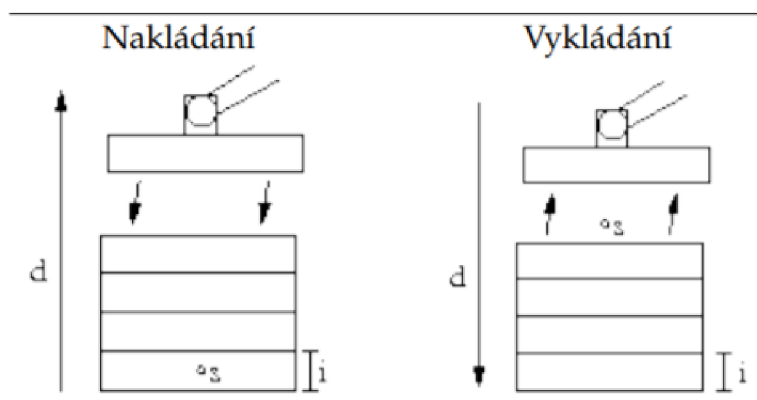
Tato funkcionalita funguje naprosto stejně jako u všech programovacích jazyků čili pokud je splněna určitá podmínka vykoná se jedna část programu, pokud podmínka splněna není, provede se výchozí část kódu.

Šablony programů

Robot UR5 poskytuje v rámci svého prostředí několik přednastavených šablon, jejichž úkolem je usnadnit práci programátorovi a možnost pouhého dosazení důležitých bodů do těchto šablon. Šablony jsou v rámci uživatelského rozhraní umístěny v samostatné záložce.

Těmito šablonami jsou:

- Síla – umožňuje působit zadanou silou pro zadanou osu/směr, robot dle toho přizpůsobí svou polohu a není tak třeba volit konkrétní bod, ve kterém by měl být. To je obzvláště užitečné například při použití brusky, kdy je důležité, aby robot brousil každou část materiálu stejnou silou.
- Paletizace – zjednodušuje proces paletizace, kdy je od obsluhy pouze potřeba nastavit základní body, tvar palety, orientaci skládání, počáteční a koncovou sekvenci. Robot je poté jednoduše tuto sekvenci opakovat a skládat paletu do zvoleného počtu pater.
- Hledat – dává možnost nakládání/vykládání sloupce položek. Po nadefinování polohy osy sloupce a tloušťky položek, robot je schopen automaticky najít vrchol sloupce bez ohledu na jeho výšku a zahájit požadovanou sekvenci.



Obrázek 18 - znázornění funkce Hledat [13]

- Sledování dopravníku – umožňuje ovlivnit program robota s ohledem na momentální pohyb dopravníku.

Cyklus a podprogram

Tato funkce opět funguje velmi podobně jako u většiny programovacích jazyků. Je zde tímto možné nastavit počet cyklů, který má robot vykonat a vytvořit podprogramy, které můžeme jednoduše volat z různých míst hlavního programu.

3. **Ostatními funkcemi** robota jsou zejména funkce bezpečnostní či funkce související s konkrétním adaptivním uchopovačem.

Detekce úchopu

Tato funkce uchopovačů umožňuje vyvolat reakci na případ, kdy předmět, který robot drží vypadne případně pokud na místě, kde má robot produkt přebírat, vůbec žádný materiál není.

4 typy úchopu 3F

Mezi funkce můžeme také zařadit různé typy úchopu, které umožňuje tříprstý uchopovač 3F od Robotiq. Mezi těmito úchopy lze volit po přidání do stromu programu, přímo v kartě funkce úchopu tohoto uchopovače. Jednotlivé úchopy jsou ukázány na obrázku 16.

Bezpečnostní hranice

Robot umožňuje velké množství bezpečnostních omezení, které je možné nastavit v záložce Instalace (viz kapitola 1.1.3 – uživatelské rozhraní), tím nejvýraznějším je bezpečnostní hranice. Jelikož má robot vždy přehled o tom, v jaké části prostoru vzhledem ke své základně se pohybuje, je možné přes uživatelské rozhraní zvolit roviny, které se budou chovat jako bezpečnostní hranice. Následně je možné nastavit, k jakým omezením dojde při překročení této hranice – omezení momentu, rychlosti, povolených stupňů otáčení jednotlivých kloubů či úplné zastavení robota. Tato funkce je dále také aktivní i při ručním ovládní robota, takže jakmile je hranice nastavena pro úplné zastavení, není možné ji nevědomě překročit bez přenastavení bezpečnostního protokolu.

1.4 Možnosti simulačních prostředí pro robota UR5 s uchopovači

V této části je představeno několik nejdostupnějších variant softwaru pro simulaci robota UR5 od Universal Robots a jeho interakci s okolním prostředím. Ani jeden z vybraných programů není speciálně vytvořen pro roboty Universal Robots, ale všechny ho mají ve své knihovně komponentů. Co se týče uchopovačů, každý uvedený program má ve své knihovně minimálně jeden z těch, které jsou používány během této práce. Pro každý program jsou uvedeny obecné informace o možnostech programování simulace, o knihovnách prvků, o licencích, je ukázáno simulační prostředí, a nakonec zhodnocení výhod a nevýhod konkrétního softwaru. Z průzkumu plyne, že všechny znázorněné programy jsou pro tento účel využívanou volbou v praxi.

1.4.1 CoppeliaSim

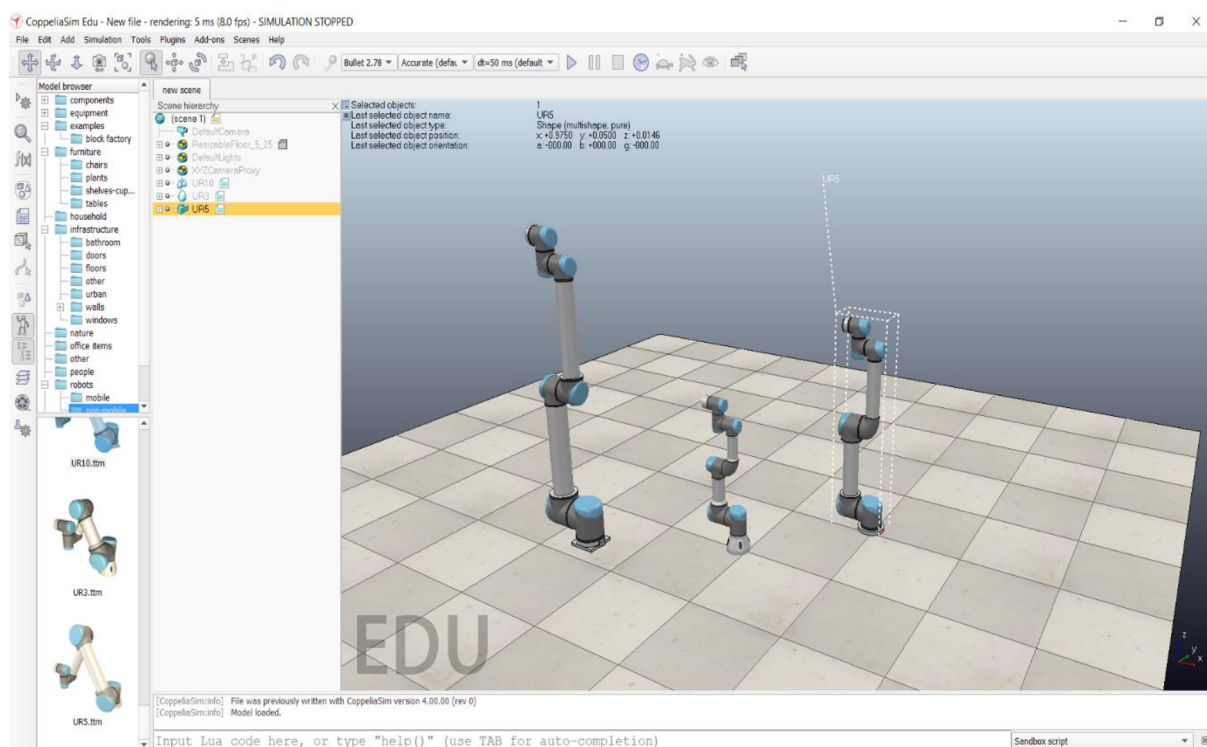
CoppeliaSim (dříve známý pod názvem V-REP) je robotický simulátor určený pro Windows, macOS a Linux. Programování simulace je v něm možné za pomoci integrovaného prostředí nebo případně za využití vzdáleného API (Application Programming Interface).

Integrované prostředí je tvořeno tak, že každý jednotlivý prvek může být řízen svým vlastním skriptem v programovacím jazyku Lua.

Vzdálené programování dává možnost řídit simulaci jinými programovacími jazyky, kterými jsou: MATLAB, C/C++, Python, Java a Octave. Případně je také možné využití tzv. plug-inů v jazyce C/C++ nebo propojení s ROS (Robot Operating System). Na obrázku 20 je možné vidět porovnání jednotlivých možností.

Licence je zcela zdarma se všemi funkcemi, pouze v případě komerčního použití je třeba ji zaplatit.

Knihovna prvků obsahuje velké množství reálných robotických ramen i senzorů, které jsou potřebné pro realistickou simulaci. Avšak „kosmetické“ prvky jako nábytek nebo další stroje již nejsou zastoupeny v tak velké míře, jako například u ostatních programů v tomto seznamu.



Obrázek 19 - simulační prostředí CoppeliaSim

Výhody: možnost programování v integrovaném prostředí přes Lua, možnost vzdáleného API šesti dalšími jazyky, malá výpočetní náročnost systému, velká variabilita, možnost vložení prvků z CAD, velký počet připravených mobilních/nemobilních robotů, jednoduchost programování

Nevýhody: Poměrně malá knihovna dodatečných prvků připravených k použití, v porovnání s některými jinými softwary méně působivé grafické znázornění (žádné stíny apod.)

	Embedded script	Add-on / sandbox script	Plugin	Remote API client	ROS / ROS2 node	ZeroMQ node
Control entity is external (i.e. can be located on a robot, different machine, etc.)	No	No	No	Yes	Yes	Yes
Difficulty to implement	Easiest	Easiest	Relatively easy	Easy	Relatively easy	Easy
Supported programming language	Lua	Lua	C/C++	C/C++, Python, Java, Matlab, Octave, Lua	Any ¹	Any
Code execution speed	Relativ. slow ²	Relativ. slow ²	Fast	Depends on programming language	Depends on programming language	Depends on programming language
Communication lag	None	None	None	Yes, reduced	Yes, reduced	Yes, reduced
Control entity is fully contained in a scene or model, and is highly portable	Yes	No	No	No	No	No
Control entity relies on	CoppeliaSim	CoppeliaSim	CoppeliaSim	BlueZero framework, or sockets	ROS / ROS2 framework	Various, e.g. ZeroMQ, TCP/IP
Synchronous operation ³	Yes, inherent. No delays	Yes, inherent. No delays	Yes, inherent. No delays	Yes. Slower due to comm. Lag	Yes. Slower due to comm. Lag	Yes. Slower due to comm. Lag
Asynchronous operation ³	Yes, via threads	Yes, via threads	No (threads available, but API access forbidden)	Yes, default operation mode	Yes, default operation mode	Yes

¹ Depends on ROS / ROS2 bindings

² The execution of API functions is however very fast

³ *Synchronous* in the sense that each simulation pass runs synchronously with the control entity, i.e. simulation step by step

Obrázek 20 - porovnání možností programování CoppeliaSim [24]

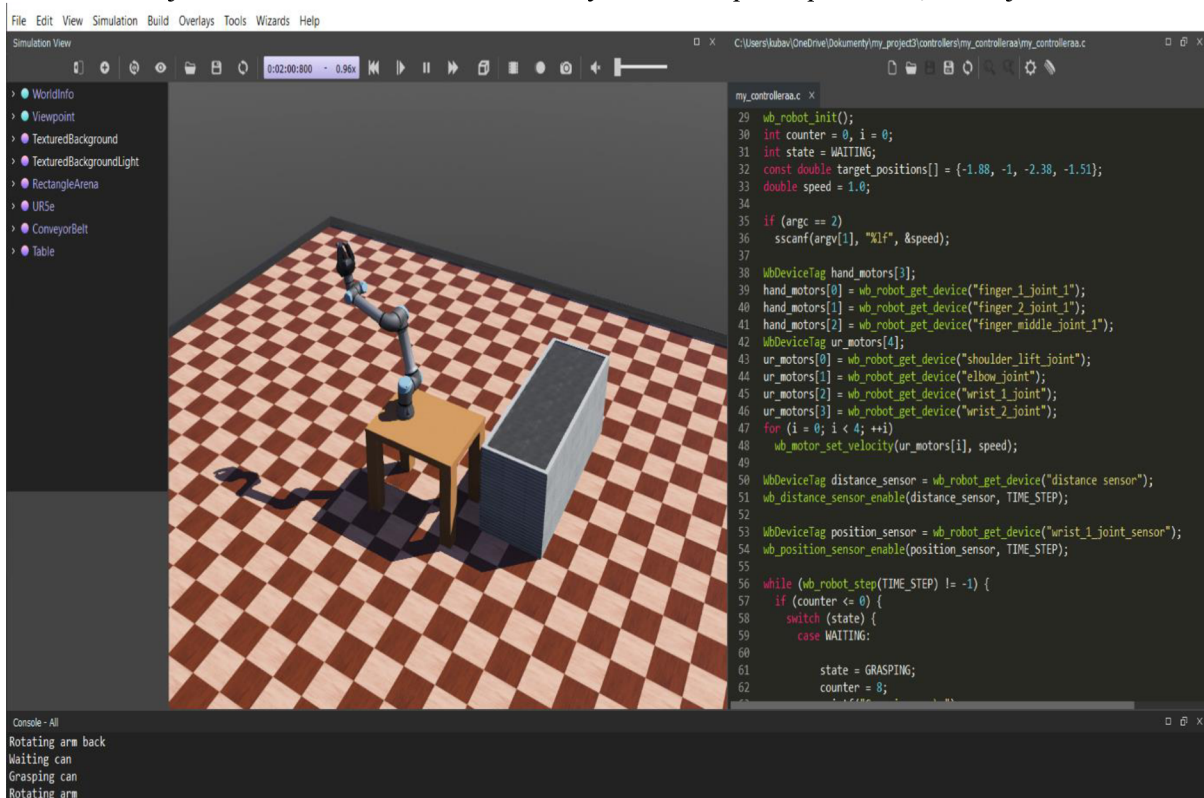
1.4.2 Webots

Webots je open-source prostředí sloužící k simulaci všech druhů robotů, ale taky jiných zařízení jako jsou například drony nebo robotické vysavače. Stejně jako Coppelia i Webots je dostupné pro Windows, macOS i Linux. Nejlépe optimalizované je však pro Linux.

Velkým rozdílem oproti CoppeliaSim je, že přestože i zde je možné programovat vícero jazyky, tato možnost je zpřístupněná přímo v integrovaných skriptech. Možnostmi programovacích jazyků jsou: C/C++, Python, MATLAB a Java.

Licence je i v tomto případě zdarma. Příplácet je třeba pouze v případě, že uživatel vyžaduje aktivní uživatelskou podporu.

Pravděpodobně z důvodu, že Webots je open-source prostředí, je knihovna velmi rozsáhlá. Zahrnuje všechny druhy zařízení, které jdou automatizovat, ale také nepřeberné množství kosmetických prvků pro dekoraci. To zaručuje, že výsledná simulace vypadá opravdu věrohodně a je možné udělat bez větší námahy věrnou repliku prostředí, které je simulováno.



Obrázek 21 - simulační prostředí Webots

Výhody: Propracovanější prostředí (textury, stíny apod.), možnost programování zvoleným jazykem přímo v aplikaci, velké množství prvků všech typů v knihovně, velké množství ukázkových úloh, možnost importu prvků z CAD

Nevýhody: Oproti CoppeliaSim náročnější na výkon počítače, během testování občas celá simulace přestala reagovat

1.4.3 Gazebo

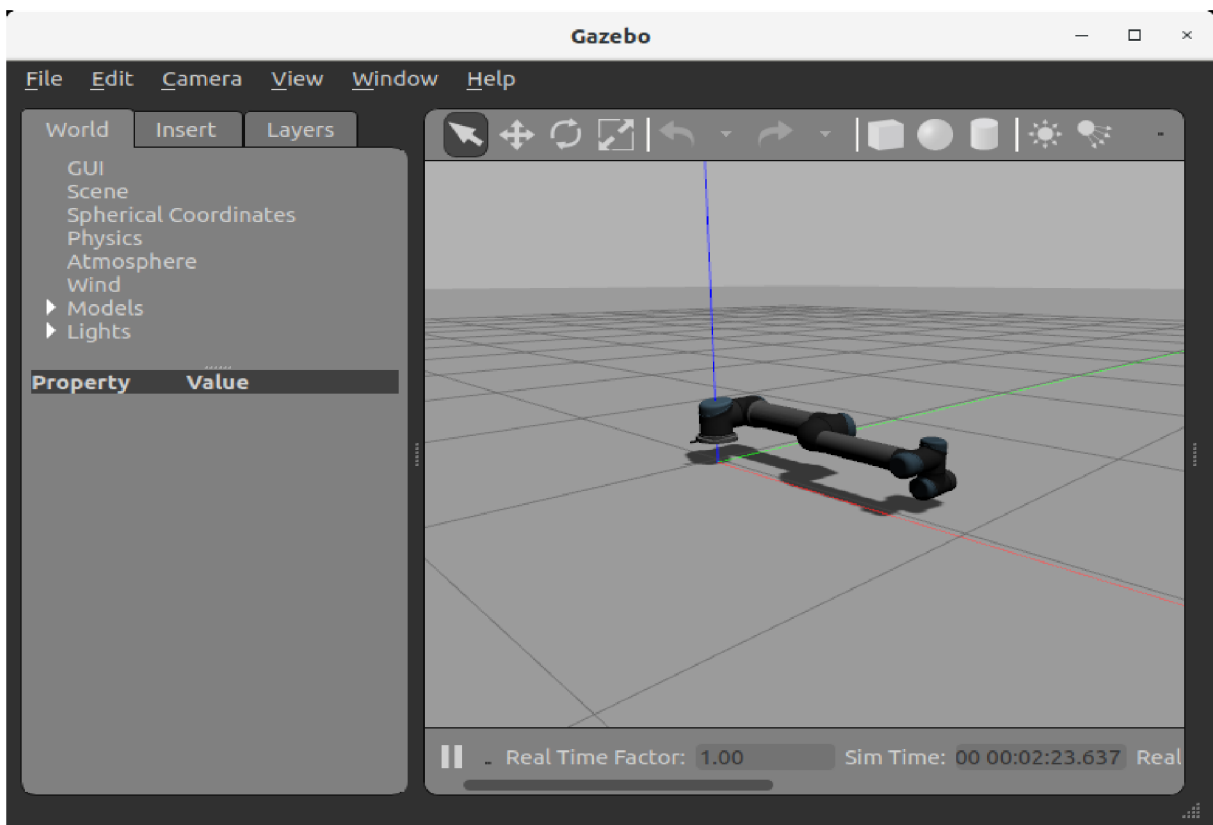
Třetím veřejně nejpoužívanějším nástrojem pro simulaci robotů je Gazebo. Stejně jako všechny ostatní uvedené programy i Gazebo je určené pro Windows, macOS i Linux. Podobně jako Webots se jedná o open-source projekt a je nejlépe optimalizované pro Linux. A nakonec stejně jako u ostatních programů je zde možnost plug-inů a ROS. Nejčastěji se využívá právě v kombinaci s ROS, které výrazně rozšiřuje možnosti pro simulaci robotů.

Gazebo již však nemá tak široké jednoduché možnosti programování v námi zvoleném jazyce. Veškeré modely jsou popsány pomocí skriptů formátovaných v XML formátu. Klient a server komunikují přes komunikační rozhraní Gazebo.

Licence pro Gazebo je zcela zdarma.

Výhody: velké množství ukázkových tutoriálů, velká komunita využívající Gazebo s ROS, možnost vložení prvků z CAD

Nevýhody: není možné zvolit si s několika programovacími jazyky



Obrázek 22 - simulační prostředí Gazebo [25]

1.4.4 Další možnosti

Mezi další vhodný software pro simulaci procesů s robotem UR5 a adaptivními uchopovači by se dalo zařadit kromě jiného například program Visual Components nebo RoboDK.

Visual Components

Je simulační software, který se zaměřuje na simulaci výrobních procesů ve fabrikách. V rámci tohoto systému je však i možnost simulace robotů v tomto prostředí a v jejich knihovně robotů je zahrnut i robot UR5 a ostatní kolaborativní roboti od Universal robots.

Výhodou zde je velké spektrum objektů v připravené knihovně a jednoduchost vytváření prostředí.

Hlavní nevýhoda je naopak, že licence je zdarma pouze na 30 dní pro studenty. V ostatních případech je licence placená, a tedy méně dostupná pro jednotlivce.

RoboDK

RoboDK je simulační nástroj, který se používá zejména na simulaci průmyslových robotů. Zahrnuje přibližně 500 druhů robotů včetně UR5.

Nevýhodou je však cena licencí, jelikož s výjimkou 30i denní zkušební verze je placená i studentská licence.

2 Řešení a výsledky

V této sekci jsou ukázány postupy a výsledky praktické části této bakalářské práce, jejímž hlavním cílem je otestování hlavních funkcí robota UR5 s uchopovači, který se nachází v mechatronické laboratoři FSI VUT Brno, na základních úlohách.

Další cíl, který vznikl v průběhu vytváření práce je zpracování komplexnější úlohy s tímto robotem v simulačním prostředí.

2.1 Použité uspořádání



Obrázek 23 - použité uspořádání robota

Při vytváření jednotlivých úloh byl robot v konfiguraci, která zahrnuje samotné robotické rameno, ovládací skříňku, tablet, pojízdný stůl a dva již zmíněné uchopovače

Stůl představuje platformu, ke kterému je připevněno samotné robotické rameno, ale také slouží jako pracovní plocha při práci s materiálem a v jeho nižším patře se nachází samotná ovládací skříňka se všemi vstupy a výstupy. Nakonec je k robotu připojen tablet, který umožňuje ovládání robota.

Všechny jednotlivé části robota jsou blíže popsány v kapitole 1.1.3. Informace o použitých uchopovacích jsou rozebrány v kapitole 1.2.2 pro uchopovač RG2 od společnosti Onrobot a v kapitole 1.2.3 pro uchopovač 3F od Robotiq.

2.2 Základní vytvořené úlohy

Celkem bylo vytvořeno 5 základních úloh, jejichž hlavním cílem bylo vyzkoušet základní funkce v praxi. Tyto funkce jsou shrnuty v kapitole 1.3. U každé úlohy je ukázán jejich popis, využití funkce a ukázka konfigurace. Ke každému úkolu bude dále v příloze zahrnut kód, který byl pro úlohu použit.

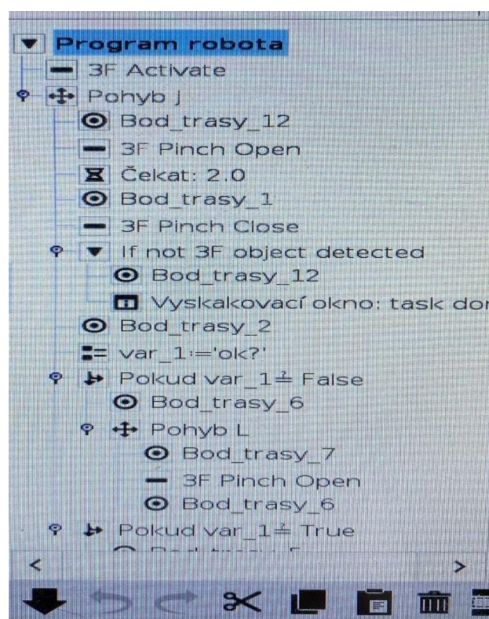
2.2.1 Optimalizované přenášení s kontrolou

První úloha byla zaměřena na optimalizaci pohybu a umožnění kontroly robota od obsluhy. Při zpracování této úlohy byl využit uchopovač 3F od Robotiq při využití úchopu pinch fingertip grip (viz Obrázek 16).

Konkrétně byly v této úloze testovány funkce: Pohyb J, Pohyb L, funkce Čekání, funkce Zadání, příkaz Jestli, detekce úchopu a optimalizace pohybu, za pomoci změny rychlosti, zrychlení a zaoblení u jednotlivých Bodů trasy.



Obrázek 24 - konfigurace úlohy 1



Obrázek 25 - ukázka kódu úlohy 1

Popis průběhu úlohy: Robot přenese objekt z místa výdeje, a to buď na druhé místo pro další zpracování nebo do "koše". Při zvedání předmětu je třeba čekání robota na sevření uchopovače. Dále je potřeba při pohybu blízko u předmětu použít pohyb L, tak aby ho robot nesrazil. Ve zbytku programu je použit pro zrychlení procesu pohyb J. U bodů, které jsou v prostoru se využije zaoblení pro zrychlení procesu. Celý proces je také optimalizován změnou rychlostí a zrychlení robota v jednotlivých částech. Rozhodnutí, zda objekt bude pokračovat do koše nebo ne, provede obsluha pomocí funkce zadání – robot nastaví objekt ke kontrole a obsluha zvolí, zda je předmět v pořádku nebo ne. Při každém úchopu robot také ověřuje, zda se na místě nachází nějaký objekt pro uchopení a pokud nenachází, robot zobrazí vyskakovací okno pro obsluhu, která následně rozhodne, zda má robot pokračovat v programu.

2.2.2 Automatizované třídění sloupců

V této úloze robot třídí sloupce koleček o dvou různých velikostech na dva separátní sloupce, ve kterých se již nachází pouze jedna velikost koleček. Byl při ní využit dvourprstý uchopovač RG2.

Tato úloha by šla obdobně zpracovat také s využitím šablony Hledat, jež zjednodušuje programování procesu nakládání a vykládání sloupců. Pro vyzkoušení ostatních funkcí byla úloha však programována obecně bez využití šablon.

Konkrétně byly v této úloze testovány následující funkce: pohyb L, funkce Směr s podfunkcí Až do kontaktu, funkce Pokud, Vysakovací okno, funkce Zastavit, detekce úchopu a zároveň funkčnost měření velikosti uchopeného předmětu, která vyplývá z informace o rozevření koncových efektorů adaptivního uchopovače.



Obrázek 27 - Počáteční poloha úlohy 2



Obrázek 26 - výsledné rozřídění úlohy 2

Popis průběhu úlohy: Robot se sevřeným uchopovačem se pomalu (aby při kontaktu nedošlo k bezpečnostnímu zastavení programu) přibližuje přímo shora ke sloupci koleček podél jejich osy. Jakmile robot detekuje kontakt, vrátí se o 1 mm, aby rozevřením nesrazil samotný sloupec. Uchopovač se poté rozevře a postoupí opět dolů o 7 mm (o šířku kolečka), aby mohl kolečko uchopit. Následně se uchopovač opět sevře, a dle vnitřní proměnné velikosti rozevření koncových efektorů změří velikost kolečka. Dle velikosti dává kolečka na dvě různá místa a obdobným postupem jako při rozebírání původního sloupce, skládá kolečka do dvou samostatných sloupců.

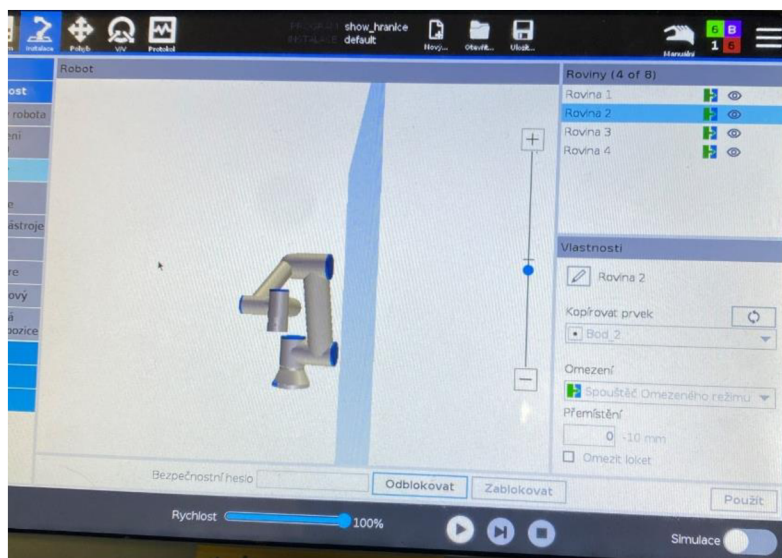
2.2.3 Nastavení bezpečnostní hranice

Tato úloha se zaměřuje na využití bezpečnostních nastavení robota, což zahrnuje nastavení rovin v jeho okolí a jejich konfiguraci pro zaručení bezpečného pohybu robota bez ohrožení okolních věcí a lidí.

Konkrétně byly v této úloze testovány funkce: Vytvoření rovin v prostoru, nastavení těchto rovin jako bezpečnostní hranice, určení podmínek, jakým způsobem se robot má chovat při překročení této hranice, nastavení tvrdého/měkkého přechodu a funkce Domů



Obrázek 28 - znázornění jedné z bezpečnostních rovin



Obrázek 29 - znázornění bezpečnostní roviny a její nastavení

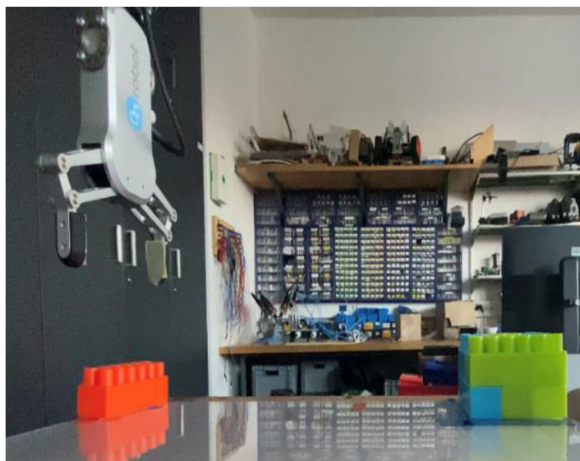
Popis průběhu úlohy: Pro každou ze čtyř hran stolu jsou přes uživatelské rozhraní tabletu nastaveny kolmé bezpečnostní roviny. Ty jsou nastaveny takovým způsobem, že při jejich překročení robot se aktivuje omezený režim robota, a robot tedy výrazně sníží svoji rychlost. Samotný testovací program již spočívá pouze v pohybu robota, při kterém tyto hranice překračuje, aby šlo vidět, že bezpečnostní roviny opravdu plní svoji funkci. Nakonec programu je otestována funkce Domů, kdy robot přejde do nastavené výchozí bezpečné polohy, který se nachází v prostoru mezi bezpečnostními rovinami.

Nastavení bezpečnostních prvků: Nastavení bezpečnostních prvků je možné provést v záložce Instalace. Následně je možné jednotlivé prvky nastavit jako spouštěče omezeného režimu (viz Obrázek 29). Omezený režim jde dále nastavit v záložce Instalace tak, aby se omezila rychlost, zrychlení robota, ale například také rozsah otáčení jednotlivých kloubů, přičemž výchozí je rozsah dvou 360° otáček. Dále lze u jednotlivých rovin nastavit, zda se robot má kompletně zastavit nebo pouze aktivovat tento omezený režim. Po nastavení těchto bezpečnostních prvků již není potřeba nic řešit při samotném programování, jelikož si robot tyto roviny bude hlídat až do opětovného přepsání bezpečnostního nastavení.

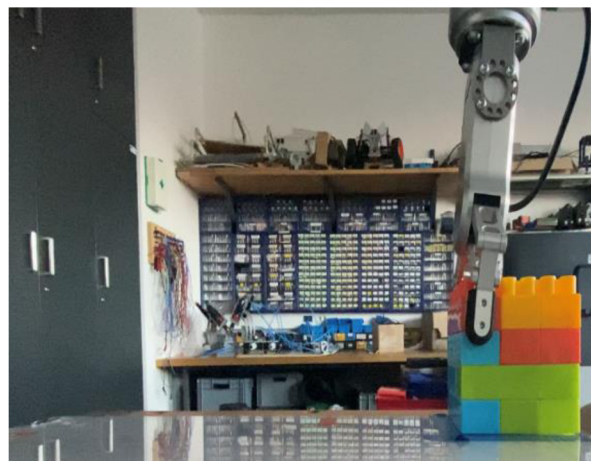
2.2.4 Skládání stavebnice

Tato úloha se zaměřuje primárně na vyzkoušení funkce šablon, a to konkrétně šablonu síly, která umožňuje pohyb robota na základě vyvíjené síly daným směrem. Využití síly je během této úlohy také testováno tak, aby kostky nevypadávaly z uchopovače a zacvakly se vzájemně do sebe úplně, ale zároveň, aby nedošlo nepřiměřenou silou k poškození samotných kostek. Při úloze byl využit dvouprstý uchopovač RG2.

Konkrétně byly v této úloze testovány funkce: šablona Síla, pohyb L, funkce Podprogram, funkce Cyklus a funkce Čekat.



Obrázek 30 - výchozí pozice 4. úlohy



Obrázek 31 - konečná pozice 4. úlohy

Popis průběhu úlohy: Robot přebírá kostky stavebnice z daného místa. Následně je postupně skládá do sloupce, který se nachází na druhé straně stolu. Pro ztížení a ověření naprosté přesnosti robota, skládá tyto kostky do tří řad na již předpřipravenou plochu, do které může kostky zasadit.

Program se ve svých částech opakuje, proto je zde využita funkce Podprogram, která umožňuje jednoduše volat na konkrétních místech programu hlavního přednastavený podprogram.

Tato úloha vyžaduje naprostou přesnost v mnoha ohledech. Pro přesnost zapojení kostek je využit pohyb L. Dále byla na základě experimentálního testování určena vhodná hodnota 30 N, kterou robot působí při zapojování kostek. Stejnou silou robot také drží kostky mezi koncovými efekty, což zaručuje pevný stisk, aniž by došlo k deformaci samotných kostek.

Při úloze také docházelo k problému, kdy se plastová kostka po stisku mírně přilepila k měkkým hladkým koncům prstů uchopovače. Tím docházelo při rozevření uchopovače k posunu celého sloupce. Tato komplikace byla vyřešena přelepením těchto prstů jednostrannou malířskou páskou, která se k plasty lepila mnohem méně.

2.2.5 Nanášení lepidla

Hlavním cílem této poslední základní úlohy bylo otestovat pohyb typu P. Úloha simuluje nanášení lepidla na produkt, což je jedním z typických příkladů využití tohoto typu pohybu, jelikož je zapotřebí rovnoměrnost nanášeného lepidla – konstantní rychlost v průběhu celého pohybu.

Dále je testován úchop encompassing grip uchopovače, který je ideální pro pevné držení lepidla. V průmyslové praxi by toto lepidlo bylo připojené na velký zásobník s konstantním tlakem, ale principiálně by šlo využít stejné konfigurace.



Obrázek 32 - ukázka konfigurace úlohy 5

Popis průběhu úlohy: V úloze se robot pohybuje mezi 4 základními body s využitím pohybu typu P. Body jsou nastaveny tak, aby se konec lepidla pohyboval těsně nad povrchem stolu a simuloval tak reálné lepení.

2.3 Komplexní úloha v prostředí CoppeliaSim

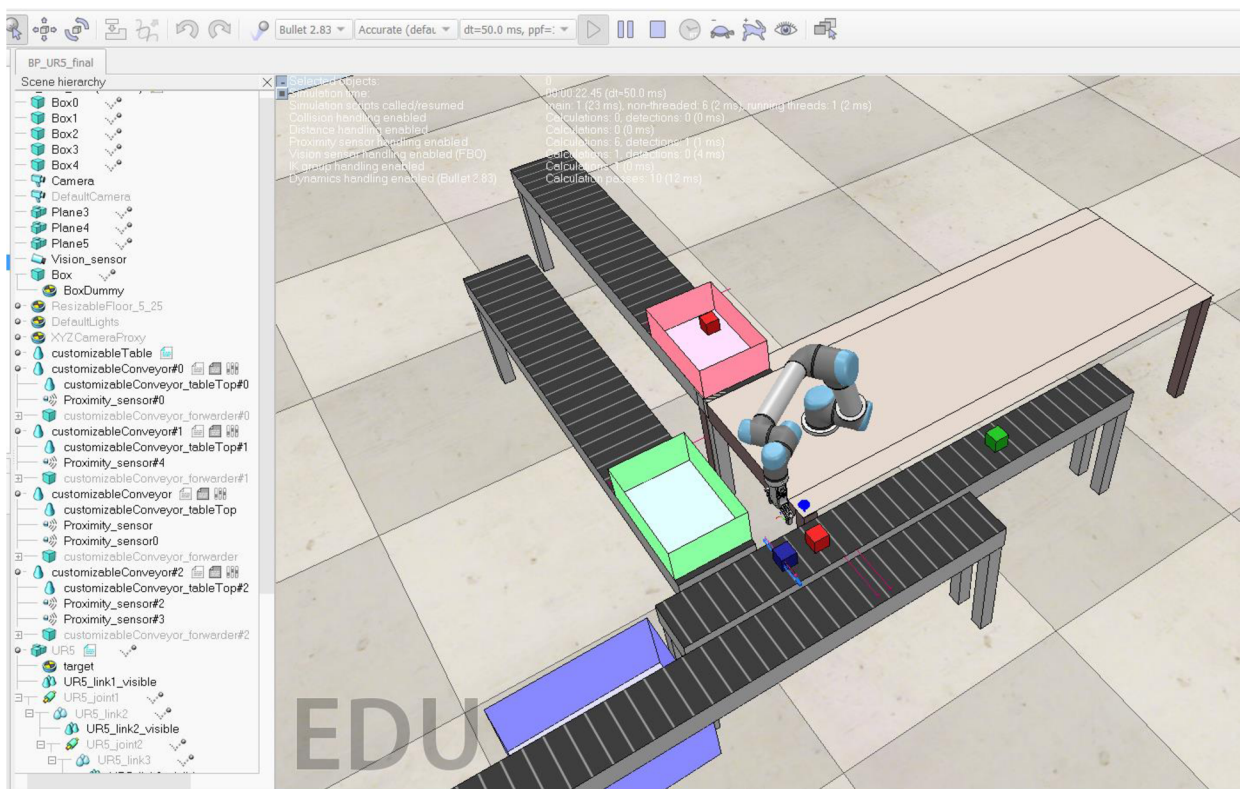
Poslední částí této bakalářské práce bylo vytvoření komplexnější úlohy, při které by v praxi byla použita kombinace základních funkcí, které byly předvedeny na ukázkových úlohách. Úloha byla vytvořena také s předpokladem využití propojení s dalšími zařízeními jako jsou dopravníky a sensory, jelikož této možnosti je často využíváno v průmyslové praxi.

Pro simulaci této úlohy bylo využito CoppeliaSim, jelikož splňoval všechny základní požadavky: dostupnost robota UR5 i adaptivního uchopovače RG2 v poskytované knihovně, možnost využití sensorů i dopravníků, licence zdarma pro studentské účely a relativně malá náročnost na výpočetní výkon počítače. Výhodou pro tuto volbu byla také možnost použití MATLAB pro programování pohybu simulace.

2.3.1 Popis konfigurace a funkce robota

Hlavní funkcí robota je zde třízení výrobků, které na dopravníku dorazí k sensoru, a to automaticky podle barvy a velikosti objektu.

Vytvořená konfigurace obsahuje celkem: 4 dopravníky, 6 ultrasonických sensorů, 1 optický sensor, uchopovač RG2, robotické rameno UR5 a stůl, na kterém je usazeno. Dále konfigurace obsahuje tři různé barevné krabice a na dopravníku se postupně zobrazují objekty o stejných barvách.



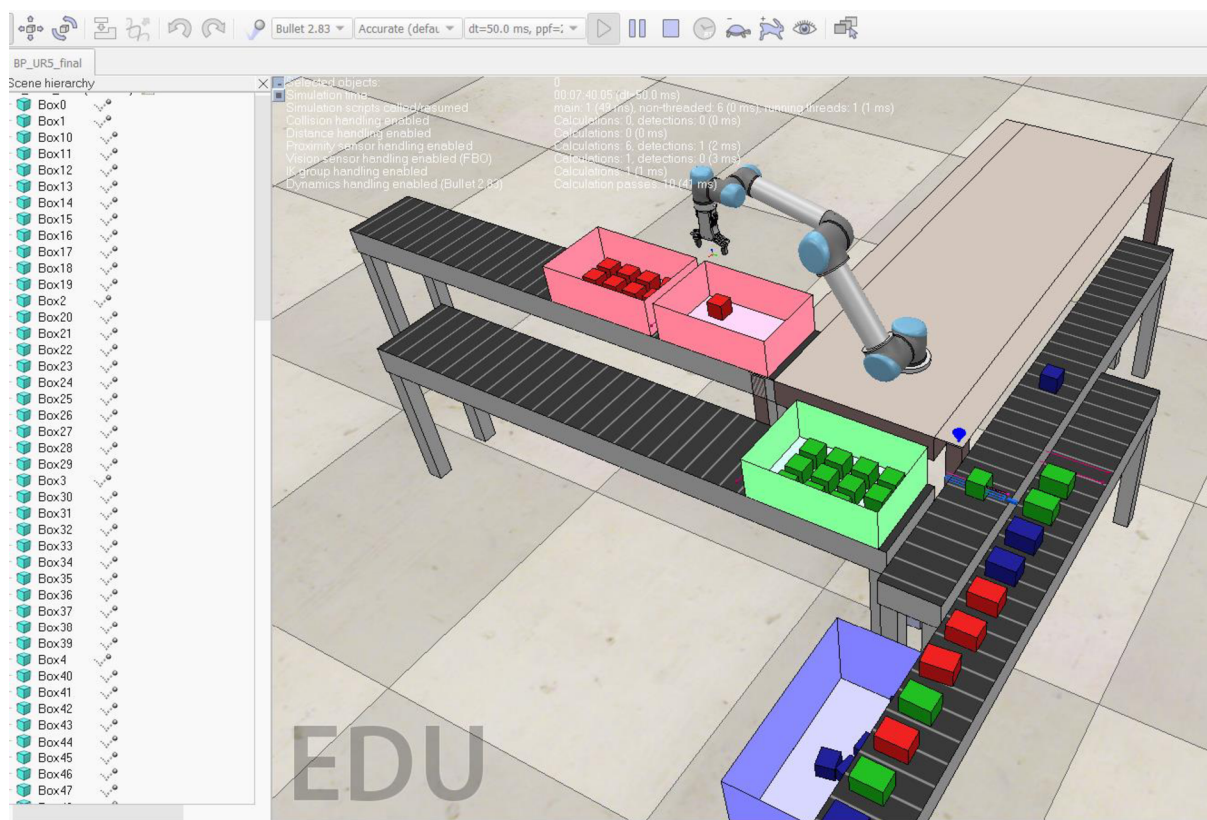
Obrázek 33 – počáteční fáze simulace

Simulace byla vytvořena s výchozím nastavením fyzikálního enginu Bullet 2.83 a časového kroku 50 ms. Pro ideální fungování simulace je tedy třeba použít tuto konfiguraci.

Konkrétně funguje simulace v následujících cyklech:

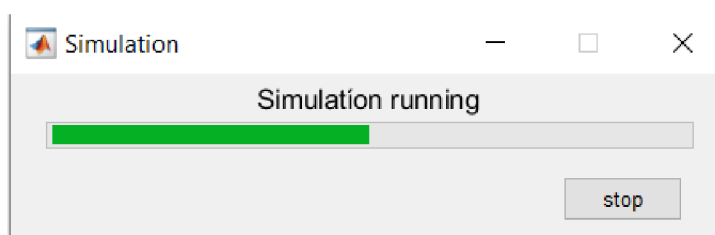
1. Na dopravníku přijíždí objekty tří různých barev a dvou různých velikostí.

2. U robota se nachází ultrasonický a optický senzor. Ultrasonický zaznamenává, jestli jeho paprsek byl přerušen a v jaké vzdálenosti a optický senzor zaznamenává barvu objektu.
3. V moment, kdy se dopravník zastaví, robot přenáší objekt, dle barvy a velikosti.
 - a. V případě, že optický senzor určí, že se jedná o červenou kostku → přeneše ji robot do červené krabice, kde se uplatňuje paletizace → kostky se postupně skládají do předem zvoleného útvaru, který představuje tvar krabice (v praxi má robot tuto funkci připravenou k použití s využitím šablony Paletizace, zde bylo třeba tuto funkci naprogramovat)
 - b. V případě, že optický senzor určí, že se jedná o zelenou kostku → přeneše ji robot do zelené krabice, kde se uplatňuje paletizace → kostky se postupně skládají do předem zvoleného útvaru, který představuje tvar krabice (v praxi má robot tuto funkci připravenou k použití s využitím šablony Paletizace, zde bylo třeba tuto funkci naprogramovat)
 - c. V případě, že optický senzor určí, že se jedná o modrou kostku → robot zmáčkne tlačítko ve formě modrého ultrasonického senzoru → dopravník pokračuje v pohybu.
 - d. V případě, že mají objekty jiný tvar → přesune je robot na vedlejší pás.
 - i. Na tomto páse jsou umístěny další ultrasonické senzory, které při jejich přerušeni způsobí spuštění dopravníku, což zaručí, aby se automaticky objekty řadily za sebe



Obrázek 34 - pokročilá fáze simulace

4. V případě, že program robota zjistí, že je jedna z krabic je již plná kostek (1 patro) – posune robot krabici tak, že přeruší ultrasonický senzor, který zařídí spuštění dopravníku přesně na takovou dobu, aby vzniklo místo na další krabici a proces se mohl opakovat.
5. Po posunutí krabice je simulace vytvořena tak, že se na původním místě zobrazí krabice nová a proces může pokračovat.
6. Konec simulace je naprogramován tak, že se program ukončí v případě:
 - a. Minimálně jedna krabice zelené i červené barvy jsou již naplněny.
 - b. Jeden z dopravníků je již naplněn krabicemi, takže by při pokračování již padaly na zem.
 - c. Uživatel ukončí proces za pomoci vygenerovaného vyskakovacího okna.



Obrázek 35 - vyskakovací okno pro ukončení simulace

2.3.2 Programování simulace

CoppeliaSim umožňuje několik možností programování simulace. V tomto případě byla zvolena kombinace integrovaných Lua skriptů a MATLABU přes vzdálené API. Lua bylo použito pro pohyb dopravníků, automatické přidávání objektů na dopravník a jednoduchou práci se sensory. MATLAB byl využit zejména pro pohyb samotného robotického ramene v závislosti na informacích získaných ze sensorů. Celý kód je založen v přílohách této práce, v následující části jsou tedy ukázány pouze základy jednotlivých inicializací a syntaxí pro obě programovací prostředí.

Zpracování pohybu robota v MATLAB

Pro propojení CoppeliaSim s MATLAB je zejména důležitá inicializace, která se musí nacházet na počátku spouštěného programu. Ta vypadá takto:

```
sim=remApi('remoteApi');  
sim.simxFinish(-1);  
clientID=sim.simxStart('127.0.0.1',19999,true,true,5000,5);
```

Další specifický krok, který je třeba udělat. Je navázat ovladač k jednotlivým prvkům simulace. Ukázkou může být navázání spojení s optickým senzorem:

```
[err,camhandle]=sim.simxGetObjectHandle(clientID,'Vision_sensor',sim.simx_opmode_blocking); %optický sensor
```

Po této inicializaci je již možné v rámci našeho programu pracovat s tímto prvkem a číst z něj potřebná data. Veškerá syntaxe se následně již velmi podobá této inicializaci a je jasně stanovená na webových stránkách CoppeliaSim pro jednotlivé jazyky.

Pro čtení z prvku lze využít syntaxi:

```
[errorCode, resolution, img]=sim.simxGetVisionSensorImage2(clientID, camhandle, 1, sim.simx_opmode_streaming);
```

Z těchto kroků již vychází programování celé simulace. V MATLABu byly zpracovány tři funkce: pohyb typu L, paletizace a samotný program určující pohyb robota pro různé podmínky.

Pohyb L byl naprogramován tak, že na základě načtené výchozí a cílové pozice byla zjištěna dráha mezi pozicemi. Tato dráha byla rozdělena na určitý počet kroků a pozice robota následně se zadaným časovým intervalem postupně aktualizována po těchto krocích.

Paletizace byla zpracována na základě změny cílové polohy kostky s ohledem na pořadí. Tato změna odpovídá velikosti kostky a mezery mezi nimi. Funkce byla vytvořena tak, že je možné také zadat počet vrstev, do kterých se sloupce budou skládat.

Hlavní program již pouze vyplývá z podmínek vysvětlených v postupu kroků simulace.

Zpracování Lua skriptů v integrovaném prostředí

V CoppeliaSim má každý prvek svůj vlastní skript určený pro jeho ovládání. V případě, že chceme z daného skriptu pracovat s jinými prvky, je třeba stejně jako u MATLAB nejdříve navázat s nimi spojení. Rozdíl je, že je třeba využít Lua syntaxi. Pro znázornění této syntaxe je dále uveden úsek kódu určený pro generování jednotlivých objektů na pásu dopravníku, což byla jedna z hlavních funkcionalit.

```
-- inicializace - počáteční hodnoty a spojení s objekty
local Colors = {{0.1,0.75,0.1}, {0.1,0.1,0.6}, {0.95,0.1,0.1}}
box = sim.getObjectHandle("Box")
boxx = sim.getObjectHandle("Box0")
Proximity_sensor=sim.getObjectHandle('Proximity_sensor')
local shapes = {box,boxx}

while true do
PSensor_distance=sim.readProximitySensor(Proximity_sensor)
if(PSensor_distance == 0) then
-- kontrola zda dopravník není v danou chvíli zastavený
sim.wait(4)

insertedObjects =
sim.copyPasteObjects({shapes[math.random(1,2)]},0)
-- funkce náhodně kopíruje jednu ze dvou typu kostek, které jsme
vytvořili
sim.setObjectPosition(insertedObjects[1],-1,{-1.05,0.5,0.62})
-- pozice zobrazení je stanovena na začátku dopravníku
sim.setShapeColor(insertedObjects[1],nil,sim.colorcomponent_ambient_diffuse,Colors[math.random(1,3)])
-- nakonec tímto způsobem volíme mezi třemi předvolenými barvami
jednu náhodně
end
end
```


ZÁVĚR

Mezi cíle této bakalářské práce patřilo vytvoření rešerše v oblasti kolaborativních robotů a adaptivních uchopovačů, dále otestování hlavních funkcí dostupného robotického ramene UR5 s adaptivními uchopovači na ukázkových úlohách. Posledním z hlavních cílů práce bylo zpracování rešerše softwarových řešení, které umožňují simulaci uvedeného robotického ramene a jeho interakci s okolím.

První sekce rešeršní části byla věnována samotným kolaborativním robotům. Konkrétně zde bylo rozebrány výhody a nevýhody tohoto typu robotů, informace jakým způsobem je u nich zajištěna bezpečnost a také jakým způsobem jsou schopny snímat sílu a reagovat tak na svoje okolí. Nakonec zde byl uveden popis robotického ramene, které je dále využíváno v praktické části této práce.

Druhá sekce rešeršní části byla zaměřena na adaptivní uchopovače a jejich využití v průmyslové praxi. Nacházejí se zde opět také kapitoly zaměřené na uchopovače, které jsou dále využity v praktických úlohách.

V třetí sekci byly naznačeny základní funkce robotického ramene s dostupnými uchopovači.

Poslední sekce rešeršní části byla věnována možnostem simulačních prostředí pro robota UR5 s uchopovači, kde byly stanoveny jejich výhody, nevýhody a možnosti programování.

Výstupem rešeršní části práce je tedy obecný přehled problematiky kolaborativních robotů a adaptivních uchopovačů. Zvýšená pozornost zde byla věnována těm, které jsou dále využity v praktické části této práce, a je tedy nutná znalost jejich fungování. Dále byly shrnuty jejich základní funkce a možnosti jejich softwarové simulace, což byly údaje, které následně sloužily jako východisko pro testování v praktické části práce.

První polovina praktické části byla zaměřena na testování základních funkcí, které byly shrnuty v teoretické části práce, přímo na robotickém rameni v mechatronické laboratoři. Celkem bylo vytvořeno pět úloh, z nichž každá testovala různou skupinu těchto funkcí. Úlohy byly vytvářeny takovým způsobem, aby fungovali na jednoduchém principu, avšak zároveň názorně ukázaly použití potřebných funkcí. Byly otestovány všechny možnosti pohybů a jejich optimalizace, práce s jednotlivými uchopovači, nastavení bezpečnostní konfigurace a práce s jednotlivými funkcemi pohybovými i těmi, které jsou zakomponovány pro správný běh programu daného robota. Dohromady tyto vyzkoušené funkce umožňují pokročilou práci s robotem a jeho použití v průmyslové praxi.

V druhé polovině praktické části byla vytvořena jedna komplexnější úloha vycházející z průmyslové praxe. Hlavním rozdílem od základních funkcí byl fakt, že při ní došlo k propojení se sensory a dopravníky, čímž byla zaručena vysoká míra automatizace. Její hlavní funkcí bylo třídění produktů na základě velikosti a barvy do krabic s využitím modelu paletizace. Úloha byla následně naprogramována v simulačním prostředí CoppeliaSim, které bylo zvoleno na základě rešeršního rozboru v teoretické části práce.

Všechny cíle této bakalářské práce byly úspěšně splněny. Výsledky práce mohou sloužit jako podklad pro další studenty pracující s tímto robotem, a to jak ve fyzické podobě, tak v podobě simulace. Teoretická část práce obsahuje veškeré základní informace, které je potřeba znát pro práci s těmito nástroji. Praktická část práce naopak poskytuje reálnou ukázkou úloh, které je možné vytvořit na základě těchto znalostí a zejména popis jakým způsobem je vytvořit.

Jelikož jsou v rámci příloh této práce zahrnuty také jednotlivé kódy, které byly použity pro správné fungování úloh, je pro studenty možné na jejich základu vytvořit úlohy specifické pro jejich potřeby.

Práce by se v budoucnu dala vylepšit zpracováním komplexní úlohy přímo na robotickém rameni v mechatronické laboratoři, a tím vyzkoušení propojení robota s dalšími zařízeními jako jsou sensory či dopravníky v praxi. Naopak v rámci simulačního řešení by se dala práce vylepšit vytvořením úlohy pracující s dostupným tříprstým uchopovačem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VACULÍKOVÁ, Eva. Robot nebo kobot? V čem se liší?. In: Talentica.cz [online]. 05.04.2018 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.talentica.cz/robot-nebo-kobot/>
- [2] Comau. *Aura* [online] 2020 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: https://www.comau.com/Download/our-competences/robotics/Automation_Products/Comau%20AURA%20ENG%20WEB%20HD.pdf
- [3] M 2000-series. *Fanuc* [online] M 2000-series, 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/es/en/robots/robot-filter-page/m-2000-series>
- [4] IFR, *2020 Industrial Robots report* [online]. 2020 [cit. 09.05.2021] Dostupné z: <https://ifr.org/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe/>
- [5] BARTOŠÍK, Petr. Bezpečnost kolaborativních robotů. In: *Automa.cz* [online]. 2017 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/11040.pdf
- [6] VOJÁČEK, Antonín. Problematika bezpečnosti kolaborativních robotů – ISO/TS 15066. In: *automatizace.hw.cz* [online]. 17.10.2019 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/problematika-bezpecnosti-kolaborativnich-robotu-isots-15066.html>
- [7] YEN, Shih-Hsiang & TANG, Pei-Chong & LIN, Yuan-Chiu & LIN, Chyi-Yeu. Development of a Virtual Force Sensor for a Low-Cost Collaborative Robot and Applications to Safety Control. In: *Researchgate.net* [online]. 2019 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/344743116_Development_of_a_Virtual_Force_Sensor_for_a_Low-Cost_Collaborative_Robot_and_Applications_to_Safety_Control
- [8] Universal Robots, *Hex force/torque sensing package* [online]. 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/plus/urplus-components/accessories/hex-forcetorque-sensing-package/>
- [9] Universal Robots, *Historie kolaborativních robotů* [online]. 2020 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/o-universal-robots/centrum-novinek/historie-kolaborativn%C3%ADch-robot%C5%AF/>
- [10] Universal Robots, *UR5 technická specifikace* [online]. 2009-2016 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: https://www.universal-robots.com/media/50579/ur5_cs.pdf
- [11] Universal Robots, *Universal Robots UR5e* [online]. 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/produkty/robot-ur5e/>
- [12] TŮMA, Pavel. Ekosystém Universal Robots+. In: *universal-robots.com* [online] 28.08.2020 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/ur-blog/ekosyst%C3%A9m-universal-robotsplus/>
- [13] Universal Robots, *Universal robots e-series uživatelská příručka* [online]. 2018 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/40962/UR5e_User_Manual_cs_Global.pdf
- [14] Thinkbotsolutions, *Universal robots UR5e* [online]. 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://thinkbotsolutions.com/products/universal-robots-ur5e>
- [15] Universal Robots, *Connecting internal inputs and outputs (I/O) on the robot's controller* [online]. 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/connecting-internal-inputs-and-outputs-io-on-the-robots-controller/>

- [16] Universal Robots, *VG10 Vacuum gripper* [online]. 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/plus/urplus-components/handling-grippers/vg10-vacuum-gripper/>
- [17] Universal Robots, *Soft gripper* [online]. 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/plus/urplus-components/handling-grippers/soft-gripper/>
- [18] iF Design, *DHEF adaptive shape gripper* [online]. 2021 [cit. 09.05.2021] Dostupné z: <https://ifworlddesignguide.com/entry/283452-dhef-adaptive-shape-gripper>
- [19] BÉLANGER-BARETTE, Mathieu. Ekosystém Gettig started with collaborative robots: Machine tending. In: *blog.robotiq.com* [online] 26.11.2019 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/getting-started-with-collaborative-robots-machine-tending-application>
- [20] Onrobot, *RG2* [online]. 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://onrobot.com/cs/vyrobky/uchopovac-rg2>
- [21] Onrobot, *Onrobot product brochure*, 2020 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: https://onrobot.com/sites/default/files/productbrochure/ENG_OnRobot_%20brochure_A4_0.pdf
- [22] Robotiq, *3-Finger Adaptive Robot Gripper*, 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>
- [23] Robotiq, *Robotiq 3-Finger Adaptive Robot Gripper Instruction Manual* [online]. 2018 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: https://assets.robotiq.com/website-assets/support_documents/document/3-Finger_PDF_20190221.pdf
- [24] Coppelia Robotics, *Writing code in and around CoppeliaSim* 2021 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: <https://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/writingCode.htm#sixMethods>
- [25] Github, *UR5 Moveit model*, 2018 [cit. 09.05.2021]. Dostupné z: https://github.com/ros-industrial/universal_robot/issues/374
- [26] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Vydání první, Brno : Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUT IUM, 2016. 787 stran. ISBN: 978-80-214-4828-5