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

OVLÁDÁNÍ KOOPERATIVNÍCH ROBOTŮ HLASEM
VOICE CONTROL OF COOPERATIVE ROBOTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Lukáš Bubla**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Branislav Lacko, CSc.**
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	**Bc. Lukáš Bubla**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Branislav Lacko, CSc.**
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 diplomové práce:

Ovládání kooperativních robotů hlasem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ovládání kolaborativních robotů prostřednictvím programovacích aplikací klasickými programovacími jazyky či dotykových panelů a tlačítek není příliš uživatelsky efektivní.
Proto je nutné analyzovat možnosti ovládání kooperativních robotů hlasem s ohledem na spolupráci robota a člověka.

Cíle diplomové práce:

Provedení rozboru problematiky koordinace člověk – stroj na společných pracovních úkolech při montážních operacích.
Doporučit hlasové pokyny pro vzájemnou komunikaci.
Navrhnout možné řešení hlasové komunikace pro vybraný typ kooperativního robota.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk a kol. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: VUTIUM, 2016, 800 s .ISBN 978-80-2114-826.

PECINOVSKÝ, Rudolf. Phython. Praha: GRADA, 2020, 480 s., ISBN 978-80-271-1269-2.

PSUTKA, Josef. Komunikace s počítačem mluvenou řeči. Praha: Academia,1995, 287 s. ISBN 8020002030.

Termín odevzdání diplomové 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

Cílem diplomové práce bylo vytvoření programu, pomocí kterého bude možné ovládat kolaborativního robota pomocí hlasu. Úvodní kapitoly obsahují rešerši současného stavu v oblasti kolaborativní robotiky z hlediska bezpečnosti, efektivity práce, programování a komunikace s robotem. Dále je rozebírána problematika strojového zpracování lidského hlasu. V praktické části byl navržen experiment, ve kterém se pracuje s off-line simulací robota UR3 v prostředí PolyScope 3.15.0. Tato simulace byla propojena s programem, psaným v programovacím jazyku Python, který využívá knihovny *SpeechRecognition* a *urx*. Pro ovládání robota byly navrženy jednoduché hlasové pokyny, které uvádějí robota do pohybu na definované pozice.

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis was to create a program with which it will be possible to control a collaborative robot by voice. First chapters contain a search of the current state in the field of collaborative robotics in terms of safety, work efficiency, robot programming and communication with the robot. Furthermore, the issue of machine processing of the human voice is discussed. In practical part was proposed an experiment in which we work with off-line simulation of UR3 robot in PolyScope 3.15.0 software. This simulation was linked to a Python program which uses *SpeechRecognition* and *urx* libraries. Simple voice instructions have been designed to move robot to defined position.

KLÍČOVÁ SLOVA

kolaborativní robot, spolupráce člověk-robot, ovládání hlasem, rozpoznání hlasu, převod řeči na text, jazykové modely, akustické modely

KEYWORDS

collaborative robot, human-robot cooperation, voice control, speech recognition, speech-to-text, language models, acoustic models

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

2021

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BUBLA, Lukáš. Ovládání kooperativních robotů hlasem. Brno, 2021. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134721. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Branislav Lacko.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Branislavu Lackovi, CSc. za jeho ochotu, rady a věcné poznámky při konzultacích a vypracovávání práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Romanu Parákovi za ochotu a pomoc při práci se simulací, s robotem a při tvorbě programu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 22. 5. 2021 ……

Lukáš Bubla

OBSAH

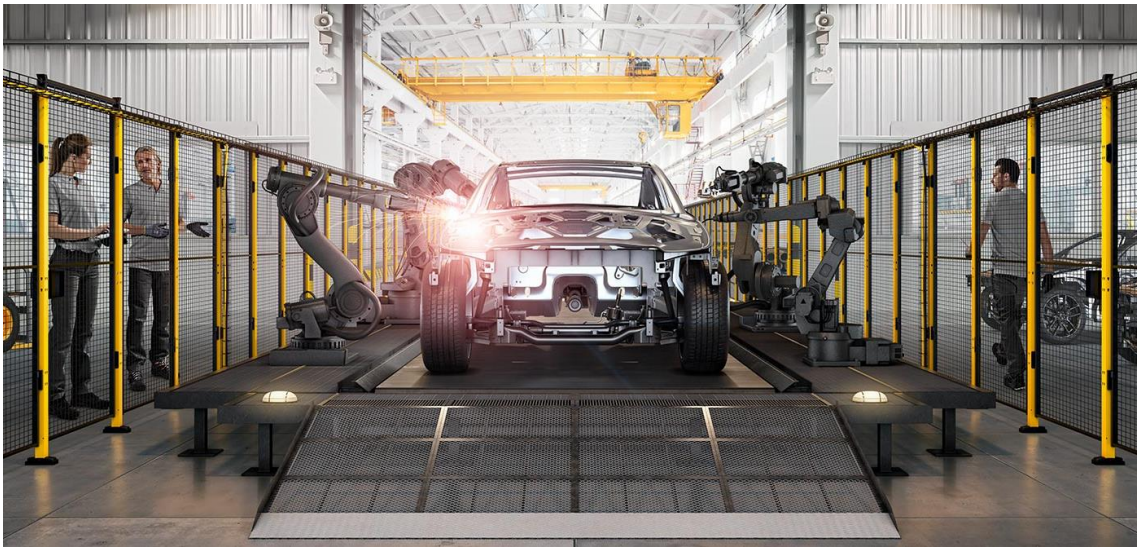
1 ÚVOD 15
1.1 Historie kolaborativních robotů 15
1.2 Nástup kolaborativních robotů v ČR 17
1.3 Cíle diplomové práce 18
1.4 Použitá metoda zpracování diplomové práce 18
2 PROBLEMATIKA OVLÁDÁNÍ KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ 20
2.1 Hledisko bezpečnosti 20
2.1.1 Kolaborativní pracovní prostor 20
2.1.2 Normy a technické specifikace 20
2.1.3 Technická specifikace ISO/TS 15066 22
2.2 Hledisko efektivity práce 24
2.2.1 Scénáře spolupráce člověka s robotem 25
2.2.2 Koordinace práce člověka s robotem 26
2.3 Hledisko programování robotů 29
2.4 Komunikace mezi člověkem a robotem 30
2.4.1 Řeč a řeč těla 30
2.4.2 Uživatelské rozhraní 31
3 KOMUNIKACE S ROBOTY POMOCÍ HLASU 35
3.1 Techniky strojového rozpoznávání lidského hlasu 35
3.1.1 Matematická formulace 35
3.1.2 Akustické modely 36
3.1.2.1 Skrytý Markovův model (angl. HMM) 36
3.1.3 Jazykové modely 37
3.2 Techniky generování strojového hlasu 38
3.2.1 Syntéza řeči z textu 38
4 NÁVRH OVLÁDÁNÍ ROBOTA UR3 HLASEM 39
4.1 Volba robotického systému 39
4.2 Návrh koncepce experimentu 40
4.3 Simulace činnosti robota 40
5 POPIS REALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ 43
5.1 Digitalizace hlasu 43
5.2 Program v jazyku Python 44
6 ZÁVĚR 49
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 51
8 SEZNAM PŘÍLOH 55

1 ÚVOD

1.1 Historie kolaborativních robotů

Historicky první robotické rameno si nechal patentovat v roce 1954 George Devol, čímž položil základy moderního robotického průmyslu a vysloužil si titul *„Grandfather of robotics“*.

Po prvním uvedení do provozu v roce 1959 následovala řada let, kdy blízká kooperace robota s člověkem byla nemyslitelná. Roku 1999 se však objevuje první definice kolaborativního robota, a to v žádosti o patent z USA, podáné na *„přístroj a metodu přímé fyzické integrace mezi člověkem a univerzálním manipulátorem, ovládaným počítačem“*. Až do roku 2000 byly průmyslové roboty primárně instalovány v kleci nebo za oplocením, pro co největší bezpečí zaměstnanců pohybujících se kolem robota. [1]

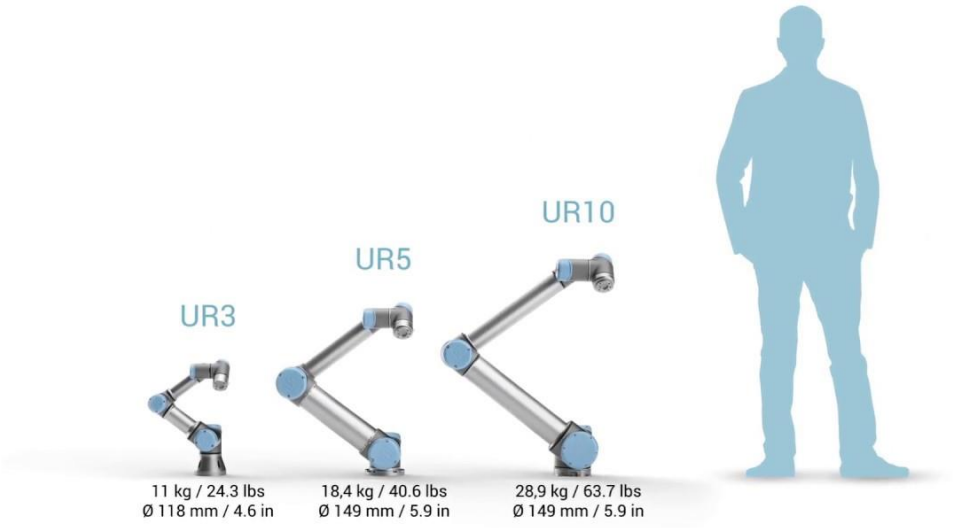


Obr. 1 – Ukázka robotického pracoviště bezpečně umístěného za oplocením. [2]

Změnu však přinesly roky 2001-2005, kdy výzkumný tým na univerzitě v Odense, v jižním Dánsku začal uvažovat o možných změnách v oblasti robotické technologie. Práce univerzitního týmu vyústila v založení společnosti Universal Robots A/S, s cílem vytvořit lehkého, levného a dostupného robota, schopného pracovat v jednom prostředí s člověkem, což se povedlo v roce 2008. V prosinci 2008 byl prodán a nainstalován ve společnosti Linatex první kolaborativní robot model UR5, který si zvládli naprogramovat sami, i bez zkušeností s programováním. Tato novinka umožnila malým a středním podnikům poměrně levně automatizovat svou výrobu. [3]

Od roku 2012 jsou do trhu kolaborativních robotů zapojení i další výrobci, včetně dosavadních lídrů robotiky jako KUKA, ABB či Fanuc. Větší pozornost věnovaná kolaborativním robotům znamenala i větší tlak na bezpečnost, a proto v roce 2016 ISO

vydalo dlouho očekávanou specifikaci ISO/TS 15066 s pokyny k zajištění bezpečnosti práce. [3]



Obr. 2 – Porovnání velikostí kolaborativních robotů Universal Robots s člověkem [4]

Na obrázku je vidět, že řada robotů UR se skládala z malých robotů. V té době se ale velcí výrobci robotů předháněli, kdo bude mít ve své nabídce průmyslového robota, který konkurenci předčí v nosnosti těžkých obrobků. To z důvodu, aby je mohli nabízet velkým firmám z automobilového průmyslu (velké osobní automobily, nákladní automobily), loděnicím, zbrojnímu průmyslu apod., protože tyto firmy měly dostatek finančních prostředků ke koupi takových robotů. Obr. 3 zachycuje právě takového velkého robota. Pro tyto typy průmyslových robotů se varianta provedení jako kolaborativní robot nezvažuje.

Obr. 3 – Průmyslový robot Kuka KR 1000 titan s nosností až 1300 kg. [5]

Zaměření UR na výrobu robotů této velikosti, které byly navíc kolaborativní, umožnilo UR oslovit řadu malých a středních firem, které do té doby příliš průmyslové roboty nevyužívaly. Konstruktéři UR také navrhli své roboty tak, aby jejich výrobní cena byla nízká.

Na konferenci ROBOTY 2020, kterou pořádala dne 29. ledna 2020 v Brně společnost Trade Media International, si bylo možné vyslechnout vystoupení zakladatele dánské společnosti Universal Robots. Pan Esben Østergaard, nositel ocenění Engelberger Robotics Award, což je ve světě robotiky považováno za obdobu Nobelovu ceny, na konferenci pohovořil o začátcích společnosti UR, vývoji kolaborativní robotiky a o budoucnosti robotiky. Zmínil se také o tom, co bylo příčinou velkého komerčního úspěchu firmy. Konkrétně zmínil:

1. zvolení vhodné, malé velikosti kolaborativních robotů,
2. snadné programování s interaktivní 3D vizualizací,
3. jednoduché uvedení do provozu a rychlé nastavení robota (jen několik hodin),
4. flexibilita použití robota při řešená ekonomické automatizace, dovolující získat krátkou dobu návratnosti vložených investic (ROI) – někdy už po 90 dnech,
5. poradenství on-line od národního zástupce až do centrály firmy,
6. nabídka kvalitního školení a instruktáží servisních pracovníků v centrech blízko zákazníků.

1.2 Nástup kolaborativních robotů v ČR

Zastoupení robotizace průmyslové výroby každým rokem ve světě roste. Jinak tomu není ani v Česku, kde roku 2018 vzrostla zhruba o 50 procent. Na začátku roku 2019 v České republice podle statistik připadalo 120 robotů na 10 tisíc zaměstnanců. Pro porovnání – v roce 2016 to bylo 101 robotů na 10 tisíc pracovníků.[6, 7]

Stále výraznějším trendem poslední doby je však prosazování kolaborativních robotů na úkor klasických průmyslových. Přestože kolaborativní roboty zaujímají jen zlomek celkového počtu prodaných robotů, prodalo se jich ve světě v roce 2019 o 23 % více než v roce 2018. V česku se pozornost firem pomalu zaměřuje na kolaborativní roboty, čemuž pomáhá nízká nezaměstnanost, s ní spojený nedostatek pracovní síly a také očekávaná ekonomická krize. [6, 8]

V příloze č. 1 jsou uvedeny příklady kolaborativních robotů, které jsou u nás velmi často nabízeny.

1.3 Cíle diplomové práce

Závěrečná práce se zabývá možností, jak využít hlasových pokynů člověka, k ovládání kooperativních robotů s ohledem na spolupráci robota a člověka. Tomuto způsobu ovládání je předpokládána velká budoucnost.

Zadání diplomové práce ukládá realizovat tři hlavní cíle:

1. Provedení rozboru problematiky koordinace práce člověk – stroj na společných pracovních úkolech při montážních operacích
2. Doporučit hlasové pokyny pro vzájemnou komunikaci.
3. Navrhnout možné řešení hlasové komunikace pro vybraný typ kooperativního robota.

V diplomové práci budu používat pojem *„ovládání“* ve smyslu kvalifikované obsluhy kolaborativního robota včetně vzájemné komunikace s ním při společné práci. Kolaborativní robot je řízen hierarchicky uspořádaným programovým systémem, který byl již dříve naprogramován k zajištění všech potřebných funkcí robota (od základních programovatelných mikroprocesorových systémů, které řídí čidla, jednotlivé motory pohybů ramen a dalších podpůrných funkcí). V práci předpokládám, že pomocí hlasu budou lidskou obsluhou řízeny pracovní funkce robota a pohyby na nejvyšší úrovni koordinace spolupráce člověk – robot.

1.4 Použitá metoda zpracování diplomové práce

Diplomovou práci jsem zpracoval podle obecných pokynů a požadavků, které jsou kladeny pro tento druh studentských závěrečných prací - struktura, obsah, formální úprava práce, citace apod.

Cíle diplomové práce jsem stanovil na základě zadání diplomové práce a sestavil jsem také pracovní osnovu závěrečné práce:

1. Rešerše poznatků o problematice kolaborativní robotiky a zpracování hlasu
2. Seznámení s robotem/simulačním programem
3. Návrh programu pro demonstraci ovládání robota
4. Popis a vyhodnocení praktické části do textu diplomové práce

K provedení rozboru problematiky koordinace práce člověka s robotem na společných pracovních úkolech při průmyslových operacích jsem analyzoval obsah článků v odborných časopisech. Dále také obsah odborných publikací, vyhledávaných pomocí *Web Of Science,* se kterými jsem se detailně seznámil. Získané poznatky byly použity pro zpracování jednotlivých problémů, které se týkaly vzájemné spolupráce a její koordinace při nasazení kolaborativních robotů ve výrobě. Shodně bylo postupováno při zpracování doporučení hlasových pokynů pro ovládání robota při spolupráci s člověkem.

Při návrhu možného řešení hlasové komunikace jsem se orientoval na kolaborativní robot, který je instalován v robotické laboratoři ústavu. Uvažoval jsem dva základní aspekty:

- Jednak, že řešení musí obsahovat technickou podstatu ovládání kolaborativního robotu pomocí hlasu,
- jednak, že řešení musí být realizováno tak, aby bylo možné ho předvést a demonstrovat bez nutnosti použití robotu instalovaného v laboratoři. Což automaticky vedlo k myšlence využití počítačové simulace pro navržené řešení.

Během zpracování diplomové práce jsem se snažil postupovat systematicky podle systémového přístupu a podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Jelikož jsem práci zpracovával v režimu distanční on-line výuky při uzavření fakulty, probíhala vzájemná komunikace a spolupráce s vedoucím elektronickou formou. Některé dotazy nebo zpřesnění obsahu a textu diplomové práce jsem řešil s vedoucím práce telefonicky.

2 PROBLEMATIKA OVLÁDÁNÍ KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ

2.1 Hledisko bezpečnosti

S příchodem kolaborativních robotů bylo potřeba se odklonit od zažitého paradigmatu oddělení pracovního prostoru robotického systému od pracovníků. V průmyslu se objevily roboty, které spolupracují ruku v ruce s člověkem nebo se pohybují po továrně sami nezávisle na člověku. K těmto robotům je potřeba přidat určitá bezpečnostní opatření, které se v tomto směru řadí přímo k vlastnostem samotného robota, což je určitou zárukou nižší pravděpodobnosti způsobení škody. Jak zmiňují Universal Robots, „definičním znakem všech kolaborativních robotů je integrovaný bezpečnostní systém, který zastaví činnost kolaborativního robota při kontaktu se zaměstnancem.“ [3] Díky tomuto systému je možné roboty vyndat z klece a umožnit jim samovolně cestovat po továrně nebo je přemisťovat tam, kde je potřeba. [3, 9]

2.1.1 Kolaborativní pracovní prostor

V otázce bezpečnosti se pracuje s pojmem kolaborativní pracovní prostor, a proto by bylo vhodné si definovat, o co se vlastně v oblasti kolaborativních robotů jedná. Jak je definováno v ISO 10218/ANSI RIA 15.06, jedná se o prostor v zabezpečené oblasti, kde může člověk a robot během výrobních operací provádět pracovní úkony společně. Podobně ISO/TS 15066 definuje tento prostor jako oblast v operačním prostoru, kde může robotický systém během výroby provádět úkoly zároveň s lidským operátorem. [10] Podrobněji viz 2.2.1.

Kolaborativní pracovní prostor však nezahrnuje pouze člověka a robot, ale je potřeba brát v potaz i další zařízení, nástroje, akční členy, upínací zařízení a další možné rizikové prvky. [11]

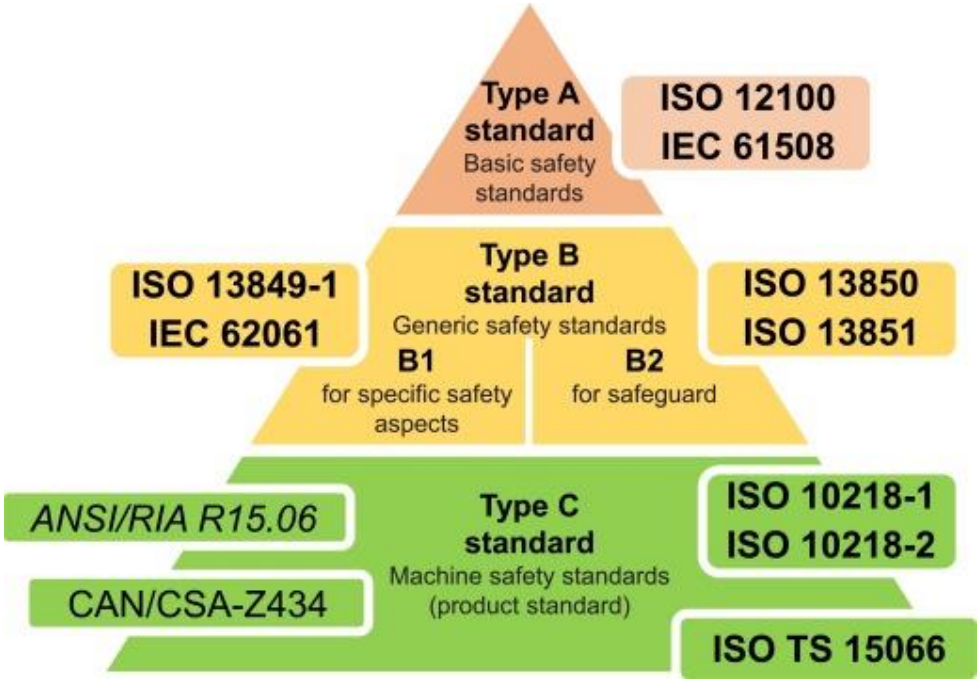
2.1.2 Normy a technické specifikace

Pro bezpečnost zaměstnanců, ale i samotných robotů, je potřeba brát v potaz různé normy, specifikace či doporučení. Tyto bezpečnostní normy lze rozdělit do 3 skupin:

- **Normy typu A** (základní bezpečnostní normy) stanovují základní pojmy a zásady pro projektování a konstrukci a obecné požadavky, které lze použít na všechna strojní zařízení. Příkladem je ČSN EN ISO 12100 (83 3001) *Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a snižování rizika*.
- **Normy typu B** (skupina bezpečnostních norem) jsou rozděleny do dvou skupin a zabývají se vždy konkrétním aspektem nebo zařízením. Normy typu B1 se týkají jednotlivých bezpečnostních aspektů (např. bezpečných vzdáleností, teploty povrchu, hluku apod.). Příkladem může být ČSN EN ISO 13857 (83 3212) *Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu do*

nebezpečných prostor horními a dolními končetinami. Normy typu B2 pokrývají oblast konkrétních bezpečnostních zařízení (např. dvouručního ovládacího zařízení, blokovacího zařízení apod.). Jako příklad lze uvést ČSN EN ISO 13850 (83 3311) *Bezpečnost strojních zařízení – Nouzové zastavení – Zásady pro konstrukci.*

- **Normy typu C** (bezpečnostní normy pro stroje) shromažďují jednotlivé bezpečnostní standardy a určují detailní bezpečnostní opatření pro konkrétní strojní zařízení. Pokud jsou standardy typu C dostupné, jsou prioritní před standardy typu A i B. Normy C mají dvě části ČSN EN ISO 10218-1, která shromažďuje bezpečnostní požadavky pro výrobce robotů, zabývá se konstrukcí robotu a jeho řídicí jednotky a ČSN EN ISO 10218-2 popisuje bezpečnostní požadavky na systém průmyslových robotů a vše co k němu náleží. [12, 13]



Obr. 4 – Přehled skupin bezpečnostních norem [13]

Tab. 1 – Přehled norem pro posuzování bezpečnosti pracovišť s roboty [12]

ČSN EN ISO 12100 (83 3001)	*Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a snižování rizika*
ČSN EN ISO 13849-1 (83 3205)	*Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečnostní části ovládacích systémů – Část 1: Obecné zásady pro konstrukci*
ČSN EN ISO 13850 (83 3311)	*Bezpečnost strojních zařízení – Nouzové zastavení – Zásady pro konstrukci*
ISO 14118	*Safety of machinery – Prevention of unexpected start-up(neharmonizovaná; jako ČSN nepřevzata)*
ČSN EN ISO 13857 (83 3212)	*Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu do nebezpečných prostor horními a dolními končetinami*

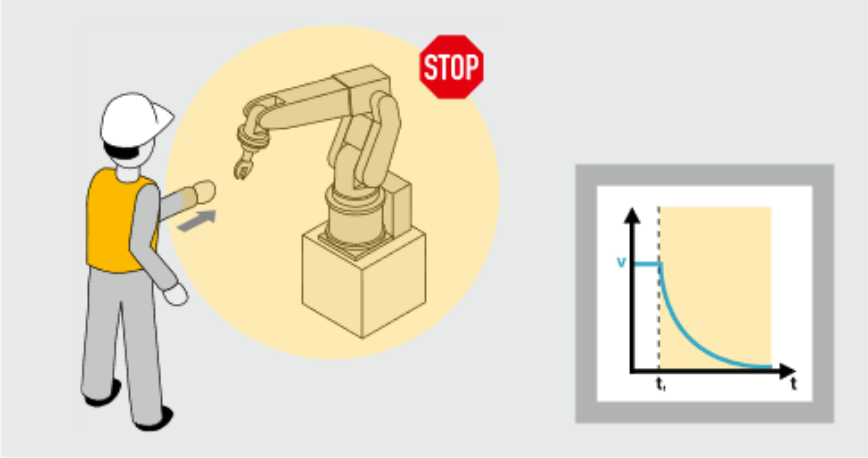
ČSN EN ISO 13855 (83 3303)	*Bezpečnost strojních zařízení – Umístění ochranných zařízení s ohledem na rychlosti přiblížení částí lidského těla*
ČSN EN ISO 10218-1 (18 6502)	*Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 1: Roboty*
ČSN EN ISO 10218-2 (18 6502)	*Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 2: Systémy robotů a integrace*

2.1.3 Technická specifikace ISO/TS 15066

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1, v roce 2016 byla vydána dlouho očekávaná technická specifikace ISO/TS 15066, jejímž autorem je technická komise ISO/TC 299. Komisi tvoří všichni hlavní výrobci kolaborativních robotů – Universal Robots, ABB, Fanuc, Kuka, Rethink Robotics, Denso Wave a Yaskawa. V původních normách, vydaných v roce 2006, kdy byl obor kolaborativních robotů v úplných začátcích, byla kolaborativním robotům věnována pouze jedna strana. Po obrovském rozvoji tohoto oboru však bylo potřeba rozsáhlejší specifikace, a proto v roce 2016 byla vydána technická specifikace obsahující třicet stran informací a doporučení konkrétně pro tento obor robotiky. „Technická specifikace ISO / TS 15066 však není standardem, spíše aktualizuje stav techniky ve stávajících bezpečnostních normách robotů. V současnosti je přijata jako nejlepší praxe vedle DIN EN 10218, co do spolupráce člověka s robotem. Zatímco DIN EN 10218 uvádí, že jakýkoli kontakt *by neměl vytvářet úraz*, ISO / TS 15066 jmenuje limity pro sílu a rychlost, které tomu odpovídají.“[14]

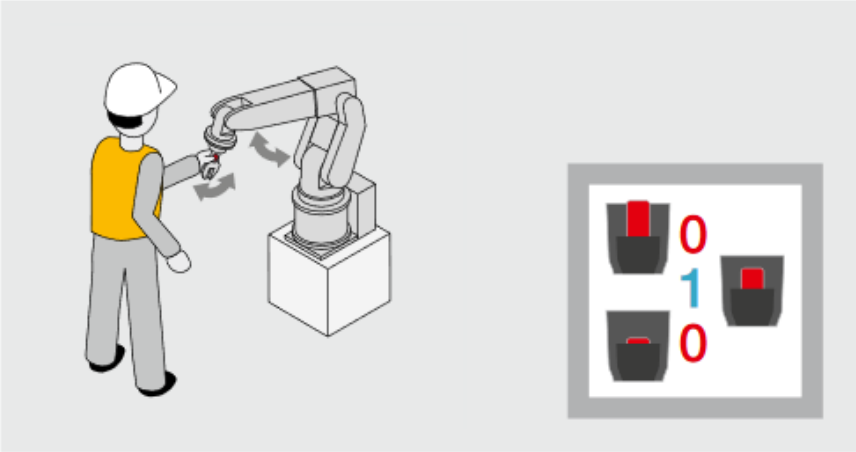
Ve specifikaci jsou, po zavedení obecné identifikace nebezpečí a vyhodnocení rizik týkajících se systému spolupráce člověk-robot, definovány požadavky na aplikace kolaborativních robotických systémů. Názorně lze tyto požadavky a reakce robota z hlediska bezpečnosti charakterizovat následovně:

- **Metoda 1 – Bezpečně řízené monitorované zastavení** povoluje pohyb robota pouze tehdy, je-li operátor mimo kolaborativní pracovní prostor. V případě, že operátor vstoupí do vymezeného pracovního prostoru, robot zastaví svou činnost a ve svém pohybu opět pokračuje až v momentě, kdy operátor prostor opustí.



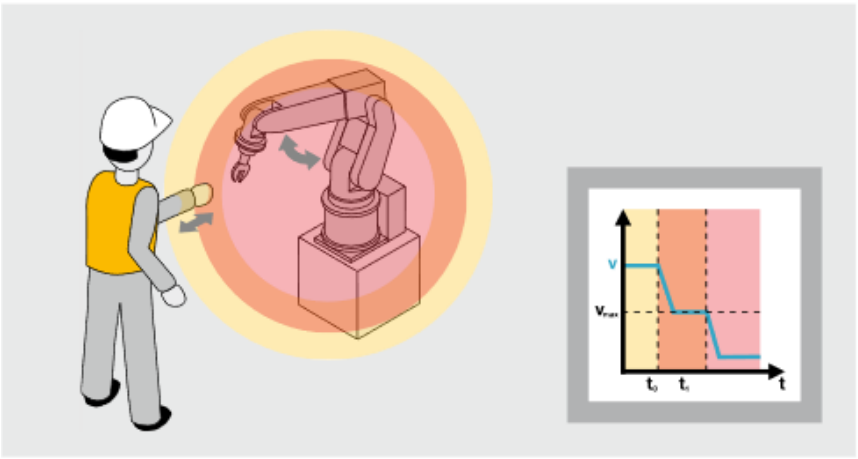
Obr. 5 – Metoda 1 – Bezpečně řízené monitorované zastavení [15]

- **Metoda 2 – Ruční navádění** umožňuje řízení robota ručně, ovšem jen v případě bezpečně snížené rychlosti. Tato rychlost je stanovena na základě posouzení rizika. Současně je nutné mít dostupné potvrzovací zařízení a zařízení pro nouzové vypnutí robota.



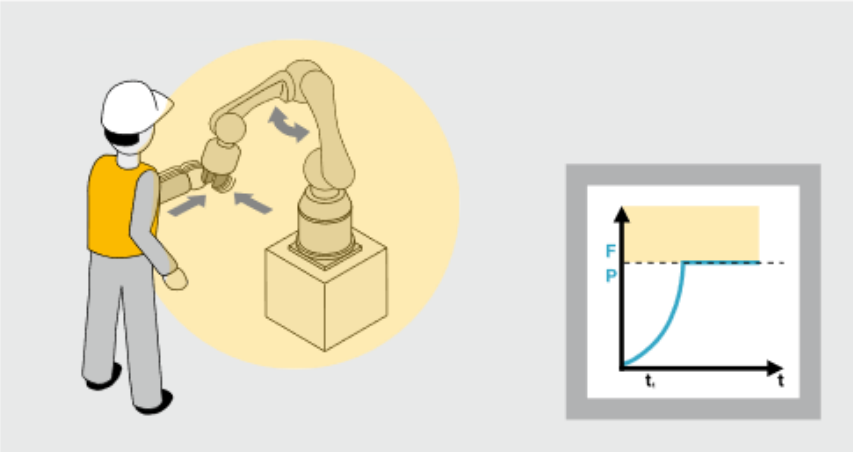
Obr. 6 – Metoda 2 – Ruční navádění [15]

- **Metoda 3 – Monitorování rychlosti a vzdálenosti** umožňuje robotu pracovat i při vstupu operátora do kolaborativního pracovního prostoru. Robot však detekuje pozici člověka a mění rychlost svého pohybu v závislosti na vzdálenosti mezi operátorem a robotem. Pokud by se operátor dostal příliš blízko, zastaví robot činnost, anebo uhne tak, aby nedošlo ke kontaktu.



Obr. 7 – Metoda 3 – Monitorování rychlosti a vzdálenosti [15]

- **Metoda 4 – Omezení výkonu a síly** umožňuje plně sdílený kolaborativní pracovní prostor včetně možnosti kolizí mezi člověkem a robotem. Bezpečnost je zajištěna omezením výkonu a síly robotu, tak aby případný kontakt nepřesahoval mezní hodnoty, které by mohly operátorovy způsobit újmu. Pro vhodný návrh systému obsahuje technická specifikace studii o prazích bolesti na různých částech lidského těla. [13, 14]



Obr. 8 – Metoda 4 – Omezení výkonu a síly [15]

Tab. 2 – Zajištění bezpečnosti pracovišť s kolaborativními roboty. [12]

	Opatření	**Popis**
Bezpečná konstrukce (zajišťuje výrobce robotu, chapadla, nástroje)	eliminace	eliminace nebezpečí skřípnutí nebo nebezpečného dotyku; nutný také správný návrh celého pracoviště
	náhrada	méně nebezpečné materiály, omezení energie, rychlosti, rozsahu pohybu
	omezení interakcí	vyloučení dotyku s obsluhou, zvláště dotyku s citlivými částmi těla (omezení rozsahu pohybu)
Bezpečnostní prostředky a doplňující opatření	bezpečnostní prostředky	kryty, zámky, mříže, bezpečnostní snímače, funkce a systémy (potřeba nastavit podle konkrétních podmínek)
	doplňující opatření	nouzová zastavení, odpojení momentu, zabezpečení přístupu, možnosti úniku z nebezpečné zóny, prevence pádu
Opatření na straně uživatele	výstražná zařízení	signální světla, majáky, sirény, bezpečnostní tabulky a značení
	administrativní opatření	SOP, školení, inspekce, kontroly bezpečnosti práce
	osobní ochranné prostředky	ochranný oděv, boty, brýle, rukavice apod.

2.2 Hledisko efektivity práce

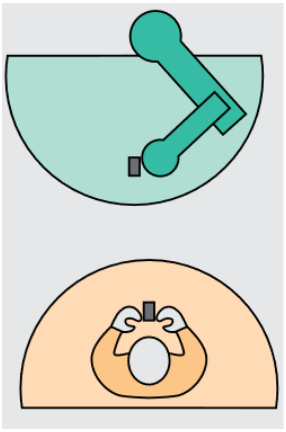
Jak bylo zmíněno v přecházející kapitole, pracoviště určená ke spolupráci člověka s robotem, musí být dostatečně zabezpečena, aby nedošlo k újmě na zdraví člověka nebo k materiální škodě způsobené robotem. Ovšem aby kooperace mezi člověkem a robotem mohla být efektivní, musí být zajištěny další faktory např. komunikace člověka s robotem, koordinace práce, zda bude navazující nebo zda bude člověk a robot pracovat zároveň na stejném úkolu. Průmyslové úkoly, na kterých spolupracuje lidský operátor s kolaborativním robotem, lze charakterizovat jako scénáře spolupráce. [16]

2.2.1 Scénáře spolupráce člověka s robotem

Ve scénáři spolupráce vždy sdílí člověk a kolaborativní robot stejný pracovní prostor, na kterém provádí výrobní procesy, jako montáž, kontrola materiálu aj. Každý scénář tedy zahrnuje lidského operátora, robot, výrobek/obrobek a výrobní procesy. [16]

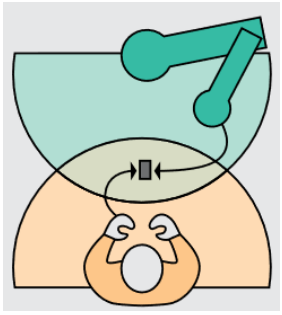
Tyto scénáře lze rozdělit do 4 různých kategorií spolupráce, které jsou vždy definovány podle prolnutí práce operátora a práce kolaborativního robota, při konkrétním výrobním procesu. Správná kategorizace pomáhá při pořizování a programování robota, jelikož vytyčí požadované vlastnosti a schopnosti robota pro výrobní proces. Tyto kategorie jsou:

- **Koexistence –** Operátor a kolaborativní robot mají svůj výrobní proces a každý pracuje zvlášť na svém výrobku. Kolaborativním prvkem, který se v tomto scénáři objevuje, je možnost vzájemného sdílení pracovního prostoru, kdy člověk a robot pracují vedle sebe bez nutnosti oddělit robota plotem. Robot tedy musí jen splňovat bezpečnostní požadavky probírané v kapitole 2.1 a uvědomovat si přítomnost operátora.



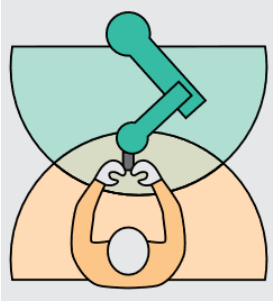
Obr. 9 – Kategorie 1 – Koexistence. [17]

- **Simultánní spolupráce –** Operátor a kolaborativní robot mají sice každý svůj výrobní proces, ale pracují na stejném výrobku ve stejný čas. Výrobní procesy na sobě nejsou závislé a nijak na sebe nenavazují. Robot si pouze musí prostorově uvědomovat operátora a jeho požadavky na splnění procesu. Tento scénář umožňuje souběžnou práci na výrobku, což minimalizuje dobu přenosu výrobku mezi robotem a člověkem a zefektivní práci a využití prostoru.



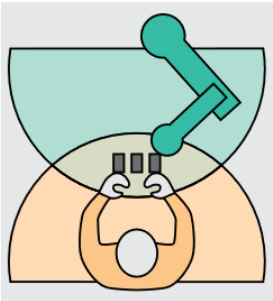
Obr. 10 – Kategorie 2 – Simultánní spolupráce. [17]

- **Sekvenční spolupráce –** Operátor a kolaborativní robot provádějí své výrobní procesy sekvenčně na stejném výrobku. Existují tedy časové závislosti mezi procesy operátora a robota. Konečný stav výrobku po výrobním procesu operátora je vstupním stavem pro výrobní proces robota nebo obráceně. Využívá se především v situacích, kdy se v procesu vyskytuje zdlouhavá monotónní činnost, a to za účelem zlepšit pracovní podmínky pro operátora.



Obr. 11 – Kategorie 3 – Sekvenční spolupráce. [17]

- **Vzájemná podpora –** Operátor a kolaborativní robot pracují při společném výrobním procesu interaktivně na stejném výrobku. Prováděné akce jsou vždy určitým způsobem závislé neboli jeden bez druhého by nebyl schopen daný úkol splnit. Např. operátor připevní šrouby na správné místo a robot je zašroubuje nebo může robot působit jako fyzická dopomoc operátorovi přidržováním výrobku v dané poloze. [16]

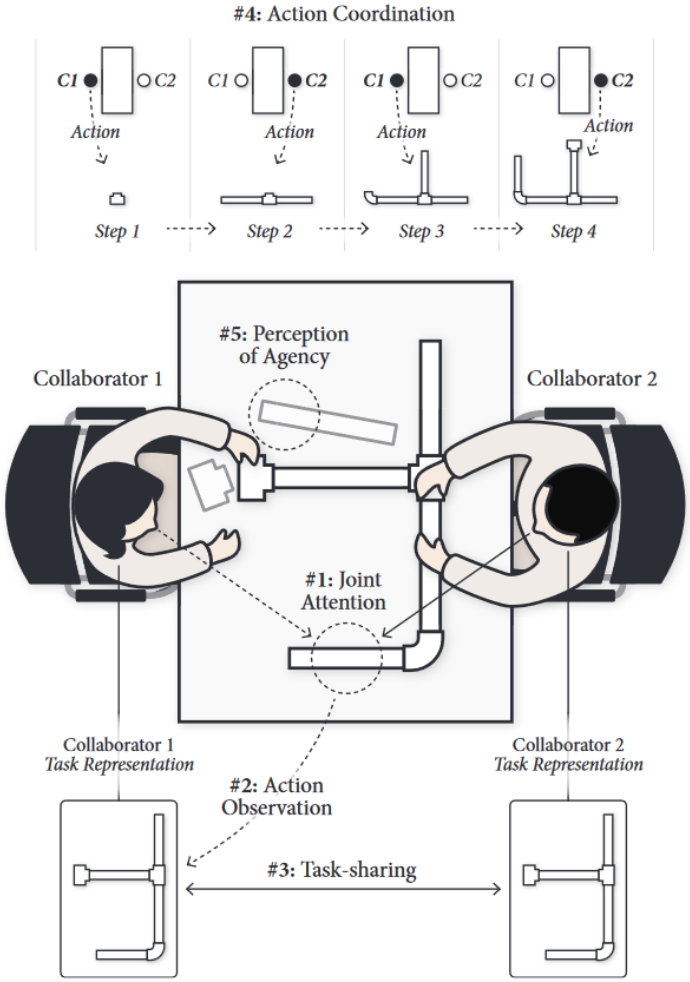


Obr. 12 – Kategorie 4 – Vzájemná podpora. [17]

2.2.2 Koordinace práce člověka s robotem

Vzájemná spolupráce dvou a více lidí, případně skupin, vyžaduje vždy určitou koordinaci a rozdělení práce, za účelem co nejefektivnějšího dosáhnutí stanoveného cíle. K dosažení stanoveného společného cíle je potřeba, aby všichni spolupracovníci koordinovali své akce, sdíleli své znalosti a komunikovali ohledně jednotlivých činností. Jen tak lze dosáhnout efektivního a společného pochopení cíle. Velice podobně to musí fungovat i v případě spolupráce člověka s robotem. Robot musí se svým lidským spolupracovníkem dostatečně komunikovat a musí mu zprostředkovat informace o svých záměrech či cílech. Současně musí rozumět svému spolupracovníkovi a efektivně zkoordinovat svou činnost s jeho. [18]

Podle výzkumu z roku 2006, týkajícího se společných činností, by měli lidé při spolupráci obecně čerpat z pěti klíčových mechanismů – *společná pozornost, pozorování činnosti, sdílení úlohy, koordinace činnosti a vnímání postupu* [19]. Ve výzkumu kolaborativních robotů by se měly tyto mechanismy brát v potaz, jelikož při spolupráci robota s člověkem lze z některých mechanismů vycházet.



Obr. 13 – Základní mechanismy společných činností při spolupráci. [18]

- **Společná pozornost** (Joint Attention) – Tento mechanismus říká, že spolupracovníci by si měli navzájem uvědomovat, co ostatní vnímají či nevnímají. V případě potřeby upozornění spolupracovníka lze využít prostředky jako jsou gesta, nebo slovní popis. Tento mechanismus se snaží sjednotit pohled na pracovní prostředí a orientaci v něm. V oblasti robotiky se tomuto mechanismu věnovali výzkumníci asi nejvíce ze všech.
- **Pozorování činnosti** (Action Observation) – Spolupracovníci by si měli uvědomovat, co ostatní dělají nebo by mohli dělat. V případě robota je to podstatné například v oblasti bezpečnosti anebo v případě podpůrného scénáře spolupráce. Pokud si robot bude uvědomovat, v jaké fázi pracovního procesu je jeho lidský kolega, může efektivněji načasovat další krok činnosti nebo předvídat možnou kolizi.

- **Sdílení úlohy** (Task-sharing) – K efektivnímu předvídání činnosti spolupracovníků, které není založené na pozorování činnosti, je potřeba znát spolupracovníkův následující úkol.
- **Koordinace činnosti** (Action Coordination) – Důležitým rysem spolupráce je to, jak spolupracovníci upravují své akce vůči sobě navzájem. Všichni, kteří se podílí na daném úkolu, vyhodnocují v čase a prostoru, co může každý zvládnout sám a naopak, kde je potřeba spolupracovat k dosažení cílů. Při spolupráci člověka s robotem je potřeba dopředu vytvořit plán, který specifikuje cílový produkt a jednotlivé role, které v tomto plánu hrají člověk a robot.
- **Vnímání postupu** (Perception of Agency) – Mechanismus, který úzce souvisí s koordinací činností. Jde o vnímání toho, jak na sebe navazují jednotlivé činnosti prováděné jednotlivými spolupracovníky. Výzkum tohoto mechanismu je v robotice omezen na zkoumání, jak by roboti mohli pracovat, aniž by se učili jen zrcadlovým napodobováním. [18, 19]

Tab. 3 – Příklady koordinované spolupráce člověka s robotem [16]

Scénář	Úkol operátora	Úkol robota
Společná manipulace	Člověk i robot drží výrobek společně. Člověk řídí směr a cestu pohybu.	Robot drží váhu výrobku.
Uchycení	Člověk leští držený výrobek.	Robot drží výrobek a polohuje podle naučených požadavků
Předání	Člověk bere od robota výrobek a odkládá ho stranou.	Robot předává člověku výrobek. Rychlost předání a pohybu upravuje podle člověka.
Montáž	Montážní akce se rozdělují mezi člověka a robota podle náročnosti úkonu, požadavků na přesnost aj.	
Pick-and-place	Člověk vybírá náhodně předmět k umístění.	Robot si vybírá předmět, zatímco současně předvídá pohyby člověka.
Podávání	Člověk si bere od robota díl a provádí montáž.	Robot postupně podává díly potřebné k montáži podle postupu.
Pájení	Člověk upravuje pozici nástroje robota. Polohuje pájecí drát a následně provádí pájení.	Robot drží pájecí drát přesně podle polohy nastavené člověkem.
Osvětlení	Člověk pracuje s díly na stole.	Robot s připevněným zdrojem světla poskytuje přímé osvětlení pro práci člověka a současně se snaží předcházet kolizím.
Kontrola	Člověk zašroubuje všechny šrouby.	Robot kontroluje zašroubování všech šroubů a upozorní na případný chybějící šroub.
Vrtání	Člověk určí místo pro vrtání během práce robota.	Robot vrtá díru na určeném místě. Pohyb při vrtání omezen pouze na osu vrtáku.
Povrchová úprava	Člověk specifikuje povrch, který má být broušen.	Robot brousí specifikovanou oblast. Pohyb omezen pouze ve směru rovnoběžném s upravovaným povrchem.
Šroubování	Člověk vloží šrouby do otvorů na jedné straně desky.	Robot utahuje šrouby/matice ze strany druhé.

2.3 Hledisko programování robotů

Programovaní robotů se v poslední době odklonilo od čistého programování směrem k intuitivnějším metodám. Intuitivní nové metody umožňují programování robotů i lidem, kteří nemají zkušenosti s programováním pomocí kódu a umožňuje to efektivnější a levnější využití robotů v praxi. Např. je výhodnější, aby svařovací robot naprogramoval člověk, který sice nemá zkušenosti s programováním, ale má spoustu zkušeností jako svářeč, než aby robota programoval zdatný programátor s minimální zkušeností se svářením. [16, 20]

Dříve byl člověk, programátor, do činnosti robota zapojen pouze off-line. Programátor napsal program, který byl striktně daný, nebral v potaz přítomnost člověka a nebylo možné je měnit za běhu systému, pokud nedošlo k chybě a nebylo nutno ji odstranit. Robot pak na základě takového programu pracuje v prostředí, které předpokládá programátor a jehož součástí není lidský operátor. Ovšem v oblasti kolaborativní robotiky je to už jinak. Operátor se pohybuje v pracovním prostoru, což dodává prostředí nepředvídatelnost. Práce operátora pak ovlivňuje činnost robota za chodu čili ovlivňuje program on-line. Dá se tedy říct, že programování kolaborativního robota probíhá nepřetržitě během jeho činnosti. [16, 20]

Operátor může upravovat nebo ovlivňovat program robota explicitně nebo implicitně. Explicitní zapojení člověka probíhá jako přímá komunikace operátora směrem k robotu, tj. operátor posílá robotu informace nebo pokyny. Explicitní komunikace může probíhat například pomocí hlasových pokynů nebo jasně stanovených gest. Implicitní zapojení oproti tomu stojí na nepřímém ovlivňování činnosti robota. Robot průběžně snímá činnost operátora a podle toho vhodně mění svou činnost za účelem efektivity a bezpečnosti práce. [16]

Na základě vlivů operátora, zmíněných v odstavcích výše, definují El Zaatari a spol. [16] tři programovací vlastnosti, které umožňují robotu pružně jednat a / nebo být intuitivně programován. Tyhle vlastnosti jsou:

- **Komunikace –** Operátor pro ovládání robota využívá verbální nebo neverbální komunikační kanál. Verbální komunikační kanál je standardně lidský jazyk. Mezi neverbální se řadí gesta, pohled, pozice hlavy, haptika a také uživatelské rozhraní. Programátor, plnící off-line roli programování, definuje možné akce robota a zajišťuje základní řízení pohybu. On-line vliv operátora je většinou explicitní. Operátor svými pokyny spouští předem definované akce. Komunikace bude více rozebrána v kapitole 2.4.
- **Optimalizace –** Aspekty v okolí robota, jako jsou překážky, zařízení a pozice nástrojů, jsou matematicky modelovány jako hodnotící funkce robota. Podle těchto funkcí je daný program robota optimalizovaný podle požadavků na konkrétní operace, například aby minimalizoval zátěž operátora, časovou náročnost nebo spotřebovanou energii. U off-line vývoje navrhuje programátor hodnotící funkce a algoritmy pro optimalizaci. Při činnosti robota je on-line vliv

operátora čistě implicitní, jelikož sám operátor je součástí nějaké hodnotící funkce.

- **Učení –** Robot se učí dovednosti, které jsou podobné činnosti člověka. Proces učení probíhá například metodou pokus / omyl, pomocí názorné ukázky, zpětnou vazbou nebo pokládáním otázek. Úkolem off-line programátora je návrh učícího algoritmu a poskytnutí vstupních dat, ze kterých se robot může učit. Během procesu může být vliv operátora explicitní. Operátor může provádět názorné ukázky, poskytovat robotu zpětnou vazbu nebo případně dodávat další data. Implicitně ho však také ovlivňuje jakožto součást pracovního prostoru.

Nejoblíbenější metody programování robotů v posledních letech, tak jak je klasifikuje Pieskä a spol. [20], jsou následující:

- programování pomocí teach pendantu (více rozebíráno v kapitole 2.4.2),
- simulace / off-line programování,
- učení pomocí názorné demonstrace.

Z těchto metod je nejpopulárnější využití teach pendantu, který je rozhraním mezi operátorem a robotem. Off-line programování je využívaný především pro zvýšení efektivity v nepřerušovaných provozech, ovšem není příliš vhodné pro programování kolaborativních robotů. Metoda názorné demonstrace je obecně využívána především u kolaborativních robotů. Princip spočívá v navádění robota, kdy operátor fyzicky nebo pomocí joysticku pohybuje s ramenem a nástrojem robota dle potřeby. Řídicí jednotka si během pohybu zaznamenává polohy kloubů a následně přehrává zaznamenaný vzorec pohybů a činností. [20]

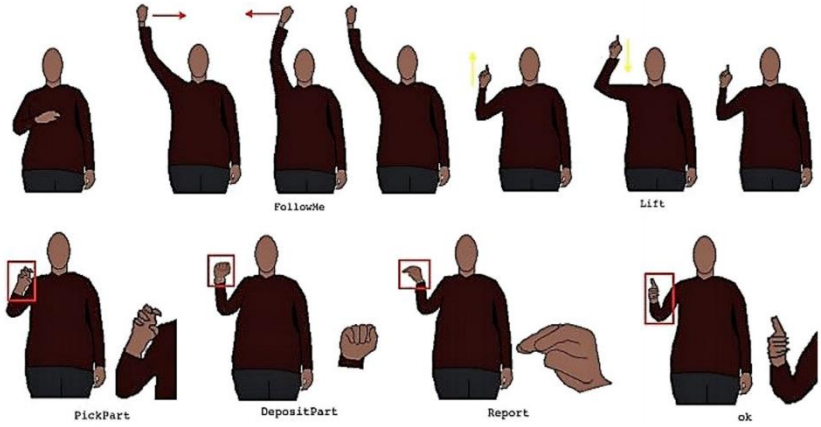
2.4 Komunikace mezi člověkem a robotem

V případě týmové práce lidé spoléhají primárně na vzájemnou komunikaci, bez které by nebylo možné úspěšně a efektivně splnit cíle. V případě programování a spolupráce člověka s kolaborativním robotem je to velmi podobné. Operátor dává robotu pokyny nebo zpětnou vazbu prostřednictvím různých komunikačních kanálů. Mezi nejběžnější způsoby komunikace operátora s robotem patří řeč a gesta (řeč těla), uživatelská rozhraní a haptika (kontakt dotykem), která je důležitá především z hlediska bezpečnosti a je částečně ošetřena v technické specifikaci ISO/TS 15066 (viz kap. 2.1.3).

2.4.1 Řeč a řeč těla

Mluvené slovo a řeč těla je pro člověka nejběžnějším způsobem komunikace, proto je vhodné umožnit, aby ovládání robota bylo pro operátora co nejpřirozenější. K oběma těmto komunikačním kanálům se přistupuje algoritmicky stejně. Je potřeba předem definovat pokyny, pomocí kterých bude operátor komunikovat s robotem a dále definovat, která slova, gesta, posunky atd. ovlivní robota a jak. V úvahu se musí brát i to,

že ne každé gesto či pozici těla je robot schopný rozpoznat, proto musí být pokyny jasné a jednoznačné a nápomocná může být i kombinace řeči a gest. Při vhodné volbě pokynů bude pro operátora spolupráce s robotem intuitivní a efektivní. [16]

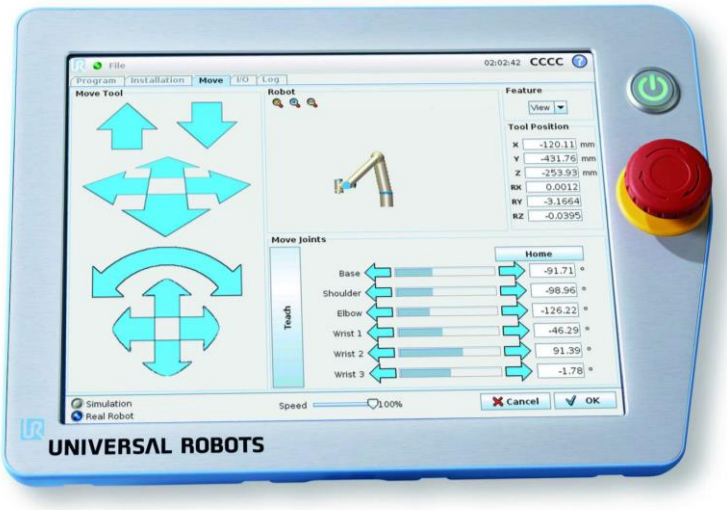


Obr. 14 – Základní gesta pro komunikaci s robotem [16]

2.4.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelská rozhraní jsou v dnešní době nedílnou součástí téměř každého robota, pracujícího v blízkosti člověka. Rozhraní umožňuje operátorovi (resp. programátorovi) vytvářet, upravovat a přizpůsobovat program kolaborativního robota, a to jak off-line tak on-line. Podle dostupných průmyslových řešení lze uživatelská rozhraní rozdělit do následujících kategorií:

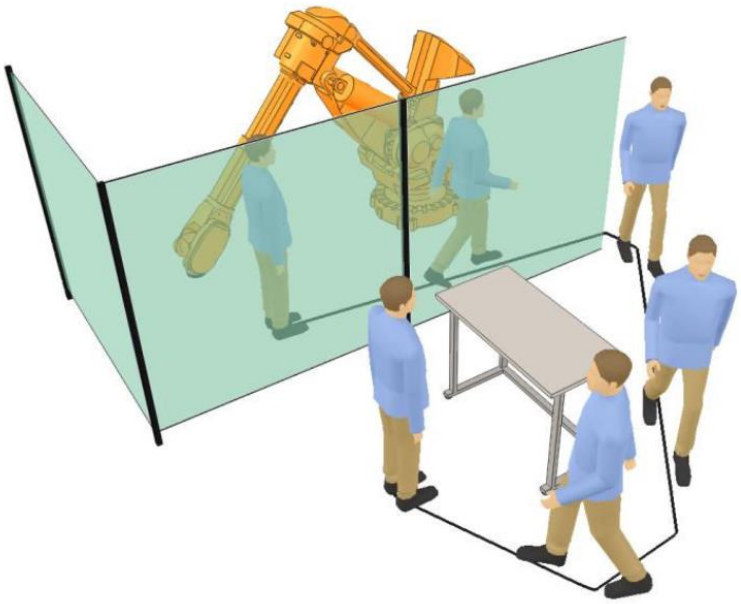
- **Cobot teaching pendant –** Rozhraní zabudováno přímo u robotu ve formě tabletu s ovládacími tlačítky a naváděcími joysticky. Umožňuje operátorovi vytváření pohybových pracovních vzorců. Možnosti ovládání jsou sice intuitivní a jednoduché, ale mohou být časové náročnější, nejsou příliš flexibilní a nejsou schopné pracovat s přítomností člověka v pracovním prostoru. [16, 21]



Obr. 15 – Teach pendant od společnosti Universal Robots. [22]

- **Icon-based programování –** Programování založené na práci s knihovnou ikon, kde každá má předdefinovanou určitou činnost. Program je vytvářen kombinací a posloupností ikon, které jsou navzájem propojené a tvoří diagram/schéma pokynů pro činnost robota. Tento způsob je velice jednoduchý na používání a mnohem jednodušší na naučení než klasické kódové programování. Má ovšem složité ladění a úpravu programu, nízkou flexibilitu a také nemá, stejně jako v prvním případě, možnost integrovat přítomnost člověka. [16, 23]

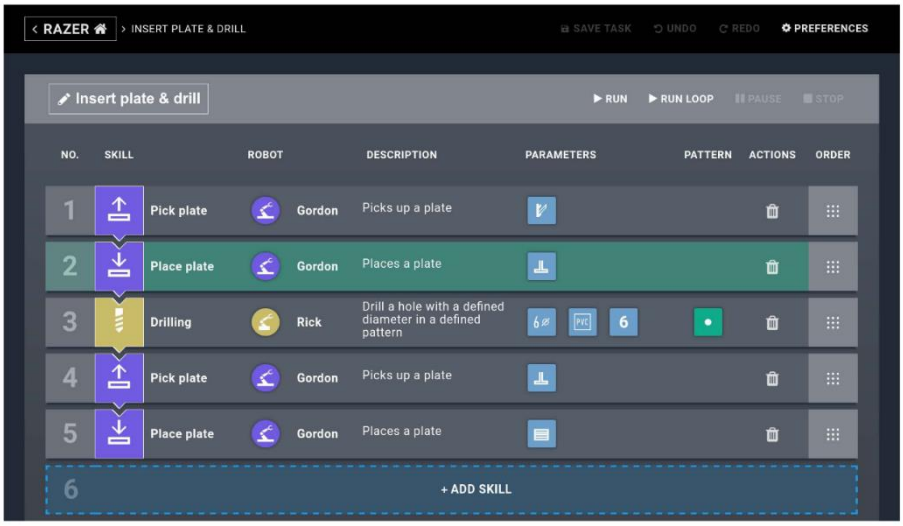
- **CAD-based programování** – V oblasti kolaborativní robotiky je výhodné především využití CAD softwarů s možností integrovat na robotické pracoviště lidské modely. Mezi takové aplikace se řadí V-REP nebo Visual Components. V-REP je 3D software, který umožňuje například plánování cesty člověka kolem robota a lze také pomocí 3D snímačů přidat skutečné pohyby člověka do simulace. V aplikaci Visual Components může programátor využít, v poslední době stále více populární, virtuální realitu. [16, 24]



Obr. 16 – Plánování cesty v software V-REP. [24]

- **Task-based programování** – Tento přístup pracuje s posloupností tří vrstev – *schopnosti robota, dovednosti robota* a *pracovní úloha*. Do první vrstvy, nazvané *schopnosti robota,* spadají všechny základní pohyby a funkcionality robota např. uchopení, pohyb robota na zadané souřadnice nebo hledání ve směru osy. Schopnosti robota jsou základními prvky pro vytvoření *dovedností robota.* Dovednosti využívají schopnosti robota a společně se signálem ze senzorů a kamer vytváří určité pohybové vzorce, např. zdvihnutí součásti nebo

utáhnutí šroubu. Zvolené sekvence a parametry dovedností následně tvoří *pracovní úlohu.* [25, 26]



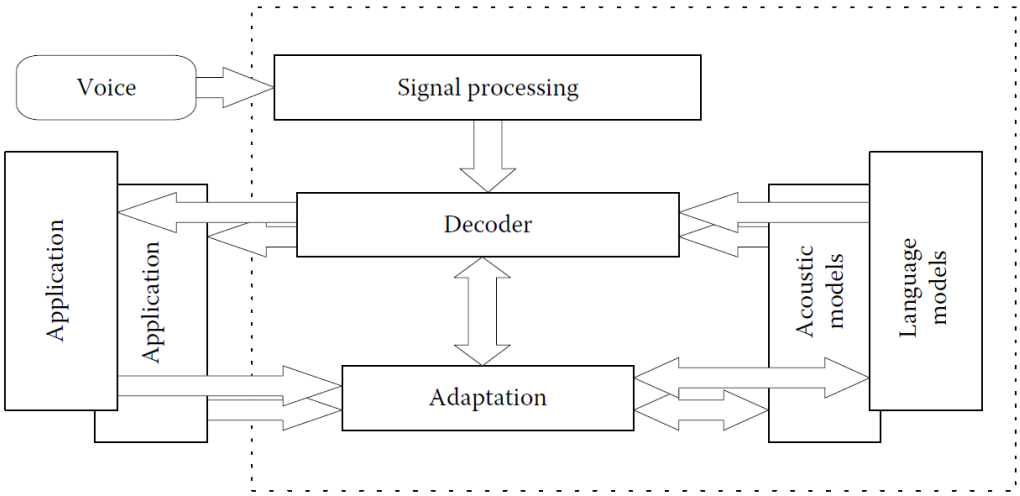
Obr. 17 – Rozhraní RAZER pro task-based programování. [26]

3 KOMUNIKACE S ROBOTY POMOCÍ HLASU

3.1 Techniky strojového rozpoznávání lidského hlasu

Výzkum v oblasti automatického rozpoznávání řeči probíhá už více než 50 let a vždy byl chápán jako důležitý článek pro zlepšení komunikace člověk-robot. Využití však nalezl až v posledních několika letech, díky zrychlujícímu se vývoji technologií, a dostal se tak do běžného života lidí skrze mobilní telefony, počítače a jiná zařízení. [27]

Základní systém pro rozpoznávání a zpracování řeči, jak je znázorněno na obr. 18, se skládá z několika komponent. Základem systému je dekodér, který přijímá výsledky rozpoznávání a ovlivňuje adaptaci dalších částí systému. Pro rozpoznávání řeči jsou v systému využity dva základní modely – akustický a jazykový, které se řadí i k základním metodám strojového zpracování hlasu. Akustické modely zpracovávají problematiku akustiky, dialektů, variabilitu prostředí a mikrofonů, ale také rozdíly v řeči u jednotlivých pohlaví a další. Jazykové modely pracují se znalostí častých slovních spojení, slov vyskytujících se často společně, jejich pořadím a případně se znalostí vykonávané operace, která se váže k hlasovému pokynu. [28]



Obr. 18 – Základní schéma systému pro rozpoznávání řeči od Microsoft Corporation. [28]

3.1.1 Matematická formulace

Složitý problém, jakým automatické rozpoznávání řeči bezesporu je, je potřeba rozdělit na řešení jednodušších podproblémů. Matematicky se jedná o statistickou problematiku, proto tahle formulace pracuje s pravděpodobnostmi. Základní statistická rovnice pro rozpoznávání řeči je následující:

$$\widehat{W} = \arg\max_{W} P(W|A) \tag{3.1}$$

kde W odpovídá originální sekvenci slov, které generátor slov použil, A je zachycený akustický signál, pomocí kterého je zvolena výsledná sekvence slov $\widehat{\mathrm{W}}$, která má nejvyšší zpětnou pravděpodobnost $P(W|A)$ – čili určuje se pravděpodobnost, s jakou bylo na vstupu použito slovo (sekvence slov) W, pokud byl akustický signál A.

Pomocí Bayesovy věty lze rovnici (3.1) přepsat do tvaru

$$\widehat{\mathrm{W}} = \arg\max_{W} \frac{P(W)P(A|W)}{P(A)} \tag{3.2}$$

a jelikož je maximalizace prováděna s neměnnou pravděpodobností $P(A)$ (akustický signál A se v průběhu maximalizace nemění), lze uvažovat pouze maximalizaci čitatele. Rovnice se tedy upraví na tvar

$$\widehat{\mathrm{W}} = \arg\max_{W} P(W)P(A|W) \tag{3.3}$$

kde $P(W)$ a $P(A|W)$ znázorňují pravděpodobnostní veličiny určené jazykovým a akustickým modelováním. [28, 29]

3.1.2 Akustické modely

Pro určení pravděpodobnostní veličiny $P(A|W)$ do rovnice (3.3) je potřeba právě komplexní statistický akustický model interakce mluvčího s akustickým procesorem. Veličina $P(A|W)$ udává pravděpodobnost, že pokud mluvčí vyslovil slovo W, akustický procesor produkoval signál A. Do akustického modelu je potřeba zahrnout vztahy mezi složkami řeči (fonémy) a většími řečovými jednotkami, jako jsou slova či fráze, které jsou hlavní oblastí zájmu v případě rozpoznávání řeči. [28, 29]

Akustické modely mají zásadní vliv na přesnost systému rozpoznání řeči a tvoří bezesporu jeho hlavní součást. Modely bývají nejčastěji založené na skrytých Markovových modelech, případně na umělých neuronových sítích. V praxi se musí automatické systémy pro rozpoznání řeči vypořádat s řadou faktorů, které mohou výrazně ovlivnit přesnost rozpoznání a musí být také zahrnuty do modelů. Mezi takové faktory lze zařadit kontext konverzace, vlivy prostředí, umístění mikrofonu, případně změny mluvčího a dialektu. [28, 29]

3.1.2.1 Skrytý Markovův model (angl. HMM)

HMM je nedeterministický konečný stavový automat, který mění stav vždy jednou v daném časovém elementu a slouží k reprezentaci pravděpodobnostního rozdělení skrze sekvence pozorování. HMM pracuje se dvěma předpoklady. První předpoklad uvažuje, že aktuální pozorovaná data v čase t byla generována procesem, se stavem S_t, který je před pozorovatelem v daný moment skrytý. Za druhé se předpokládá,

že aktuální stav S_t je, vzhledem k S_{t-1}, nezávislý na všech stavech v časech před $t-1$, čili splňuje tzv. Markovovu vlastnost. [28, 30]

Typický HMM používaný v systémech pro rozpoznávání řeči, jak uvádí Rabiner [31], obsahuje obvykle 4 následující kroky:

1. Definování sady zvukových tříd $V = \{v_1; v_2; \dots; v_L\}$ pro modelování (fonémy, slova).
2. Pro každou ze zvukových tříd získat dostatečnou tréninkovou sadu, u které je jisté, že spadá do dané třídy.
3. Na základě tréninkové sady stanovit nejlepší možný model λ_i pro každou ze zvukových tříd $v_1; v_2; \dots; v_L$
4. Během rozpoznávání vypočítat pravděpodobnost $P(A|\lambda_i), i = 1,2, \dots, L$ pro neznámý akustický signál A a v případě, že bude platit rovnice (3.4), ho přiřadit k třídě v_j.

$$P(A|W_j) = P(A|\lambda_j) = \max_{1 \le i \le L} P(A|\lambda_i) \tag{3.4}$$

3.1.3 Jazykové modely

Cílem jazykového modelování je výpočet pravděpodobnosti $P(W)$ pro sekvenci slov nebo fonémů. Jazykové modely jsou tedy statistické modely, které jsou složeny ze dvou hlavních částí – slovníku a gramatiky. Slovník představuje množinu slov, kterou je systém schopen rozpoznat a gramatika je soubor pravidel, které definují přípustné uspořádání a použití slov ze slovníku. [28, 32]

Pro systémy automatického rozpoznávání řeči je nejvíce rozšířené použití tzv. n-gram modelů, které používají předchozí $(n-1)$ slova jako jediný zdroj informací pro volbu parametrů modelu. [32]

Jak bylo zmíněno výše, jazykový model má za úkol určit pravděpodobnost $P(W)$, kterou je možné dále rozepsat následovně

$$P(W) = \prod_{i=1}^{n} P(w_i|w_{1,}w_2, \dots w_{i-1}) \tag{3.5}$$

kde $P(w_i|w_{1,}w_2, \dots w_{i-1})$ udává podmíněnou pravděpodobnost, že bude vysloveno w_i, pokud tomu předcházela sekvence slov $w_{1,}w_2, \dots w_{i-1}$. Tuto pravděpodobnost je však téměř nemožné vypočítat pro vyšší hodnoty i, proto se v praxi pracuje pouze s několika předchozími slovy a rovnice se upravuje do tvaru

$$P(W) = \prod_{i=1}^{n} P(w_i|w_{i-N+1,}w_{i-N+2}, \dots w_{i-1}) \tag{3.6}$$

což vede právě k použití jazykových modelů založených na n-gram modelu. [28]

3.2 Techniky generování strojového hlasu

Strojové rozpoznávání hlasu, probírané v předchozí podkapitole, je relativně složitá problematika. Oproti tomu strojová syntéza řeči je mnohem jednodušší a běžně se s ní člověk setkává v životě, například v podobě telefonních informačních systémů s automatickou odezvou, mobilních zařízeních, počítačích apod. Využití má například pro zrakově postižené, kterým umožňuje používat mobilní zařízení či počítače. Ovšem snad největší povědomí o technologii generování (syntézy) strojového hlasu dal Stephen Hawking, kterému umožnila „normálně“ komunikovat s okolím i přes své postižení.

3.2.1 Syntéza řeči z textu

Syntéza řeči z textu je technologie, která umožňuje převod libovolného psaného textu na strojové mluvené slovo. První pokusy o syntézu řeči se u veřejnosti nesetkali s vysokou oblibou, protože generovaný hlas byl příliš umělý a nepřirozený, a to i přes to, že umožnily např. slepým lidem nechat si předčítat knihu. Současné moderní technologie však dokážou generovat hlas, který je téměř k nerozeznání od opravdového lidského hlasu. Proto jsou systémy pro syntézu řeči dnes hojně používány ve spoustě aplikacích. [33]

4 NÁVRH OVLÁDÁNÍ ROBOTA UR3 HLASEM

4.1 Volba robotického systému

Pro experiment a demonstraci možného řešení ovládání pomocí hlasu jsem zvolil robota firmy Universal Robots, konkrétně model UR3, z následujících důvodů:

1. Tento model je dostupný v laboratoři ústavu.
2. Společnost AMTECH, spol. s r.o., jakožto dodavatel robotů Universal Robots v ČR, projevila zájem o spolupráci v tomto směru.
3. Existuje několik knihoven, implementovatelných do jazyka Python, které umožňují ovládání robotů UR prostřednictvím psaného kódu.
4. Součástí programového vybavení robota je software pro simulaci činnosti robota.

Tab. 4 – Vybrané základní charakteristiky a specifikace modelu UR3 [34]

Specifikace	
Kolaborativnost	17 bezpečnostních funkcí včetně monitoringu lokte, dálkové ovládání dle ISO 10218
Zatížení	3 kg
Dosah	500 mm
Programování	Grafické uživatelské rozhraní s 12 palcovou dotykovou obrazovkou s připevněním
IP klasifikace	IP54
Hlučnost	< 65 dB(A)
Vlhkost	90% RH (bez kondenzace)
Rozsah pohybu	
Základna	± 360
Rameno	± 360
Loket	± 360
Zápěstí 1	± 360
Zápěstí 2	± 360
Zápěstí 3	neomezený
Opakovatelnost	± 0.03 mm
Rozměry	
Průměr	ø 128 mm
Materiály	hliník, plast, ocel
Hmotnost	11.2 kg

Šestiosého robota UR3 je možné bez problému integrovat do jakéhokoli výrobního procesu, kde bezpečně může pracovat v blízkosti člověka, a to bez ohledu na odvětví. Programování je velice jednoduché a intuitivní díky lehkému responzivnímu tabletu, taktéž nastavení robota je snadné a rychlé. Robot je také možno velice snadno přesunout na jiné místo a zapojit do jiného výrobního procesu, což přispívá k rychlé návratnosti

investic. Navíc v případě poruchy lze robota jednoduše opravit, jelikož má snadno vyměnitelné otočné klouby. [34]

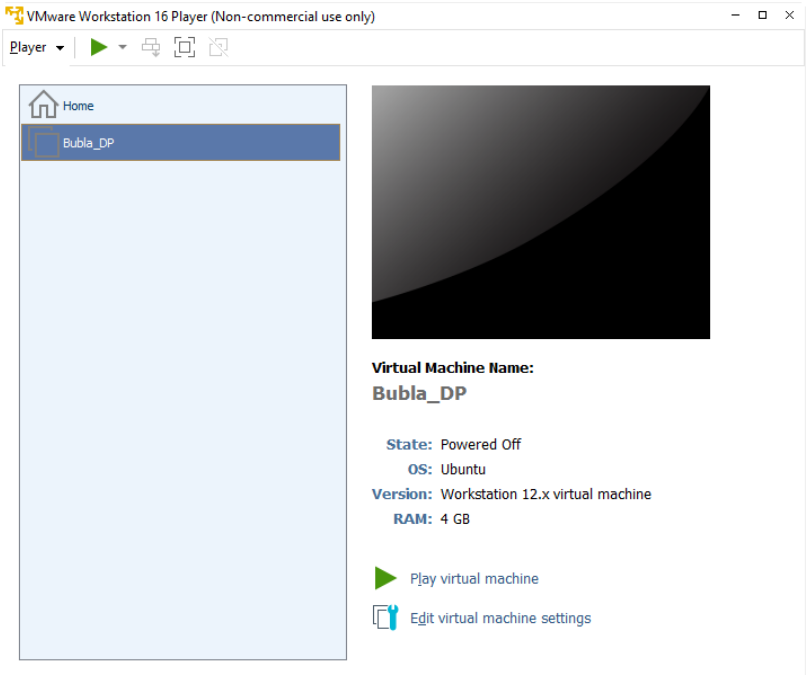
4.2 Návrh koncepce experimentu

V současné průmyslové praxi není ovládání robotů pomocí hlasu příliš rozšířeno, proto byl navržen experiment, který má otestovat možnost ovládání robota UR3 pomocí hlasu. Pro provedení experimentu jsem měl snahu využít běžně dostupných technologií, proto je možné experiment provést na standardním notebooku či počítači s mikrofonem. Vytvořený program využívá knihovnu, která umožňuje vzájemné propojení programu s robotem v simulaci přes přiřazenou IP adresu.

Reálné řešení experimentu zahrnovalo řešení problému s digitalizací hlasu, volbu vhodných knihoven, správného a efektivního využití možností zvolených knihoven. Experiment testuje ovládání robota na jednoduchém programu typu pick-and-place, kde robot setrvává v poloze, dokud nedostává následující povel ve formě hlasového vstupu. Snažil jsem se zvolit vhodné hlasové povely tak, aby byly dostatečně intuitivní a zároveň bylo rozpoznávání povelů konzistentní.

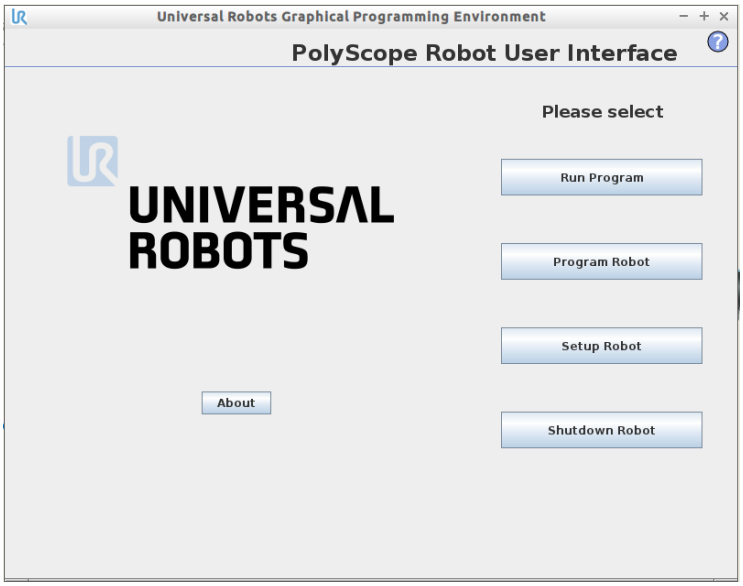
4.3 Simulace činnosti robota

Simulace robota probíhala v off-line simulačním programu PolyScope 3.15.0. Jelikož je PolyScope vytvořený pro systém Linux, pro spuštění programu na systému Windows bylo potřeba využít virtualizační program VMware Workstation, který umožňuje spustit virtuální stroj se systémem Linux.



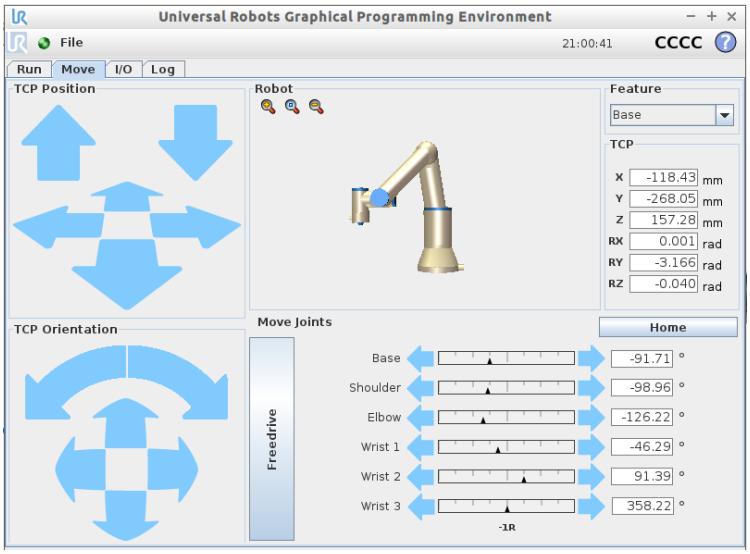
Obr. 19 – Prostředí virtualizačního programu VMware Workstation 16.

Z domovské plochy virtuálního stroje je možné zvolit jednoho ze tří robotů série CB (UR3, UR5, UR10). Jelikož skutečný robot ze školní laboratoře je ze série CB, byla zvolena verze PolyScope určená pro CB sérii. V případě potřeby je však možné používat i nové verze PolyScope určené pro sérii robotů E (UR3e, UR5e, UR10e, UR16e), pro které bude program taktéž funkční.



Obr. 20 – Úvodní obrazovka uživatelského rozhraní pro robota UR.

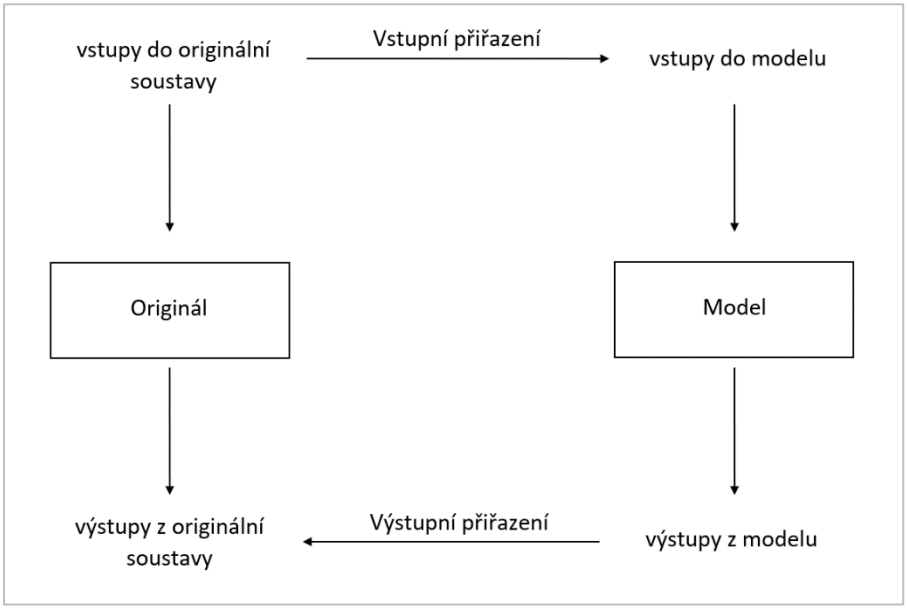
Po spuštění off-line simulace nabízí simulační program stejné možnosti, jako v případě ovládání robota on-line pomocí teach pendantu. Je možné vytvořit pro robota program nebo ho spustit, což umožní pohybovat s robotem v simulaci za pomoci ovládacích šipek nebo zadáním rotací či souřadnic. Pro potřeby diplomové práce však nebylo potřeba vytvářet v simulaci program nebo využívat ovládacích šipek, jelikož veškeré pokyny jsou obsažené v Python programu.



Obr. 21 – Prostředí off-line simulátoru PolyScope 3.15.0. určeného pro sérii robotů CB.

Výhodou využití simulace je možnost vyzkoušet a vyhodnotit vytvořený model (program), aniž by hrozilo poškození robota či zranění operátora, avšak při zachování hodnot a klíčových vlastností tak, jako by se jednalo o skutečný proces. Využití simulace obecně přináší snížení nákladů, snížení rizika, zvýšení produktivity a kvality, zvýšení rychlosti rozhodovaní aj. [35]

Modelem rozumíme systém, který je používaný jako náhrada za reálný systém a vykazuje chování, které je v důležitých aspektech shodné se skutečným systémem. V době testování modelu nemusí být nutně reálný systém již vybudovaný, naopak může pomoci předejití chybám a úpravám systému. Model je nejčastěji zjednodušenou verzí originálu a výběr vlastností, které má obsahovat, záleží vždy na účelu, kterému má model sloužit. Na obr. 22 můžeme vidět schéma znázorňující vztah mezi originálem a modelem. Z obrázku lze vyčíst, že máme-li model, pak je za jistých okolností možné obejít použití reálného řešení, a to za použití vstupního a výstupního přiřazení. [35, 36]



Obr. 22 – Schéma vyjadřující vztah mezi originálem a modelem. [35]

Prvním impulsem k aplikaci modelu a simulace byla nemožnost pracovat v robotické laboratoři ústavu. Následně jsem si uvědomil, že se jedná o modifikovanou myšlenku digitálního dvojčete, která představuje jednou z definic čtvrté průmyslové revoluce a umožňuje integrování technologií, které stírají rozdíl mezi fyzickou a digitální hranicí kyberfyzikálních systémů.

5 POPIS REALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ

5.1 Digitalizace hlasu

Pro digitalizaci a rozpoznání hlasu v rámci programu využil možnosti knihovny *SpeechRecognition* [37]. Jedná se o knihovnu jazyka Python, která obsahuje různé moduly a API pro rozpoznávání řeči a to:

- CMU Sphinx,
- Google Speech Recognition,
- Google Cloud Speech API,
- Wit.ai,
- Microsoft Azure Speech,
- Microsoft Bing Voice Recognition
- Houndify API
- IBM Speech to Text
- Snowboy Hotword Detection

Rozpoznávání řeči v provedeném experimentu zajišťoval modul Google Speech Recognition, který využívá pokročilé algoritmy neuronových sítí pro hluboké učení a podporuje více než 125 jazyků a jazykových variant. [38] Aplikaci této knihovny a konkrétního modulu můžeme vidět na obr. 23, kde je ve výpisu využito bloků *try* a *except*.

```
import speech_recognition as sr

r = sr.Recognizer()
mic = sr.Microphone()

with mic as source:
    print("Say something!")
    audio = r.listen(source)

try:
    value = r.recognize_google(audio)
    print("You said ... {}".format(value))

except sr.UnknownValueError:
    print("Sorry, I didn't understand.")

except sr.RequestError as e:
    print("Couldn't request results from Google Speech Recognition service; {0}".format(e))
```

Obr. 23 – Ukázka aplikace knihovny *SpeechRecognition*.

5.2 Program v jazyku Python

Jazyk Python, který jsem použil k vytvoření programu experimentu, je v dnešní době velice rozšířen a oblíben. Dokonce se v budoucnu očekává další nárůst využití právě tohoto jazyka. [39] Jedná se o snadno naučitelný a výkonný programovací jazyk s efektivním přístupem k objektově orientovanému programování. Díky elegantní syntaxi, dynamickému typování a také jeho interpretované povaze je Python ideální jazyk pro skriptování a vývoj aplikací na většině platforem. Obrovská výhoda tohoto jazyka, která bezesporu ovlivnila jeho oblibu, je rozsáhlá síť bezplatných knihoven, modulů, programů a nástrojů třetích stran. Tato síť, společně s dobrou čitelností jazyka, výrazně přispívají k uživatelské přívětivosti. [40]

Pro vytvoření programu jsem využil společně možností knihovny *SpeechRecognition* a knihovny *urx* [41], které jsou obě dostupné na webové službě GitHub. Jak bylo zmíněno, knihovna *SpeechRecognition* využívá pro rozpoznávání různé moduly a pro potřeby diplomové práce bylo konkrétně využito Google Speech Recognition. Knihovna *urx* umožňuje plné ovládání robotů společnosti Universal Robots za použití Python skriptu.

Vytvořený program obsahuje několik základních funkcí, které uvádějí robota do pohybu směrem na předem stanovené pozice, které lze upravovat v souboru *coordinates.py* (viz příloha č.4). Funkce se spouští vždy pomocí některého z podporovaných hlasových pokynů uvedených v tabulce č.5. Dále na obr. 25 můžeme vidět ukázku základní funkce, která umožňuje pohyb robota, a kterou využívá většina dalších funkcí.

Tab. 5 – Podporované hlasové pokyny pro ovládání robota.

Pokyn	Popis
turn on / home	uvede robot to výchozí polohy
turn off	robot se přesune do definované polohy a ukončí se komunikace se simulačním programem
take part	robot se přesune nad součást, zdvihne součást a vrátí se zpět nahoru
move to A / move to B	přesun robotické paže do polohy A nebo B
drop	uložení součásti na pozici A / B
move linear	umožní zadat vlastní polohu nástroje v souřadnicích X, Y, Z
move joints	umožní zadat vlastní natočení jednotlivých kloubů robotické paže

```
try:
    value = r.recognize_google(audio, language="cs-CZ")

    value = r.recognize_google(audio, language="sk-SK")
```

Obr. 24 – Zápis pro případné použití češtiny, resp. slovenštiny.

Předpokládá se, že angličtina jako celosvětový jazyk není překážkou, proto bylo pro univerzálnost zvoleno zadávání pokynů v anglickém jazyce. V případě potřeby je ovšem možné přidat argument *language* do bloku *try*, který je na obr. 23 a používat pro práci s programem i jiné jazyky, např. češtinu nebo slovenštinu.

```
def move_linear(xyz):
    x = xyz[0]
    y = xyz[1]
    z = xyz[2]
    rx = xyz[3]
    ry = xyz[4]
    rz = xyz[5]
    try:
        rob.movel((x, y, z, rx, ry, rz), a, v)
    except:
        while True:
            g_pos = rob.getl()

            if (
                round(g_pos[0], 3) == round(x, 3)
                and round(g_pos[1], 3) == round(y, 3)
                and round(g_pos[2], 3) == round(z, 3)
            ):
                break
            else:
                pass
```

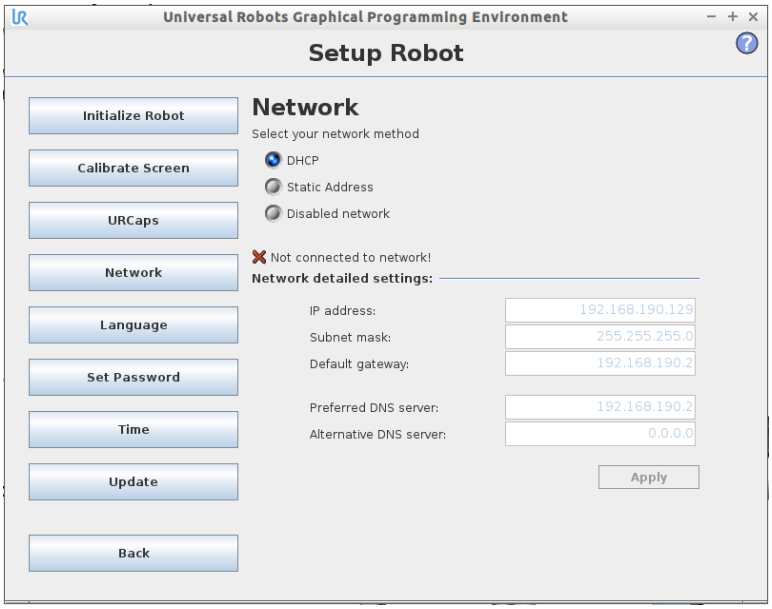
Obr. 25 – Výpis funkce *move_linear*, která umožňuje pohyb robota.

Celý skript programu, včetně skriptu obsahujícího souřadnice jednotlivých pozic, je obsažen v příloze 2 resp. 3. a lze ho rozčlenit do několika částí:

- **Úvodní část** – Zde se importují veškeré knihovny, které jsou pro danou úlohu potřebné, primárně SpeechRecognition a urx. Obě tyto knihovny musí být předem nainstalovány pomocí následujících příkazů:

> *pip3 install urx*
> *pip3 install SpeechRecognition*

- **Zadání globálních proměnných a inicializace komunikace se simulací –** Je potřeba získat a použít konkrétní IP adresu přiřazenou robotovi. Adresu lze zjistit při spuštění robota pod možnosti *Setup Robot / Network,* jak je znázorněno na obr. 26.



Obr. 26 – Prostředí nastavení robota, konkrétně záložka *Network,* kde se nachází robotova IP adresa.

- **Funkce pro rozpoznání řeči** – Základní funkce obsahující systém rozpoznávání. Pro rozpoznávání je zde zvolen modul Google Speech Recognition. Takto vypsaná funkce, jak lze vidět na obr. 27, vrací textový řetězec (třída *str*), ovšem pro některé pokyny v programu je potřeba využít číslovky. Proto je v programu použito ještě jedné, téměř totožné funkce, která navíc převádí výstup na číslovku (třídu *int*).

```
def voice_recognizer():

    r = sr.Recognizer()
    mic = sr.Microphone()

    with mic as source:
        print("Set your command ... ")
        r.pause_threshold = 1
        audio = r.listen(source)

    try:
        print("Robot is working ... \n")
        command = r.recognize_google(audio)

    except Exception as e:
        print(e)
        print("Recognition ERROR")
        return "None"

    return command
```

Obr. 27 – Výpis funkce *voice_recognizer*, zajišťující rozpoznání hlasu.

- **Funkce pro pohyb** – Jedná se o dvě funkce zajišťující buďto pohyb lineární (viz obr.25) nebo rotaci v jednotlivých kloubech. V těchto funkcích bylo potřeba využít zaokrouhlování hodnot aktuální polohy a hodnoty, se kterou byla porovnávána. To z důvodu, že robot se ani v simulaci nepřesune stoprocentně přesně, ale má malou odchylku.
- **Definice jednotlivých pohybů –** V této části jsou funkce, které využívají předchozí definované funkce pro pohyb nebo pro rozpoznání řeči společně s definovanými pozicemi z *coordinates.py*.
- **Hlavní program** – Obsahuje informace, které vypíše při spuštění programu a obsahuje if-statement zpracovávající rozpoznané hlasové povely

6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření funkčního programu, který umožní ovládání robota UR3 za pomoci hlasových pokynů.

V teoretické části práce jsem zpracoval dvě hlavní problematiky, a to problematiku ovládání kolaborativních robotů a problematiku komunikace s robotem pomocí hlasu. První zmíněná problematika byla popsána z hlediska bezpečnosti, efektivity práce, z hlediska programování robotů a s tím související komunikací mezi člověkem a robotem. Byly zde popsány normy a technické specifikace, týkající se spolupráce člověka a robota, dále také scénáře spolupráce a možnosti koordinace práce člověka s robotem. V případě posledního hlediska byly zmíněny nejrozšířenější možnosti programování kolaborativních robotů a možnosti komunikace včetně rozhraní člověk – robot.

Ve druhé problematice, týkající se komunikace pomocí hlasu, jsem práci zaměřil na techniky strojového zpracování lidského hlasu. Zde je popsána matematická formulace problému rozpoznávání hlasu a jsou rozebrány dva základní modely rozpoznávání, a to modely akustické a jazykové. Navíc je přidána zmínka o technikách generování strojového hlasu.

Z důvodu pandemických opatření jsem byl pro praktickou část nucen využít simulační program PolyScope, který je součástí softwarového vybavení robota UR3 od Universal Robots. Samotný program jsem napsal v programovacím jazyku Python. Simulace a vytvořený program byly následně propojeny za pomoci python knihovny *urx*. Pro zpracování hlasu byla v programu navíc využita knihovna *SpeechRecognition*, která umožňuje implementovat do programu různé moduly a API pro převod hlasu na text např. využitý modul Google Speech Recognition.

Možnosti ovládání robota pomocí hlasu jsem demonstroval na jednoduchém pick-and-place programu, a navíc byly přidány možnosti nastavení vlastních natočení kloubů nebo polohy nástroje. Hlasové pokyny jsem zvolil s ohledem na intuitivnost a univerzálnost, proto se jedná o krátké pokyny zadávané v angličtině. Během vytváření programu jsem tyto pokyny několikrát měnil tak, aby bylo rozpoznávání konzistentní a nebyla nutnost několikrát pokyn opakovat.

Výhodou vytvořené aplikace je možnost využití pro různé typy robotů a její funkčnost jak pro starou sérii CB, tak i pro novou E-sérii robotů Universal Robots. V případě praktického využití by však program musel být ještě upraven a doplněn o využití nástrojů a uchopovacích prostředků. V rámci závěrečné práce nebyla tato problematika řešena, a to jednak z časových důvodů, jednak z důvodu pandemických opatření. Nebyla ani explicitně vyžadována v zadání a netýká se přímo ovládání robota.

Kapitolami 2, 3 a 4 jsem se snažil naplnit zadání mé diplomové práce, navíc jsem v odst. 2.4 zmínil i využití gest člověka pro ovládání robota. Ovládání robota hlasem považuji za velmi perspektivní. Doporučuji navržené řešení rozšířit, experimentálně fyzicky ověřit a ve spolupráci s některou robotickou firmou se pokusit zpracovat konkrétní aplikaci.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SOPHIE HAND. A Brief History of Collaborative Robots. *Material Handling and Logistics* [online]. únor 2020 [vid. 2020-10-11]. Dostupné z: https://www.mhlnews.com/technology-automation/article/21124077/a-brief-history-of-collaborative-robots

[2] AXELENT GROUP. *Axelent X-Guard* [online]. 2. vyd. nedatováno [vid. 2020-10-27]. Dostupné z: https://www.axelent.com/products/machine-guarding/x-guard-machine-guarding/

[3] *History of the Cobots - The Cobots from Universal Robot* [online]. [vid. 2020-10-11]. Dostupné z: https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/news-centre/the-history-behind-collaborative-robots-cobots/

[4] *Universal Robots - UR Size* [online]. 12. červenec 2017 [vid. 2020-10-11]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=TNFn0zLSLio

[5] *swissRobotics.net - Gar nicht hölzern* [online]. [vid. 2021-02-23]. Dostupné z: http://swisstmeeting.ch/swissrobotics/gar-nicht-hoelzern.html

[6] ČTK. V Česku už je 120 robotů na 10 tisíc obyvatel. Modernizaci pohání nedostatek pracovníků v průmyslu. *Hospodářské noviny (iHNed.cz)* [online]. 1. únor 2019 [vid. 2020-10-17]. Dostupné z: https://byznys.ihned.cz/c1-66458980-mira-automatizace-v-prumyslove-vyrobe-roste-v-cesku-uz-je-120-robotu-na-10-tisic-obyvatel-modernizaci-pohani-nedostatek-pracovniku

[7] IFR. Robot density rises globally. *IFR International Federation of Robotics* [online]. [vid. 2020-10-17]. Dostupné z: https://ifr.org/news/robot-density-rises-globally

[8] *Investice do robotiky trhají rekordy* [online]. [vid. 2020-10-17]. Dostupné z: https://www.aubo.cz/clanky/investice-do-robotiky-trhaji-rekordy/

[9] GALLAGHER, Rachel Maya. *New Safety Standards for Collaborative Robots* [online]. [vid. 2020-10-11]. Dostupné z: https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/19403/New-Safety-Standards-for-Collaborative-Robots.aspx

[10] HULL, Tina a Darrell PAUL. *A Guide to Collaborative Robot Safety* [online]. [vid. 2020-10-11]. Dostupné z: https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/features/articles/34385

[11] MICHALOS, George, Sotiris MAKRIS, Panagiota TSAROUCHI, Toni GUASCH, Dimitris KONTOVRAKIS a George CHRYSSOLOURIS. Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces. *Procedia CIRP* [online]. 2015, **37**, CIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing, 248–253. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.08.014

[12] BARTOŠÍK, Petr. Bezpečnost kolaborativních robotů. *Automa - časopis pro automatizační techniku, s. r. o.* 2017, **23**(8–9), 88. ISSN 1210-9592.

[13] VILLANI, Valeria, Fabio PINI, Francesco LEALI a Cristian SECCHI. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics* [online]. 2018, **55**, 248–266. ISSN 0957-4158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2018.02.009

[14] ROSENSTRAUCH, Martin a Jorg KRUGER. *Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using ISO/TS 15066* [online]. 2017. Dostupné z: doi:10.1109/ICCAR.2017.7942795

[15] Automating robot systems safely and efficiently. *Pilz GmbH & Co. KG* [online]. 2016. Dostupné z: https://www.pilz.com/mam/pilz/content/uploads/flyer_solutions_for_robotics_en_2016_04_low.pdf

[16] EL ZAATARI, Shirine, Mohamed MAREI, Weidong LI a Zahid USMAN. Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems* [online]. 2019, **116**, 162–180. ISSN 0921-8890. Dostupné z: doi:10.1016/j.robot.2019.03.003

[17] WILHELM, Bauer, Bender MANFRED, Martin BRAUN, Peter RALLY a Oliver SCHOLTZ. *Lightweight robots in manual assembly – best to start simply! Examining companies' initial experiences with lightweight robots*. 2016.

[18] MUTLU, Bilge, Allison TERRELL a Chien-Ming HUANG. Coordination Mechanisms in Human-Robot Collaboration. In: *Proceedings of the HRI 2013 Workshop on Collaborative Manipulation* [online]. 2013. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235838952_Coordination_Mechanisms_in_Human-Robot_Collaboration

[19] SEBANZ, N, H BEKKERING a G KNOBLICH. Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences* [online]. 2006, **10**(2), 70–76. ISSN 13646613. Dostupné z: doi:10.1016/j.tics.2005.12.009

[20] PIESKÄ, Sakari, Jari KAARELA a Jari MAKELA. *Simulation and programming experiences of collaborative robots for small-scale manufacturing* [online]. 2018. Dostupné z: doi:10.1109/SIMS.2018.8355303

[21] PPMA. *Robot Programming Methods* [online]. [vid. 2021-02-09]. Dostupné z: https://www.ppma.co.uk/bara/expert-advice/robots/robot-programming-methods.html

[22] UR Teach Pendant MOVING | Get this image. *universal-robots | Skyfish Public Media Gallery* [online]. [vid. 2021-02-09]. Dostupné z: https://www.skyfish.com/p/universal-robots/all-files/16386711

[23] PATRICK SMITH, F., Dean P. HOLZWORTH a Michael J. ROBERTSON. Linking icon-based models to code-based models: a case study with the agricultural production systems simulator. *Agricultural Systems* [online]. 2005, **83**(2), 135–151. ISSN 0308521X. Dostupné z: doi:10.1016/j.agsy.2004.03.004

[24] ROHMER, E., S. P. N. SINGH a M. FREESE. V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework. In: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. 2013, s. 1321–1326. ISSN 2153-0866. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2013.6696520

[25] SCHOU, Casper, J.S. DAMGAARD, Simon BØGH a Ole MADSEN. *Human-robot interface for instructing industrial tasks using kinesthetic teaching* [online]. 2013. Dostupné z: doi:10.1109/ISR.2013.6695599

[26] STEINMETZ, F., A. WOLLSCHLÄGER a R. WEITSCHAT. RAZER—A HRI for Visual Task-Level Programming and Intuitive Skill Parameterization. *IEEE Robotics and Automation Letters* [online]. 2018, **3**(3), 1362–1369. ISSN 2377-3766. Dostupné z: doi:10.1109/LRA.2018.2798300

[27] YU, Dong a Li DENG. *Automatic Speech Recognition: A Deep Learning Approach* [online]. London: Springer-Verlag, 2015 [vid. 2021-03-03]. Signals and Communication Technology. ISBN 978-1-4471-5778-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-5779-3

[28] INDURKHYA, Nitin a Fred J. DAMERAU, ed. *Handbook of Natural Language Processing*. 2nd edition. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC, 2010. ISBN 978-1-4200-8592-1.

[29] JELINEK, Frederick. *Statistical Methods for Speech Recognition*. B.m.: MIT Press, 1997. ISBN 978-0-262-10066-3.

[30] GHAHRAMANI, Zoubin. An introduction to hidden markov models and bayesian networks. In: *Hidden Markov Models* [online]. B.m.: WORLD SCIENTIFIC, 2001 [vid. 2021-03-05], Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, Volume 45, s. 9–41. ISBN 978-981-02-4564-1. Dostupné z: doi:10.1142/9789812797605_0002

[31] RABINER, L. R. a B. H. JUANG. Hidden Markov Models for Speech Recognition — Strengths and Limitations. In: Pietro LAFACE a Renato DE MORI, ed. *Speech Recognition and Understanding* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1992, s. 3–29. NATO ASI Series. ISBN 978-3-642-76626-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-76626-8_1

[32] SARASWATHI, S. a T. V. GEETHA. Building Language Models for Tamil Speech Recognition System. In: Suresh MANANDHAR, Jim AUSTIN, Uday DESAI, Yoshio OYANAGI a Asoke K. TALUKDER, ed. *Applied Computing* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004, s. 161–168. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-540-30176-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-30176-9_21

[33] TAYLOR, Paul. *Text-to-Speech Synthesis*. B.m.: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-89927-7.

[34] UNIVERSAL ROBOTS A/S. *e-Series od Universal Robots* [online]. [vid. 2021-04-08]. Dostupné z: https://www.universal-robots.com/products/ur3-robot/

[35] LACKO, Branislav. Modelování a simulace v oblasti projektového řízení. In: *Modelování a simulace projektů*: *Sborník semináře MSP2001* [online]. nedatováno, s. 19. ISBN 80-214-1734-X. Dostupné z: http://prog-story.technicalmuseum.cz/images/autorske/Lacko/Modelovani-a-simulace.pdf

[36] SANCHEZ, P. J. Fundamentals of simulation modeling. In: *2007 Winter Simulation Conference*: *2007 Winter Simulation Conference* [online]. 2007, s. 54–62. ISSN 1558-4305. Dostupné z: doi:10.1109/WSC.2007.4419588

[37] ZHANG, Anthony. *Uberi/speech_recognition* [online]. Python. 2021 [vid. 2021-04-11]. Dostupné z: https://github.com/Uberi/speech_recognition

[38] Speech-to-Text: Automatic Speech Recognition. *Google Cloud* [online]. [vid. 2021-04-13]. Dostupné z: https://cloud.google.com/speech-to-text

[39] ROBINSON, David. The Incredible Growth of Python | Stack Overflow. *Stack Overflow Blog* [online]. 6. září 2017 [vid. 2021-04-11]. Dostupné z: https://stackoverflow.blog/2017/09/06/incredible-growth-python/

[40] ROSSUM, Guido van. *Python Tutorial* [online]. B.m.: Python Software Foundation, 2020. 3.8.3. Dostupné z: http://lib.21h.io/library/G7B3RFY7/download/GBMFTU3C/Python_3.8.3_Docs_.pdf

[41] ROULET-DUBONNET, Olivier. *SintefManufacturing/python-urx* [online]. Python. B.m.: Sintef Manufacturing, 2021 [vid. 2021-04-11]. Dostupné z: https://github.com/SintefManufacturing/python-urx

[42] KOLÍBAL, Zdeněk, ed. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

[43] PSUTKA, Josef. *Komunikace s počítačem mluvenou řečí*. Praha: Academia, 1995. ISBN 978-80-200-0203-7.

[44] PECINOVSKÝ, Rudolf. *Python: kompletní příručka jazyka pro verzi 3.9*. První vydání. Praha: Grada, 2020. Knihovna programátora. ISBN 978-80-271-1269-2.

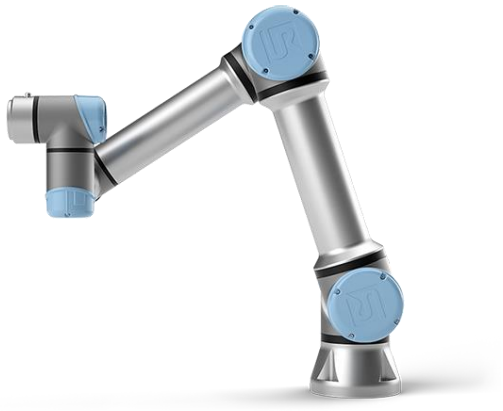
8 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Typy kolaborativních robotů nabízených v ČR
Příloha č. 2: Robot UR3 v robotické laboratoři UAI
Příloha č. 3: Hlavní program v jazyku Python
Příloha č. 4: Seznam pozic pro hlavní program (coordinates.py)

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Typy kolaborativních robotů nabízených v ČR

Model: **UR5e**
Výrobce: **Universal Robots**
Užitečné zatížení: **5 kg**
Dosah: **850 mm**
Další vlastnosti a funkce: půdorys 149 mm; klasifikace IP54; hmotnost 20.6 kg



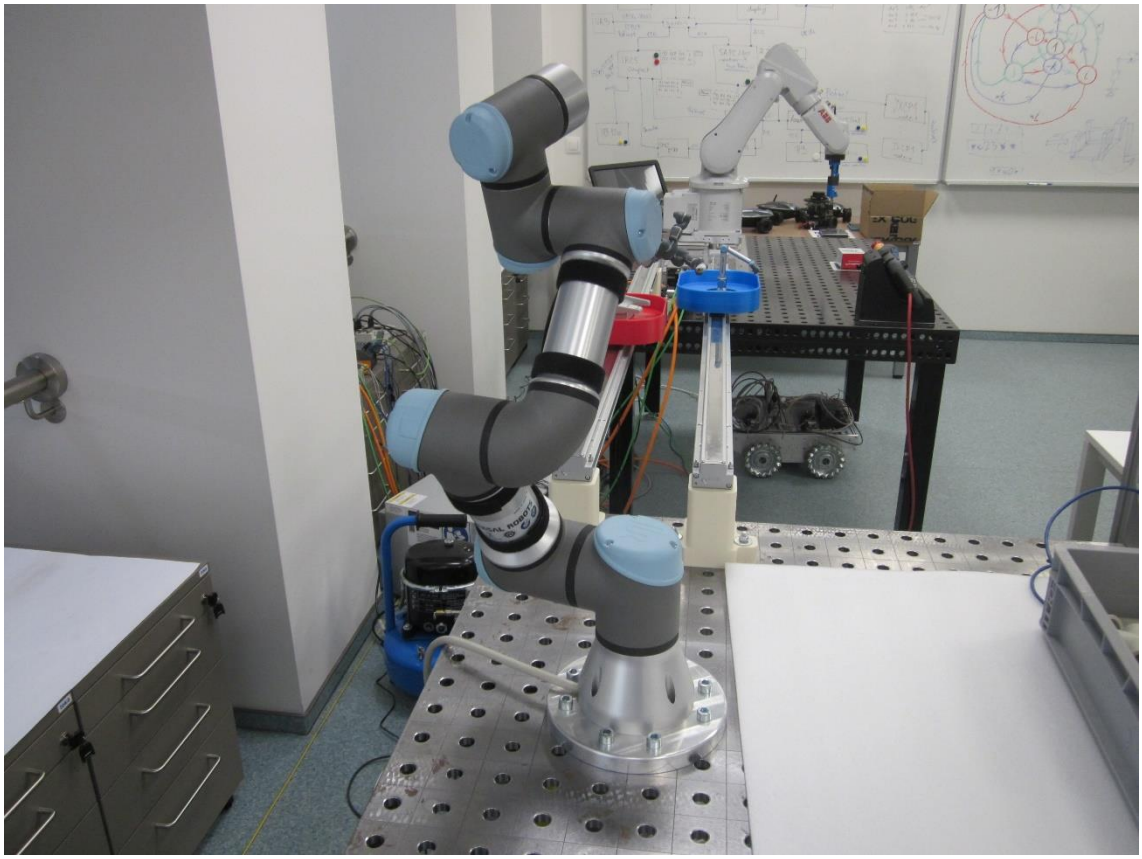
Model: **YuMi IRB 14000**
Výrobce: **ABB**
Užitečné zatížení: **0.5 kg**
Dosah: **500 mm**
Další vlastnosti a funkce: dvě paže, půdorys 399 mm;
klasifikace IP30; hmotnost 38 kg

Model: **AUBO i5**
Výrobce: **Aubo Robotics**
Užitečné zatížení: **5 kg**
Dosah: **924 mm**
Další vlastnosti a funkce: klasifikace IP54; hmotnost 24 kg; možná i instalace na strop/zeď

Model: **LBR iiwa 7 R800**
Výrobce: **KUKA**
Užitečné zatížení: **7 kg**
Dosah: **800 mm**
Další vlastnosti a funkce: klasifikace IP54; hmotnost 22.3 kg; možná i instalace na strop/zeď

Model: **CRX-10iA**
Výrobce: **Fanuc**
Užitečné zatížení: **10 kg**
Dosah: **1249 mm**
Další vlastnosti a funkce: klasifikace IP67; hmotnost 40 kg

Příloha č. 2: Robot UR3 v robotické laboratoři UAI



Příloha č. 3: Hlavní program v jazyku Python

Dostupné v elektronické příloze.

Příloha č. 4: Seznam pozic pro hlavní program (*coordinates.py*)

Dostupné v elektronické příloze.