



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MANIPULACE S KAPALINOU S VYUŽITÍM PLATFORMY ABB YUMI – PIPETOVÁNÍ

FLUID HANDLING USING THE ABB YUMI PLATFORM – PIPETTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Smolinský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Michal Smolinský
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
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:

MANIPULACE S KAPALINOU S VYUŽITÍM PLATFORMY ABB YUMI – PIPETOVÁNÍ

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce bude pochopit filosofii programování robotu ABB Yumi prostřednictvím ABB RS a vyřešit definovanou úlohu laboratorní manipulace s kapalinou. Práce bude řešena v laboratoři robotiky a kybernetiky ÚAI.

Cíle bakalářské práce:

- 1/ Popis využitého robotu a rešerše kolaborativních robotů.
- 2/ Stručná rešerše pipet pro dávkování přesných objemů.
- 3/ Popis a řešení úlohy pipetování přesného objemu.
- 4/ Popis a řešení zvolené popularizační úlohy.
- 5/ Programování robotu a simulační verifikace v ABB RS.
- 6/ Video prezentující dosažené výsledky a poster.

Seznam doporučené literatury:

SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB, ed., [2016]. Springer handbook of robotics. 2nd edition. Berlin: Springer. ISBN 978-3-319-32550-7.

ZÁDA, Václav, 2012. Robotika: matematické aspekty analýzy a řízení. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-882-3.

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

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cieľom tejto bakalárskej práce je vytvorenie riadiaceho programu pre kolaboratívneho robota IRB 14000, ktorého úlohou je presné dávkovanie kvapaliny pomocou pipety. V úvode práce je predstavené odvetvie kolaboratívnej robotiky, nasledované popisom, vývojom a produktmi spoločnosti ABB. Po predstavení modelu použitého robota je pozornosť venovaná problematike manipulácie s kvapalinou, ktorej súčasťou je výber vhodnej pipety. Robotom vykonávaná aplikácia a jej tvorba tvorí zvyšok práce, súčasťou ktorej je okrem pôvodnej úlohy pipetovania rozšírenie vo forme samostatnej úlohy. Za cieľ tejto úlohy bola pre účely prezentácie použitého robota zvolená príprava miešaného nápoja. Nasledujúca posledná časť popisuje priebeh testovania oboch úloh na reálnom prototypu robota, čoho produktom je video, ktoré je súčasťou prílohy.

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to create a control program for the collaborative robot IRB 14000, whose task is the accurate dosing of liquid using a pipette. The introduction introduces the collaborative robotics industry, followed by a description, development and ABB products. After the introduction of the model of the used robot, attention is paid to the issue of liquid handling, which includes the selection of a suitable pipette. The application performed by the robot and its creation forms the rest of the work, which includes, in addition to the original pipetting task, an extension in the form of a separate task. The aim of this task was to prepare a mixed drink for the purpose of presenting the used robot. The following last part describes the process of testing both tasks on a real prototype robot, the product of which is a video, which is part of the appendix.

KLÚČOVÉ SLOVA

kolaboratívny robot, IRB 14000, YuMi, RobotStudio, RAPID, presné dávkovanie kvapalín, automatizované pipetovanie, príprava nápoja

KEYWORDS

collaborative robot, IRB 14000, YuMi, RobotStudio, RAPID, precise liquid dosing, automated pipetting, drink preparation



2021

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SMOLINSKÝ, Michal. Manipulace s kapalinou s využitím platformy ABB YuMi – pipetování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2021, 77 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu svojej práce, doc. Ing. Radomilovi Matouškovi, Ph.D, za poskytnuté rady pri spracovávaní práce. Moje ďakujem patrí tiež za prívetivý prístup a sprevádzanie v počiatočnej práci Ing. Romanovi Parákovi. Rovnako ďakujem mojej najbližšej rodine, ktorá ma počas celého štúdia podporovala.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením vedúceho práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry.

Ako autor uvedenej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestne právnych dôsledkov.

V Brne dňa 22. 5. 2021

.....

Michal Smolinský

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	KOLABORATÍVNA ROBOTIKA	17
2.1	Význam kolaboratívnej robotiky	17
2.2	Bezpečnosť a režimy spolupráce	18
2.3	Rozdelenie kolaboratívnych robotov	19
2.4	Výrobcovia spolupracujúcich robotov	20
2.5	Súčasnosť a budúcnosť kolaboratívnej robotiky	26
3	ROBOTIKA ABB	27
3.1	Spoločnosť ABB.....	27
3.2	Divízia robotiky	28
3.2.1	História	28
3.2.2	Súčasný stav	30
3.3	Dual-arm YuMi	32
3.3.1	Popis robota	32
3.3.2	Riadiaci systém.....	34
4	PROBLEMATIKA DÁVKOVANIA KVAPALINY	37
4.1	Laboratórna automatizácia	37
4.2	Pipetovanie	38
4.3	Prehľad výrobcov pipiet	40
4.4	Výber pipety	44
5	ÚLOHA MANIPULÁCIE.....	47
5.1	Koncový efektor robota	47
5.2	Laboratórne pracovisko	48
5.3	Robotická manipulácia	49
5.3.1	Nasadenie špičky pipety	49
5.3.2	Pipetovanie	50
5.3.3	Odstránenie špičky pipety	50
6	APLIKÁCIA ROBOTSTUDIO.....	53
6.1	Vytvorenie stanice a import robota	53
6.2	Pridanie nástroja	55
6.3	Geometria a modelovanie	56
6.4	Vytváranie cieľov a ciest	57
6.5	RAPID	59
6.6	Signály a Logika stanice	60
7	PREZENTAČNÁ ÚLOHA IRB 14000	63
7.1	Pracovné prostredie	63
7.2	Príprava nápoja	64
8	TESTOVANIE A ZHODNOTENIE	67
9	ZÁVER	69
10	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....	71
11	ZOZNAM PRÍLOH.....	77



1 ÚVOD

Hoci je odvetvie automatizácie a robotiky vďaka svojim benefitom sektorom s rastúcou popularitou, významnosť týchto oblastí sa intenzívnejšie prejavila s masívnym rozšírením ochorenia Covid-19. Reakciou na zvýšené nároky zdravotníckeho personálu, zahŕňajúce vykonávanie testov na diagnostiku infekcie, je táto práca, ktorá je využiteľná ako podklad pre široké spektrum laboratórných činností.

Hlavnou úlohou tejto práce je tak tvorba riadiaceho programu pre kolaboratívneho robota IRB 14000, vykonávajúceho odbery a distribúciu potenciálne infekčných vzoriek. Kolaboratívna robotika, vhodná pre priamu spoluprácu s človekom, je predstavená v prvej kapitole, súčasťou ktorej je tiež prehľad producentov tejto kategórie robotov. Nasleduje popis výrobcu zvoleného robota, spoločnosti ABB, pričom jadrom tejto kapitoly je charakteristika použitého dvojramenného robota, označovaného tiež Dual-arm YuMi. Prehľad výrobcov pipiet, ich distribútorov a výber vhodného modelu pipety, ktorá je primárnym nástrojom manipulácie, je vykonaný v časti nasledujúcej, ktorej ukončením prichádza na rad praktická časť práce.

Nástrojom použitým pre programovanie robota a tvorbu simulácie je softvér RobotStudio, ktorý je poskytovaný firmou ABB. Po predstavení vybavenia pracoviska je začlenený popis robotom vykonávanej úlohy, ktorej základná časť, pipetovanie, je rozšírená o činnosti nasadenia a odstránenia špičky pipety. Procesu tvorby programu robota v prostredí RobotStudio sa venuje nasledujúca kapitola, popisujúca funkcie tohto nástroja. Rozšíreniu súboru aplikácií, ktoré dokáže robot YuMi vykonávať, je venovaná nasledovná časť práce. Predmetom úlohy, zahŕňajúcej taktiež manipuláciu s kvapalinou, je príprava miešaného nápoja, po ktorej charakteristike je pozornosť venovaná overeniu riešení na reálnom modeli robota. Po tejto kontrole programov oboch úloh sú pre úlohu pipetovania navrhnuté alternatívy riešenia a možný budúci vývoj pracoviska.

2 KOLABORATÍVNA ROBOTIKA

2.1 Význam kolaboratívnej robotiky

Robotika ako prostriedok pre zefektívnenie procesov predstavuje v porovnaní s jednoúčelovými zariadeniami prvok pružnej automatizácie s možnosťou programovania. Po výraznom vývoji v šesťdesiatych rokoch 20. storočia, v ktorých príchod výkonnejšej výpočtovej techniky umožňoval vykonávať zložitejšie riadenie, sú na robotické systémy neustále kladené náročnejšie požiadavky. [61]

V oblasti automatizácie a robotiky môžeme byť v súčasnej dobe svedkami ďalšieho technologického pokroku, často označovaným ako 4. priemyselná revolúcia. Tento koncept, niekedy pod pojmom priemysel 4.0, zahŕňa širokú škálu služieb, ktorých hlavným zámerom je zvýšenie efektivity v danej prevádzke. To možno docieľiť predovšetkým vzájomnou komunikáciou medzi systémami, zberom dát s ich následnou analýzou a mnohými ďalšími technológiami. [60]

S nástupom tejto revolúcie sa do popredia dostáva aj kolaboratívna robotika. Jej produktom je robot menších rozmerov, najčastejšie s jedným, prípadne s dvomi ramenami (Obr. 1), ktorý umožňuje bezpečnú spoluprácu s človekom.



Obr. 1: Spolupráca človeka a robota [14]

Kolaboratívny robot, alebo kobot, tak predstavuje zariadenie, určené pre priamu fyzickú interakciu medzi človekom a strojom. Na rozdiel od bežných priemyselných robotov pracujúcich paralelne s človekom nie je potrebné, aby bol kolaboratívny robot kvôli bezpečnosti izolovaný a oplotený, vďaka čomu môže spolupracovať s ľuďmi. Neprichádza tak k úplnému odstráneniu človeka z úlohy, ale len k začleneniu robota do práce, ktorá má často opakujúci sa charakter. [27]

Rozmanitosť úloh pre ktoré sa dá robot použiť možno jednoducho rozšíriť vďaka výmenným koncovým efektorom. Vzhľadom na menšiu hmotnosť robota je možné proces programovania novej úlohy dokonca často zjednodušiť, a to pomocou postupného vedenia robotického ramena po danej trase, ktorú si robot zaznamenáva. Týmto sa pri použití v jednoduchých aplikáciách nielen výrazne skracuje čas zavádzania do prevádzky, ale sa aj čiastočne znižujú nároky na personál. Popri svojich rozmeroch je obstarávacia cena v porovnaní s konvenčnými zariadeniami nižšia, ako aj ďalšia údržba a náklady s ňou spojené. Aj vďaka tomuto a svojej flexibilitě je kolaboratívny robot vhodnou voľbou do prostredia, kde by investícia do rozsiahlejších technológií predstavovala značné riziko. [27]

2.2 Bezpečnosť a režimy spolupráce

Hoci by mala byť bezpečnosť prvoradá pri každej práci, mimoriadny význam nadobúda tento pojem v oblasti kolaboratívnej robotiky, kedy prichádza k priamemu kontaktu človeka so strojom.

Základ v tejto oblasti poskytujú normy ISO 10218-1 a ISO 10218-2 z roku 2011, ktoré stručne definujú požiadavky pre kolaboratívne roboty [17].

Neúplnosť a nejednoznačnosť týchto noriem popri zvyšujúcom sa počte kolaboratívnych robotov však spôsobil vznik ďalšej špecifikácie, ktorou je ISO/TS 15066. Táto špecifikácia slúži ako doplnok k predošlým normám a prináša informácie o maximálnej sile a rýchlosti robota pre zariadenia obmedzujúce silu a výkon, ako aj ďalšie obmedzenia a odporúčania, ktoré treba brať v úvahu pred použitím robota. Špecifikácia je založená na názore, že pokiaľ príde ku kontaktu robota s človekom, nesmie byť spôsobené zranenie, ale ani bolesť. ISO/TS 15066 tak pre tieto účely zohľadňuje výsledky štúdie z univerzity v Mainzi, popisujúcej pre rôzne časti tela silové a tlakové limity, ktoré by počas prevádzky nemali byť prekročené. Je dôležité poznamenať, že ISO/TS 15066 je technická špecifikácia, čo znamená, že jej obsah nepredstavuje konečnú podobu a možno ju pred vyhlásením normy ISO podľa potrieb upraviť. [17, 27]

Špecifikácia ISO/TS 15066 popisuje 4 hlavné režimy spolupráce: [17, 41]

- Monitorované bezpečnostné zastavenie – tento spôsob s minimálnym stupňom kolaborácie využíva bezpečnostné prvky, ako napríklad lasery na zachytenie prítomnosti osoby v pracovnej zóne. V prípade, že osoba vstúpi do monitorovaného priestoru, robot sa zastaví a čaká na ďalšie inštrukcie obsluhy.
- Ručné navádzanie – výhoda režimu spočíva v jednoduchosti programovania zariadenia, kedy pracovník pohybom svojej ruky navádza robotické rameno po žiadanej trajektórii.

- Monitorovanie rýchlosti a vzdialenosti – pri tomto type kolaborácie je podobne ako pri monitorovanom bezpečnostnom zastavení sústavne sledované okolie pracoviska, ktoré je podľa vzdialenosti od robota rozdelené do viacerých zón. Podľa stupňa zóny, v ktorej sa osoba nachádza, sa upravuje rýchlosť robota a v prípade bezprostrednej blízkosti stroja sa robot zastaví. Po následnom dostatočnom oddialení pracovníka robot pokračuje vo svojej práci automaticky, čo činí tento spôsob kolaborácie vhodný aj pre častejšie zásahy. Obmedzenie výkonu a sily – najviac kolaboratívny režim, ktorý dovoľuje nepretržitú prácu s človekom. Samozrejmosťou je okamžité zastavenie v prípade stretu s človekom. Aby neboli prekročené prípustné hodnoty tlaku na ľudské telo, je žiaduce rozložiť silu robota pri kolízii na väčšiu plochu. Z tohto dôvodu sú pre splnenie predošle spomínanej technickej špecifikácie žiaduce zaoblené tvary robota, rovnako ako aj predmetov, s ktorými robot pracuje. [33]

2.3 Rozdelenie kolaboratívnych robotov

Napriek tomu, že norma definuje viacero režimov spolupráce, má najväčšie zastúpenie spomedzi kolaboratívnych robotov typ s obmedzením výkonu a sily. Na to, aby mohli byť zaznamenané sily pri kontakte s človekom, obsahuje robot rôzne druhy senzorov. Podľa spôsobu, ktorým robot s obmedzením výkonu a sily sníma kolízie, sa rozlišujú nasledujúce druhy robotov: [19]

- Skin sensing – riešenie, ktoré je menej používané, pracuje za použitia senzorov reagujúcich na dotyk. Snímače rozmiestnené po celom tele robota činia tento druh za jeden z najbezpečnejších. Prototypom s povrchom citlivým na dotyk je robot APAS, zobrazený na Obr. 2.



Obr. 2: Robotický asistent APAS od firmy Bosch Rexroth [21]

- Joint sensing – najčastejšie používaný typ kolaboratívneho robota, ktorý pomocou merania prúdu v motoroch, prípadne iných senzorov snímajúcich vznikajúci krútiaci moment, vyhodnocuje sily pôsobiace na telo robota. Jednoduchosť pri nastavovaní pred spustením do prevádzky je u tohto typu značnou výhodou.
- Force sensor base – spôsob umiestnenia snímačov krútiaceho momentu v kĺboch u predošlého typu je nahradený metódou, pri ktorej sú snímače nahradené jedným senzorom, umiestneným v podstavci robota. S výhodou možno tento spôsob uplatniť u bežných priemyselných robotov, u ktorých je požiadavkou zapojenie do kolaboratívneho procesu. Takáto zmena charakteru robota je avšak spojená so zložitým procesom nastavovania, ktorým je potrebné dosiahnuť správnu citlivosť, nutnú pre rozlíšenie sily vznikajúcej z bremena od síl z nárazov.
- Inherently safe – spojením viacerých druhov senzorov vzniká druh robota, ktorý je označovaný ako bezprostredne bezpečný. Táto záruka je dosiahnutá aj vďaka nízkemu limitu maximálneho zaťaženia, pri ktorom nehrozí vznik závažných zranení.

2.4 Výrobcovia spolupracujúcich robotov

Na trhu s robotikou existuje v dnešnej dobe viacero výrobcov kolaboratívnych robotov, ktorí svojimi produktmi pokrývajú rozličné odvetvia. Medzi najznámejších producentov patrí nepochybne výrobca Universal Robots, nasledovaný ďalšími, z ktorých zmienení sú v tejto podkapitole KUKA, Stäubli, ABB a Rethink Robotics.

KUKA

Pôvodom nemecká spoločnosť, vyrábajúca priemyselné roboty, ponúka svoju prvú sériu robotov vhodných na spoluprácu s človekom pod názvom LBR iiwa. Tento názov je výsledkom zjednotenia skratky „LBR“, poukazujúc na ľahkosť robota a spojenia „iiwa“, znamenajúc inteligentný priemyselný pracovný asistent. [34]

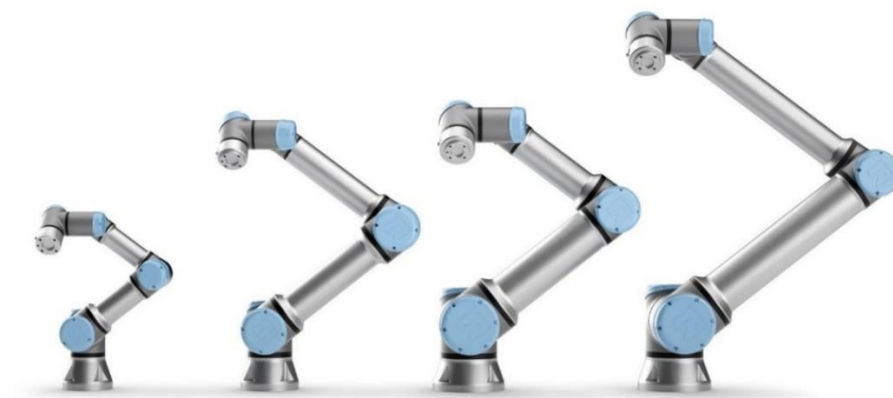


Obr. 3: KUKA LBR IIWA 14 R820 [47]

Základné 2 prevedenia LBR iiwa 7 R800 a LBR iiwa 14 R820 (Obr. 3) s nosnosťou 7 alebo 14 kg pozostávajú zo 7 pohyblivých ôs s celkovým maximálnym dosahom 800, prípadne 820 mm. Nízka hmotnosť 23,9 alebo 29,9 kg vďaka konštrukcii z hliníka dovoľuje vznik systému, skrátene nazvaného ako KMR iiwa. Ten predstavuje kombináciu robota LBR iiwa a mobilnej platformy KUKA Mobile Robotics, na ktorej je umiestnený. Robot sa tak podľa požiadaviek môže pomocou navigačného systému nezávisle pohybovať, pričom sa po každom príchode na nové stanovisko automaticky vykonáva kalibrácia. LBR iiwa dokáže následne lokalizovať aj nepresne pripravené diely, ktorým sa s opakovanou presnosťou (ďalej označovanou len ako presnosťou) polohovania $\pm 0,1$ mm dokáže prispôbiť. Vďaka svojej ľahkej konštrukcii vzniká rovnako riešenie do priestorov s nedostatkom voľného miesta, a to vo forme stropného umiestnenia. KUKA používa u týchto robotov senzory citlivé na krútiaci moment, umožňujúce pri zachytení vonkajších síl okamžite reagovať. [34]

Universal Robots

Od uvedenia prvého vlastného kolaboratívneho robota od tohto výrobcu na trh v roku 2008 sa podarilo tejto firme získať prvenstvo v zastúpení na trhu s kolaboratívnou robotikou. Jej najnovším produktom je edícia e-Series, znázornená na Obr. 4, ktorej základ predstavujú produkty UR3e, UR5e a UR10e. Maximálne možné zaťaženie robotov, začínajúc od 3 kg, je vyjadrené výrobcom priamo v názve robota. Najmenší kobot UR3e s váhou 11,2 kg dovoľuje 360 stupňovú rotáciu vo svojich všetkých kĺboch a neobmedzenú rotáciu koncového kĺbu. S dosahom 500 mm ponúka presnosť polohovania $\pm 0,03$ mm. Rovnakú presnosť s hmotnosťou 20,6 kg a dosahom 850 mm ponúka UR5e, ktorý je kompromisom medzi výkonom a veľkosťou. Predstaviteľom s najväčším dosahom 1300 mm, hmotnosťou 33,5 kg a presnosťou polohovania $\pm 0,05$ mm je robot UR10e. Okrem univerzálnosti a flexibility patrí medzi najväčšie prednosti týchto 6-osých robotov ich jednoduchosť nastavovania, kedy pomocou navádzania robota a prenosného ovládacieho panela robota ľahko naprogramovať. [57]



Obr. 4: Rodina kolaboratívnych robotov Universal Robots [43]

Posledný člen e-Series UR16e bol predstavený v roku 2019 v Šanghaji. Ten sa so svojim najväčším užitočným zaťažením spomedzi série a 900 mm dosahom stáva vhodný predovšetkým pre manipuláciu s ťažkými predmetmi a obsluhu CNC strojov. Presnosť polohovania u tohto typu robota je $\pm 0,05$ mm. Do ponuky výrobcu patria aj produkty systému UR+, ktorý obsahuje certifikované súčasti a prídavné komponenty k robotom e-Series. [58]

Stäubli

Mechatronická spoločnosť Stäubli so sídlom v Švajčiarsku je na svetovom trhu známa vo viacerých odvetviach. Firma sa okrem robotiky venuje výrobe rôznych typov konektorov, spojok a takisto navrhovaniu systémov pre textilný priemysel. [52]



Obr. 5: Modely 60L a 90 rady TX2touch [53]

Kolaboratívny rad robotov TX2touch (Obr. 5) je založený na priemyselných robotoch TX2, využívajúci navyše sensorický povrch pre bezpečnejšiu spoluprácu človeka so strojom. Táto funkcia je dodatočná k ostatným bezpečnostným funkciám a v prípade kolízie zaznamená kontakt a predchádza zraneniam zastavením robota. Rovnako ako u pôvodnej rady TX2, je aj v tomto prípade použitý kontrolér CS9. Roboty majú 6 stupňov voľnosti a digitálny enkodér, ktorý TX2touch využíva, je viacotáčkový absolútny 19-bitový. Okrem zabudovaného elektrického a pneumatického obvodu obsahuje robot na pripojenie zariadení, ako kamier a senzorov ethernetovú prípojku Cat5e. Primárne 2 modely robotov, od ktorých sú odvodené ostatné prototypy sú TX2touch-60 a TX2touch-90. [53]

Zoznam všetkých kolaboratívnych robotov rady TX2touch spolu s ich základnými údajmi je zobrazený v Tab. 1.

Tab. 1: Prehľad kolaboratívnych robotov TX2touch od Stäubli [53]

Model	Nosnosť [kg]	Dosah [mm]	Opakovateľnosť pohybu [mm]	Hmotnosť [kg]
TX2touch-60	4,5	670	± 0,020	51
TX2touch-60L	3,7	920	± 0,030	52
TX2touch-90	14,0	1000	± 0,030	111
TX2touch-90L	12,0	1200	± 0,035	114
TX2touch-90XL	7,0	1450	± 0,040	116

ABB

YuMi IRB 14000 (Obr. 6), označovaný ako prvý skutočne kolaboratívny robot na svete, bol predstavený spoločnosťou ABB v roku 2015. Pomenovanie YuMi, vychádzajúce zo spojenia „You and Me“, teda „ty a ja“, napovedá zámer priamej spolupráce s človekom. Vysoký potenciál v odvetví automatizácie poskytuje dvojramenný robot vďaka svojmu jednoduchému ovládaniu, presnosti a ďalším schopnostiam, ktoré sú bližšie popísané v osobitnej podkapitole 3.3. [14]



Obr. 6: Dual-arm YuMi – IRB 14000 [12]

Inšpiráciou predošlého produktu vznikol nasledovný kolaboratívny robot, ktorým je model IRB 14050 single-arm YuMi, s maximálnym dosahom 559 mm. Robot so 7 stupňami voľnosti, najväčším užitočným zaťažením 500 g a s presnosťou polohovania 0,02 mm je predurčený predovšetkým pre práce menšieho charakteru

v oblasti montáže a elektrotechniky. Kompaktné zloženie o hmotnosti 9,5 kg povoľuje okrem bežnej inštalácie montáž v ľubovoľnej horizontálnej aj vertikálnej polohe. Napriek tomu, že model zdieľa so svojím predchodcom sériu spoločných vlastností, akou je napr. ľahká konštrukcia robota, patrí medzi zmeny u Single-arm YuMi (Obr. 7) prechod na kontrolér OmniCore. [2]



Obr. 7: Single-arm YuMi - IRB 14050 [2]

Novinkou z najnovších dvoch prírastkov do rodiny kolaboratívnych robotov od ABB, predstavených v roku 2021, je GoFa CRB 15000 (Obr. 8). Skrátené použité slovné spojenie v názve „Go faster“ vyzdvihuje rýchlosť robota, ktorej možná hodnota 2,2 m/s pripisuje tomuto modelu rýchlostné prvenstvo vo svojej kategórii robotov. [9]



Obr. 8: GoFa CRB 15000 [9]



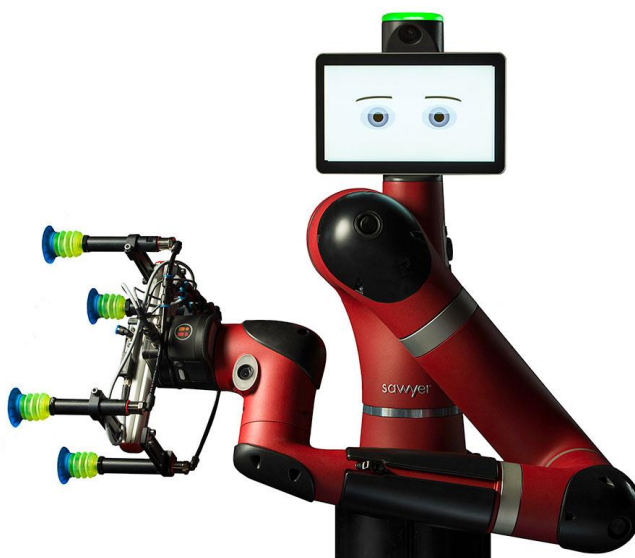
Obr. 9: SWIFTI CRB 1100 [8]

Ďalšou významnou vlastnosťou tohto robota je dosah 950 mm, ktorý je o 12 % väčší ako u príbuzných robotoch s nosnosťou 5 kg. GoFa o hmotnosti 27 kg má ochranné krytie IP54, presnosť polohovania 0,05 mm a použitý riadiaci systém Omnicore. Zaoblený šesťosý robot obsahuje tiež vo svojich kĺboch senzory snímajúce krútiaci moment, čím zabraňuje vzniku zranení. [9]

Druhým z najnovšie predstavených spolupracujúcich robotov je produkt SWIFTI CRB 1100 (Obr. 9) s maximálnym dosahom 580 mm. Zámerom tohto modelu bolo vytvorenie zariadenia, ležiaceho na pomedzí kolaboratívnej a priemyselnej robotiky. Použitie softvéru SafeMove a bezpečnostného lasera zamedzuje vznik zrážky medzi človekom a robotom, čím odpadá nutnosť použitia ochranného oplotenia. Hmotnosť šesťosého zariadenia je 21 kg a maximálna rýchlosť, porovnateľná s priemyselnými robotmi, je cez 5 m/s. Robot patrí do kategórie robotov s nosnosťou do 4 kg, pričom presnosť polohovania je 0,01 mm. Riadenie prebieha rovnako prostredníctvom kontroléra OmniCore a 4 zabudované prívody vzduchu navyše umožňujú prácu s vákuovými prísavkami. [8]

Rethink Robotics

So zámerom podporiť lokálnu produkciu v Severnej Amerike a zastaviť presúvanie výroby do ostatných krajín sveta, vyvinula firma Rethink Robotics kolaboratívneho robota s menom Baxter. Tohto dvojramenného robota s pohybujúcimi očami na displeji prekonal významnejší nástupca Sawyer (Obr. 10), ktorý obsahuje viacero zmien. Najvýraznejšou zmenou u tohto 19 kg robota je prechod ku konštrukcii s jedným ramenom. Za účelom zvýšenia tuhosti sú v pohonoch pôvodne používané kovové pružiny v tvare C nahradené pružinami tvaru S z titánu. Ďalšia zmena nastala v odstránení ostrých hrán a v spôsobe upevňovania robota, ktoré je fixné. Táto zvýšená pevnosť umožňuje manipuláciu s predmetmi do maximálnej hmotnosti 4 kg, pričom rovnako ako u predošlého typu, disponuje rameno 7 stupňami voľnosti. [18]



Obr. 10: Robot Sawyer s prídavným uchopovacím efektorom [45]

Rozhranie pre komunikáciu medzi človekom a robotom tvorí systém Intera. K tomuto softvéru je možné pristupovať pomocou grafického prostredia na displeji robota, ktoré je vhodné aj pre menej skúsených používateľov. Odchýlky a údaje o produkcii, ako počet vykonaných cyklov a priemerná dĺžka procesu tak jednoducho zistiť priamo na mieste. Súčasťou tejto platformy je funkcia Intera Studio, dovoľujúca vytvárať a upravovať úlohy, ktoré sú pre robota určené. [44]

2.5 Súčasnosc' a budúcnosť kolaboratívnej robotiky

Kroky k postupnému znižovaniu nákladov na personál a zavádzanie kolaboratívnych robotov sú neodmysliteľne spojené s rastom trhu v tomto odvetví robotiky. K tejto skutočnosti prispieva aj rýchla návratnosť investícií a pokles obstarávacej ceny kobotov. Najväčší podiel na trhu s kolaboratívnou robotikou predstavuje automobilový priemysel, po ktorom nasleduje oblasť zdravotnej starostlivosti. Spomedzi charakteru práce, ktorú vykonávajú, patria najčastejšie úlohy kolaboratívnych robotov do oblastí manipulácie, montáže a demontáže, zvarovania a spájkovania. V súčasnosti najväčšie zastúpenie na tomto trhu predstavujú kolaboratívne roboty z kategórie s užitočnou nosnosťou do 5 kg. Pre nízku hmotnosť a všestrannosť týchto zariadení tak možno rovnako očakávať, že tento trend ostane nezmenený. [42]

Výhoda kolaboratívnej robotiky nižšej nosnosti v porovnaní s výkonnejšími modelmi spočíva tiež v menších nárokoch na priestor, v ktorých bude robot vykonávať svoju činnosť. Vďaka svojmu nízkemu maximálnemu zaťaženiu a presnosti pri práci, často menšou ako 1 mm, predstavujú ideálny prostriedok pre prácu v elektrotechnickom priemysle. [38]

Podľa odhadov spoločnosti Markets and Markets sa celosvetová hodnota trhu s kolaboratívnymi robotmi zvýši z 981 miliónov amerických dolárov za rok 2020 na hodnotu 7,972 miliárd amerických dolárov do roku 2026, čo predstavuje zloženú ročnú mieru rastu 41,8 %. Jedno z najsilnejších postavení na tomto trhu zastávajú krajiny, ako Thajsko, Taiwan, Južná Kórea, ktoré vďaka miestnym nízkonákladovým spoločnostiam, ako napr. Doosan Robotics a Techman Robot úspešne konkurujú Európskym výrobcem kobotov. Poznajúc benefity robotizácie, možno teda od týchto krajín Ázijsko-pacifického regiónu aj naďalej očakávať prvenstvá v zastúpení na globálnom trhu s kolaboratívnou robotikou. [38]

3 ROBOTIKA ABB

Cieľom nasledujúcej kapitoly je predovšetkým predstavenie súboru robotov od výrobcu ABB. Prvá podkapitola rozoberá vznik a oblasti pôsobenia tejto firmy, pričom nasleduje stručný vývoj robotických produktov až k súčasnému stavu, spomedzi ktorých sú vyzdvihnuté najznámejšie produkty. Najpodstatnejšiu podkapitolu tvorí podrobnejší popis kolaboratívneho robota YuMi IRB 14000, ktorého súčasťou je stavba robota, ako aj jeho riadenie a možnosti ovládania.

3.1 Spoločnosť ABB

Staršia spoločnosť ASEA, založená v roku 1883 v Štokholme a pôvodne zameraná na výrobu generátorov a elektrického osvetlenia, ako aj podobne orientovaná švajčiarska spoločnosť Brown, Boveri & Cie, pôsobiaca od roku 1891, zohrávajú v histórii dôležitú úlohu. Spojenie týchto dvoch významných firiem ASEA a BBC v roku 1988 má za následok vznik skupiny ABB, ako je známa dnes. [4]

Švajčiarsky koncern ABB sa s viac ako 130 ročnou históriou zaraďuje medzi najvýznamnejšie technologické spoločnosti sveta a celkovo s vyše 110 000 zamestnancami má svoje pôsobisko vo viac ako 100 krajinách. Medzi tieto krajiny s dlhou históriou spolupráce patrí najmä Čína. Zohrávajú pre ABB kľúčovú úlohu na trhu, nachádza sa tu preto rozľahlá sieť tovární a R&D centier [5]. Zastúpenie ABB nachádza aj v Nemecku, s centrom v meste Mannheim (Obr. 11), ktoré poskytuje zamestnanie vyše 10 000 pracovníkom [3].



Obr. 11: Nemecké sídlo ABB v Mannheime [3]

Široké portfólio činností, ktorým sa firma venuje, možno zhrnúť do 4 hlavných oblastí. Medzi tieto divízie patrí: [6]

- Elektrifikácia – rozsiahle spektrum výrobkov, siahajúc od spínačov, zásuviek, rozvádzačov až po rôzne ochranné prvky. Obsiahnuté sú aj moderné produkty a riešenia pre elektrické vozidlá, solárne inventory a riadiace prvky.
- Procesná automatizácia – služby a sortiment orientovaný najmä pre meranie, reguláciu a optimalizáciu priemyselných procesov. ABB patrí v oblasti distribuovaných riadiacich systémov medzi najväčších dodávateľov.
- Pohony – táto divízia patrí podobne medzi oblasti, v ktorej má firma celosvetovo dominujúce postavenie. V ponuke možno nájsť generátory, elektromotory, frekvenčné meniče a iné výrobky pre prenos mechanickej energie.
- Robotika a automatizácia – navrhovanie automatizovanej výroby a iné moderné prístupy pre rozličné priemyselné odvetvia. Hlavnou činnosťou tejto divízie je zavádzanie robotických systémov a riešení do podnikov.

3.2 Divízia robotiky

3.2.1 História

Tento oddiel, zaoberajúci sa vývojom robotiky ABB, je spracovaný na základe [15]. Predstavenie v roku 1974 prvého plne elektrického priemyselného robota IRB 6 s mikroprocesorom a nosnosťou 6 kg od firmy ASEA malo za následok vznik nových štandardov v oblasti robotiky. Oproti robotom s hydraulickým pohonom, akým bol Unimate, prvý priemyselný robot, sa rozšírila oblasť, v ktorej bolo možné robotov uplatniť. V poradí druhý predstavený robot od ASEA s väčšou nosnosťou bol IRB 60, medzi ktorého prvé aplikácie patrilo zváranie vo švédскеj automobilke Saab.

Uplatnenie týchto strojov predovšetkým v oblasti zvárania zapríčinilo v roku 1982 vznik robota pre tieto účely stvoreného. Tým bol IRB 90 so 6 stupňami voľnosti, ktorý obsahoval zabudovaný prívod vody, vzduchu a elektriny vo svojom ramene. Následne bol v roku 1988 uvedený TR 5000, prvý robot s elektrickým pohonom na lakovanie.

Výraznejšia zmena v mechanike robotov prišla v 1986 s IRB 2000. Okrem možného zaťaženia 10 kg obsahoval robot namiesto dovtedy používaného DC motoru AC motor, ktorý bol menší, dosahoval väčší krútiaci moment a mal väčšiu životnosť. V roku 1991 vyhovel ABB požiadavkám na prispôsobivého robota vo forme IRB 6000 (Obr. 12) s nosnosťou 150 kg. Tento model určený pre ťažkú manipuláciu a zváranie sa vďaka svojej modulárnej konštrukcii, dovoľujúcej individuálne úpravy, stal vôbec jedným z najobľúbenejších robotov.



Obr. 12: Robot IRB 6000 [16]

Iný koncept stavby vyvinutý v Japonsku a vhodný pri menších aplikáciách predstavujú roboty SCARA. Prvé zariadenie tohto typu od ABB vzniklo v roku 1987 pod menom IRB 300. Väčší pracovný priestor, než aký bolo možné dosiahnuť so SCARA modelom, poskytoval robot IRB 1000 z roku 1984. Jeho kyvadlová stavba s nízkym momentom zotrvačnosti, kedy sa hmotnosť podopieraného ramena sústreďovala do kĺbu, umožňovala zrýchlenie 2 G (tiažové zrýchlenie $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$), vďaka čomu bol vo svete často označovaný ako najrýchlejší montážny robot. Tieto rýchlostné schopnosti sa naďalej podarilo prekonať delta robotom, typom robota pochádzajúceho od švajčiarskeho profesora menom Raymond Clavel. Model tohto druhu IRB 340 FlexPicker z 1998 od firmy ABB s možným zrýchlením 10 G a vykonaním 2 zdvihov za sekundu sa tak pri práci s malými predmetmi zľahka vyrovnal človekovi.

Radikálnejšiu zmenu oproti vývoju robotiky však zaznamenali riadiace systémy a použitý softvér. Prvý takýto systém pre IRB 6 s názvom S1 obsahoval 8-bitový mikroprocesor Intel 8008 a výstup vo forme LED displeja pre 4 číslice. Rozhranie pre obsluhu pozostávalo z 12 tlačidiel a práca s týmto systémom vyžadovala odbornú znalosť. Zmena prístupu a zjednodušenie programovania prišlo v 1981 s príchodom systému S2, kedy bol uvedený programovací jazyk ARLA. Rozhranie pre človeka predstavovalo zariadenie teach pendant, obsahujúce joystick pre ovládanie jednotlivých ramien robota. Pridanými prvkami boli aj časovače a iné funkcie pre zváranie.

Predstavenie S3 v roku 1986 okrem potrebných zmien na riadenie novo používaných AC motorov nepredstavovalo veľkú zmenu. Tá nastala až v roku 1994 nástupom riadiaceho systému S4. Prvou odlišnosťou bol prechod štýlu teach pendant k dizajnu podobnému systému Windows, zahŕňajúcemu rozbaľovacie menu a dialógové

okná. Programátorom uľahčil prácu nový programovací jazyk RAPID. Druhá väčšia oblasť zmien sa týkala výkonu, kedy sa v riadiacom systéme uchovával dynamický model robota, predstavujúci podklad pre vylepšujúce funkcie, ako Motion Control, QuickMove a TrueMove. Pre riadenie aj tých najrýchlejších robotov na trhu vznikol s príchodom nového tisícročia kontrolér S4Cplus s mikroprocesorom Pentium MMX a PCI zbernicou. Nový hardvér tak disponoval vyššími komunikačnými schopnosťami a dokázal sa lepšie prispôbiť novým nárokom.

3.2.2 Súčasný stav

S nástupom 21. storočia sa portfólio priemyselných robotov od ABB výrazne rozšírilo. Medzi najvýznamnejšie produkty patril IRB 7600 s nosnosťou 500 kg, flexibilný IRB 6600 s konštrukciou dovoľujúcou prevrátenie ramena dozadu, alebo IRB 1600 pochádzajúci z roku 2005, teda obdobia, ktoré sa zaraďuje medzi najproduktívnejšie roky firmy ABB. [46]



Obr. 13: Viacúčelový robot IRB 120 [48]



Obr. 14: IRB 360 FlexPicker [1]

Najmenší multifunkčný robot vážiaci 25 kg je IRB 120 (Obr. 13) s nosnosťou 3 kg. Upravený flexibilný model IRB 120T, ktorý dosahuje presnosť polohovania 0,01 mm, využíva vyššiu rýchlosť pre zrýchlenie manipulačných operácií. Podobnými rýchlostnými vlastnosťami disponuje aj IRB 360 FlexPicker (Obr. 14). So svojím zameraním na „pick and place“ aplikácie, typ činností u ktorej dochádza k uchopeniu výrobku a jeho premiestneniu na iné miesto, existuje vo viacerých podobách. Tie, obsahujú zabudovaný kamerový systém pre navádzanie, majú podľa varianty dosah do 1,6 m a nosnosť od 1 do 8 kg. Okrem menších aplikácií, ako v potravinárskom a elektro priemysle tak nachádzajú využitie aj pri práci s ťažšími predmetmi. [39]

V oblasti paletizácie je o nosnosti 110 kg svetovo najrýchlejším robotom IRB 460. Štvorosý robot s dosahom 2,4 m a schopnosťou vykonávať 2 190 cyklov za hodinu je prispôsobený pre vysokorýchlostnú prácu na konci výrobnéj linky. Na uľahčenie práce používateľov je dostupný balík PalletPack 460 s prednastavenými produktmi pre paletovanie. Väčšiu nosnosť do 450 kg s dosahom 3,2 m poskytuje robot IRB 760. Vysoký krútiaci moment v zápästí dovoľuje paletizáciu s ťažšími a väčšími predmetmi, čím je vhodný do výroby v stavebnom alebo chemickom priemysle. [39]

Nasledujúcou generáciou v rodine robotov IRB 6000 je model IRB 6700, predstavujúci najvýkonnejší robot v triede s nosnosťou od 150 do 300 kg. Ako podklad pre zvýšenie spoľahlivosti slúžil predchodca IRB 6640, u ktorého boli zaznamenávané správy o poruchách. V porovnaní tak IRB 6700 dosiahol okrem pevnejšej štruktúry spotrebu menšiu o 15 % a dlhšiu prevádzkyschopnosť, kedy je stredná doba medzi poruchami stanovená na 400 000 hodín. Predĺženie životnosti sa vzťahuje aj na oblasť kabeláže, ktorá patrí k častým dôvodom servisu robota. Previsajúce hadice pre prívod vzduchu, drôtu a káble vedú k ich rýchlejšiemu opotrebeniu a rovnako obmedzujú pohyb robota. IRB 6700 patrí preto k modelom využívajúcim riešenie LeanID, u ktorého sú najviac vystavované časti vedenia umiestnené v ramene robota. [39]

Zástupcom robotov SCARA, určených pre menšie montáže, je rýchly a obratný model IRB 910SC (Obr. 15). S maximálnou nosnosťou 6 kg sú dostupné 3 prevedenia, ktoré majú dosah 450 mm, 550 mm alebo 650 mm. Jednoramenný robot je vďaka svojim rozmerom a presnosti vhodný pre prácu s menšími súčiastkami, montáž a skrutkovanie, kontrolu výrobkov a inú manipuláciu s materiálom. [7]



Obr. 15: SCARA model IRB 910SC - 3/ 0.65 [7]

ABB tak svojou ponukou pokrýva celý rad priemyselných aplikácií, a keďže je globálne od tohto výrobcu nainštalovaných už viac ako 300 000 robotov, patrí spoločnosť medzi najväčších dodávateľov robotických zariadení. Spoločnosť sa pri koncepte tovární

budúcnosti zameriava na 3 oblasti. Prvou je kolaborácia, ktorá okrem priamej spolupráce s človekom znamená začlenenie a odizolovanie robotických systémov. Nutné bezpečnostné funkcie, ako monitorovanie bezpečnosti v kľudovom režime, obmedzovanie rýchlosti a kontrola bezpečného rozsahu osí sú zahrnuté v monitorovacej technológii SafeMove2. Ďalšou oblasťou je digitalizácia, ktorá je za účelom zberu informácií zameraná na prepájanie robotov do systému služieb. Analýza týchto dát prebieha prostredníctvom platformy ABB Ability Connected Services, ktorá slúži pre zvýšenie spoľahlivosti robota a je schopná zredukovať počet servisných zásahov až o 25 %. Poslednou myšlienkou, ktorá je spolu s rastúcim pokrokom v automatizácii a robotike nevyhnutná, je zjednodušovanie. [1]

3.3 Dual-arm YuMi

3.3.1 Popis robota

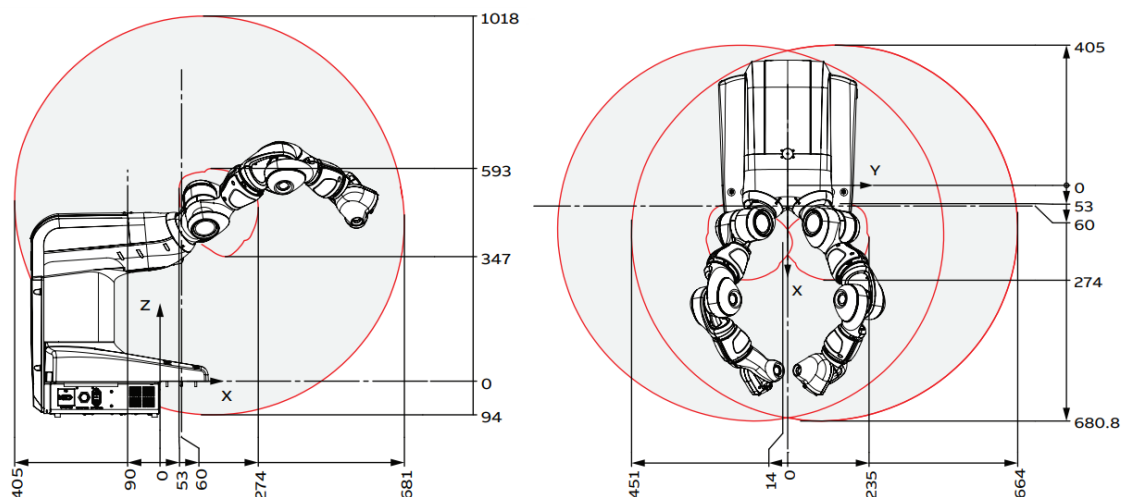
Flexibilný a spoľahlivý robot Dual-arm YuMi signalizuje novú éru, v ktorej nasadenie človeka bok po boku s robotom (Obr. 16) vytvára bezpečné podmienky pre produktívnu prácu. Kompaktný dizajn s rozmermi podobnými ľudskému telu umožňuje vykonávať pohyby v obmedzenom priestore, pričom dosah robota je 559 mm. Hoci je primárne navrhnutý pre použitie v odvetví elektrotechniky, s nosnosťou 500 g a presnosťou polohovania 0,02 mm je tiež riešením pri montáži malých komponentov a manipulácii s drobnými prvkami. [12, 13, 14]



Obr. 16: Kolaborácia s Dual-arm YuMi [14]

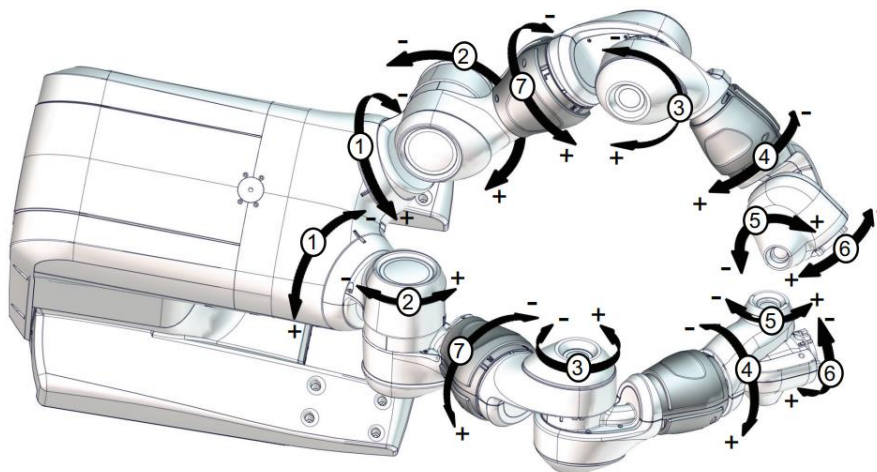
Pre zaistenie minimálne rovnakej bezpečnosti v porovnaní s človekom, obsahuje robot rad bezpečnostných prvkov. Medzi pevnou konštrukciou z horčíka a vonkajšími

plastovými dielmi sa nachádza mäkká vrstva, absorbujúca sily z náhlych nárazov. Po takejto kolízii v pracovnej oblasti robota (Obr. 17) sa robot automaticky zastaví a čaká na opätovné spustenie. Dôvodom zaradenia modelu do kategórie bezprostredne bezpečných robotov sú aj používané algoritmy, ktoré v reálnom čase určujú bezkolíznu dráhu pre obe ramená. [12, 13]



Obr. 17: Pracovný rozsah Dual-arm YuMi [12]

Ľahký dizajn prispôbený pre upevnenie na pracovný stôl má hmotnosť 38 kg, čo umožňuje v prípade potreby jednoduché premiestnenie. Mimo stupeň ochrany IP30 spĺňa YuMi požiadavky CleanRoom, umožňujúce použitie v sterilnom prostredí. Dve ramená, vyobrazené na Obr. 18, pozostávajú zo 7 pohyblivých ôs a sú schopné pohybovať sa maximálnou rýchlosťou 1 500 mm/s. [12, 13]



Obr. 18: Pohyblivé ramená IRB 14000 [11]

Pre uchopovanie rôznych predmetov používa YuMi k svojej činnosti grippery, existujúce vo viacerých podobách. Základnú verziu tvorí elektrický servo modul, ovládajúci pohyb dvoch zovierajúcich prstov, medzi ktorými je maximálne rozpätie

50 mm. Doplnkom je vákuový modul, ktorý po pripevnení predmetu na prísavkový efektor kontroluje pomocou snímača vzniknutý podtlak, čím je zaručené správne zdvihnutie objektu. Gripper umožňuje vďaka postrannému uloženiu vákuovej prísavky použitie dvoch týchto modulov súčasne. Hoci je modul navrhnutý pre maximálnu hmotnosť 150 g, aktuálna hodnota možného zaťaženia závisí od viacerých faktorov, ako je povrch zvoleného predmetu, alebo pohyb robota pri premiestňovaní objektu. Pre využívanie vizuálnych identifikačných nástrojov je k dispozícii druhý doplnok, predstavujúci modul videnia, využívajúci kameru Cognex AE3 s rozlíšením 1,3 MPx. Správnym spojením spomínaných troch modulov a výberom koncových efektorov možno vyhovieť rôznorodým úlohám a vytvoriť kombinácie, z ktorých niektoré sú vypoďobené na Obr. 19. [11]



Obr. 19: Rôzne variácie gripperu a modulov [11]

Je nutné podotknúť, že skutočná možná záťaž je použitím gripperu zredukovaná, a to z pôvodnej hodnoty 500 g o hmotnosť konkrétneho gripperu [11]. Prehľad možných podôb gripperu, spolu s ich obmedzeniami je popísaný v Tab. 2.

Tab. 2: Váhové údaje variánt gripperu [11]

Kombinácia modulov	Celková hmotnosť gripperu* [g]	Maximálna nosnosť celého gripperu* [g]
Servo	230	270
Servo + Vacuum	248	252
Servo + Vacuum + Vacuum	280	220
Servo + Vision	244	256
Servo + Vision + Vacuum	262	238

*pri použití štandardných, výrobcom dodávaných koncových efektorov

3.3.2 Riadiaci systém

Súčasťou dual-arm YuMi je zabudovaný riadiaci systém IRC5, založený na piatej generácii kontrolérov od ABB [12]. Systém riadenia ovplyvňuje výkon robota a obsahuje viaceré funkcie pre riadenie pohybu. Medzi tie patrí QuickMove, ktorá redukuje čas pohybu, a funkcia TrueMove, zabezpečujúca presnosť trajektórie [15]. Softvér použitý

pre riadenie je RobotWare, ktorého úlohou je vykonávať dohľad nad robotom a realizovať programy, ktoré sú pre robota určené [11].

Rozhrania nachádzajúce sa na ľavej a pravej strane kontroléra poskytujú možnosť pripojenia prostredníctvom rady štandardov. Ľavý bočný panel obsahuje tiež okrem digitálnych vstupov a výstupov bezpečnostný konektor, rozhranie pre Ethernet, USB, DeviceNet, alebo Profibus a zabudovaný prívod vzduchu pre obe ramená. Menej komplexná pravá strana kontroléra zahŕňa spínač, konektor jednotky FlexPendant a napájania 100–240 V pre 50–60 Hz, dovoľujúce zapojenie do bežnej elektrickej siete. [11]

Forma samostatnej riadiacej jednotky je štandardne ponúkané prevedenie systému IRC5. Pre menšie priestory je k dispozícii kompaktné prevedenie s označením IRC5C, ktoré má hmotnosť 28,5 kg. Výrazná zmena oproti štvrtej generácii kontrolérov nastala u väčšieho prevedenia typu Single Cabinet. Tento variant so základnou hmotnosťou 150 kg disponuje funkciou MultiMove, ktorá dovoľuje po pripojení prídavných modulov k riadiacej jednotke ovládanie maximálne štyroch robotov. [10, 15]

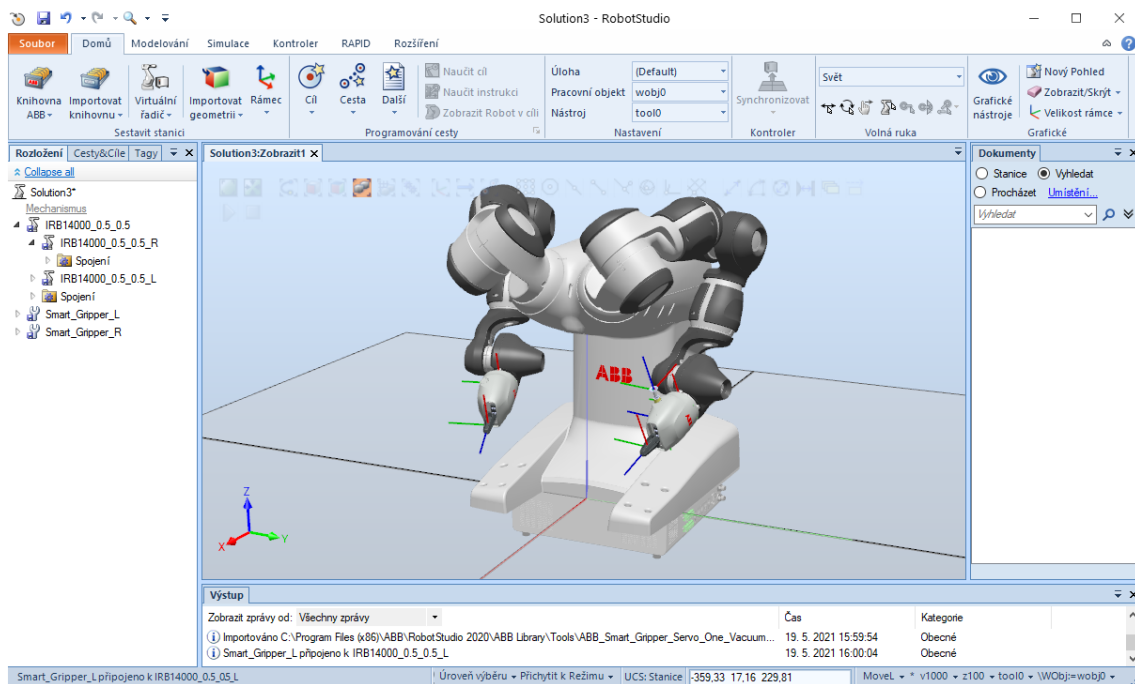
Nové operátorské rozhranie vytvorené pre IRC5, reprezentuje zariadenie FlexPendant (Obr. 20). To mimo joystick obsahuje grafickú dotykovú obrazovku, ktorá zjednodušuje operácie servisu, nastavovania, alebo programovania robota. Zavedením funkcie MultiMove je okrem bežného navádzania konkrétneho robota možné koordinované riadenie pre viaceré roboty. Ručná ovládací jednotka váži asi 1,3 kg a flexibilné pracovné prostredie dovoľuje prepínanie medzi viacerými jazykmi sveta. Ergonomický dizajn rovnako poskytuje flexibilitu vďaka otočnému displeju, čím sa stáva vhodný pre pravákov aj ľavákov. [15]



Obr. 20: Komunikačné rozhranie FlexPendant [11]

Osobitým prístupom s využitím počítačovej grafiky je offline programovanie. K dôvodom vzniku týchto programovacích systémov patrí okrem zjednodušenia programovania odstránenie fyzického vybavenia, nutného k programovaniu. Rozšírením robotického programovacieho jazyka o grafické rozhranie vzniká prostredie, simulujúce

robotu a jeho pracoviško. Výhodou offline programovania, prebiehajúceho bez priameho kontaktu s robotom, je tiež schopnosť implementácie CAD modelov. Použitím súčiastok alebo nástrojov vo forme trojrozmerných modelov, prípadne ich priamym vytvorením v obsiahnutom podsystéme, dochádza k urýchleniu tvorby programu [23, 50]. Nástrojom, disponujúcim týmito vlastnosťami, ktorý bol zároveň využitý v tejto práci, je od spoločnosti ABB softvér RobotStudio (Obr. 21).

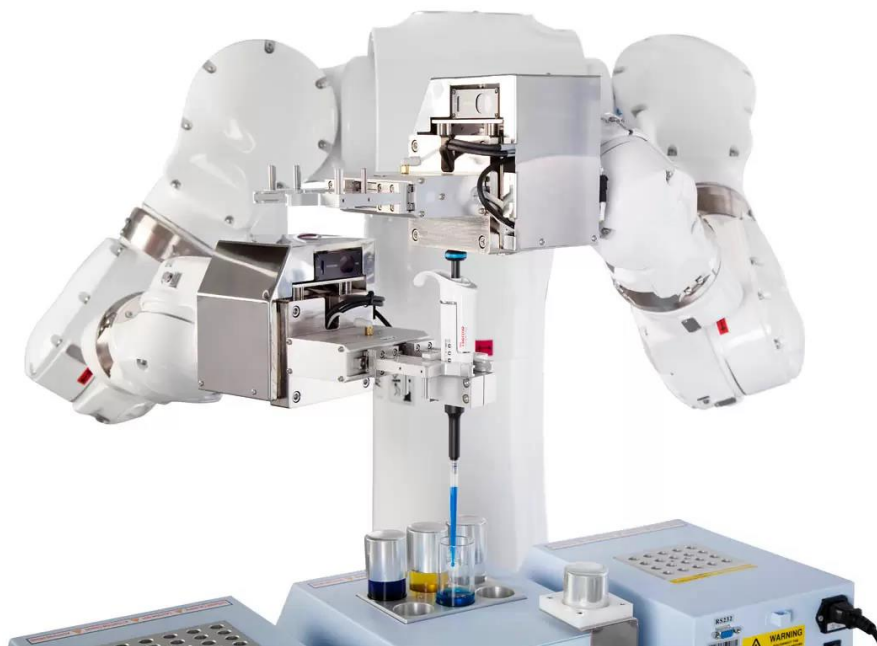


Obr. 21: Offline programovací nástroj RobotStudio

4 PROBLEMATIKA DÁVKOVANIA KVAPALINY

4.1 Laboratórna automatizácia

Pipetovanie a manipulácia s kvapalinami predstavujú v laboratórnom prostredí prácu, ktorá sa zaraďuje medzi rutinné a časovo náročné činnosti. Riešením pre tieto aktivity je automatizácia, ponúkajúca viacero výhod. Popri úspore času a zvýšení množstva operácií umožňuje pracovníkom použitie automatizovanej techniky realizáciu dôležitejších činností. [40]



Obr. 22: Laboratórny robot CSDA10F [49]

Monotónne a často rizikové operácie možno vykonávať prostredníctvom robotiky, ktorá vďaka vysokému stupňu presnosti a opakovateľnosti zaručuje spoľahlivosť. Robotický systém, vyvinutý pre laboratórne podmienky, je schopný práce so širokým spektrom laboratórneho vybavenia a nachádza využitie pri práci s reakčnými nádobami, Petriho miskami, pipetovaní a dávkovaní tekutín, alebo manipulovaním so vzorkami [49]. Príklad takéhoto robotického systému je zobrazený na Obr. 22.

Automatizované riešenia sa stávajú obzvlášť vhodné v prípade nástupu Covid-19, kedy práca v laboratóriu a spracovávanie testov na ochorenie predstavuje pre pracovníkov ohrozenie zdravia. Znížiť toto zdravotné riziko je možno nahradením človeka technikou, kedy robotizované pracovisko vykonávajúce triedenie a testovanie vzoriek na diagnostiku infekcie dokáže zastúpiť rad činností, ktoré bežne vyžadujú ľudský zásah.

Z predošle spomínaných modelov kolaboratívnych robotov v podkapitole 2.4 sú v Tab. 3 vybrané modely, ktoré najmä svojimi vlastnosťami ako nosnosť, dosah a hmotnosť predstavujú najlepšie možné riešenie pre nami zvolené laboratórne zadanie.

Tab. 3: Redukovaný zoznam kolaboratívnych robotov

Výrobca	Model	Nosnosť [kg]	Dosah [mm]	Opakovateľnosť pohybu [mm]	Hmotnosť [kg]
KUKA	LBR iiwa 7 R800	7,0	800	± 0,01	23,9
UR	UR3e	3,0	500	± 0,03	11,2
	UR5e	5,0	850	± 0,03	20,6
Stäubli	TX2touch-60L	3,7	920	± 0,03	52,0
ABB	GoFa CRB 15000	5,0	950	± 0,05	27,0
	SWIFTI CRB 1100	4,0	580	± 0,01	21,0
	IRB 14050	0,5*	559	± 0,02	9,5
	IRB 14000	2×0,5*	559	± 0,02	38,0

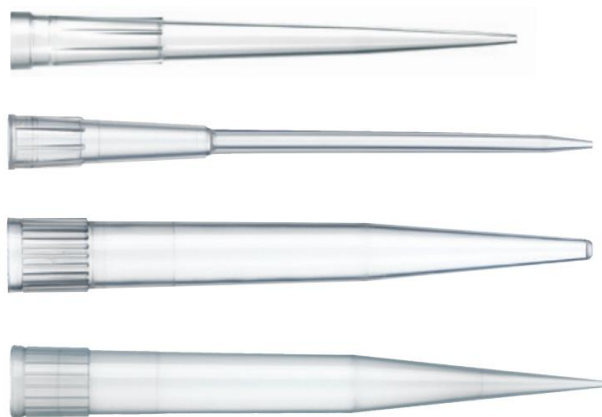
*nosnosť ramena bez použitia gripperu

Mimo spomenuté prednosti IRB 14000 YuMi, je dôvodom použitia robota v tejto práci predovšetkým jeho prítomnosť na Ústave automatizácie a informatiky, FSI, VUT v Brne (ÚAI). Laboratórium kybernetiky a robotiky, v ktorom sa nachádza daný model, tak bude nielen poskytovať východisko pre autentickú tvorbu simulácie, ale tiež plniť účely verifikácie zvolenej úlohy pre túto prácu.

4.2 Pipetovanie

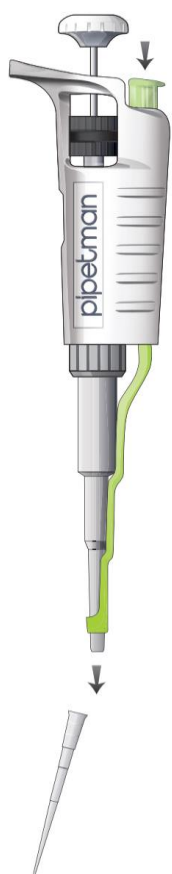
Pipeta, ako nástroj pre manipuláciu s presným množstvom kvapaliny, vznikla za účelom zníženia kontaminácie pri práci s tekutinami. Pôvodné pipetovanie ústami bolo postupne nahradené modelmi, ktoré pozostávali s pohyblivého piestu, neskôr s voliteľným nastavovaním objemu [31]. Hoci existuje pre tieto účely vytvorených viacero zariadení a na trhu nájsť širokú škálu pipiet, počnúc od transparentných plastových a manuálnych viackanálových pipiet až po automatizované pipetovacie systémy, zvyšná časť textu sa venuje jednodokálovým mikropipetám, určeným pre ručné presné dávkovanie.

Prvou skupinou mikropipiet, vhodnou pre menšie množstvo spracovávanej tekutiny, sú manuálne modely, u ktorých je piest pipety ovládaný pracovníkom ručne pomocou tlačidla. V opačnom prípade, kedy je piest ovládaný elektromotorom, sa zaraďuje produkt do kategórie elektronických mikropipiet, ktoré poskytujú vyššiu presnosť, ergonómiu a sú vhodné pre pokročilejšie laboratórne protokoly. [20]

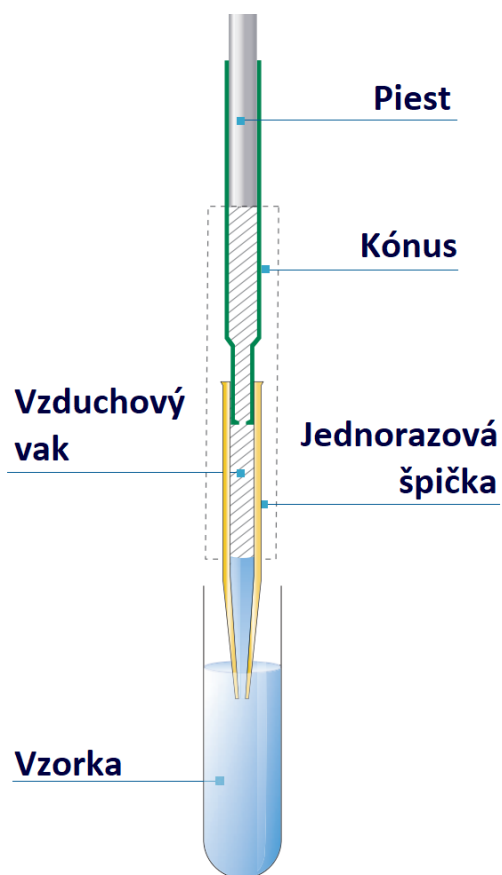


Obr. 23: Pipetovacie špičky Finntip a ich prevedenia [54]

Jednorazové špičky, ktoré prichádzajú do kontaktu so vzorkou, existujú vo viacerých prevedeniach (Obr. 23). Okrem bežných viacúčelových špičiek sú alternatívou pre zabránenie vstupu kontaminovaného aerosólu do pipety sterilné špičky s filtrom. Výmena špičky za novú je vhodná najmä pri zmene tekutiny, z ktorej sú vzorky odoberané. Pre zníženie kontaktu s kontaminovanou špičkou pri jej odstraňovaní je tak častou funkciou pipety zhadzovanie špičky pomocou tlačidla [31]. Pipeta obsahujúca takéto tlačidlo je vyobrazená na Obr. 24.



Obr. 24: Odstránenie špičky z pipety [31]



Obr. 25: Air-displacement pipeta [31]

Podľa spôsobu, ktorým pipeta pracuje, sa rozlišujú: [31]

- Air-displacement pipety – sú určené pre bežné laboratórne práce, kedy pipeta využíva tzv. vzduchový vankúš, ktorý oddeľuje piest od nasiatej kvapaliny. Po nastavení žiadaného odoberaného objemu a uvedení do prevádzky vytlačí piest pohybom objem vzduchu, ktorý zodpovedá objemu odsatej kvapaliny. Spätným pohybom piestu v kvapaline dochádza k odobratiu vzorky, ktorá je pripravená pre opätovné vypustenie. Popis takejto pipety pri súčasnom odbere kvapaliny je znázornený na Obr. 25.
- Positive-displacement pipety – tieto obdobne pracujúce zariadenia, eliminujúce problémy pri odbere kvapalín, sú vhodné najmä pre odber viskózných, prchavých, rádioaktívnych, prípadne teplotne nízkych, vysokých alebo iných vzoriek. Absenciou vzduchového vaku vzniká priamy kontakt medzi piestom a kvapalinou, čím sa zamedzuje možnej zmene objemu vzduchového vankúša a síl pôsobiacich v odobratej vzorke. Medzi vzorky, vhodné pre túto aplikáciu, patrí napr. krv alebo glycerol.

4.3 Prehľad výrobcov pipiet

Použitím robota IRB 14000 pre laboratórnu manipuláciu vznikajú čiastočné obmedzenia, ktoré pri výbere vhodnej pipety definujú rozhodujúce parametre. Pre kolaboratívny charakter robota s nízkou nosnosťou patrí medzi hlavné požiadavky nízka hmotnosť pipety, spolu s dôrazom na minimálnu silu, potrebnú pre obsluhu tlačidiel pipety. Vzhľadom tiež na spracovávaný objem kvapaliny 200–300 μ l je tak snahou najst' najpriaznivejšie riešenie medzi manuálnymi a elektronickými mikropipetami. Ceny konkrétnych produktov sú uvádzané bez sadzby DPH.

Gilson

Medzi popredné činnosti globálneho výrobcu produktov pre prácu so vzorkami patrí výroba pipiet. Tradičné pipety používanej technológie PIPETMAN predstavuje rodina PIPETMAN Classic, pokrývajúca rozsah odoberaného objemu 0,2 μ l až 10 ml. Pre vylepšenú ergonómiu a robustný dizajn je navrhnutá rada PIPETMAN L, pričom zmeny piestovej sústavy prezentujú modely PIPETMAN G, ktoré disponujú zvýšeným komfortom vo forme redukcie pipetovacích síl, potrebných pre ovládanie piestu. [30]

Zvyšnou sériou zo základných air-displacement produktov je rad elektronických pipiet PIPETMAN M, ktorý podobne vyžaduje nízke pipetovacie sily a vyniká svojím jednoduchým používaním. Variant PIPETMAN M Connected dovoľuje pomocou pripojenia Bluetooth real-time komunikáciu s Gilson aplikáciami, ktoré sú spolu s tabletom súčasťou systému TRACKMAN Connected. Prototypom z kategórie positive-displacement pipiet je rad MICROMAN E. [30]

Spomedzi produktov ponúkaných výrobcom treba zaradiť do výberu PIPETMAN model P1000G (Obr. 26) o hmotnosti 0,120 kg a s dĺžkou 284 mm [29]. Určený pre objem 100–1000 μ l je model dostupný prostredníctvom spoločnosti SIPOCH, pôsobiacej ako

distribútor produktov Gilson na území ČR a SR. Cena tejto pipety, disponujúcej kovovým odhadzovačom špičiek je 6 000,00 Kč [51]. Z kategórie elektronických produktov je začlenený motorizovaný model P300M Connected [30]. Pipeta s možnosťou bezdrôtového pripojenia pre objem 20–300 μl je ponúkaná spoločnosťou SIPOCH za cenu 14 000,00 Kč [51].



Obr. 26: PIPETMAN G P1000G [28]

Eppendorf

Ďalším významným zástupcom s dlhoročnými skúsenosťami v oblasti manipulácie s tekutinami a laboratórneho vybavenia je spoločnosť s nemeckým sídlom Eppendorf. Ultraľahký dizajn poskytujú pipety Eppendorf Research plus, ktoré patria globálne medzi najpoužívanejšie pipety. So zámerom znížiť námahu počas práce, disponujú pipety prvenstvom najnižšej hmotnosti a pipetovacích síl spomedzi manuálnych pipiet Eppendorf. Veľkosť sily, nutnej k vysunutiu špičky tlačidlom, je len 3,6 N. Pipeta je ponúkaná v prevedení s nastaviteľným, rovnako ako s fixným objemom dávkovania, ktoré poskytuje cenovo výhodnejšie riešenie a dovoľuje pracovať rýchlejšie. [25]

Vysokú precíznosť a presnosť poskytujú pipety Eppendorf Reference 2, zaručujúce dlhú životnosť. Zmena ovládania pomocou jediného tlačidla prispieva k jednoduchému používaniu a rukoväť z nehrdzavejúcej oceli chráni pipetu aj pred väčšími pádmi. Dáta pipety sú obsiahnuté v zabudovanom RFID čipe, po ktorom spojení s čítačkou Eppendorf TrackIt je možné zobrazovať a upravovať tieto dáta o pipete, nachádzajúce sa v centrálnom softvéri TrackIt. Pomocou TrackIt tak možno použitý nástroj jednoznačne identifikovať, prípadne zistiť jeho servisnú históriu. [25]

Elektronické pipety Eppendorf Xplorer/Xplorer plus umožňujú presné nastavenie parametrov a vďaka výkonnej batérii dovoľujú 8 hodín práce bez nutnosti nabíjania. Mimo prostredie podporujúce 9 rôznych jazykov sú vo verzii Xplorer plus doplnkové funkcie, ako ukladanie často vykonávaných aplikácií a vlastné programovanie. Obe pipety, rovnako ako predošle spomínané, pracujú s metódou vzduchového vaku. [25]



Obr. 27: Eppendorf Research plus 30–300 µl [24]

Z prevedení s variabilným objemom ponúka Eppendorf Czech & Slovakia pipetu Eppendorf Research plus (Obr. 27) s rozsahom 30–300 µl za cenu 6 680,00 Kč a elektronickú pipetu vyššieho štandardu zo základného prevedenia Eppendorf Xplorer (Obr. 28) pre objem 15–300 µl za 15 390,00 Kč [24, 26].



Obr. 28: Eppendorf Xplorer 15–300 µl [26]

CAPP

K činnostiam firmy CAPP patrí mimo výroby pipiet produkcia špičiek, PCR doštičiek, centrifúg a iných laboratórnych prístrojov. Medzi modely pipiet patrí CAPP ecopipette, ktorá ako obalový materiál využíva recyklovateľný a biologicky rozložiteľný materiál. Nízka sila potrebná pre nasávanie a vytlačenie kvapaliny uľahčuje prácu obsluhu a konštrukcia z trvanlivých obnoviteľných zdrojov zaručuje dlhú životnosť pipety. Mimo prevedenie s variabilným objemom využíva tento typ pri svojej činnosti odnímateľné jednotky s fixným objemom, bližšie popísané u modelu CAPPTrio. Nízkonákladovým riešením pre začínajúce laboratóriá je pipeta CAPPSolo. Model o nízkej hmotnosti je vyvinutý pre nepriaznivé laboratórne podmienky, čím je odolný voči rôznym agresívnym chemikáliám. Uživateľsky prívetivou pipetou s ľahkým ergonomickým dizajnom je model CAPPBravo, vyžadujúci nízku silu pre obsluhu. Osobitnú pipetu s fixným objemom predstavuje CAPPTrio, ktorej úpravou možno získať tri variácie s odlišným

objemom. Vďaka trom odnímateľným jednotkám, dodávaným výrobcom k pipete, je k dispozícii rôzny objem a rýchlou výmenou jednotky tak jednoducho prispôbiť pipetu. Rovnaký princíp využíva pipeta CAPPMicrobiology, ku ktorej sú dodávané vymeniteľné jednotky s objemom 100 μl , 900 μl a 1000 μl . Primárne určená pre mikrobiologické testy v potravinárskom priemysle, disponuje pipeta upraveným hrotom, vhodným pre nasadenie dlhšej tyčinky, čím je vhodná pre pipetovanie viskózných kvapalín, ako mliečnych výrobkov a kozmetiky. [22]

Elektronickou pipetou od tohto výrobcu je CAPPMaestro, vybavená plnofarebným OLED displejom, ktorý v porovnaní s inými obrazovkami poskytuje vyššiu obnovovaciu frekvenciu a spotrebúva menej energie. Prevedenie s použitou lítiovou batériou dovoľuje užívanie zariadenia aj počas nabíjania pipety a ľahký dizajn poskytuje správnu ergonómiu. Medzi ponúkané funkcie patrí riedenie, miešanie, ukladanie protokolov, alebo nastavenie vlastného hesla [22]. Podoba tejto pipety je na Obr. 29.



Obr. 29: Elektronická pipeta CAPPMaestro [37]

Spomedzi ponuky sú zvolené produkty Ecopipette a CAPPMaestro, ktoré sú dostupné pomocou sprostredkovateľa LAB MARK. Ecopipette C1000-1 s nastaviteľným objemom pre 100–1000 μl je tak prostredníctvom tohto distribútora k dispozícii za cenu 5 700,00 Kč a elektronickej pipeta CAPPMaestro M1000-1 s väčším rozsahom 50–1000 μl je ponúkaná za čiastku 14 200,00 Kč. [35, 36]

Thermo Scientific

Medzi široké spektrum príslušenstva producenta Thermo Scientific, zameraného na produkty vedeckých laboratórií, patria pipety systému Finnpipette. Komfort a menšiu námahu poskytuje pipeta Finnpipette F1, ktorá okrem nízkej hmotnosti vyniká nízkymi silami pre ovládanie piestu a odstraňovanie špičiek. Spoľahlivou pipetou s jednoduchou údržbou a chemickou odolnosťou je Finnpipette F2. Trvanlivosť pipety je docielená použitím PVDF komponentov, ktorých prítomnosťou vzniká rezistencia voči poškodeniu UV svetlom a chemikáliami, často používaných pri dekontaminácii. [54]

Pipetovanie pomocou elektronickej pipety je možné s modelom Finnpipette Novus, vhodným pre viskózne tekutiny a pipetovanie o malom objeme. Poskytujúci ľahký dizajn, disponuje pipeta intuitívnym grafickým rozhraním, dostupným v 7 jazykoch. Zahŕnuté sú funkcie pre uchovávanie programov, multidispensing (funkcia Stepper), slúžiaca pre opakovaný výdaj zvoleného objemu, alebo monitorovanie pipetovania, nutné pre dodržanie intervalov kalibrácie. [54]

Náhľad na grafickú obrazovku pipety FinnpiPETTE Novus (Obr. 30) a jej ostatné ponúkané funkcie sú zachytené na Obr. 31.



Obr. 30: FinnpiPETTE Novus [55]

Obr. 31: Uživatelské rozhranie FinnpiPETTE Novus [54]

Pomedzi distribútorov s najlepšou cenovou ponukou, disponujúcich pipetami FinnpiPETTE, patrí dodávateľ TRIGON PLUS. Produkt FinnpiPETTE F1 pre 30–300 µl je k predaju za cenu 6 110,00 Kč a elektronický model FinnpiPETTE Novus, určený pre rovnaký variabilný objem, je prístupný za čiastku 13 660,00 Kč. [56]

4.4 Výber pipety

Kompletný prehľad predošle spomenutých pipiet spolu s ich cenovou ponukou je zobrazený v Tab. 4. Po spoločnej konzultácii s vedúcim práce bol za najvhodnejší produkt z kategórie manuálnych pipiet zvolený model Eppendorf Research plus, popri Gilson pipete P300M Connected zo skupiny elektronických zariadení.

Tab. 4: Stručný prehľad ponúkaných pipiet

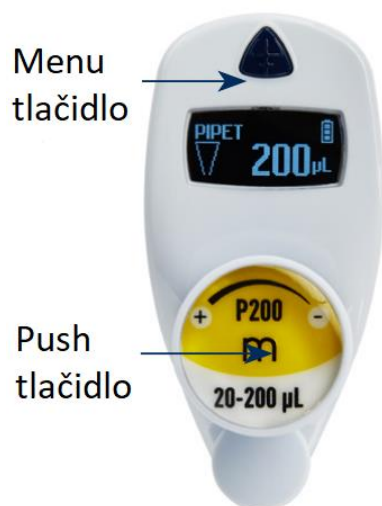
Kategória	Výrobca	Distribútor	Model	Cena bez DPH [Kč]	Objem [μ l]
Manuálne	Gilson	SIPOCH	P1000G	6 000,00	100–1000
	Eppendorf	Eppendorf	Eppendorf Research plus	6 680,00	30–300
	CAPP	LAB MARK	Ecopipette C1000-1	5 700,00	100–1000
	Thermo Scientific	TRIGON PLUS	Finnpipette F1	6 110,00	30–300
Elektronické	Gilson	SIPOCH	P300M Connected	14 000,00	20–300
	Eppendorf	Eppendorf	Eppendorf Xplorer	15 390,00	15–300
	CAPP	LAB MARK	CAPPMaestro M1000-1	14 200,00	50–1000
	Thermo Scientific	TRIGON PLUS	Finnpipette Novus	13 660,00	30–300

Z oboch modelov, zvolených ako najvhodnejších, je nami výsledne zvolená pipeta pre použitie P300M Connected (Obr. 32), poskytujúca výhody tejto kategórie pipiet a ktorej jednoduchá štruktúra s výrazným tlačidlom zároveň zjednodušuje jej budúce používanie.



Obr. 32: Elektronická pipeta P300M Connected [32]

Hmotnosť motorizovanej jednotky P300M Connected je porovnateľná s identickým motorizovaným produktom výrobcu, nedisponujúcim možnosťou Bluetooth pripojenia, ktorého hmotnosť je 130 g [59]. Užívanie zvoleného modelu je spojené s takmer nulovými pipetovacími silami, pričom odoberanie, výdaj vzorky a nastavovanie objemu prebieha prostredníctvom viacúčelového otočného push tlačidla. Mimo tlačidlo pre odstraňovanie špičiek je pre priamy prístup k funkcionalitám pomocným prvkom menu tlačidlo, znázornené na Obr. 33. OLED obrazovka obsahuje okrem indikátora nasávania a dávkovania informáciu o nastavenom objeme, stav batérie, alebo tiež aktuálne zvolený pipetovací mód. Spomedzi piatich dostupných možností pipetovania je základným režimom mód PIPET, u ktorého prebieha odber vzorku stlačením tlačidla push. Stlačením rovnakého tlačidla sa realizuje výdaj tekutiny, po ktorom sa piest automaticky nastaví do východiskovej pozície. Benefitom pipety je vďaka úprave držiaka hrotu redukcia síl, potrebných k montáži a odstráneniu špičky. Odporúčaná doba uchovania špičky v kvapaline, nutná pre správne nasatie tekutiny, je určená pre tento model na 1 s. [32]

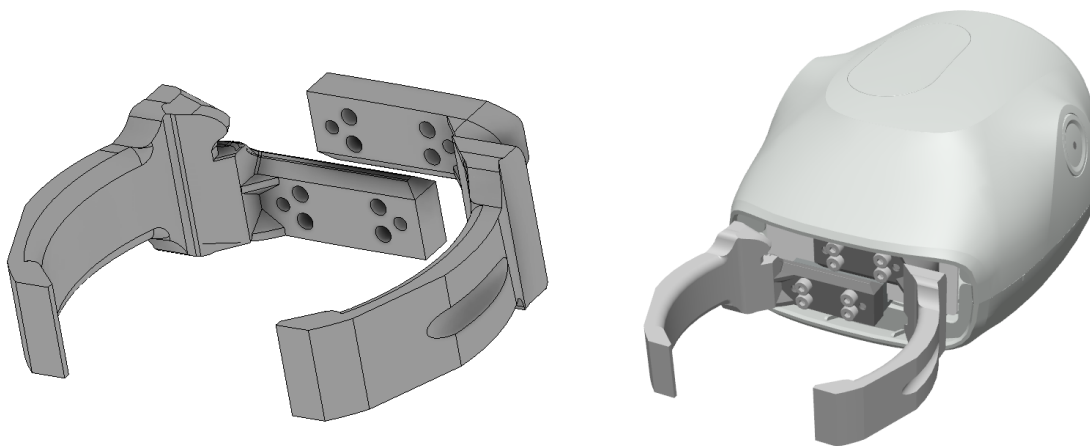


Obr. 33: Užívateľské rozhranie pipety PIPETMAN M Connected [32]

5 ÚLOHA MANIPULÁCIE

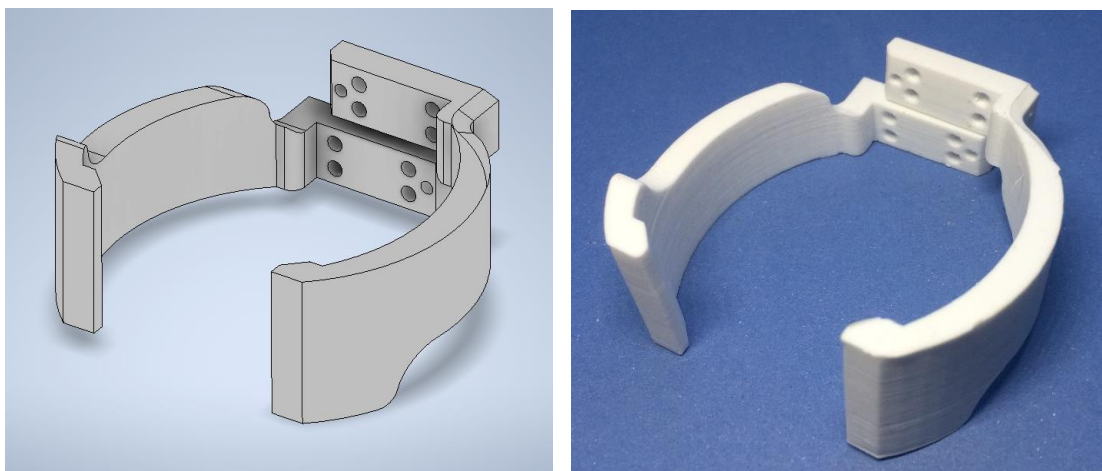
5.1 Koncový efektor robota

Zvolením pipety za primárny nástroj robota YuMi vznikla vďaka špecifickému tvaru pipety nutnosť úpravy použitého koncového efektora. Novo vzniknuté prsty pomocou CAD softvéru boli po ich vytvorení importované do RobotStudia, aby nahradili pôvodne určené jednotky pre YuMi gripper. Výsledný gripper so servo modulom pravého ramena, vhodný pre uchopenie pipety je na Obr. 34.



Obr. 34: Prvý variant efektora (vľavo) pre IRB 14000 gripper (vpravo)

Pre ponúkané možnosti tlače reálneho 3D modelu vznikla požiadavka úpravy vytvorených prstov, cielenej na zjednodušenie geometrie a redukciu zaoblených hrán. Upravený návrh prstov a ich reálne vyhotovenie, určené pre nahradenie pôvodných prstov gripperu, s ktorými je hmotnosť porovnateľná, je zobrazené na Obr. 35.

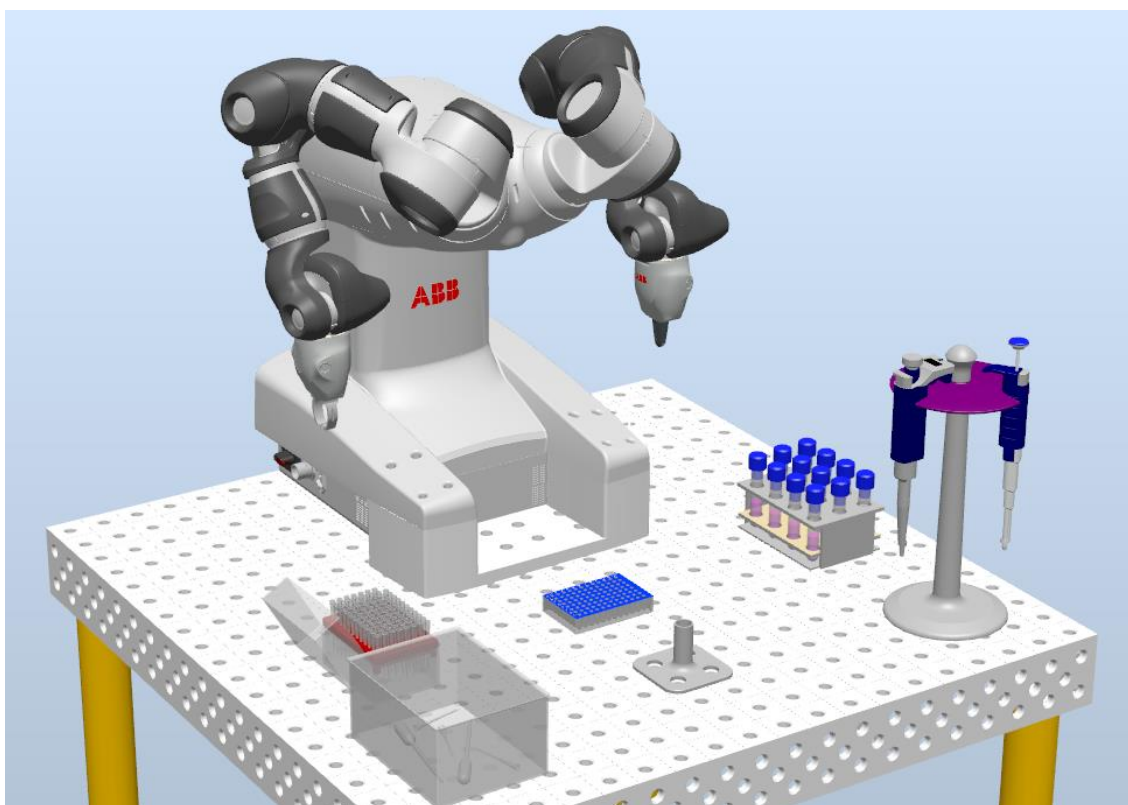


Obr. 35: Druhá modifikácia koncového efektora (vľavo) a jej model z 3D tlačiarne (vpravo)

5.2 Laboratórne pracovisko

Základným prvkom pracoviska v prostredí RobotStudio, potrebným pre umiestnenie robota YuMi, je pracovný stôl. Model poskytnutý ÚAI plne reprezentuje reálny objekt, nachádzajúci sa na danom ústave, čím je vhodný pre potreby simulácie.

Nadväzujúcim krokom po pridaní pracovného stola bola pre účely vizualizácie tvorba pipety, spolu so stojanom, v ktorom je pipeta počiatocne umiestnená. Vytvorená mikrotitračná doštička, potrebná pre distribuovanie odoberanej tekutiny, obsahuje alfanumerické označenie a pozostáva z 96 jamiek s kruhovým prierezom a guľatým dnom. Testovacie vzorky, z ktorých časť objemu bude odoberaná, sú uskladnené v uzatvárateľných plastových skúmavkách, ktorých východiskovým miestom je vyhradený stojan, určený pre celkovo 12 skúmaviek. Nutným prvkom je tak uprostred pracoviska držiak, určený pre súčasne používanú skúmavku.



Obr. 36: Laboratórne pracovisko robota IRB 14000 v RobotStudios

Ďalšími laboratórnymi pomôckami sú pipetovacie špičky, uložené v krabičke pre 96 kusov. Pre zdravotnícky odpad je vyhradená nádoba, určená pre kontaminované materiály a predovšetkým použité jednorazové špičky.

Kompletne pripravená scéna pracoviska po vytvorení popísaného laboratórneho vybavenia v prostredí Autodesk Inventor a jeho vložení do RobotStudia je zachytená na Obr. 36.

5.3 Robotická manipulácia

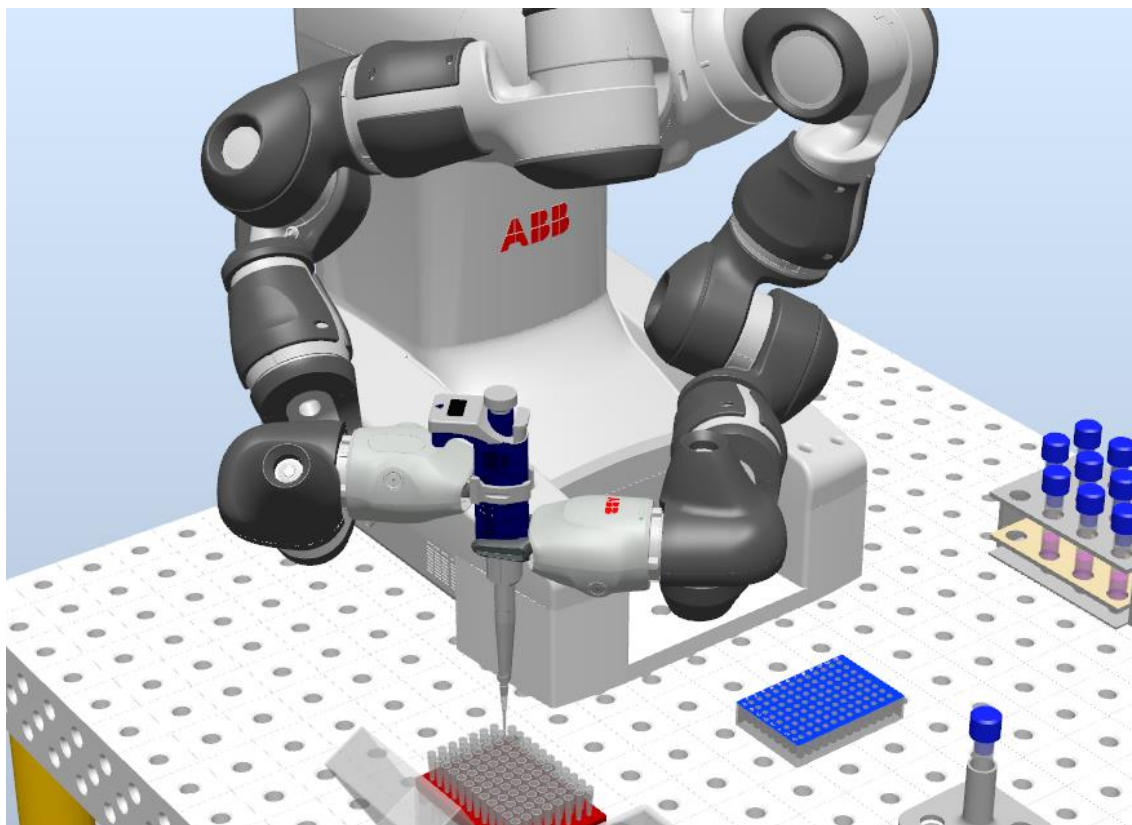
Výrobcom pipety P300M Connected udávaná jednoduchá montáž a odstraňovanie špičky vytvára možnosť dodatočného zautomatizovania tohto procesu, ktorým možno naďalej zredukovať nároky personálu. Hoci je pre reálne použitie vďaka premenlivosti síl potrebných k týmto činnostiam nutné overenie, či prípadné úpravy, jadro úlohy, ktorého úspešnosť možno jednoduchšie určiť, tvorí pipetovanie.

Prvotnou úlohou robota v úvodnej fáze prípravy je uchopenie modelu pipety, nachádzajúcej sa v stojane. Žiadaná zmena orientácie pipety, ktorá by vznikla jej priamym uchopením pravého ramena, je realizovaná použitím druhého ramena, ktoré pravému ramenu pipetu sprostredkuje.

5.3.1 Nasadenie špičky pipety

Premiestnenie skúmavky zo stojana do držiaka je v poradí ďalšia úloha pre ľavé rameno, pričom je vhodným zariadením nutné dodatočné otvorenie skúmavky.

Pred zahájením pipetovania je nasledovnou požiadavkou pre čakajúce pravé robotické rameno, zovierajúce pipetu, montáž pipetovacej špičky. Použitie boxov so špičkami dovoľuje bezkontaktné nasadenie, kedy súčasným krútením pipety a jej posuvom v smere špičky vznikne vzduchotesný spoj [31]. Za účelom vzniku spoľahlivého spojenia je tak proces nasadenia špičky, zahŕňajúci tieto pohyby, súčasne priradený pre obe ramená (Obr. 37).

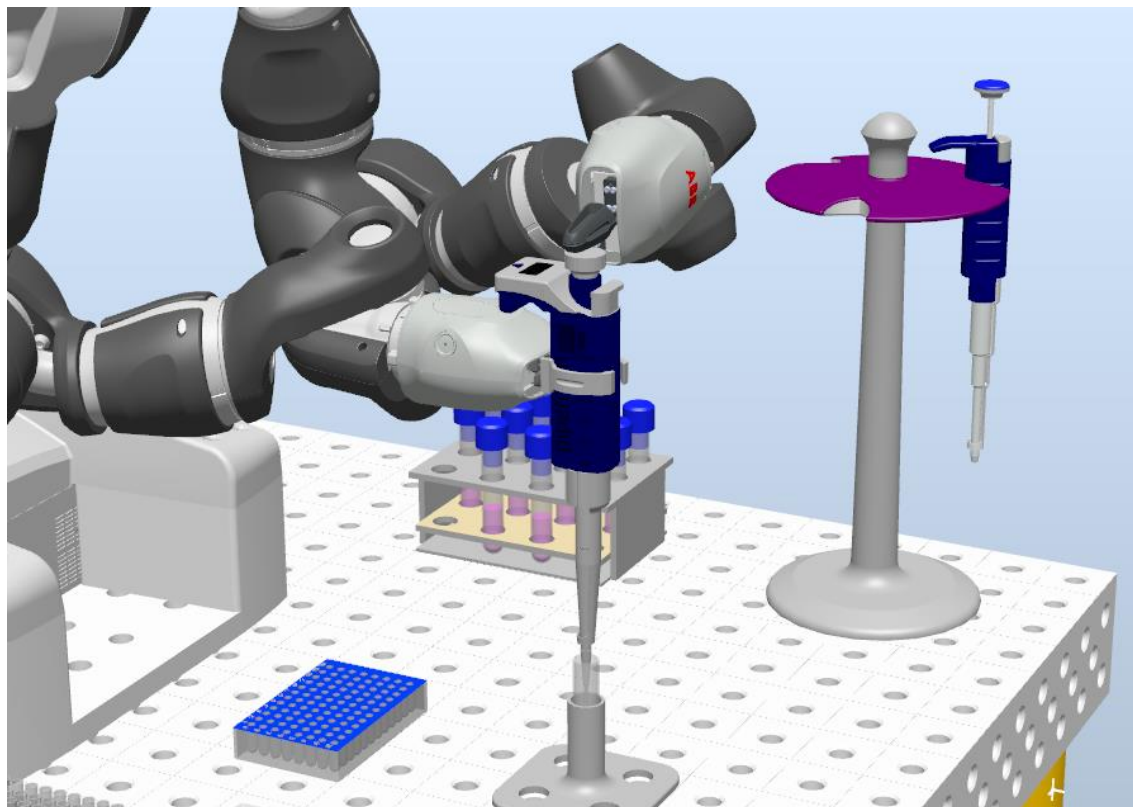


Obr. 37: Nasadenie pipetovacej špičky oboma ramenami

5.3.2 Pipetovanie

Splnením predošlých požiadaviek oboch ramien možno pristúpiť k najdôležitejšej časti úlohy, ktorou je odber vzorky.

Po príprave pipety nad otvorenú skúmavku a umiestnení ľavého ramena nad pipetu je zahájený ponor špičky do tekutiny a následný odber vzorky (Obr. 38). Ovládanie pipety pre nasávanie kvapaliny, rovnako ako jej vypustenie, prebieha pomocou koncového efektora ľavého ramena, ktorým je pár prstov, dodávaných výrobcom ku gripperu.



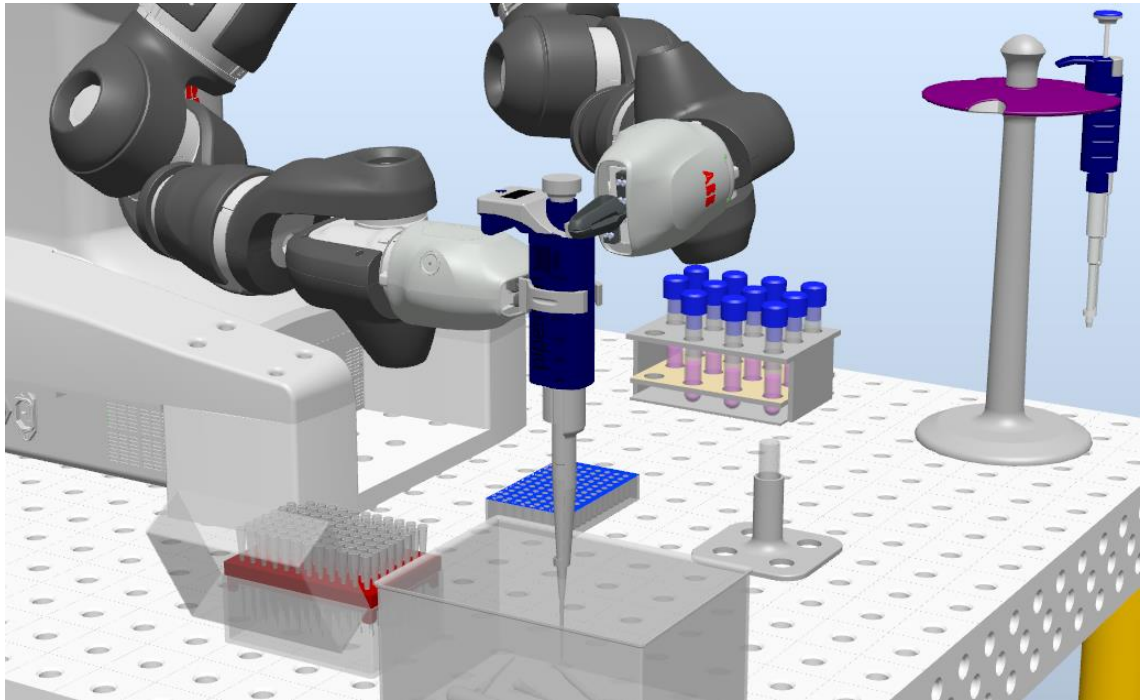
Obr. 38: Odber vzorky zo skúmavky

Druhou fázou pipetovania s analogickým postupom je výdaj odobranej tekutiny. Začínajúc umiestnením špičky pipety nad zvolenú jamku mikrotitračnej doštičky, pripravením ľavého ramena a ponorením špičky do jamky je objem pipety stlačením tlačidla push vytlačený.

5.3.3 Odstránenie špičky pipety

Naplnením jamky, označenej písmenom A a číslom, reprezentujúcim poradie vyšetrovanej skúmavky, prichádza k ukončeniu manipulácie a presunu oboch ramien robota nad odpadovú nádobu. Stlačením tlačidla na bočnej strane pipety pomocou ľavého ramena je objímkou zhadzovača jednorazová špička vysunutá a odhodená do nádoby pre kontaminovaný odpad (Obr. 39).

Dodatočnou požiadavkou pre ľavé rameno je po tejto úlohe navrátenie vyšetrenej, medzičasom uzavretej skúmavky na svoje pôvodné miesto v stojane.



Obr. 39: Odstránenie špičky pipety pomocou zhadzovača

Po dokončení celého procesu je robot opäť pripravený pre spracovanie zvyšných skúmaviek v stojane, po ktorom je posledným krokom spätné odloženie pipety. Výsledná mikrotitračná doštička s odobratými vzorkami je tak prichystaná pre odobratie a následné ďalšie účely.

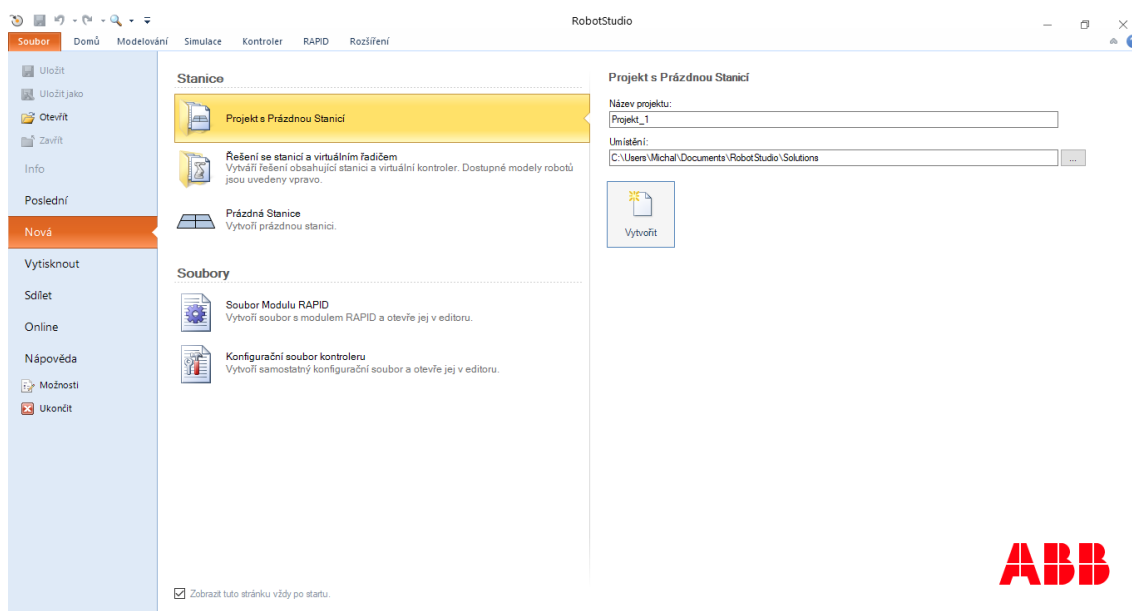
6 APLIKÁCIA ROBOTSTUDIO

Medzi možnosti vytvárania programov na ovládanie robota patrí použitie softvéru nazývaného RobotStudio. Softvér od firmy ABB je určený pre offline programovanie v rozličných odvetviach, ktoré nevyžaduje fyzické zastavenie prevádzky. Tento simulačný systém, založený na technológii Virtual Robot, obsahuje totožný softvér, aký je použitý u skutočného robota. Druhá generácia tejto technológie, predstavená s príchodom IRC5, disponuje viacerými schopnosťami a je schopná spravovania viacerých robotov. Myšlienka, že fungujúce riešenie vytvorené v RobotStudiosu je rovnako účinné v praxi vytvára rad možných využití. Možnosť predprípravy programov, vizualizácia, overovanie dosahu robotov a testovanie prispievajú ku skráteniu doby uvádzania do prevádzky a tiež zamedzujú nákladným odstávkam podniku. [15]

Nasledujúca kapitola popisuje proces tvorby robotickej bunky, počnúc vytvorením stanice až po predstavenie jazyka RAPID. Hoci je RobotStudio komplexný softvér, sú predstavené základné prvky a funkcie, použité pri riešení oboch úloh práce. Použitá licencia RobotStudia 2020 je typu School Edition.

6.1 Vytvorenie stanice a import robota

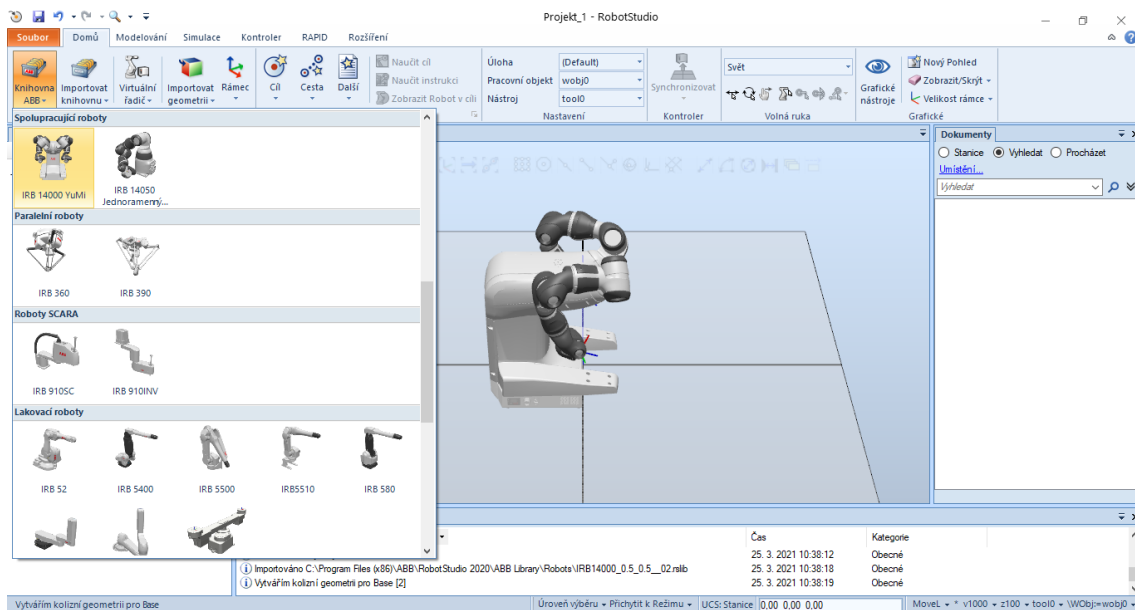
Po spustení programu sa užívateľ ocitá v prostredí, ponúkajúcom vytvorenie novej stanice alebo súboru. Po vybraní možnosti *Projekt s Prázdnu Stanici*, zobrazenej na Obr. 40, zadáme názov projektu, určíme vhodné umiestnenie a potvrdíme stisnutím *Vytvoriť*.



Obr. 40: Vytvorenie stanice projektu

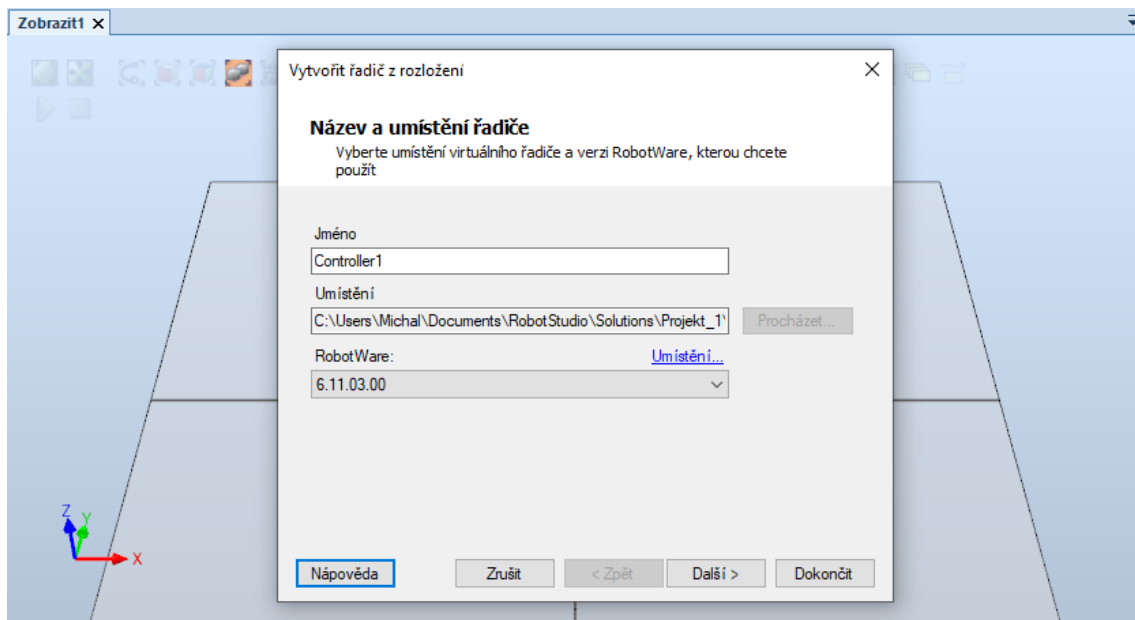
Vytvorením nového projektu vzniká prázdna stanica, do ktorej bude podľa daného zadania vložený robot. Zvolením palety *Domů* a následným vybraním *Knihovna ABB* sa rozbalí ponuka produktov ABB, vrátane priemyselných a kolaboratívnych robotov.

Ukážka týchto produktov a výsledok vloženia robota IRB 14000 YuMi do scény je zachytený na Obr. 41.



Obr. 41: Import robota do stanice

Nasledujúcim krokom po vložení robota je vytvorenie virtuálneho kontroléra pre riadenie robota. Nachádzajúc sa v rovnakej palety *Domů* zvolíme záložku *Virtuální řadič*, v ktorej vyberieme prvú možnosť *Z rozložení...* Vo vzniknutom dialógovom okne (Obr. 42) podľa uváženia zmeníme názov kontroléra a vyberieme vhodný RobotWare.



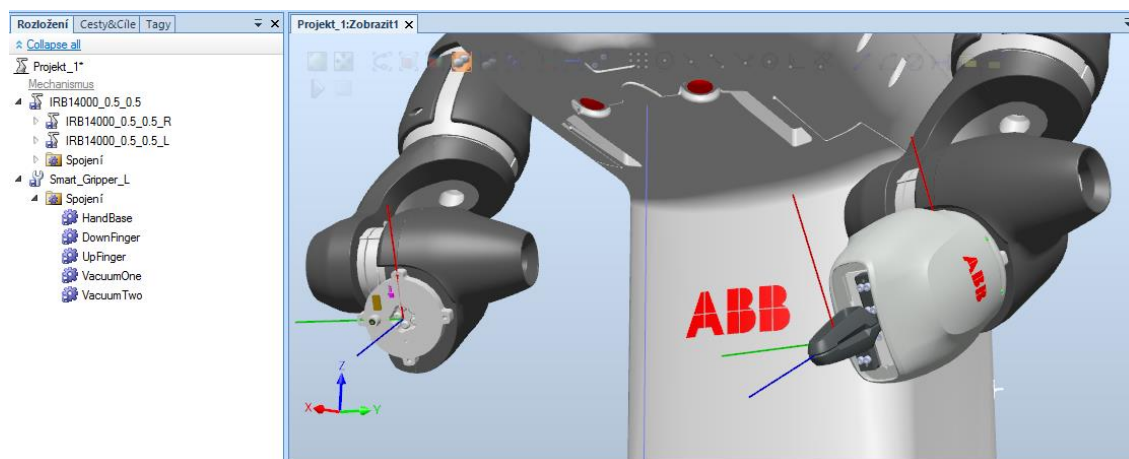
Obr. 42: Vytvorenie virtuálneho kontroléra

Ten je v prípade jeho absencie možné pridať prostredníctvom palety *Rozšíření* a možnosti *RobotApps*, ktorá zahŕňa široké spektrum doplnkov. Verzia RobotWare, ktorá

je použitá v tejto práci je 6.11.03. Po vyhľadání a nainštalovaní príslušného softvéru obdobným spôsobom opäť zahájime pridanie kontroléra, po ktorom dokončení nás o stave vytvárania informuje výstup v spodnej časti obrazovky.

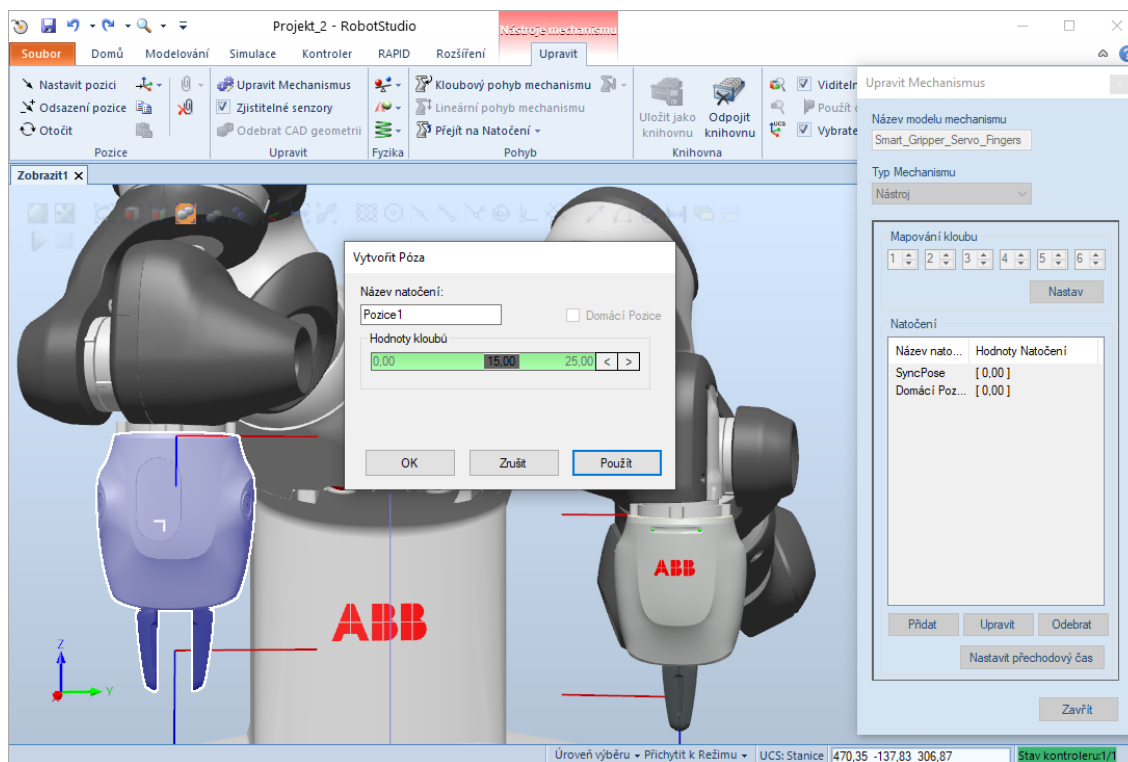
6.2 Pridanie nástroja

Pre umožnenie manipulácie s objektami je ďalším krokom import nástroja. Kliknutím v záložke *Domů* na rozbaľovacie tlačidlo *Importovat knihovnu* a možnosť *Vybavení* sa opätovne zobrazí ponuka produktov, tentokrát obsahujúca modely riadiacich systémov, dopravníky a iné príslušenstvo. Zo sekcie nástrojov vyberieme *ABB Smart Gripper* a zvolíme variantu, ktorá je najvhodnejšia pre úlohu. Na Obr. 43 je vidno premenovaný a k ramenu robota upevnený gripper, pozostávajúci zo vzájomne pohyblivých častí. Pre toto pripevnenie presunieme za ľavého stlačenia myši pridaný mechanizmus *Smart_Gripper_L* v paneli *Rozložení* na rameno *IRB14000_0.5_0.5_L*, nachádzajúce sa v rovnakej záložke, pričom aktualizujeme pozíciu tohto grippera. Rovnako proces možno opakovať pre ďalší nástroj, určený pre pravé robotické rameno.



Obr. 43: Gripper upevnený k ramenu

Vytvorenie rozpätia pre gripper prebieha po označení mechanizmu v záložke *Upravit* prostredníctvom možnosti *Upravit Mechanismus*. K prednastaveným pozíciám pridáme vlastné natočenie tlačidlom *Přidat*, kde zvolíme názov a hodnotu natočenia v milimetroch. Táto hodnota vyjadruje vzdialenosť medzi prstom grippera a bodom TCP, prezentujúcim miesto, ktorým sa robot pri vykonávaní inštrukcie usiluje dostať do cieľovej destinácie. Pre takúto interpretáciu, kedy je výsledná vzdialenosť medzi prstami pri ich symetrickom pohybe dvojnásobná, je maximálna hodnota natočenia 25,00 mm. Prispôsobené okno pre úpravu mechanizmu *Smart_Gripper_R* a proces pridávania pozície je na Obr. 44. Aplikovanie vytvoreného natočenia a prepínanie medzi pozíciami sa vykonáva v rovnakej záložke voľbou *Přejít na Natočení*.

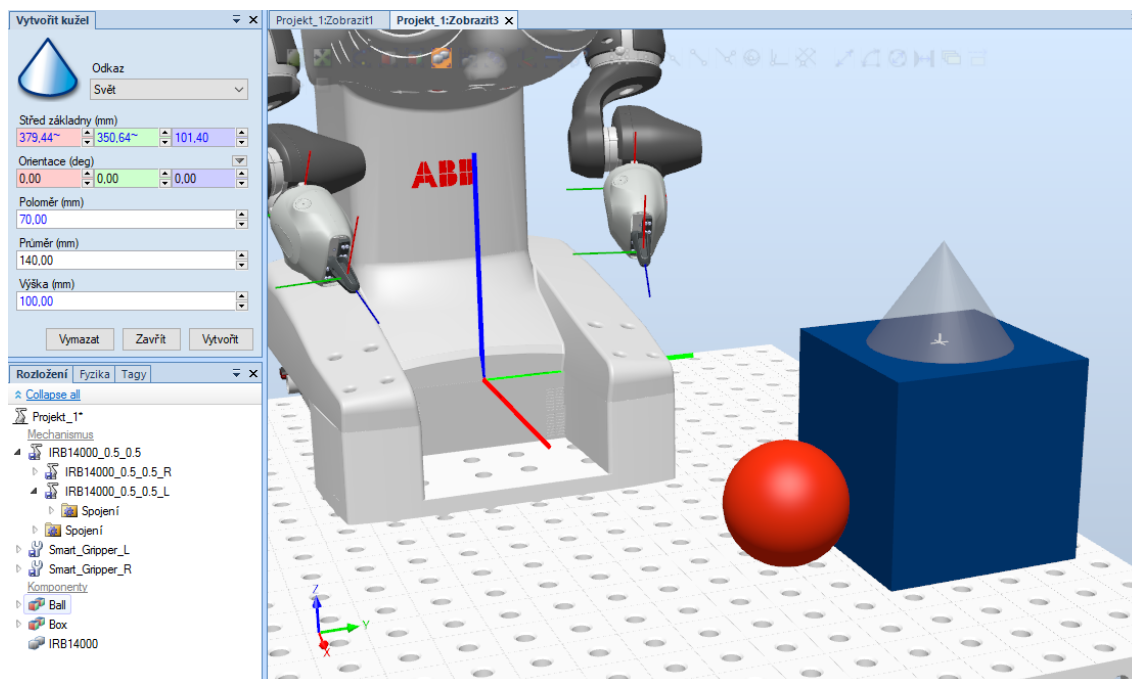


Obr. 44: Tvorba natočenia pre gripper

6.3 Geometria a modelovanie

Vytvorené a existujúce modely je možné zahrnúť do scény pomocou záložiek *Domú* alebo *Modelování*, v ktorých sa nachádza funkcia *Importovať geometrii*. Zvolením *Procházet Geometrie* sa zobrazí okno, v ktorom si užívateľ zvolí súbor podporovaného typu. Po zvolení a importovaní súboru prichádza posledný krok, ktorý spočíva v správnom nastavení pozície objektu voči ostatným predmetom. Jedným zo spôsobov je pravým kliknutím na daný komponent v paneli *Rozložení* a prejdením kurzoru nad voľbu *Pozice*. Mimo bežné polohovanie, rotovanie a odsadzovanie je v ponuke funkcia *Umístit*, ktorá upraví pozíciu objektu, aby sa určený počiatkový bod telesa nachádzal vo zvolenom cieľovom bode.

Súčasťou RobotStudia je tiež nástroj pre vytváranie vlastných objektov, vyskytujúci sa v karte *Modelování*. Popri vytváraní kriviek a plôch je možnosťou modelovanie telies, ku ktorému je prístup prostredníctvom možnosti *Pevné*. V priebehu vytvárania vzniká po zvolení žiadanej telesu a zadaní potrebných rozmerov v grafickom okne čiastočná ukážka telesa, ktorého vloženie na záver potvrdíme tlačidlom *Vytvoriť*. Náhľad vytvárania objektu je zachytený na Obr. 45.



Obr. 45: Modelovanie telies v RobotStudios

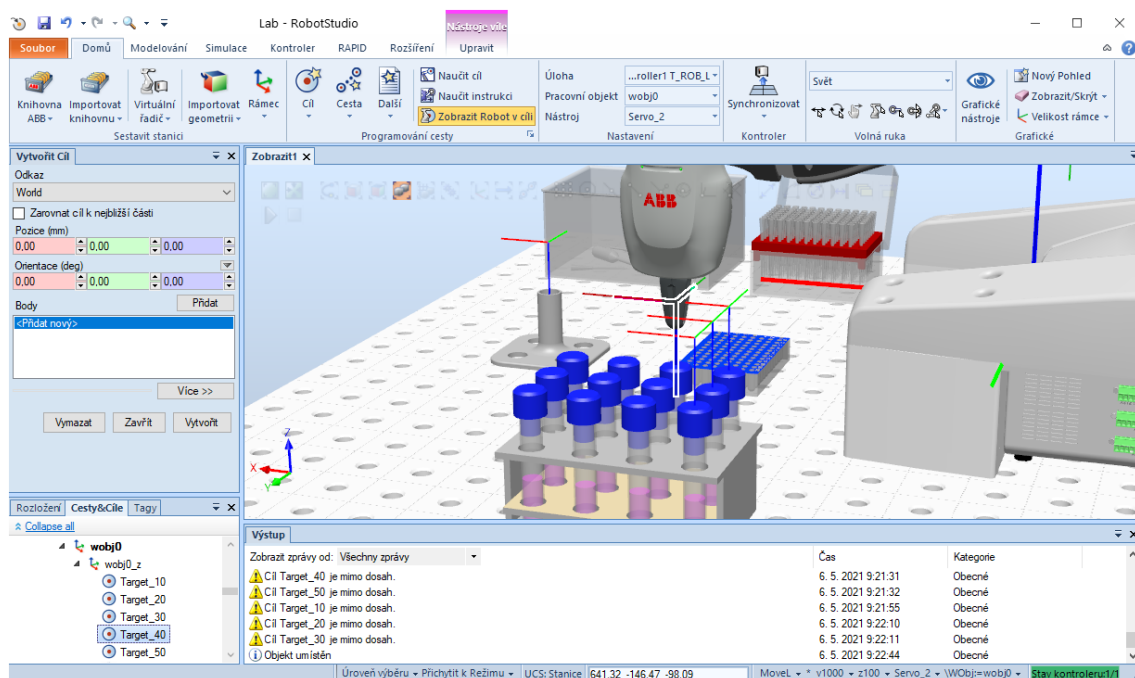
6.4 Vytváranie cieľov a ciest

Cesta po ktorej sa robot pohybuje ukrýva súbor cieľov, ktoré sú jednoznačne definované v priestore. Východiskom pre tieto body je Workobject, alebo pracovný objekt, ktorý slúži ako referenčný systém. Vytvorený bod tak podlieha zvolenému pracovnému objektu, ktorý RobotStudio umožňuje v priebehu vytvárať.

Prítomnosť dvoch robotických ramien ustanovuje nutnosť separátneho vytvárania pracovných objektov, cieľov a ciest. V prípade, že nie je zvolená žiadna aktívna programová úloha, aktivujeme jednu z nich pravým kliknutím na úlohu v paneli *Cesty&Ciele* a zvolením *Nastaviť jako aktivní*. Počnúc ľavým ramenom, vyberieme úlohu *T_ROB_L*.

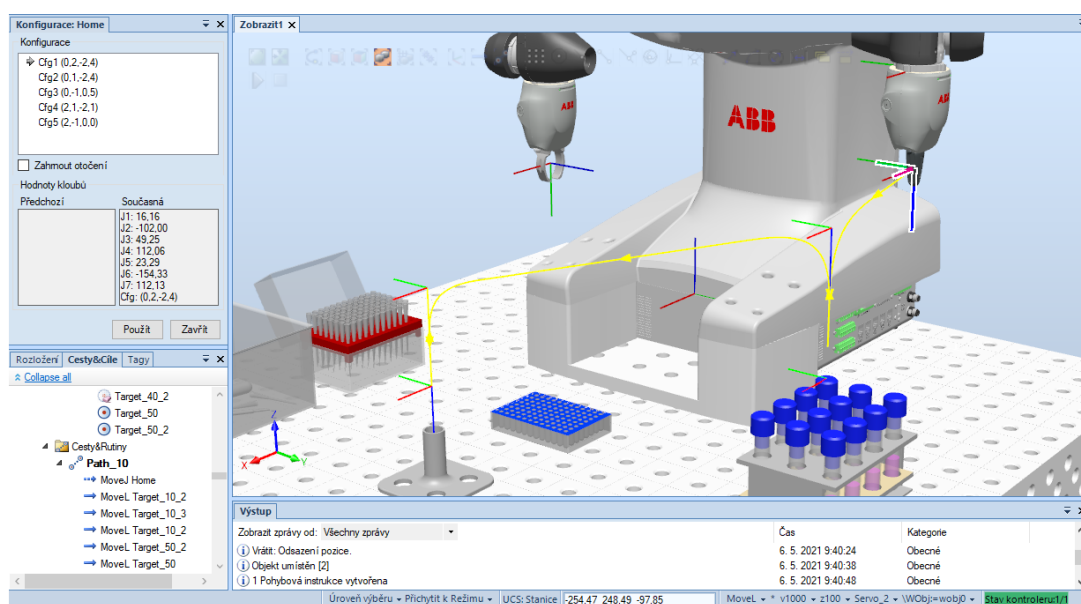
Pred začiatkom vytvárania nových bodov je vhodné aktivovať tlačidlo v grafickom okne *Přichytit k Objektu*, prípadne iné tlačidlo pre uľahčenie práce s uchopovaním predmetov. Jednou z možností ako vytvoriť nový cieľ (Target) je priamym kliknutím v záložke *Domů* na tlačidlo *Cíl*. Po vzniku okna pre nový cieľ a nastavení kurzoru do jedného z polí pre pozíciu je možné v grafickom okne určovať body, ktoré sa pridávajú do zoznamu. Vznik vybraných cieľov potvrdíme tlačidlom *Vytvořit*. K overeniu dostupnosti bodov pre robota aktivujeme v záložke *Domů* tlačidlo *Zobrazit Robot v cíli*, kedy následným kliknutím na pridaný bod zistíme, či je bod prístupný, prípadne či vyhovuje súčasná orientácia bodu. Pre oba prípady zvolíme vhodnú orientáciu po označení bodu v záložke *Upravit* voľbou *Otočit*. Zvyšné body je možné rovnako upraviť, poprípade pre aplikáciu identickej orientácie zvoliť v rovnakej záložke u vzorového bodu možnosť *Kopířovat Orientaci*, ktorú možnosťou *Použít Orientaci* aplikujeme u zvyšných bodoch.

Obr. 46 zobrazuje spolu s oknom pre vytváranie nových cieľov už vzniknuté a upravené ciele. Pôvodné a momentálne neplatné oznámenie o nedostupnosti bodov, ktoré sú mimo dosah robota, možno pozorovať v textovom výstupe.



Obr. 46: Pridávanie cieľov do scény

Vytvorením dostatočného množstva cieľov možno prístup k tvorbe cesty. Pravým kliknutím na súčasne viacero označených bodov a zvolením *Přidat do nové cesty* sa automaticky vytvorí cesta (Path), obsahujúca tieto body. Pokiaľ sa u inštrukcie cesty zobrazuje výstražný symbol je často riešením zmena konfigurácie, ktorá je súčasťou jednotlivých cieľov a reprezentuje spôsob natočenia osí bodu.



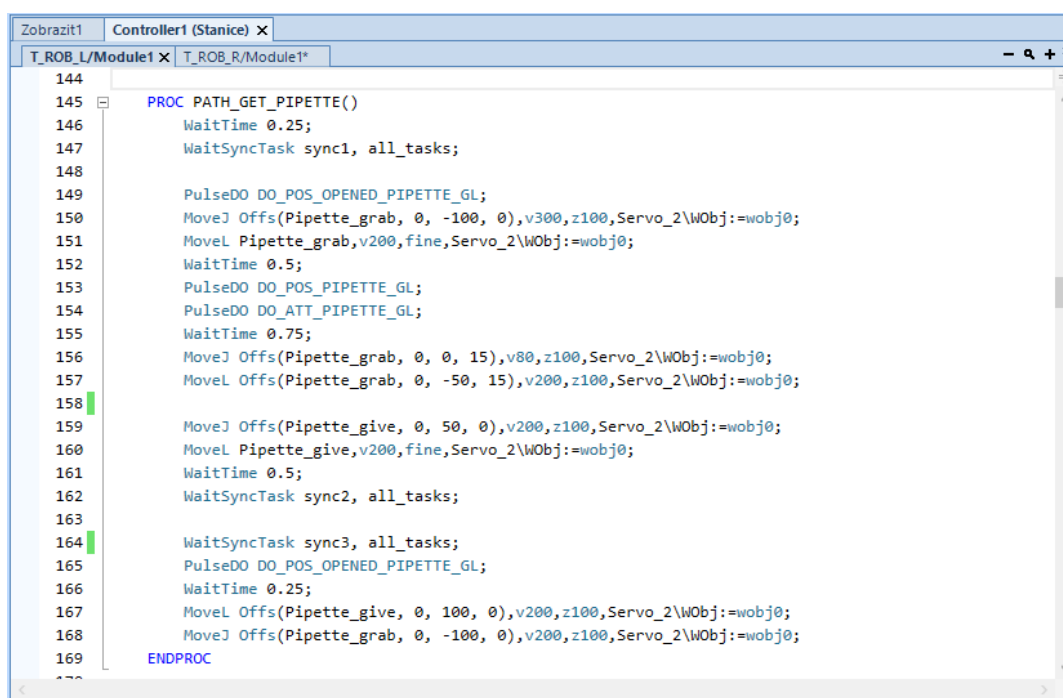
Obr. 47: Zmena konfigurácie cieľa

Pre akciu zmeny konfigurácie cieľa postupne označíme použité ciele a v záložke *Upravit* zvolíme možnosť *Konfigurace*. Zobrazí sa okno, zachytené na Obr. 47, spolu s vytvorenou cestou. V dôsledku nadväznosti bodov je žiaduce použiť minimálne odlišujúce sa konfigurácie, ktoré umožnia plynulý prechod medzi bodmi.

Dôležitým faktorom pohybovej inštrukcie je typ pohybu. Mimo inštrukcie MoveL, ktorá prezentuje lineárny pohyb, a MoveC pre kruhový pohyb robota, je alternatívou MoveJ, pri ktorej robot využíva nelineárne pohyby. Takúto zmenu možno realizovať prostredníctvom zvolenia inštrukcie a v záložke *Upravit* vybraním *Upravit Instrukci*. Medzi argumenty pohybovej inštrukcie patrí tiež rýchlosť, ktorej príkladná hodnota 150 mm/s sa zapisuje v tvare v150 a parameter Tool, ktorý definuje koncový použitý nástroj. Špecifickou vlastnosťou je zóna, určujúca veľkosť zakrivenej rohovvej dráhy v bodoch, medzi ktorými sa robot pohybuje. Zónu o veľkosti 10 mm tak definujeme pomocou formátu z10. Po dostačujúcej úprave spustíme všetky pohybové inštrukcie obsiahnuté v ceste jej označením, pravým kliknutím a následným zvolením *Pohybovat se podél cesty*.

6.5 RAPID

Nasledujúcim krokom po vytvorení cieľov a ciest je prenos týchto zmien do kódu RAPID. Prepnutím sa do rovnako pomenovanej záložky, priamym kliknutím na voľbu *Synchronizovat* a potvrdením sa táto akcia vykoná. Programový modul *Module1*, existujúci separátne pre obe programové úlohy T_ROB_L a T_ROB_R, obsahuje predovšetkým definované pozície robota, inštrukcie, vlastné procedúry a hlavnú procedúru main. Ukážka kódu RAPID ľavého ramena je na Obr. 48.



```
144
145 PROC PATH_GET_PIPETTE()
146     WaitTime 0.25;
147     WaitSyncTask sync1, all_tasks;
148
149     PulseDO DO_POS_OPENED_PIPETTE_GL;
150     MoveJ Offs(Pipette_grab, 0, -100, 0),v300,z100,Servo_2\WObj:=wobj0;
151     MoveL Pipette_grab,v200,fine,Servo_2\WObj:=wobj0;
152     WaitTime 0.5;
153     PulseDO DO_POS_PIPETTE_GL;
154     PulseDO DO_ATT_PIPETTE_GL;
155     WaitTime 0.75;
156     MoveJ Offs(Pipette_grab, 0, 0, 15),v80,z100,Servo_2\WObj:=wobj0;
157     MoveL Offs(Pipette_grab, 0, -50, 15),v200,z100,Servo_2\WObj:=wobj0;
158
159     MoveJ Offs(Pipette_give, 0, 50, 0),v200,z100,Servo_2\WObj:=wobj0;
160     MoveL Pipette_give,v200,fine,Servo_2\WObj:=wobj0;
161     WaitTime 0.5;
162     WaitSyncTask sync2, all_tasks;
163
164     WaitSyncTask sync3, all_tasks;
165     PulseDO DO_POS_OPENED_PIPETTE_GL;
166     WaitTime 0.25;
167     MoveL Offs(Pipette_give, 0, 100, 0),v200,z100,Servo_2\WObj:=wobj0;
168     MoveJ Offs(Pipette_grab, 0, -100, 0),v200,z100,Servo_2\WObj:=wobj0;
169 ENDPROC
```

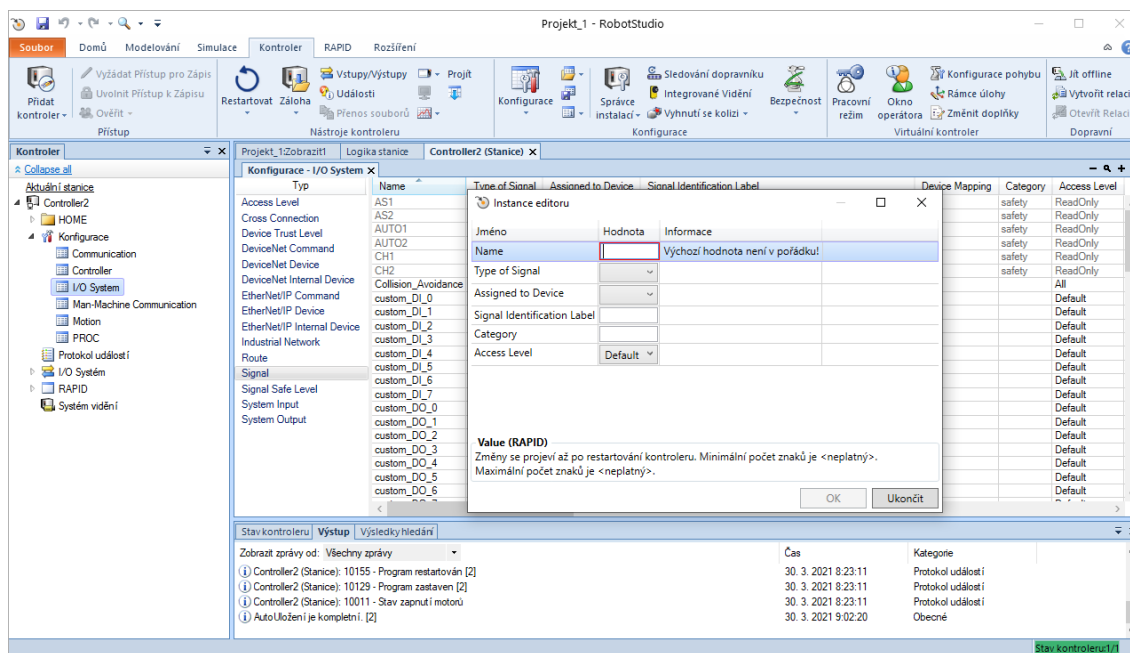
Obr. 48: Časť kódu v RAPID editore

Editor RAPID dovoľuje vykonávať podrobnejšiu úpravu dát, vrátane vytvárania podmienok a príbuzných riadiacich štruktúr. Po vykonaní úprav je nutné ich aplikovanie pomocou tlačidla *Použiť a spätná synchronizácia* so stanicou, ktorú učiníme rozkliknutím predošlého tlačidla *Synchronizovať* a zvolením *Synchronizovať do Stanice*.

So zámerom minimalizovať počet Targetov a tým aj sprehládniť scénu je možnosťou nahradenia pohybových inštrukcií do cieľov použitie funkcie *Offs*. Funkcia pridávajúca ofset zahrňa zvolený cieľ, nasledovaný tromi hodnotami, ktoré určujú posunutie v jednotlivých smeroch súradného systému.

6.6 Signály a Logika stanice

Simulácia objektov v RobotStudio vyžaduje vytvorenie nových signálov, ktoré sú pre tieto účely vyhradené. Editáciu a pridávanie signálov do kontroléra prebieha pod záložkou *Kontroler*, otvorením ponuky *Konfigurace* a zvolením *I/O System*. Pre upresnenie klikneme pravým tlačidlom na typ *Signal* zvolíme *Nový Signal...* Popri mene je potrebné zvoliť typ signálu, ktorý môže byť digitálny alebo analógový, a to vstup alebo výstup. Tento proces pridávania do množstva systémových signálov je zachytený na Obr. 49. Po skončení úprav je pre uplatnenie zmien nutné virtuálny kontrolér reštartovať, a to pomocou tlačidla *Restartovať*.



Obr. 49: Vytváranie signálu pre kontrolér

Pokiaľ je počet vytvorených signálov postačujúci, je nasledujúcou úlohou ich použitie v záložke *Simulace*. Navrhnuť simulačnú logiku je možné zvolením *Logika stanice*, čím sa zobrazí editor, umožňujúci vytváranie prepojenia medzi signálmi virtuálneho kontroléra a rôznymi položkami. Pridávanie prvkov označovaných ako *Smart Komponenty* prebieha v susednej podzáložke *Složité*. Tieto komponenty reprezentujú

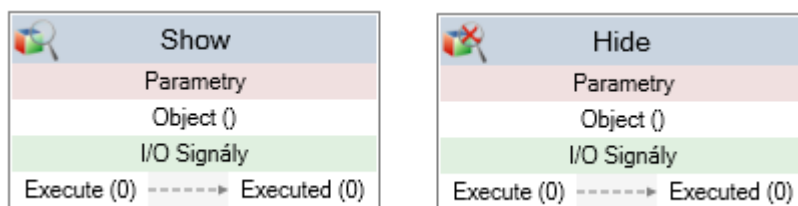
objekty, ktorých vlastnosti dovoľujú zložitejšie akcie, kam patrí ovládanie efektoru robota, manipulácia s predmetmi alebo použitie Booleovej algebry.

K tejto skupine prvkov prináležia tiež súvisiace komponenty, z ktorých prvým je *Attacher*, ktorý upevní predmet (Child) k objektu (Parent) za podmienky, že signál pre vykonanie akcie (Execute) má hodnotu True. Inverznú úlohu zastáva *Detacher*, ktorý pripojený objekt odpojí. V prípade, že má vlastnosť pre zachovanie novej pozície (KeepPosition) hodnotu False, vráti sa premiestnený objekt po odpojení na svoje miesto pôvodu. Podrobné parametre oboch komponentov sú vyobrazené na Obr. 50. Príkladom využitia týchto blokov je premiestňovanie objektu u aplikácie typu „pick and place“.



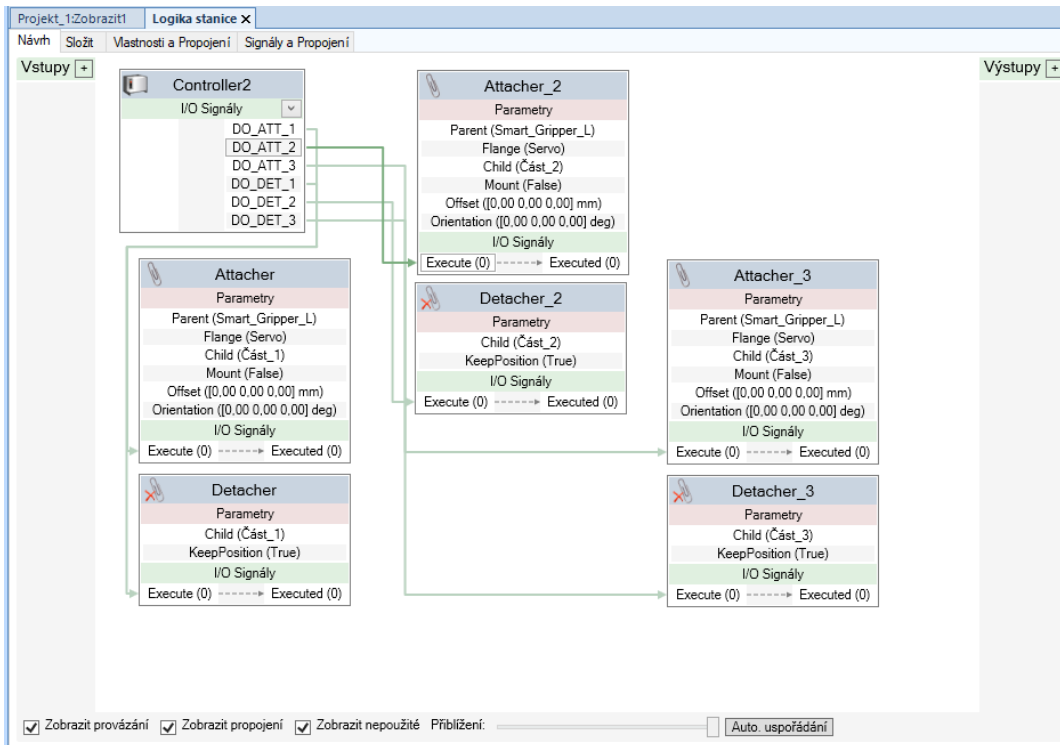
Obr. 50: Komponenty Attacher a Detacher

Možným riešením pre rovnaký typ aplikácie sú komponenty *Show* a *Hide*, ktorých úlohou je zviditeľnenie, resp. zneviditeľnenie objektu. Nutnosťou pri takomto použití je pripojenie objektu ku gripperu spôsobom, totožným s pripojením grippera k ramenu robota, popísaným v podkapitole 6.2. Po následnej tvorbe kópií manipulovaného objektu, situovaných v pôvodnej a cieľovej destinácii, je posledným krokom vytvorenie komponentov pre jednotlivé objekty a ich správne nastavenie. Teleso, na ktorom sú tieto akcie vykonávané (Object), je jediným parametrom komponentov *Show* a *Hide* (Obr. 51).



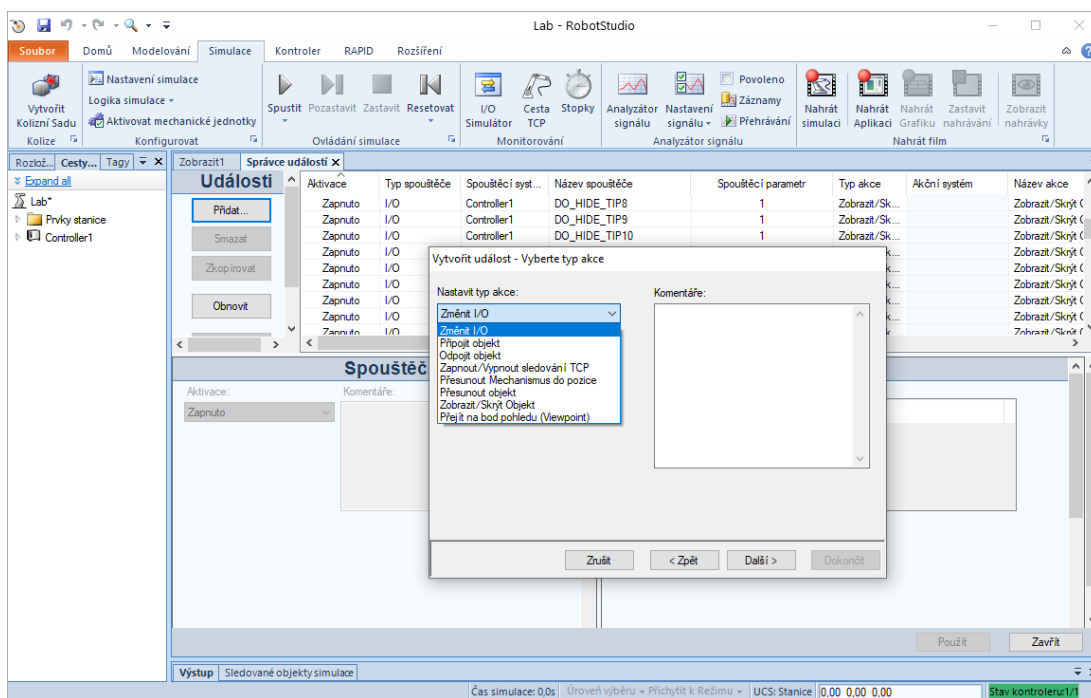
Obr. 51: Komponenty Show a Hide

Pre proces utvárania spojení je vyhovujúca podzáložka *Návrh*, ktorá obsahuje pridané prvky. Pridanie signálov kontroléra prebieha rozbalením tlačidla ponuky v príslušnom bloku, kde pridáme nami vytvorené signály. Mechanickým spojením myšou signálov kontroléra a komponentov vzniknú spojenia, zobrazujúce sa zelenou farbou. Výsledný možný návrh stanice poskytuje Obr. 52.



Obr. 52: Simulačná logika stanice

Alternatívou vytvárania simulačnej logiky je *Správce udalostí*, prístupný zo záložky *Simulace* v časti *Konfigurovat*. Jednoduchý sprievodca pridávania novej udalosti, umožňujúci vytvárať podmienky spúšťaných udalostí, poskytuje univerzálne prostredie pre vytváranie rôznych typov akcií. Vytváranie udalosti a výber žiadanej akcie pre udalosť je prezentované na Obr. 53.



Obr. 53: Zvolenie akcie pre novú udalosť

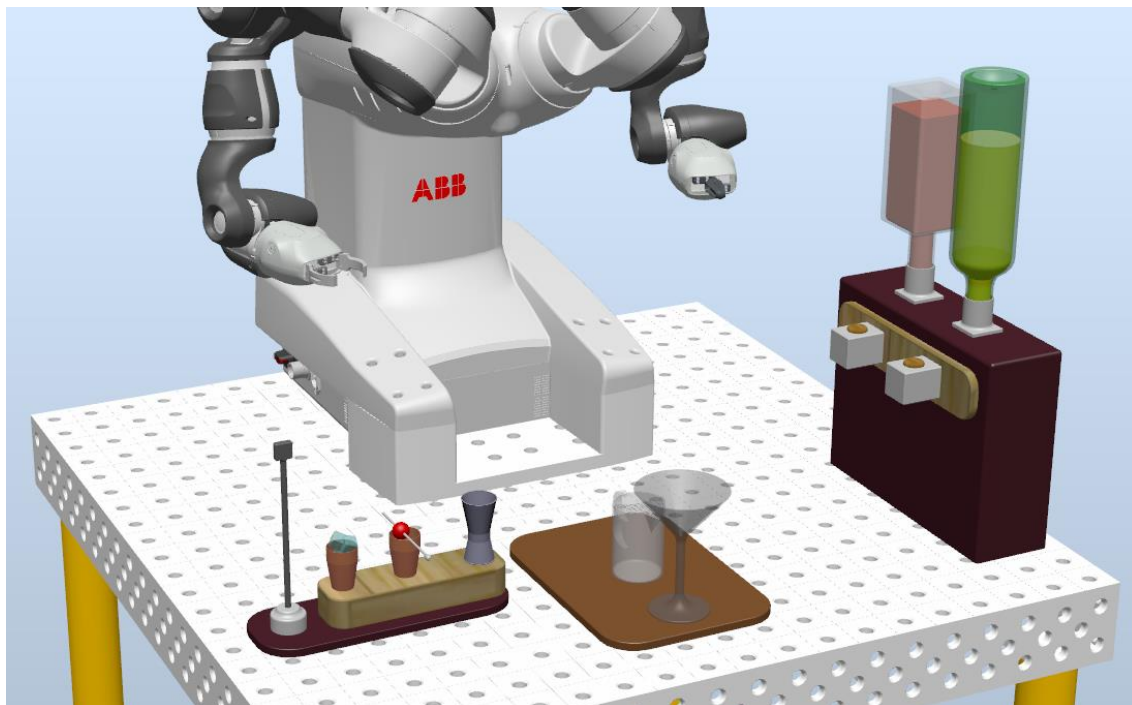
7 PREZENTAČNÁ ÚLOHA IRB 14000

Odlíšnou a samostatnou aplikáciou, v ktorej Dual-arm YuMi nachádza upotrebenie, je príprava miešaného nápoja. Vďaka charakteru práce, vyžadujúcom súčasné zapojenie viacerých ramien, prípadne ich synchronný pohyb, predstavuje táto aplikácia vhodné využitie pre robota.

7.1 Pracovné prostredie

Prvá časť pracovného prostredia, rozdeleného do troch častí, obsahuje nástroje a prídavné suroviny, potrebné pre prípravu drinku. Táto časť pracoviska, obsluhovaná výhradne pravým robotickým ramenom, pozostáva z nádobiek pre ľad a ovocie, miešadla a kališteka, pričom hlavné zložky, ktorými je alkohol, sú umiestnené v druhej časti prostredia. Čapovanie z fliaš prítomných v tejto sekcii, pripojených k dávkovaču, je vykonávané pomocou tlačidiel, umiestnených nad jednotlivými dávkovacími tryskami.

Najvýznamnejším a posledným úsekom, nachádzajúcim sa uprostred pracoviska, je servírovacia doska s dvomi pohármi. Prvý z nich, určený na miešanie nápoja, obsahuje okrem hlavnej časti sitko a dvojitú rukovať, zvolenú pre súčasné začlenenie oboch ramien pri manipulácii. Posledným prvkom, v ktorom je výsledný nápoj prezentovaný, je servírovací pohár. Výsledné pracovisko po importovaní do simulačného prostredia a úprave vytvorených CAD objektov je zachytené na Obr. 54.

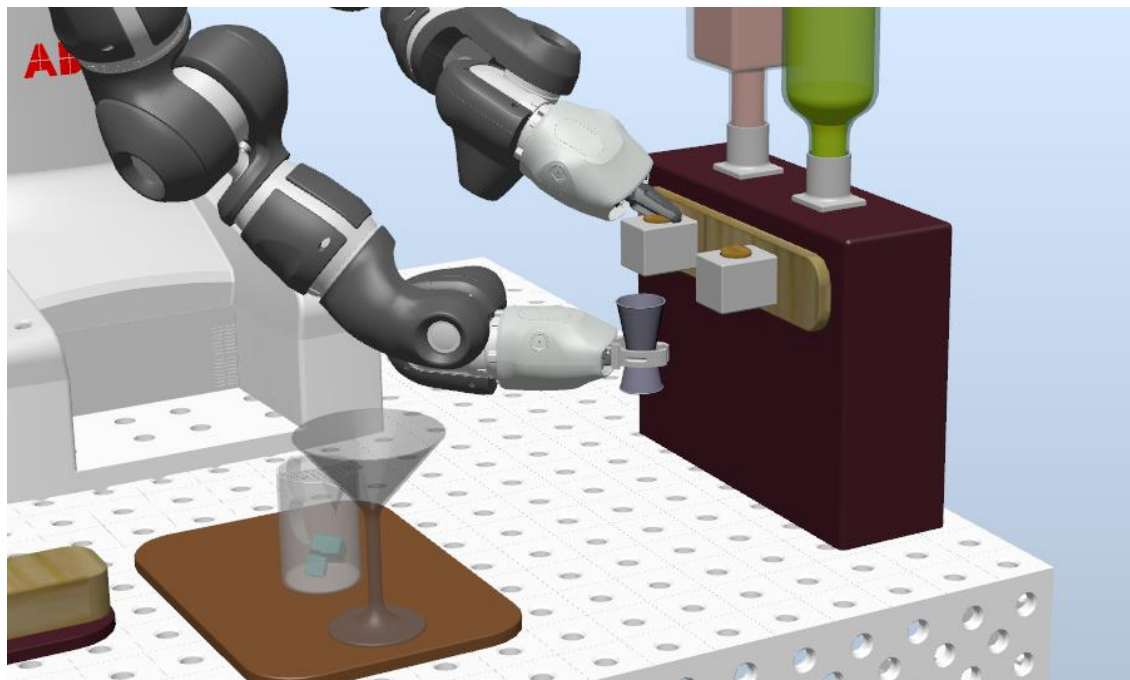


Obr. 54: Pracovisko pre prípravu nápoja v prostredí RobotStudio

7.2 Příprava nápoja

Potreba manipulácie s nádobkami a kalištekom znemožňuje použitie štandardných prstov grippera, kvôli čomu boli pre pravé rameno zužitkované prsty, pôvodne vytvorené pre uchopenie pipety.

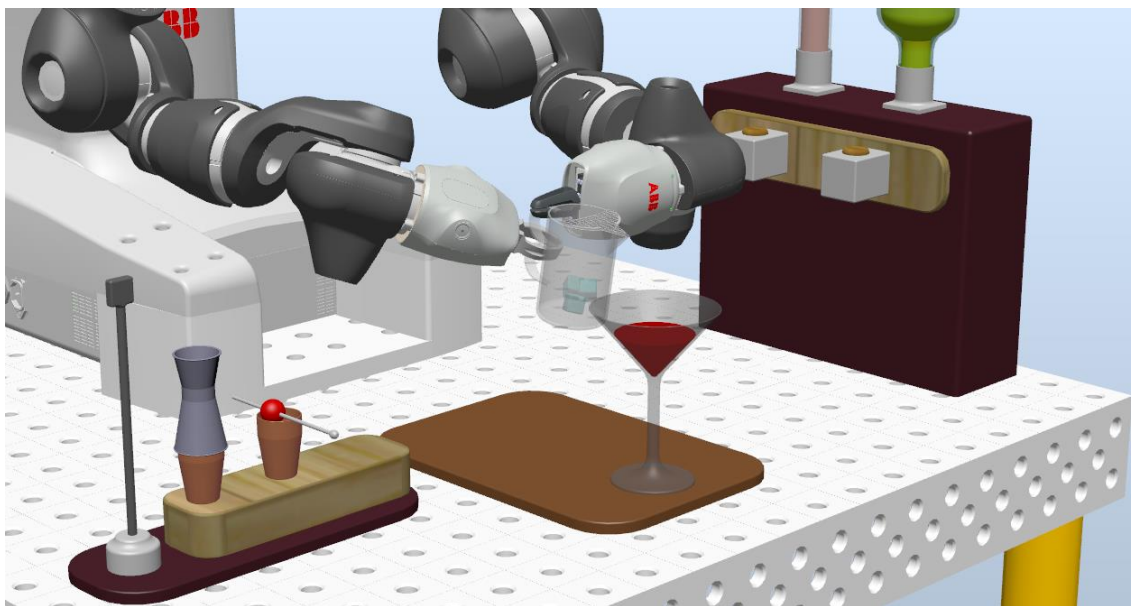
Ústredným bodom prípravy nápoja je miešací pohár, do ktorého je pridané vopred pripraveného ľadu z nádoby prvým krokom. Po spätnom vrátení prázdnej nádoby a uchopení kalištku je nasledujúcim krokom dávkovanie alkoholu (Obr. 55), ktoré je zahájené stlačením tlačidla dávkovača ľavým ramenom robota.



Obr. 55: Čapovanie prísady do kalištku

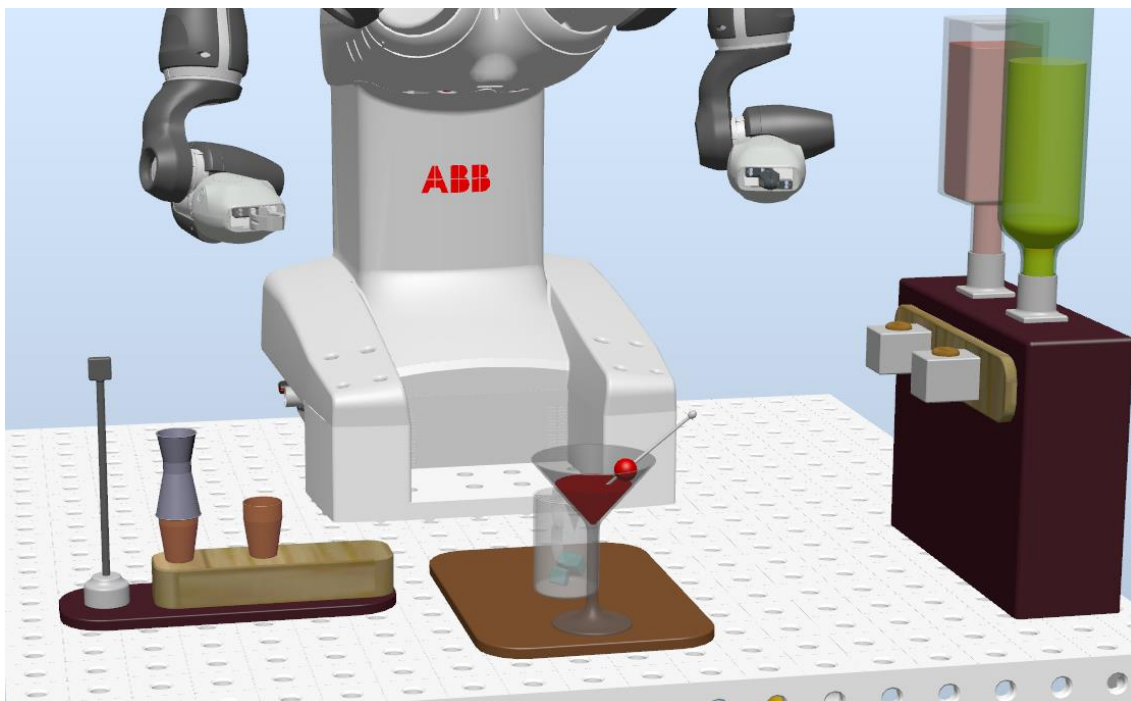
Načapovaná prísada v kalištku je následne presunutá k miešaciemu poháru, do ktorého je pridaná. Opakovaním tohto procesu z vedľajšieho dávkovača a pridaním načapovanej druhej prísady do pohára vzniká zmes, ktorej poslednou nutnou úpravou je premiešanie.

Po odložení kalištku a pripravení miešadla je tak proces miešania v súčinnosti s ľavým ramenom zahájený, po ktorom dokončení a odložení miešadla nasleduje preliatie drinku do koktejlového pohára. Týmto krokom, vyžadujúcim spoluprácu oboch ramien, je po preliatí nerozpustený ľad pomocou sita zachytený v miešacej nádobe.



Obr. 56: Odloženie nádoby po preliatí nápoja

Opätovným synchronným pohybom je nádoba odložená na pôvodné miesto (Obr. 56) a dochádza k dozdobeniu nápoja. Čerešňa napichnutá na ihle je pravým ramenom z nádoby odobraná a predaná druhému ramenu, ktoré túto dekoráciu do pripraveného nápoja vloží. Výsledok úlohy, po ktorej splnení robot presunie obe ramená do východiskovej pozície, je na Obr. 57.



Obr. 57: Nápoj pripravený robotom IRB 14000

8 TESTOVANIE A ZHODNOTENIE

Dokončením tvorby simulácií úloh laboratórnej manipulácie a prípravy drinku v RobotStudiu možno pristúpiť k ďalšiemu kroku, ktorým je overenie funkčnosti riešení na reálnom modeli IRB 14000. Za týmto účelom bol vytvorený riadiaci program nahraný do riadiaceho systému robota dual-arm YuMi (Obr. 58), ktorý sa nachádza v robotickej bunke ÚAI.

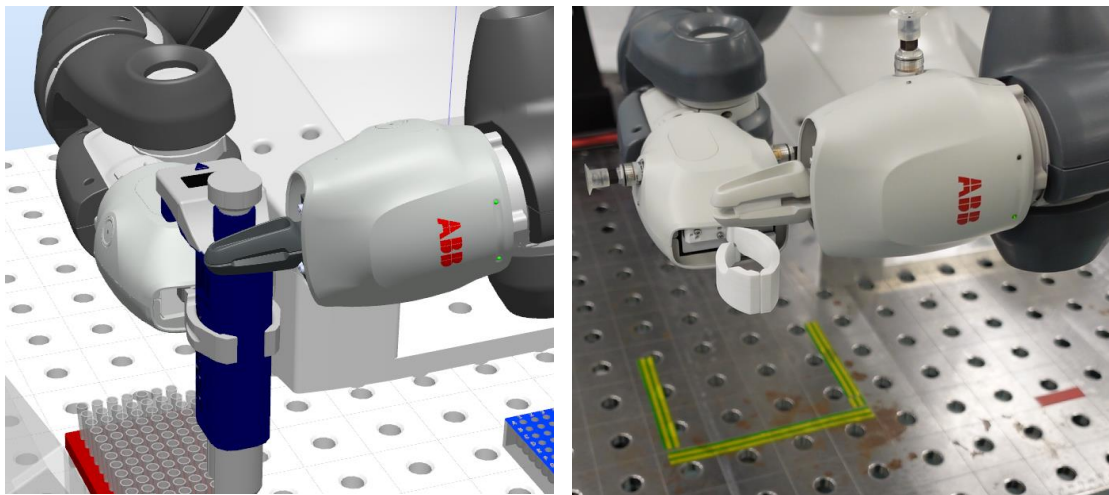


Obr. 58: Robot IRB 14000 v školskej robotickej stanici

Funkčnosť predošle vytvorených riešení bola potvrdená uvedením robota do prevádzky, pri ktorej bola činnosť robota totožná s výsledkami zo simulačného prostredia. Vedúce k týmto záverom sú tiež videá, prezentujúce proces testovania, ktoré sú dostupné pre obe úlohy v prílohe práce.

Doba potrebná pre kompletne vykonanie úlohy pipetovania pre jednu vyšetřovanú skúmavku bola RobotStudiom stanovená na takmer 84 s. Hoci je program tejto úlohy pre opakujúci sa charakter počiatocne nastavený pre spracovanie jednej skúmavky, je upravením premennej v RAPID kóde možné docieľiť spracovanie všetkých dvanástich skúmaviek. Doba potrebná pre vykonanie druhej úlohy, prípravy miešaného nápoja, bola rovnakým spôsobom určená na približnú hodnotu 96 s.

Príležitosťou pre budúci rozvoj pipetovacieho pracoviska je návrh a vytvorenie zariadenia pre automatizované otváranie a zatváranie skúmaviek, ktorého použitie je v simulácií predpokladané. Medzi možné zmeny tejto úlohy sa po prípadne nepostačujúcom výkone robota pri nasadzovaní a odstraňovaní špičiek ponúka vytvorenie náhradného riešenia, bez ktorého je pre tieto činnosti nutný zásah personálu. Alternatívou k tomuto problému, ktorú je potrebné spomenúť, je nahradenie zvolenej pipety jednorazovými plastovými pipetami. Hoci je takéto použitie spojené s poklesom počiatkových nákladov, je vhodnejšie zvoliť túto možnosť pre aplikácie s väčším manipulovaným objemom.



Obr. 59: Robot zvierajúci pipetu v prostredí RobotStudio (vľavo) a imitácia tejto aktivity v reálnom prostredí (vpravo)

Inou oblasťou, otvorenou pre ďalšie zmeny, je spôsob uchopovania pipety (Obr. 59). S cieľom prispôbiť sa premenlivému tvaru pozdĺž pipety a zároveň nepoškodiť jej povrch je možné vnútornú plochu prstov, vytvorených pre tento účel, upraviť pridaním pružnej podložky. Výraznejšiu zmenu by predstavovalo úplné odstránenie a nahradenie grippera jednoúčelovým držiakom pipety, ktorého ľahká konštrukcia by prispela k redukcii záťaže pravého ramena.

9 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bola tvorba programu zvolenej laboratórnej úlohy pre spolupracujúceho robota ABB IRB 14000. Kolaboratívna robotika, do ktorej sa zaraďuje zvolený robot, je popísaná v prvej časti práce, po ktorej nasledovala charakteristika firmy ABB a použitého robota. Zvolená úloha, zameriavajúca sa na presné dávkovanie kvapaliny, vyžadovala následne výber pipety, ktorej špecifikácie boli pre vlastnosti robota značne obmedzené.

Počiatočnou potrebou pri riešení úlohy v prostredí RobotStudio bola zmena prstov robota, ktorými pipetu uchopuje. Mimo pôvodne vytvorený návrh modifikácie týchto prstov bol vytvorený ich druhý variant, ktorého reálne vytvorený model bol použitý pri neskoršom testovaní robota. Po zmene koncového efektora nasledovalo vytvorenie simulačného pracovného prostredia, zahŕňajúce robotom používané pomôcky, a tvorba programu pre robota, pričom činnosť pipetovania bola doplnená o procesy nasadenia a odstránenia špičky pipety. Dodatočnou aplikáciou s analogickým postupom tvorby je úloha prípravy miešaného nápoja, po ktorej nasledovalo predstavenie programovacieho nástroja RobotStudio a jeho základných funkcií.

Overenie funkčnosti oboch úloh na skutočnom prototypu robota je vykonané v záverečnej časti práce. Zhodujúca sa činnosť robota so simuláciou v prostredí RobotStudio potvrdila funkčnosť vytvorených riešení, čoho dôkazom sú priložené videá. Hoci pri testovaní pracovisko nedisponovalo potrebným vybavením, vrátane zvolenej pipety, cieľom záverečnej kapitoly je tiež predstavenie myšlienok, ktorých realizáciou možno dosiahnuť budúci rozvoj úlohy pipetovania. Mimo prezentované návrhy je rovnako príležitosťou pre obe úlohy tvorba užívateľského prostredia ovládacieho panela, ktorým vstupné údaje, ako napr. počet prichystaných skúmaviek, alebo pomer prísad nápoja, možno meniť jednoduchšie. Nezvyčajným riešením úloh, spomenutým ako posledným, je využitie použitého prototypu robota s príbuzným modelom single-arm YuMi, ktorých spojením by vznikol priestor pre zložitejšiu manipuláciu, vyžadujúcu zapojenie viacerých robotických ramien.

10 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] ABB. Product Range: For the flexible and efficient Factory of the Future. In: *Abb.com* [online]. ©2018 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/07ddcb74ba6f42cf91f32f9041858eb5/ABB-Robotic-product-range-brochure-2018-RevE.pdf>
- [2] ABB. YuMi® IRB 14050: Inherently safe, truly collaborative. In: *Abb.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A3807&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [3] ABB. ABB Deutschland: Digitalisierung liefert neue Impulse. In: *New.abb.com* [online]. Mannheim, 2019-05-03 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://new.abb.com/news/de/detail/23037/abb-deutschland-digitalisierung-liefert-neue-impulse>
- [4] ABB. History of ABB. *Global.abb* [online]. ©2020 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://global.abb/group/en/about/history>
- [5] ABB. ABB in China. *New.abb.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://new.abb.com/cn/en/about/abb-in-china>
- [6] ABB. Naše organizace. *New.abb.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://new.abb.com/cz/o-nas/divize>
- [7] ABB. IRB 910SC SCARA. In: *New.abb.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-910sc>
- [8] ABB. SWIFTI™ CRB 1100: Unleash the speedy cobot. In: *Abb.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A8562&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [9] ABB. GoFa™ CRB 15000: Go far with your new helping hand. In: *Abb.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A8564&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [10] ABB. IRC5: Industrial Robot Controller. In: *Abb.com* [online]. ©2019 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0295EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [11] ABB. Product specification: IRB 14000. In: *Abb.com* [online]. ©2015-2020, Checked in 2020-12-11 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC052982-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [12] ABB. YuMi® IRB 14000: Inherently safe, truly collaborative In: *Abb.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106354A3254&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [13] ABB. Budoucnost robotiky a automatizace závisí na společné práci lidí a robotů: YuMi. In: *Abb.cz* [online]. ©2015 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/191cbbc9809f411aac23d1feeac1a9d0/yumi_backgrounde r.pdf

- [14] ABB. YuMi® - IRB 14000. In: *New.abb.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/collaborative-robots/irb-14000-yumi>
- [15] ABB Review: *Special Report Robotics* [online]. Zurich: ABB, March 2005 [cit. 2021-02-21]. ISSN 1013-3119. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/ef27d6c7e1c59be1c1256fc500385aed/ABB%20SP%201-05_72dpi.pdf?filename=ABB%20SP%201-05_72dpi.pdf
- [16] ABB ROBOTICS. Abb Robotics [IRB 6000]. In: *Pinterest.com* [online]. [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://co.pinterest.com/pin/243827767305874996/>
- [17] ATP JOURNAL. Úvod do ISO/TS 15066. *ATP Journal: Digitálne Dvojča už aj na Slovensku* [online]. Bratislava: HMH, máj 2017, 24(5), 64-65 [cit. 2021-04-08]. ISSN 1335-2237. Dostupné z: https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/casopisy_cele/ATP%20Journal%205%202017.pdf#page=66
- [18] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. *COLLABORATIVE ROBOT EBOOK* [online]. Revision: 6.0. October 15th 2015 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.i-ctec.org/wp-content/uploads/2017/01/Los-robots-colaborativos-en-la-industria.pdf>
- [19] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. What Are the Different Types of Collaborative Robots?. In: *Blog.robotiq.com* [online]. Mar 20, 2018 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/what-are-the-different-types-of-collaborative-robots>
- [20] BIOCOMPARE. Getting a Handle on Handheld Pipettes. In: *Biocompare.com* [online]. August 29, 2013 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.biocompare.com/Editorial-Articles/144306-Getting-a-Handle-on-Handheld-Pipettes/>
- [21] BOSCH REXROTH. APAS assistant inline. In: *Boschrexroth.com* [online]. ©2014-2020 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://apps.boschrexroth.com/microsites/apas/index.html>
- [22] CAPP. CATALOGUE 2020/21. In: *Capp.dk* [online]. Nordhausen (Germany) [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.capp.dk/sites/default/files/Capp_Product_Catalogue_EN.pdf
- [23] CRAIG, John J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* [online]. 3rd edition. Upper Saddle River (New Jersey): Prentice-Hall, ©2005 [cit. 2021-03-10]. ISBN 0-13-123629-6. Dostupné z: http://www.mech.sharif.ir/c/document_library/get_file?uuid=5a4bb247-1430-4e46-942c-d692dead831f&groupId=14040
- [24] EPPENDORF. Eppendorf Research® plus. In: *Online-shop.eppendorf.cz* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://online-shop.eppendorf.cz/CZ-cs/Manualni-manipulace-s-kapalinami-44563/Manualni-pipety-a-davkovace-44564/Eppendorf-Research-plus-PF-534798.html>
- [25] EPPENDORF. Catalog 2020/21: Liquid Handling, Sample Handling, Cell Handling. In: *Eppendorf.com* [online]. Hamburg, ©2020 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.eppendorf.com/uploads/media/Eppendorf_ENG_EU_AK01001120_2020_21-comp_15.pdf
- [26] EPPENDORF. Eppendorf Xplorer®/Eppendorf Xplorer® plus. In: *Online-shop.eppendorf.cz* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://online-shop.eppendorf.cz/CZ-cs/Manualni-manipulace-s-kapalinami-44563/Manualni-pipety-a-davkovace-44564/Eppendorf-Xplorer-Eppendorf-Xplorer-plus-PF-191054.html>
- [27] FORCE DESIGN. Collaborative Robots: A Comprehensive Guide. In: *Forcedesign.biz* [online]. Covington (Ohio), ©2018 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.forcedesign.biz/collaborative-robots-a-comprehensive-guide>

- [28] GILSON. PIPETMAN G P1000G In: *Gilson.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.gilson.com/default/pipetman-g-p1000g-100-1000-micro-l-metal-ejector.html>
- [29] GILSON. PIPETMAN® G SPECIFICATIONS. In: *Be.gilson.com* [online]. ©2019 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://be.gilson.com/pub/media/docs/PIPETMAN_G_SPECIFICATIONS_LT801628_A.pdf
- [30] GILSON. 2021: Product Guide. In: *Gilson.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: https://www.gilson.com/pub/static/frontend/Gilson/customtheme/en_US/images/docs/Gilson_Product_Guide_2021_LT800605-compressed.pdf
- [31] GILSON. Guide To Pipetting: Third Edition. In: *Gilson.com* [online]. ©2018 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.gilson.com/pub/media/docs/GuideToPipettingE.pdf>
- [32] GILSON. PIPETMAN® M CONNECTED: USER'S GUIDE. In: *Gilson.com* [online]. ©2020 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: https://www.gilson.com/pub/static/frontend/Gilson/customtheme/en_US/images/docs/2019_LT801594_E_Pipetman_M_connected_UG_web.pdf
- [33] HAVLE, Otto. Kolaborativní robotika: Dočasná móda, nebo trvalý trend?. *Control Engineering Česko* [online]. Trade Media International, 14.03.2017 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/kolaborativni-robotika-docasna-moda-nebo-trvaly-trend/>
- [34] KUKA. Sensitive robotics_LBR iiwa. In: *KUKA.com* [online]. ©2017 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/event/media?itemId=0F3A2F36978A4F3FAB29FD6E203A6424>
- [35] LAB MARK. Ecopipette nastavitelná. In: *Labmark.cz* [online]. Praha, © 2015 - 2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.labmark.cz/ecopipette-nastavitelna-16516#variant=C1000-1>
- [36] LAB MARK. Capp Maestro elektronická pipeta: jednokanálová. In: *Labmark.cz* [online]. Praha, © 2015 - 2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.labmark.cz/capp-maestro-electronicka-pipeta-jednokanalova#variant=M1000-1>
- [37] LABTEAM SCANDINAVIA AB. Capp - CappMaestro elektronisk pipett. In: *Labteamet.com* [online]. Helsingborg (Sweden) [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://labteamet.com/produkter/pipetter-vatskehantering/pipetter/capp-denmark-cappmaestro-elektronisk-pipett/>
- [38] MARKETSSANDMARKETS. Collaborative Robot Market (Cobot) by Payload, Component In: *MarketsandMarkets.com* [online]. Mar 2020 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/collaborative-robot-market-194541294.html>
- [39] MARSHALL, David a Nick CHAMBERS. Rise of the robot: Celebrating 40 years of industrial robotics at ABB. *ABB Review* [online]. Zurich: ABB Technology, 2014, (2), 24-31 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1013-3119. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106103A7086&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [40] MESSE MÜNCHEN. With Robotics and Automated Production against the Corona Pandemic. In: *Automatica-munich.com* [online]. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://automatica-munich.com/en/newsroom/news/men-machines/with-robotics-against-the-corona-pandemic/>

- [41] MOGAB, Ian. 4 Types of Collaborative Robots to Increase Productivity. In: *PattiEngineering.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://pattiengineering.com/blog/4-types-collaborative-robots/>
- [42] NASDAQ OMX CORPORATE SOLUTIONS. COVID-19 Pandemic Impact on Collaborative Robot Market. *NASDAQ OMX's News Release Distribution Channel* [online]. New York: NASDAQ OMX Corporate Solutions, May 7, 2020, Last updated 2020-12-25 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2399214263/>
- [43] QUARK. Roboty medzi ľuďmi. *Quark: Magazín o vede a technike* [online]. 11. januára 2020, (1) [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.quark.sk/roboty-medzi-ludmi/>
- [44] RETHINK ROBOTICS. Intera®. *Rethinkrobotics.com* [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.rethinkrobotics.com/intera>
- [45] RETHINK ROBOTICS. Sawyer. In: *Robots.ieee.org* [online]. United States, 2015 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://robots.ieee.org/robots/sawyer/?gallery=photo2>
- [46] ROBOTS DONE RIGHT. History of ABB Robots. In: *Robotsdoneright.com* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/Articles/history-of-abb-robots.html>
- [47] ROBOTWORX. KUKA LBR IIWA 14 R820. In: *Robots.com* [online]. [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://www.robots.com/robots/kuka-lbr-iiwa-14-r820>
- [48] ROBOTWORX. ABB IRB 120. In: *Robots.com* [online]. Marion (Ohio), ©2021 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.robots.com/robots/abb-irb-120>
- [49] SCHNEIDER, Christopher. Automated laboratory tests with robots. In: *Yaskawa.eu.com* [online]. Allershausen (Germany), Apr 15, 2020 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: https://www.yaskawa.eu.com/header-meta/news-events/article/automated-laboratory-tests-with-robots_n10067
- [50] SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB, ed. *Handbook Springer of Robotics* [online]. Berlin: Springer, ©2008 [cit. 2021-05-17]. ISBN 978-3-540-23957-4. Dostupné z: https://www.academia.edu/26665877/Handbook_Springer_of_Robotics
- [51] SIPOCH. Informativní ceník pipet, špiček a příslušenství. In: *Sipoch.cz* [online]. Hořovice (Česko), 2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: http://www.sipoch.cz/ceniky/2021_cenik_pipety_czk.pdf
- [52] STÄUBLI. Company. *Staubli.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/sk-sk/profile/company/>
- [53] STÄUBLI. POWER cobot TX2touch range. In: *Staubli.com* [online]. ©02/2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/en-us/file/23040.show>
- [54] THERMO FISHER SCIENTIFIC. Thermo Scientific Finnpipette Systems. In: *Thermofisher.com* [online]. ©2016 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/Finnpipette-F1-and-Finnpipette-F2-brochure.pdf>
- [55] THERMO FISHER SCIENTIFIC. Thermo Scientific™ Finnpipette™ Novus Electronic Single-Channel Pipettes. In: *Fishersci.se* [online]. Göteborg, ©2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.fishersci.se/shop/products/finnpipette-novus-single-channel-pipettes/p-4530130#>
- [56] TRIGON PLUS. Ceník: pipety Finnpipette a špičky Finntip Thermo Scientific 2021. In: *Trigonplus.cz* [online]. Čestlice (Česko) [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.trigonplus.cz/files/product/cenik_finnpipette-88.pdf

- [57] UNIVERSAL ROBOTS A/S. E-Series FROM UNIVERSAL ROBOTS. In: *Universal-robots.com* [online]. Odense (Denmark) [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/media/1802432/e-series-brochure.pdf>
- [58] UNIVERSAL ROBOTS A/S. Universal Robots Launches Heavy-Duty Payload Cobot for Collaborative Automation. In: *Universal-robots.com* [online]. Odense (Denmark), ©2021 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/news-centre/universal-robots-launches-heavy-duty-payload-cobot-for-collaborative-automation/>
- [59] VAJNER, Luboš. *PIPETMAN Specifications* [elektronická pošta]. Message to: 209123@vutbr.cz. 14. mája 2021 15:50 [cit. 2021-05-18]. Osobná komunikácia.
- [60] WEBER, Austin. Robotics in the Age of Industry 4.0: Artificial intelligence and data analytics will make robots more productive. *ASSEMBLY Magazine* [online]. 15 May 2020 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/articles/95694-robotics-in-the-age-of-industry-40>
- [61] ZÁDA, Václav. *Robotika, matematické aspekty analýzy a řízení* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012 [cit. 2021-05-18]. ISBN 978-80-7372-882-3. Dostupné z: <https://databaze.op-vk.cz/Product/Detail/14633>

11 ZOZNAM PRÍLOH

Súčasťou elektronickej prílohy je:

- Poster, reprezentujúci výsledky práce
- Riadiaci program jednotlivých ramien pre obe úlohy
- Projekty oboch úloh v RobotStudio obsahujúce vytvorené simulácie
- Simulácie pracovísk, nevyžadujúce softvér RobotStudio, vo forme prehliadača
- Videá zobrazujúce priebeh testovania programov na reálnom modeli robota