

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Filip Jech



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## ROBOTIZOVANÝ ADAPTIVNÍ SYSTÉM PRO PŘESNÉ BROUŠENÍ MECHANICKÝCH DÍLŮ

ROBOTIZED ADAPTIVE SYSTEM FOR PRECISE GRINDING OF MECHANICAL COMPONENTS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Jech

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. František Zezulka, CSc.

BRNO 2021



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Filip Jech

**ID:** 208292

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

### Robotizovaný adaptivní systém pro přesné broušení mechanických dílů

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem je koncipovat a vyvinout adaptivní robotizované pracoviště pro přesné broušení komponent na CNC hrotové brusce s následnou korekcí určenou na přesném laserovém měřicím systému s konturografem.

1. Navrhnout robotizované pracoviště s 6-osým kloubovým robotem, kde robot bude automaticky provádět následující manipulace:

- odebrání polotovaru ze vstupní kazety a jeho založení do CNC hrotové brusky
- vyjmutí obrobku z brusky a jeho přenesení na platformu laserového měřicího systému (1. fáze měření)
- přenesení obrobku a jeho uložení do konturografu (2. fáze měření)
- vyjmutí a přenesení proměřeného obrobku z konturografu zpět do brusky, kde se obrobek přesně orientován automaticky upne a provede se jeho korekční dobroušení nebo jeho založení do kazety pro obrobky v toleranci
- vyjmutí obrobku po korekčním dobroušení z brusky a jeho zařídění podle stanovené tolerance a založení

2. Požadované parametry robotického manipulátoru: nosnost obrobku do hmotnosti 5 kg, dosah ramene do 800 mm, opakovaná přesnost polohování 0,03 mm. Přesnost laserového měřicího systému: 0,001 mm.

3. Navrhnout trajektorie pro všechny technologicky zadané pohyby robota s respektováním zakázaných zón a s využitím interpolací zajistit plynulost pohybů. Optimalizovat jednotlivé pohyby v čase.

4. Vypracovat řídicí program pro automatickou funkci robota a jeho uchopovacího zařízení tak, aby byl v zadaném rozsahu adaptivní na různé velikosti obrobku.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Racer-5 Robot, Technical Specifications, Transport and Installation and Maintenance Rel. 1.0, COMAU S.p.A., CR00758077-en01/2017.01

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 17.5.2021

**Vedoucí práce:** prof. Ing. František Zezulka, CSc.

**doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem adaptivního robotického pracoviště. Teoretická část textu pojednává o rozdělení robotických systémů a technickém popisu jednotlivých zařízení, které byly využity při realizaci řešení.

Praktická část obsahuje rozbor řešení a optimalizaci celého výrobního procesu z hlediska minimalizace trajektorie, plynulosti pohybů, časového intervalu, které byly analyzovány v softwaru RoboSim a v softwaru Roboshop byl vytvořen zdrojový kód. Další částí práce je návrh pro adaptivní výrobní proces. Výsledkem práce je algoritmus pro řízení pohybů robota mezi jednotlivými procesy. Práce obsahuje variantní řešení a možné inovativní řešení pro případné rozšiřování pracoviště.

## **Klíčová slova**

Robotický systém, Adaptivní systém, Optimalizace trajektorie, Roboshop, RoboSim.

## **Abstract**

The aim of diploma theses is the design of an adaptive robotic workplace. The theoretical part focus on the division of robotic systems and the technical description of individual devices that were used in the implementation of the solution. The practical part contains an analysis of solutions and optimization of the entire production process in terms of minimizing the trajectory, smoothness of movements, time interval, which were analyzed in RoboSim software and in Roboshop software source code was created. Part of the theses is the design for an adaptive production process. The result of the work is an algorithm for controlling robot movements between individual processes. The theses contain a variant solution and possible innovative solutions for possible expansion of the workplace.

## **Keywords**

Robotic system, Adaptive system, Trajectory optimization, Roboshop, RoboSim.

## **Bibliografická citace**

JECH, F. *Robotizovaný adaptivní systém pro přesné broušení mechanických*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134450>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: František Zezulka.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<b>Filip Jech</b>
<b>VUT ID studenta:</b>	<b>208292</b>
<b>Typ práce:</b>	<b>Diplomová práce</b>
<b>Akademický rok:</b>	<b>2020/21</b>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<b>Robotizovaný adaptivní systém pro přesné broušení mechanických dílů</b>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. dubna 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Františkovi Zezulkovi, CSc. za jeho odbornou pomoc, názory, připomínky a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Děkuji pracovníkům společnosti Mikronex s.r.o. a Berger Positec s.r.o. za zadané téma a možnost ověřit si experimentální řešení s reálnými systémy pracoviště.

V Brně dne: 22. dubna 2021

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>12</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>1. NÁVRH ROBOTICKÉHO PRACOVÍŠTĚ .....</b>	<b>14</b>
<b>2. ÚVOD DO ROBOTIKY .....</b>	<b>16</b>
2.1 DEFINICE ROBOTU .....	16
2.2 HISTORIE.....	17
2.3 GLOBÁLNÍ EKONOMIKA ROBOTIKY.....	18
2.4 GENERACE ROBOTŮ.....	19
2.5 KLASIFIKACE ROBOTŮ.....	20
2.5.1 Dle prostředí .....	20
2.5.2 Dle počtu stupňů volnosti.....	20
2.5.3 Dle kinematické struktury .....	20
2.5.4 Dle typu pohonu.....	20
2.5.5 Dle typu využití .....	21
2.6 FUNDAMENTÁLNÍ POJMY ROBOTIKY.....	21
2.7 ANATOMIE ROBOTŮ.....	22
2.7.1 Kinematická dvojice.....	22
2.7.2 Kinematický řetězec .....	23
2.8 STACIONÁRNÍ ROBOTIKA.....	24
2.8.1 Struktura stacionárních robotů.....	24
2.8.2 Klasifikace stacionárních robotů.....	25
2.9 ROZDĚLENÍ STACIONÁRNÍCH ROBOTŮ .....	26
2.9.1 Kartézský robot .....	26
2.9.2 Cylindrický robot .....	27
2.9.3 Polární robot.....	28
2.9.4 SCARA robot.....	28
2.9.5 Kloubový robot.....	29
2.9.6 Paralelní robot.....	29
2.9.7 Kooperativní robot.....	30
2.10 ADAPTIVNÍ ROBOT.....	31
2.11 KOGNITIVNÍ ROBOT .....	31
2.12 MOBILNÍ ROBOT .....	32
2.13 SERVISNÍ ROBOT.....	33
2.14 PŘÍMÁ KINEMATICKÁ STRUKTURA.....	34
2.14.1 Transformace souřadnic .....	36
2.14.2 Rotace souřadného systému .....	37
2.14.3 Rotace a translace souřadného systému.....	38
2.14.4 Denavit – Hartenbergův princip rozmístění souřadných systémů.....	40
<b>3. ZPŮSOB BROUŠENÍ A MĚŘENÍ.....</b>	<b>43</b>
3.1 CHARAKTERISTIKA BROUŠENÍ.....	43
3.1.1 Základní metody broušení.....	44



3.2	CHARAKTERISTIKA MĚŘENÍ.....	45
3.2.1	<i>Metody měření drsnosti.....</i>	45
3.2.2	<i>Dotykové měřicí přístroje.....</i>	45
3.2.3	<i>Princip funkce optických mikrometrů.....</i>	46
3.2.4	<i>Rozdělení optických mikrometrů.....</i>	47
3.2.5	<i>Měřicí metody optických mikrometrů.....</i>	47
<b>4.</b>	<b>ROZBOR ZADÁNÍ.....</b>	<b>48</b>
4.1	SPECIFIKACE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU.....	48
4.1.1	<i>Hlavní řídicí prvek.....</i>	48
4.1.2	<i>Modulární řešení.....</i>	48
4.1.3	<i>Komunikace systému.....</i>	49
4.1.4	<i>Zakázané zóny.....</i>	49
4.2	STACIONÁRNÍ ROBOT – COMAU RACER R5.....	50
4.2.1	<i>Pracovní režim.....</i>	50
4.2.2	<i>Integrovaní robota.....</i>	51
4.2.3	<i>Kalibrace.....</i>	51
4.2.4	<i>Technické specifikace.....</i>	51
4.2.5	<i>Koncový efektor.....</i>	52
4.2.6	<i>Řídicí jednotka.....</i>	53
4.2.7	<i>Vývojové prostředí.....</i>	54
4.2.8	<i>Programovací jazyk.....</i>	56
4.2.9	<i>Použitý koncový efektor.....</i>	56
4.3	NÁSTROJOVÁ BRUSKA – BUA 16 CNC.....	57
4.4	MIKROMETR – RXI SENZOR.....	59
4.5	VZOREK.....	60
4.6	KONTUROGRAF – MAHR XC 2.....	61
4.7	NEXCOM – APPC 1540T.....	62
4.7.1	<i>Quido ETH 8/8.....</i>	63
4.8	PNEUMATICKÝ SYSTÉM.....	64
<b>5.</b>	<b>ŘEŠENÍ SYSTÉMU.....</b>	<b>67</b>
5.1	REALIZOVANÝ SYSTÉM.....	67
5.1.1	<i>Řídicí systém.....</i>	68
5.1.2	<i>Trajektorie robotického systému.....</i>	69
5.2	ROZMÍSTĚNÍ.....	70
5.3	ZÁSOBNÍK.....	70
5.4	PŘÍPRAVEK.....	72
5.5	INOVATIVNÍ ŘEŠENÍ.....	72
<b>6.</b>	<b>OPTIMALIZACE.....</b>	<b>74</b>
6.1	TRAJEKTORIE.....	75
6.2	PRŮBĚHY RYCHLOSTÍ.....	77
6.3	OPTIMALIZACE POHYBU.....	79
6.4	REFERENČNÍ ZÁSOBNÍK.....	79
6.5	VSTUPNÍ PODMÍNKY.....	80
6.6	ZDROJOVÝ KÓD – SNÍŽENÍ RYCHLOSTI.....	80
<b>7.</b>	<b>ADAPTACE SYSTÉMU.....</b>	<b>82</b>

7.1	VSTUPNÍ PODMÍNKY .....	82
7.2	RŮZNÝ VSTUPNÍ MATERIÁL .....	83
7.3	ADAPTACE OBRÁBĚCÍ BRUSKY .....	84
<b>8.</b>	<b>ŘÍDICÍ SYSTÉM .....</b>	<b>85</b>
8.1	NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU Z JEDNOTKY R1C .....	87
<b>9.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>90</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>97</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Blokové schéma navrženého pracoviště.....	15
2.1	Robot Unimate [14].....	17
2.2	Přehled instalovaných robotů [4] .....	18
2.3	Využití robotů v průmyslovém odvětví [4] .....	18
2.4	Nejčastější provozní činnosti robotů [29].....	19
2.5	Kinematické dvojice ve dvourozměrném prostoru [27] .....	22
2.6	Rotační kinematické dvojice ve třírozměrném prostoru [27] .....	23
2.7	Translační kinematické dvojice ve třírozměrném prostoru [27].....	23
2.8	Schéma struktury.....	25
2.9	Klasifikace stacionárních robotů [9] .....	25
2.10	Kartézský robot [1].....	27
2.11	Cylindrický robot [13].....	27
2.12	Polární robot [14] .....	28
2.13	SCARA robot [30] .....	28
2.14	Kloubový robot [31].....	29
2.15	Paralelní robot [32].....	30
2.16	Kolaborativní robot Aura [33].....	31
2.17	Schéma kognitivního robota [15] .....	32
2.18	Mobilní robot AIMM [34].....	33
2.19	Robonaut 2 [35].....	34
2.20	Transformace souřadnic mezi souřadnými systémy [17] .....	37
2.21	Rotace souřadného systému [17].....	37
2.22	Rotace a translace souřadných systémů [17] .....	39
2.23	Denavit–Hartenbergova konvence [17].....	40
3.1	Princip broušení [38].....	43
3.2	Nepřavidelný úběr třísky [39] .....	44
3.3	Snímání nerovností povrchu [23].....	46
3.4	Vysílač laserového skenovacího mikrometru [44] .....	46
4.1	Robot Racer R5 .....	50
4.2	Pracovní rozsah modelu Racer R5 [19].....	52
4.3	Zatížení koncového efektoru [19] .....	53
4.4	Roboshop.....	55
4.5	RoboSim.....	55
4.6	Pneumatický úhlový efektor [36].....	56
4.7	Akční prvek koncového efektoru [23].....	57
4.8	Universální nástrojová bruska [22] .....	58
4.9	Přídavný zásobník pro výměnu vzorku .....	58
4.10	Mikrometr RXi laser [21].....	59
4.11	Vzorek (Váleček) [23].....	60
4.12	Výkres vzorku (Válečku) [23].....	60
4.13	Upínací přípravek pro Mahr XC 2 [23].....	61
4.14	Průběh výsledného měření na systému Mahr XC 2 [23].....	62
4.15	Řídicí PC pro generování a distribuci signálů .....	63
4.16	Rozšiřující modul <i>Quido ETH 8/8</i> [12].....	64
4.17	Elektromagnetický ventil CPE10-M1BH-5L-M7 [24].....	65
4.18	Redukční ventil MS4-LR-1/4-D6-AS .....	66

5.1	Blokový diagram navrženého systému.....	67
5.2	Trajektorie pro jeden výrobní cyklus .....	69
5.3	Realizace robotického pracoviště .....	70
5.4	Zásobník pro vzorky.....	71
5.5	Upínací přípravek (Držák u konturografu Mahr XC 2).....	72
6.1	Průběh trajektorie [19] .....	75
6.2	Trajektorie mezi třemi body .....	76
6.3	Trajektorie v bezpečném prostoru pro celý výrobní proces .....	77
6.4	Průběh trajektorie mezi třemi body .....	78
6.5	Průběh trajektorie mezi třemi body s interpolací.....	78
7.1	Zasunutí vzorku do obráběcí brusky .....	83
8.1	Řídicí software pro manuální a automatické ovládání .....	87
8.2	Vývojový diagram řídicího systému z jednotky R1C.....	88
A.1	Vývojový diagram řídicího systému .....	98
C.1	Manipulační prostor robota Racer R5 .....	100
C.2	Řídicí a rozšiřující moduly jednotky R1C.....	100
C.3	Zasunutí vzorku do upínacího přípravku.....	101
C.4	Uchycení vzorku v unašeči obráběcí brusky .....	101

## SEZNAM TABULEK

4.1	Natočení jednotlivých kloubů .....	52
4.2	Rozšiřující moduly .....	54
4.3	Technické specifikace výrobce laserového senzoru RXi .....	59
4.4	Základní technická specifikace APPC 1540T .....	63
4.5	Technické specifikace ventilu CPE10-M1BH-5L-M7 .....	65
4.6	Technické specifikace ventilu MS4-LR-1/4-D6-AS .....	66
8.1	Rozšiřující moduly .....	88
B.1	Trajektorie vycházející z obrázku 6.2 .....	99
B.2	Pro celou sekvenci pohybů pro jeden vzorek při rychlosti 50 % .....	99

# ÚVOD

S neustále se zrychlujícím vývojem techniky vzrůstá i používání robotických systémů v celé řadě odvětví. V začátcích integrování robotů do výrobních systémů. Bylo nalezeno jejich uplatnění z velké části jen pro jednoúčelové úkony. Dnes jsou řídicí systémy manipulátorů a zejména robotů vysoce výkonné, umožňující komunikaci se spolupracujícími přístroji a stroji. Při využití těchto přístrojů a zařízení se usnadňuje automatizovaná výroba, protože robotický systém interaktivně reaguje na různé podmínky. Na tuto oblast je zaměřena tato diplomová práce, kde je cílem navrhnout adaptivní robotické pracoviště pro automatický výrobní proces.

V první části se seznámíme s obecným pojmem robotických systémů, a to kategorizací dle prostředí, počtu stupňů volnosti, typu využití a kinematické struktury. Definujeme základní řešení kinematické úlohy a technické vlastnosti jednotlivých komponent, které jsou použity při realizaci systému.

Ve druhé části je popsán návrh a samotná realizace systému, optimalizace a plynulost trajektorie a schopnost adaptace systému na různé vstupní podmínky.

# 1. NÁVRH ROBOTICKÉHO PRACOVIŠTĚ

Cílem práce je vytvořit adaptivní robotické pracoviště pro přesné broušení mechanických dílů, zajistit komunikaci mezi přístroji a vytvořit způsob kategorizace výstupních obrobků. Dílčím cílem je vytvoření všech trajektorií pro dosažení technologických procesů s respektováním zakázaných zón a plynulostí pohybů.

Pro manipulaci mezi přístroji je využito robotického systému, který ovládá elektromagnetické ventily pro upevnění nebo vyjmutí předmětu. Zároveň bude robot automaticky vykonávat příslušné sekvence programů pro konkrétní část výrobního procesu. Pro vyhodnocení korekce jsou použity dva měřicí systémy, a to pro měření průměru a přechodového tvaru předmětu. Jelikož se nejedná o komplexnější řešení, je využito digitálních vstupů a výstupů pro komunikaci mezi přístroji.

Celý systém se bude skládat ze tří samostatných systémů, kde každý systém řeší určitou část výrobního cyklu. Jednotlivé subsystémy budou propojeny s řídicím systémem robota nebo s nadřazených systémem, který bude generovat akční signály.

Celé pracoviště se bude skládat z robotického manipulátoru, CNC frézky a přesného měřicího zařízení. Systém bude zpětnovazební, aby umožňoval dobrou broušení vzorku. Komunikace bude vykonávána digitálními vstupy a výstupy každého procesu.

Základní myšlenkou je integrace všech tří dílčích zařízení do výrobního systému. Na obráběcí stroji se bude vytvářet komplikovaný objekt, který bude vyhodnocován a měřen na základě více parametrů. Tyto hodnoty bude vyhodnocovat měřicí systém a dle vyhodnocených parametrů pak bude zpětnovazebně modifikovat broušící proces na obráběcí stroji. Vyhodnocenými parametry jsou základní znaky – průměr, délka, posun a přechodový tvar.

Vyhodnocování mezi přístroji se bude provádět pomocí BCD kódu a digitálních vstupů i výstupů. Rozhodující činnost bude mít robotický manipulátor nebo nadřazený systém, který na základě měřicí korekce bude zařazovat obrobek zpět do výrobního procesu nebo do patřičné výstupní kategorie.

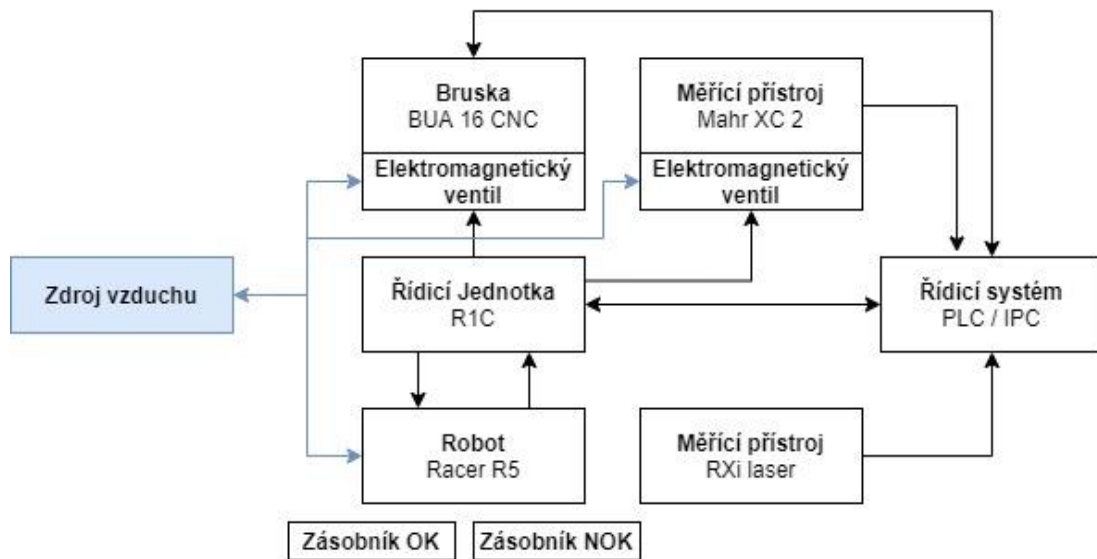
Cílem je modifikovat obráběcí proces na základě vyhodnocených parametrů z měřicí stanice takovým způsobem, aby byl celý proces v optimální toleranční mezi. Celkem budou navrženy dvě kategorie pro rozdělení výstupních vzorků, kdy první z nich bude odpovídat naměřeným hodnotám v toleranční mezi a druhá kategorie bude pro neopravitelné kusy.

Celý výrobní proces podléhá řadě faktorů. Jedním z faktorů je opotřebování brusného kotouče, který se průběžně opotřebává s každým kusem. Dalším je teplota prostředí, teplota chladicí kapaliny, poměry kalení a změna materiálu. Na základě těchto faktorů a vyhodnocených parametrů se bude adaptivní proces měnit. Nabízí se zde varianta vytvoření a ukládání statistických souborů z posledních 10 měření, které následně můžeme průměrovat a vyhodnotit tak optimální parametry k dosažení

maximální přesnosti. Dále se nabízí možnost, aby měřicí a obráběcí stanice ukládala soubory na síťový disk, získaná data by se poté využila na analýzu, nebo by se archivovaly nastavené parametry pro každý kus.

Hlavním vykonávacím prvkem bude robotický manipulátor, který bude na základě BCD kódů vykonávat příslušné podprogramy s manipulací obrobku. Z hlediska řízení celého systému je možné upravovat systém pro jiný výrobní proces s lehkými modifikacemi, čímž se stává řešení variabilní. Cílem této práce je navrhnout optimální algoritmus, který bude vyhodnocovat a adaptivně přidávat výrobky do výrobního cyklu, a na základě měření bude modifikovat toleranční meze. Vstupní materiál bude přesně orientován v předem daných přesných pozicích souřadného systému.

Návrh robotizovaného pracoviště s 6osým robotem je uveden na následujícím obrázku 1.1.



Obrázek 1.1 Blokové schéma navrženého pracoviště

Řídicí systém generuje akční zásahy pouze v případě, když je aktivní signál, který charakterizuje připravený stav jednotlivého přístroje. Při splnění podmínky systém generuje BCD signál pro zahájení procesu. Připojené přístroje po dobu vykonávání signalizují zaneprázdněný stav a nepřijímají vstupní signály. Posloupnost výrobního cyklu vyhodnocuje nadřazený řídicí systém, který je použit pouze pro generování akčních a regulačních zásahů.

Jeden výrobní cyklus se skládá z posloupnosti těchto úkonů: vyjmutí vzorku; následné založení do brusky, kde se vymění vzorek a pokračuje na měření proces; založení do upínacího přípravku; po vykonání měření, systém vyhodnotí parametry a založí vzorek do zásobníku nebo provede korekční cyklus, tedy založí vzorek do brusky.



## 2. ÚVOD DO ROBOTIKY

Tato kapitola spadá pod teoretickou část, která popisuje obecnou definici robotů, jednotlivé typy robotů, stacionární roboty, kinematický řetězec, další terminologii užívanou v robotice a základy ohledně průmyslových robotů a jejich vývoje.

Robotika a roboti v podobě, jak je dnes známe, zahrnují řadu oblastí a znalostí (mechaniku, elektroniku, IT a další), od kuchyňských robotů až po plně automatizované výrobní linky. Samotné počátky robotiky však můžeme nalézt již v období středověku, kdy si lidé chtěli usnadnit práci a vynalézali tak různé mechanické systémy nebo využívali dobytek k ulehčení fyzické práce [11].

Roboty lze dělit do několika kategorií. První z nich jsou tzv. manipulátory. Do této kategorie spadají bagry, jeřáby, nakladače atd. Postupným vývojem těchto typů se zdokonalovaly a zpřesňovaly jejich konstrukce, až se staly běžnou součástí průmyslového odvětví. Vývoj v průmyslové oblasti byl kladen zejména na opakující se činnosti, ve kterých byla možnost nahrazení lidské obsluhy za manipulátor. Převážně se jednalo o jednoduché úkony, kde právě tyto roboty našly své uplatnění. S pokrokem výpočetní techniky rostl i vývoj manipulátorů, a zvyšovala se tak funkcionalita celého systému. Manipulátory se staly programovatelnými, automatizovanými, rychlejšími a přesnějšími. Tyto vlastnosti a limity se i nadále snaží dnešní vývojáři posouvat k lepším výsledkům.

Manipulátory našly své uplatnění v mnoha výrobních oblastech:

- Sklad – manipulace, třídění, kategorizace;
- Výrobní linka – *Pick and Place* (předávání z místa na místo);
- Výrobní proces – svařování, lakování, šroubování;
- Průzkumné mise – vesmírné mise, výbušné prostředí, armádní účely;
- Lékařský průmysl – operační robotický systém Da Vinci.

Druhou skupinu tvoří tzv. humanoidní roboti, kteří jsou navrženi k podobnosti lidského těla a disponují určitým stupněm inteligence. Tento vývoj je dnes vnímám jako špička robotiky a je jedním z hlavních cílů dalšího rozvoje. Je nutné poznamenat, že vývoj v oblasti robotiky za účelem napodobení různých lidských pohybů a zajištění inteligence srovnatelné s lidskou je zatím v daleké budoucnosti [2].

### 2.1 Definice robotu

*„Automatický ovládaný, přeprogramovatelný, víceúčelový manipulátor programovatelný ve třech nebo více osách, který může být buď upevněn nebo mobilní pro použití v aplikacích průmyslové automatizace.“ [37]*

## 2.2 Historie

Poprvé v historii slovo „robot“ bylo použito v hře R.U.R od slavného českého spisovatele Karla Čapka v roce 1921. Toto slovo pochází z českého slova „robota“, který má význam tvrdá práce [17].

Historie robotiky sahá až do starověkého Řecka, kde je spojována se základy automatizační techniky. V roce 1206 Al-Jazari vytvořil nejranější programovatelný typ humanoidního robota, kterým byl hudební automat, jenž plnil funkci čtyř hudebníků a měl programovatelné bicí kolíky.

Významnější body z historie, které jsou podstatné a setkáváme se s těmito historickými koncepty a návrhy i dnes:

V roce 1942 Issac Asimov vytvořil tři zákony robotiky:

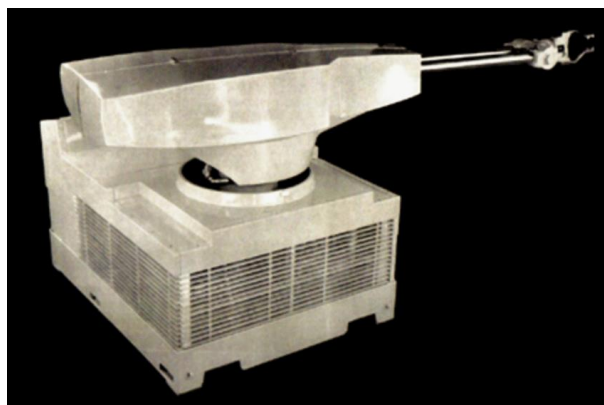
1. Robot nesmí ublížit člověku nebo nečinností umožnit zranění člověka.
2. Robot musí poslouchat příkazy, které mu dávají lidé, kromě případů, kdy by tyto příkazy byly v rozporu s prvním zákonem.
3. Robot musí chránit svou vlastní existenci, pokud tato ochrana není v rozporu s prvním nebo druhým zákonem.

V roce 1954 George Devol vynalezl první digitálně ovládaný mechanický robot s názvem Unimate. Manipulátor skládal kousky tlakově lisovaného kovu pomocí paže o přibližné hmotnosti 1815 kg a dodržoval sekvenční příkazy uložené na magnetickém bubnu. Na obrázku 2.1 je zobrazen robot Unimate.

V roce 1981 Takeo Kanade postavil rameno s přímým pohonem. Představil první konstrukci, která měla instalované pohony přímo v kloubech, tím docílil mnohem větší rychlosti a přesnosti než toho bylo doposud.

Začátkem července 1997 přistálo robotické vozítko na Marsu. Splněná mise s názve: Pathfinder mission landed on Mars. Data z povrchu Marsu byly vysílány do zří.

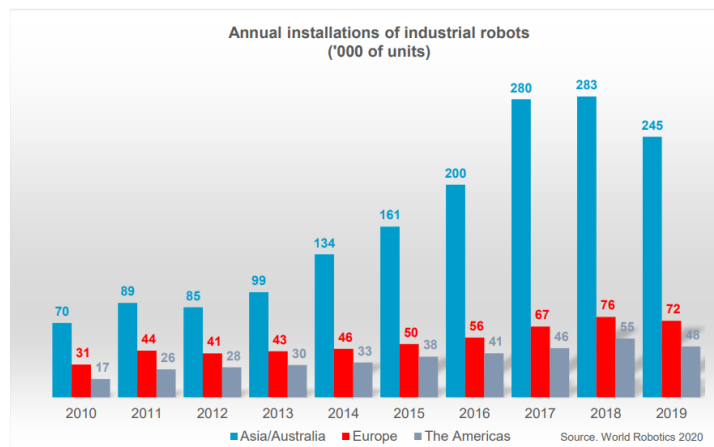
Počátkem roku 2000 byl představen humanoidní robot ASIMO, který má základní funkcionality chození, běhání, rozpoznávání hlasu a držení těla [3].



Obrázek 2.1 Robot Unimate [14]

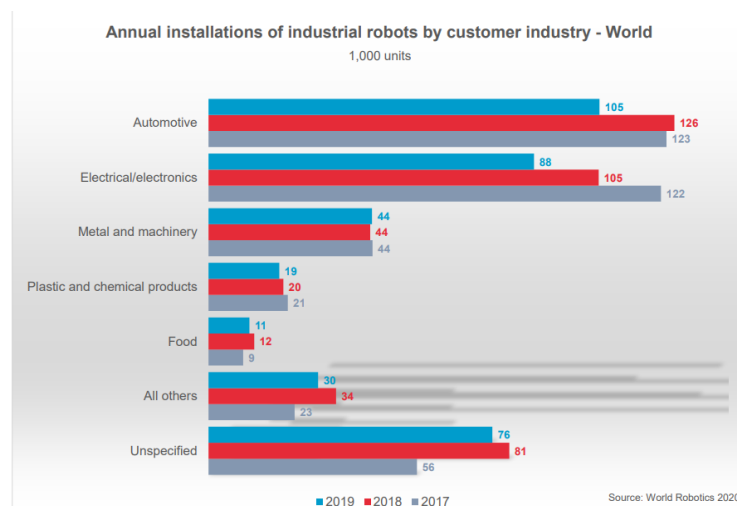
## 2.3 Globální ekonomika robotiky

Od roku 2010 poptávka po průmyslových robotech značně vzrostla, a to díky stoupajícímu trendu automatizace a vývoji nových řešení. K roku 2019 dle společnosti IFR (International Federation of Robotics) je nasazeno v průmyslovém odvětví více než 2,7 milionů robotů. Čína, Japonsko, USA, Korejská republika a Německo představují hlavní trh instalace průmyslových robotů, a to ve výši až 73 %. Nejdůležitější poptávkou na trhu je automobilový průmysl, který tvoří téměř 28 % všech instalací průmyslových robotů [4]. Graf na obrázku 2.2 znázorňuje instalaci a aplikování průmyslových robotů, kde jednoznačně největší podíl nasazených robotů spadá na kontinent Asie a Austrálie.



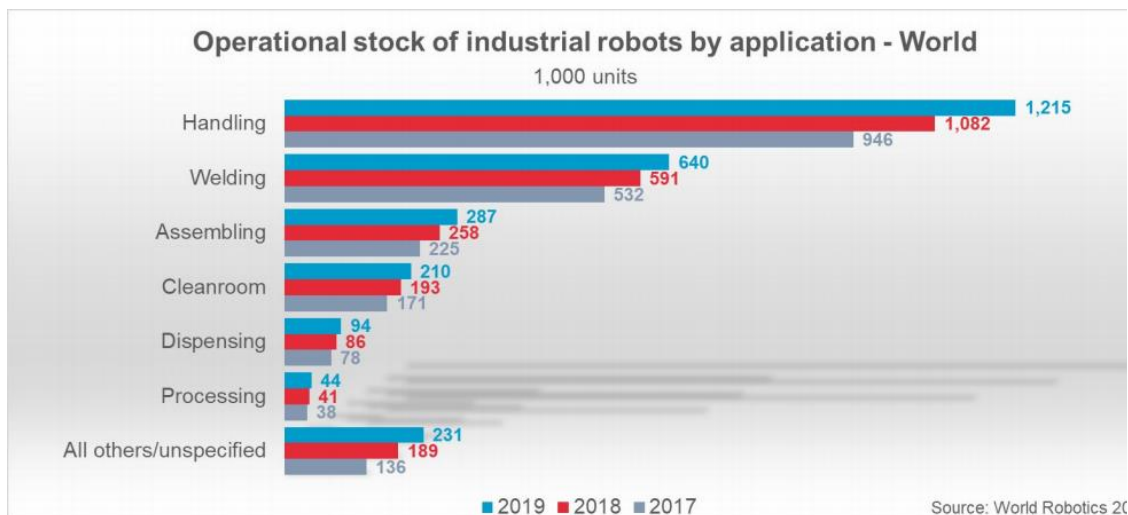
Obrázek 2.2 Přehled instalovaných robotů [4]

V roce 2018 překročila hranice prodaných robotů 400 tisíc, což je téměř čtyřnásobek oproti roku 2010. K roku 2018 jsou průměrně 2 ze 3 robotů nově nasazeny v Asii. Graf na obrázku 2.3 vystihuje počet nasazených robotů pro jednotlivá průmyslová odvětví.



Obrázek 2.3 Využití robotů v průmyslovém odvětví [4]

Od roku 2013 je Čína největším světovým trhem průmyslových robotů a připadá na ni 38 % z celkového počtu instalovaných robotů v období 2017 až 2018. Což je stále více než Evropa a Amerika dohromady. Na obrázku 2.4 jsou znázorněny činnosti, které jsou roboty vykonávány nejčastěji [28], [29].



Obrázek 2.4 Nejčastější provozní činnosti robotů [29]

## 2.4 Generace robotů

Vzhledem k budoucímu rozvoji se označují současné průmyslové roboty jako nultá generace. Světová špička současného výzkumu inteligentních robotů se zařazuje do první generace [5].

**0. Generace:** Z pravidla do této generace patří roboty a manipulátory bez zpětné vazby. Veškeré bezpečnostní systémy vedou k odpojení elektrické energie a přivolání údržbáře nebo seřizovače k obnovení systému [9].

**1. Generace:** Jedná se o roboty s pevně naprogramovatelným postupem operací. Staly se univerzálními díky možnosti snadné modifikace programu. První generace se omezuje pouze na pohybové aplikace.

**2. Generace:** Jsou to roboty se senzory. Disponují mnohem složitějším řízením, které se nevyznačuje na pouhé pohyby robota ale i vnímání vnějších (senzor, optika, koncový doraz) i vnitřních (příkon jednotlivých motorů, moment) veličin. Druhá generace robotů vychází z generace první a k činnosti využívá senzory.

**3. Generace:** Je charakterizována jako inteligentní roboty. Od druhé generace se liší složitostí a objemem řídicího systému. Navíc celý systém zahrnuje elementy umělé inteligence. Charakteristickou vlastností je schopnost učení a adaptace v procesu řešení úlohy. Třetí generace má mít základní inteligenci pro diskrétní manipulaci s objekty, zejména při montáži [5].

## 2.5 Klasifikace robotů

Robot může vystihovat mnoho významů a každý si pod tímto slovem představuje něco jiného. Důležitá je klasifikace rozdělení robotických systémů do několika kategorií dle použití, dle prostředí, dle počtu stupňů volnosti atd. Záleží na dané aplikaci, podle jakého kritéria klasifikujeme robotický systém.

### 2.5.1 Dle prostředí

**Stacionární:** Jsou to veškeré robotické systémy, které jsou upevněné na jednom místě. Do této kategorie patří například robot UNIMATE, robotické rameno, obráběcí stroje nebo nosné jeřáby.

**Pozemní:** Tyto roboti pracují na povrchu země. Tato kategorie obsahuje roboty typu: domácí uklízecí robot, autonomní robot na sekání trávy, bagr, armádní vozítka, hasičská vozítka nebo výsledek moderní technologie vozítka na Marsu.

**Letecké:** Tyto roboty jsou převážně bezpilotní vzdušná zařízení UAV neboli bezpilotní letoun. Do této kategorie patří ručně i autonomně ovládané stroje v armádní i civilní oblasti.

**Gravitační:** Jedná se o roboty, kteří jsou navrženy na oběžnou dráhu Země.

**Vodní:** Roboty jsou navrženy a primárně určeny pro práci pod vodou nebo na prozkoumávání hlubin oceánů.

**Speciální:** Jedinečná konstrukce robota pro různé identické úkony. Například robotické stroje navrženy pro těžbu surovin.

**BEAM:** Název vychází z anglických zkratk (Biology, Eletronics, Aesthetics, Mechanics). Primárně jsou využívány jednoduché analogové obvody ke konstrukci malých jednoduchých robotů, jejich chování jsou inspirovány biologickými jevy [6].

### 2.5.2 Dle počtu stupňů volnosti

Universální – s 6 stupni volnosti a jednoznačně určuje polohu a natočení.

Redundantní – s více než 6 stupni volnosti. Struktura využita pro obcházení překážek.

Deficitní – s méně než 6 stupni volnosti [17].

### 2.5.3 Dle kinematické struktury

Sériové – s otevřeným kinematickým řetězcem.

Paralelní – s uzavřeným kinematickým řetězcem.

Hybridní – kombinující oba typy řetězců [17].

### 2.5.4 Dle typu pohonu

Elektrické – v dnešní době se jednou o nejčastější variantu.

Hydraulické – využito v prostředí kde je potřeba vyvinout velkou sílu.

Pneumatické – disponují svými vlastnostmi, a to hlavně rychlostí [17].

### 2.5.5 Dle typu využití

**Průmyslové** – Od počátku průmyslové revoluce se staly nejdůležitější součástí výroby. Převážně jsou využívány kloubové a SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) roboty.

**Vojenské** – V moderních armádách je robotika důležitým faktorem. Pokroky byly dosaženy u bezpilotních letounů, jako je například General Atomics MQ-1 Predator.

**Domácí** – Jedná se o prvky chytré domácnosti.

**Lékařství** – Tyto stroje zlepšují schopnosti dnešních lékařů a posouvají jejich chirurgické hranice. Tyto roboty pracují s daleko větší přesností než lékaři a mají určitou ochranu proti nežádoucím překmitům při operaci.

**Vesmírné** – Hrají velmi důležitou a nepostradatelnou roli v prozkoumávání vesmíru [8].

## 2.6 Fundamentální pojmy robotiky

**Počet stupňů volnosti:** Z anglického názvosloví označováno DoF (Degree of Freedom). Jedná se o vyjádření minimálního počtu parametrů pro jednoznačné určení tělesa v prostoru nebo rovině. Například 3DoF můžeme popsat bod v prostoru nebo těleso v rovině. Bod v rovině odpovídá 2DoF a tuhé těleso má šest stupňů volnosti v prostoru, kde první 3DoF určují polohu a zbylé tři stupně volnosti popisují jednoznačně natočení tělesa.

**Základna manipulátoru:** Pevná část, kterou je manipulátor připevněn a zároveň definuje střed souřadného systému.

**Koncový efektor:** Poslední část robotického řetězce, respektive kloub, ke kterému jsou obvykle připeňovány nástroje.

**Kloub:** V podstatě se jedná o spoj mezi tuhými částmi, které jsou vzájemně spojeny. Typy kloubů se liší počtem a typem stupňů volnosti. Klouby dělíme na základní čtyři typy. P (Prismatic) přidává jeden translační pohyb volnosti. R (Revolute) přidává jeden rotační stupeň volnosti. U (Universal) přidává dva rotační stupně volnosti. S (Spherical) sférický kloub přidává všechny tři rotační stupně volnosti.

**Kinematický řetězec:** Je tvořen soustavou kinematických dvojic, které jsou definovány spojením a vazbou dvou pevných těles. Vazby omezují vzájemný pohyb ramen. Často se setkáme s popisem na základě kloubů. Například standardní 6osý manipulátor se označuje TRR.

**Aktuátory:** Neboli pohony, které zajišťují pohyb robotického systému. Typickými pohony jsou rotační a lineární elektromotory.

**Pracovní prostor:** Jedná se o množinu všech dostupných pozic koncového efektoru, včetně omezujících podmínek. Je také možné se setkat s termínem pracovní obálka.

**Přímá kinematická úloha:** Umožňuje stanovit polohu koncového efektoru, prostřednictvím údajů o poloze všech aktuátorů.

**Inverzní kinematická úloha:** Jedná se o nejdůležitější transformaci v robotice. Spočívá v nalezení kloubových souřadnic pro daný bod nebo pohyb v prostoru. Transformuje trajektorii pohybů koncového efektoru do prostoru kloubových souřadnic.

**Přesnost a opakovatelnost:** Přesnost je dána odchylkou požadované polohy a skutečné polohy koncového efektoru. Opakovatelnost lze chápat jako maximální rozdíl mezi skutečnou a požadovanou polohou [11].

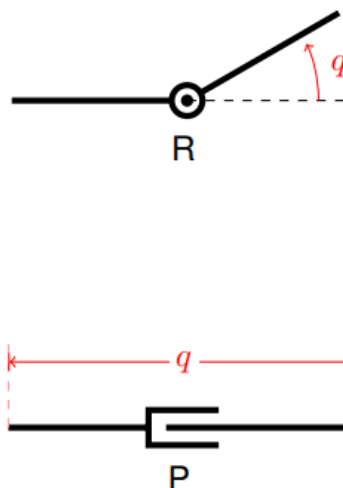
## 2.7 Anatomie robotů

Tato kapitola se zaměřuje na části, kterými jsou tvořeny roboty. V podstatě považujeme robota za pevnou část, která je spojena vazbami a tvoří strukturu otevřené smyčky. Rameno považujeme za tuhé těleso s konstantními rozměry. Pro výpočet transformace nové polohy, potřebujeme zadat šest parametrů, a to tři úhly k určení orientace, a tři vektory pro určení polohy.

Obecně se robotický systém skládá ze tří částí, které jsou mezi sebou svázaný komunikačními a napájecími obvody. Celá struktura se skládá z mechanického ústrojí, řídicího systému a ručního ovládání. U kolaborativních robotů je možné u určitých výrobců vidět, že řídicí obvody a logiku se snaží umístit v blízkosti základny robotického ústrojí [18], [9].

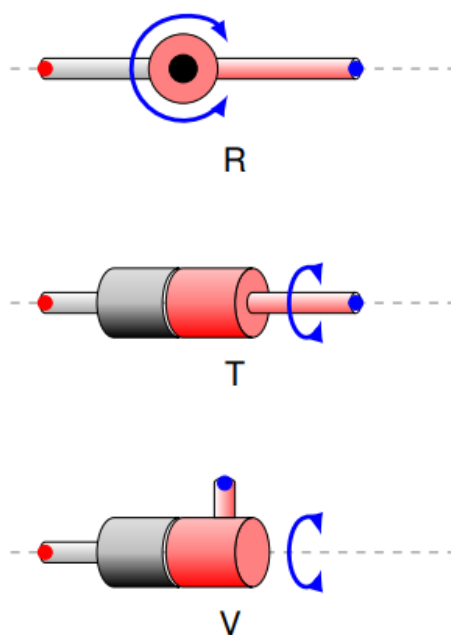
### 2.7.1 Kinematická dvojice

Klouby umožňují pohyb jednotlivých částí a dělí se na dvě varianty rotační R (Revolute) a translační P (Prismatic). Znáznorněny na obrázku 2.5.



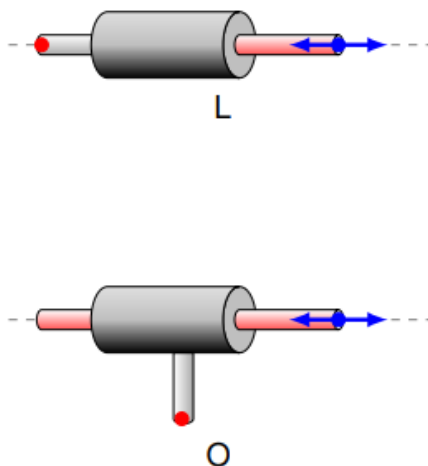
Obrázek 2.5 Kinematické dvojice ve dvourozměrném prostoru [27]

Rotační klouby v prostoru se dělí na rotační R (Rotational), kroučící T (Twisting) a otočné V (Revolving), které jsou znázorněny na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6 Rotační kinematické dvojice ve třírozměrném prostoru [27]

Translační klouby ve 3D prostoru se dělí na lineární L (Linear) a ortogonální O (Orthogonal) znázorněny na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7 Translační kinematické dvojice ve třírozměrném prostoru [27]

### 2.7.2 Kinematický řetězec

Celá soustava je pevně připevněna na jedné straně a na druhém konci je obvykle připevněn libovolný nástroj k přírubě koncového bodu. Kinematický řetězec se skládá ze čtyř následujících částí:



**Základna** (Base) – Definuje počátek kartézského souřadného systému. Nejčastější místo k upevnění robotického systému ke konstrukci.

**Rameno** (Link, Arm) – Tuhé spoje různých délek. Na obou stranách je rameno zakončeno pohyblivými klouby. Tuhost ramena ovlivňuje přesnost a délka celkovou velikost pracovního prostoru.

**Klouby** (Joint) – Jedná se o pohyblivé spoje ramen. Spoje mohou být rotační, posuvné nebo ortogonální a umožňují polohování robota. Jednotlivé klouby obsahují motory a enkodéry, které měří jejich polohu.

**Koncový efektor** (End-point, Tool-end) – Konec kinematického řetězce bývá osazen přírubou či nástavcem pro umístění pracovního nástroje [9].

## 2.8 Stacionární robotika

Robotické manipulátory dle kinematické konstrukce lze dělit na dva základní typy, a to sériové a paralelní manipulátory. Sériové manipulátory tvoří otevřený kinematický řetězec. Každý kloub svírá dvě ramena a mezi nimi působí vazba. Dnes tyto sériové manipulátory patří mezi nejrozšířenější mechanismus robotiky, který je využíván pro průmyslové aplikace jako jsou obrábění, svařování, lakování, skládání, paletizace, kompletování atd.

Paralelní manipulátory tvoří uzavřený kinematický řetězec, který lze popsat cyklickým grafem. Pro své vlastnosti se používají paralelní manipulátory v leteckém průmyslu k simulaci a testování tlumících anti-vibračních plošin nebo v aplikacích zaměřených na přesné a rychlé manipulování typu z místa na místo. U paralelních koncepcí se dá přemýšlet jako o několika (převážně třech) sériových manipulátorech, které mají vazby mezi základnou a koncovým efektem. Obecně paralelní manipulátory mají složitější konstrukci a menší schopnost manipulace, ale dosahují větší přesnosti a opakovatelnosti.

S moderními senzory je možné získat cenné informace, které pomocí softwarových nástrojů, analýz a historických dat mohou predikovat výměnu důležitých částí robota. Nejčastější použití je v manuálních úkonech, které nahrazují lidskou práci. Se stále stoupajícím výpočetní výkonem vznikají robotické aplikace s kamerovými systémy, které vypočítávají pozice v reálném čase. Například dopravní pás s náhodně umístěnými objekty [4].

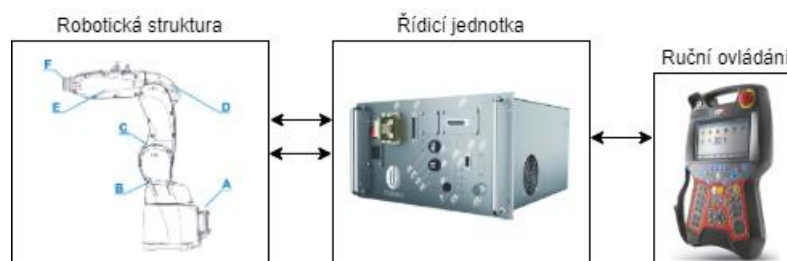
### 2.8.1 Struktura stacionárních robotů

Řídicí jednotka je mozkiem robotického systému. Řídicí systém je propojen fyzicky s robotem. Uvnitř systému je centrální procesorová jednotka, paměť, napájecí zdroje a servopohony. Většina řídicích jednotek má zabudovaný PLC, tedy programovatelný automat, který umožňuje přijímat vstupy a zpracovávat informace ze senzorů a také nastavovat výstupy pro řízení ventilů nebo spínání relé. Součásti řadiče jsou i bezpečnostní obvody, které v případě kolize zastaví robota. K tomuto bezpečnostnímu

obvodu se často přidávají senzory, které monitorují vstupní dveře do prostoru robotu.

Ruční ovládání není potřebné k běhu robotického systému. Využívá se pro programování a ladění programu, zároveň umožňuje pohybovat s každým kloubem individuálně. Většina výrobců implementuje do ručního ovládání, zvaného TeachPendant, tlačítko nouzového zastavení a obvykle obsahuje i bezpečnostní mechanické tlačítko [2].

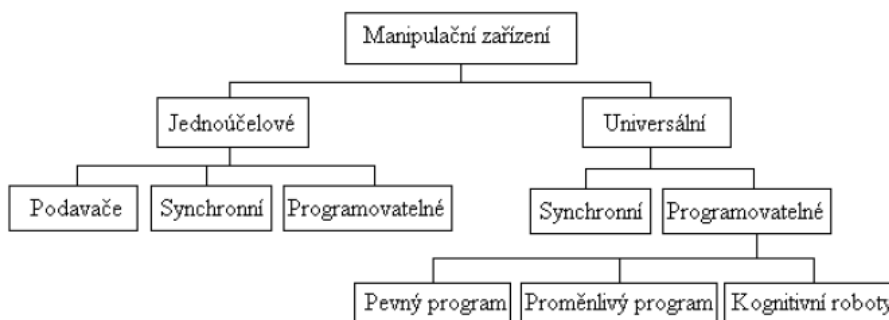
Robotická ramena jsou vyrobena pro lehkost a pevnost z kompozitu hliníku, uhlíkových vláken a litiny nebo oceli. Ramena musí být velmi tuhá, aby byla zachována přesnost, a to platí hlavně u větších konstrukcí. Ramena jsou často dutá z hlediska vlastní hmotnosti a využití prostoru pro elektrické či pneumatické obvody. Standardní struktura robotického systému je znázorněna na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8 Schéma struktury

### 2.8.2 Klasifikace stacionárních robotů

Popis můžeme rozdělit podle funkce provedení, aplikačních možností, úrovně řízení, míry automatizace atd. Jedná se o manipulační mechanismy rozdělené dle následujícího obrázku 2.9.



Obrázek 2.9 Klasifikace stacionárních robotů [9]

Jak je vidět z obrázku výše, lze rozdělit roboty do dvou skupin. Jednoúčelové se vyznačují omezujícími pohyblivými možnostmi, úrovní řízení a konstrukčním provedením. Univerzální mohou být víceúčelové s možností přizpůsobení nebo modifikovatelné na nové výrobní procesy. Pro volbu typu robota je zásadní účel a ekonomické hledisko.

**Podavače:** Patří k nejjednodušším manipulátorům. Často se přidávají už do hotových výrobních procesů, kvůli svému jednoduchému principu mají velký význam pro automatizaci technologických procesů.

**Synchronní:** Řízení provádí obsluha, která průběžně řídí systém (bagr). Jedná se o zesilovací ústrojí pro zesílení silových a pohyblivých veličin. Manipulátor a řídicí obsluha v principu vytváří uzavřený regulační obvod. Tato zařízení přenáší příkazy člověka na dálku.

**Programovatelné:** Jsou řízeny programovatelným ústrojím.

**S pevným programem:** Jedná se o neměnné programy během činnosti robota.

**S proměnlivým programem:** V současné době se jedná o špičku konstrukčního provedení a nazýváme je „průmyslovými roboty, stacionárními roboty nebo angulárními roboty“. Mají možnost měnit nebo přepínat programy na základě scény či vstupních hodnot.

**Kognitivní roboty:** Jedná se o roboty s možností vnímání a racionálního myšlení. Na rozdíl od průmyslových robotů, kteří převážně slouží k manipulaci s objektem, tak kognitivní roboty se snaží interagovat s prostředím v jakém se nacházejí. Odlišují se hlavně v způsobu řízení [9].

## 2.9 Rozdělení stacionárních robotů

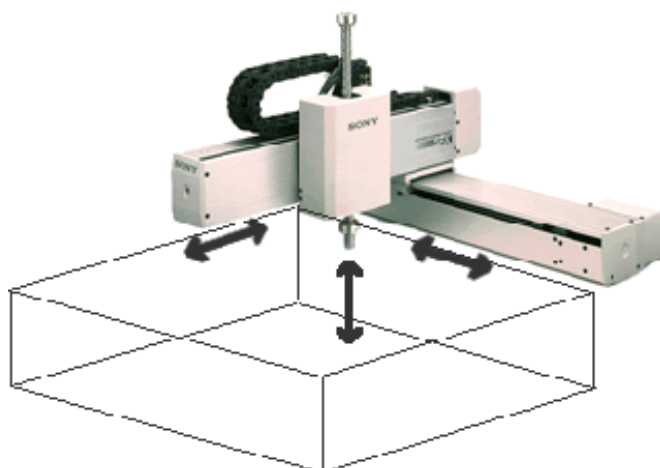
Rozdělení průmyslových robotů lze uspořádat do několika kategorií. V této práci se detailněji zaměříme na charakteristiku mechanických principů robotů a stručné rozdělení na bázi kategorií vycházející z klasifikace.

### 2.9.1 Kartézský robot

Nejčastějším příkladem je 3D tiskárna, která využívá lineární posun motorů ve třech osách (ortogonální posun), které jsou na sebe kolmo orientované. Kartézský robot vytváří čtvercovou pracovní plochu. Navíc v této lineární konstrukci nedochází k singulárním bodům a robot může pracovat v celém rozsahu stejnou rychlostí.

Kartézské roboty lze konstruovat z libovolného lineárního pohonu z různého mechanismu a nabízejí lepší kompromis mezi nosností a pracovním prostorem než konstrukce robotů SCARA nebo 6osých modelů. Konstrukci lze vidět na obrázku 2.10. Navíc u těchto typů nedochází ke změně orientace objektu [1], [13].

Díky pevné konstrukci dosahují vysoké úrovně přesnosti a opakovatelnosti ( $\pm 0,01$  cm). Jsou to nejjednodušší stacionární roboti. Cena díky jednoduchosti je poměrně nízká ve srovnání s jinými typy robotů a v určitých výrobních procesech mohou tak plnit stejné úkony [13].

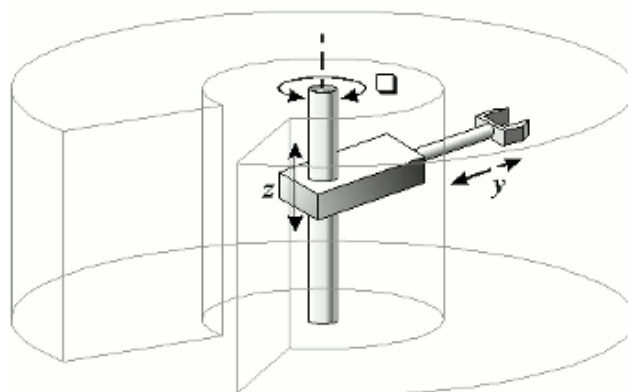


Obrázek 2.10 Kartézský robot [1]

### 2.9.2 Cylindrický robot

Z pohledu konstrukce je tento druh robotického řetězce podobný věžovému jeřábu. V praxi se s tímto modelem moc nesetkáme. Jedná se o historický model, který postupem vývoje byl nahrazen modelem SCARA.

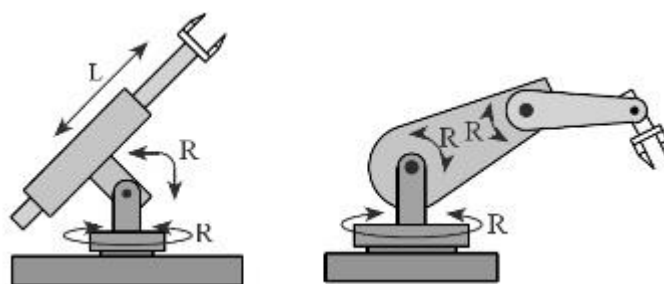
Nevýhodou tohoto modelu je manipulace v pracovním prostoru i mimo něj. Konstrukce je větší, než v jakém pracovním prostoru dokáže manipulovat s objektem. Základna je rotační a rameno obsahuje dva lineární klouby. Konstrukce vytváří válcový souřadný systém. Základní struktura a pracovní rozsah cylindrického robota je znázorněn na obrázku 2.11. Z principu mají velmi podobný pracovní prostor jako model SCARA, ale ten se výrazně liší strukturou [11], [13].



Obrázek 2.11 Cylindrický robot [13]

### 2.9.3 Polární robot

Často také nazýván jako sférický robot. Pracovní rozsah pohybu lze umístit do polárního souřadného systému. Jsou sofistikovanější než kartézské a cylindrické roboty. Zaujímá významné místo v historii vývoje robotů, do tohoto typu lze počítat první robotická ramena. Základní konstrukce se skládá z dvou otočných kloubů a jednoho lineárního. Tímto se vytvoří pracovní sférický prostor a lze vypočítat dosažitelné body v polárním souřadném systému. Lze vidět v levé části na obrázku 2.12. V pravé části je znázorněna rozšířená konstrukce o další rotační kloub, který pouze zvyšuje flexibilitu a nezvyšuje radikálně dosažitelnou oblast. Většina průmyslových robotů jsou deriváty těchto modelů [11], [14].



Obrázek 2.12 Polární robot [14]

### 2.9.4 SCARA robot

Tento typ robotů je vhodný pro aplikace typu přemísťování, protože neumožňuje rotaci v koncovém bodě, pouze posun. SCARA roboty disponují velkou výhodou konstrukce, která je robustní, velice přesná (až 0,004 mm) a umožňuje rychlou opakovatelnost. Konstrukce je složená z otočného podstavce, dvou rotačních kloubů a jednoho lineárního [15]. Na obrázku 2.13 je představitel modelu SCARA od společnosti Comau.



Obrázek 2.13 SCARA robot [30]

### 2.9.5 Kloubový robot

Hlavní předností tohoto modelu je libovolná orientace objektu i dosažení libovolného bodu v souřadném systému. Jedná se o konstrukci vytvářející systém s šesti stupni volnosti (6DoF) a tvořící systému s otočnou základnou a rotačními klouby ramene i zápěstí. Struktura konstrukce je velmi podobná lidské ruce, jelikož při začátku vývoje byla inspirace právě napodobit lidskou paži [9].

Zastoupení tohoto modelu je nejčastější variantou. Nevýhodou je zmenšení možnosti pracovního prostoru s maximálním zatížením koncového bodu. Kloubový robot je znázorněn na obrázku 2.14.



Obrázek 2.14 Kloubový robot [31]

### 2.9.6 Paralelní robot

Tento typ robotů se rozšířil nedávno a také ho lze najít pod názvem Delta. Velké využití nachází v třídění a srovnávání objektů. Konstrukcí je malý a lehký oproti ostatním modelům. Mezi výhody patří vysoká rychlost a přesnost ale nevýhodou tohoto systému je pracovní plocha, která tvoří tvar čochky. Nevýhodou je manipulace pouze s lehkými objekty. Plně paralelní konstrukce má všechny akční členy v blízkosti základy, což má za důsledek velmi nízkou setrvačnost. Paralelní struktura podporuje koncový prvek v každém kloubu a zvyšuje tak přesnost. Klouby jsou kuličkové a v teoretickém případě by systém mohl být vhodný pro přesné frézování, ale v prototypu se ukazuje, že přesnost je o řád horší než očekávání. Důvody jsou poddajnosti kuličkových šroubů, složitost konstrukce s přesnými tolerancemi a vysoké síly působící na pasivní klouby [2].



Obrázek 2.15 Paralelní robot [32]

### 2.9.7 Kooperativní robot

Za vývojem kolaborativních robotů neboli kobotů, stojí myšlenka zkonstruovat robota spolupracujícího s člověkem. Koboty mohou pracovat s lidmi přímo na pracovním místě a pomáhat lidem s těžkými, opakujícími ale i přesnými úkony, aniž by ohrožovaly lidský život. Obecně roboty i koboty musí splňovat bezpečnostní normu ČSN EN ISO 10218.

Norma vystihuje bezpečný prostor, který může být monitorovaný a zastaví robota při vstupu člověka do bezpečného prostoru. Typický robot v kleci. Druhou podstatnou bezpečnostní funkcí je sledování rychlosti a vzdálenosti ze snímačů.

Při překročení nastavené meze se ihned kobot zastaví. Maximální mez tlaku je definována normou ISO/TS 15066. Nejeftivnější výhodou je spolupráce s člověkem přímo ve výrobním procesu. Další výhodou je snadná a rychlá instalace do nového prostředí. Snadněji se programuje a nastavuje. Kobot má ale své nevýhody oproti konvenčnímu průmyslovému robotu, a to svojí konstrukcí není schopen manipulace s velkými a těžkými objekty. Dosahuje o řád menší přesnosti a není schopen vykonávat rychlé procesy [10].

Kolaborativní robot je prakticky stejný jako stacionární kloubový robot, pouze se odlišuje rychlostí, přesností a maximálnímu zatížení koncového efektoru. Na obrázku 2.16 je kolaborativní robot, který disponuje poměrně velkým zatížením a to až 170 kg.



Obrázek 2.16 Kolaborativní robot Aura [33]

## 2.10 Adaptivní robot

Počínaje prvou generací se začínaly uplatňovat tzv. adaptivní roboty, kteří se (díky zabudované zpětné vazbě a vyšší inteligenci řídicího systému) dokážou přizpůsobovat změně okolí. To znamená, že reagují na změnu sledovaných parametrů a automatickou změnou svého chování. Např. zjištěné stoupaní teploty chladicí kapaliny eliminují otevřením cesty do chladiče, zjištěné stoupaní tlaku mimo nastavené tolerance vyrovnávají otevřením obtokových či redukčních ventilů apod. Typickými adaptivními roboty jsou například roboty pro svařování elektrickým obloukem, které dovedou sledovat svařovanou spáru a v případě jejích nepřesností opravují naprogramovaný chod hořáku tak, aby ze spáry nevybočil. Vzájemná interakce robota a technologického prostředí vzniká velmi často fyzickým kontaktem koncového efektoru a předmětu technologické scény, kdy se uzavírá mechanická vazba kinematického řetězce robotu. Pro adaptivitu robotu je totiž nezbytné rozpoznat, zda dotyk nastal, stanovit souřadnice bodů dotyku a charakter dotyku vyhodnocením např. velikosti reakčních sil a momentů. K tomu jsou efektoru vybaveny sensorickými zápěstími s poddajnými členy. Kromě toho jsou používány bezdotykové vazby – zejména optické, ultrazvukové, indukční, laserové apod. [15].

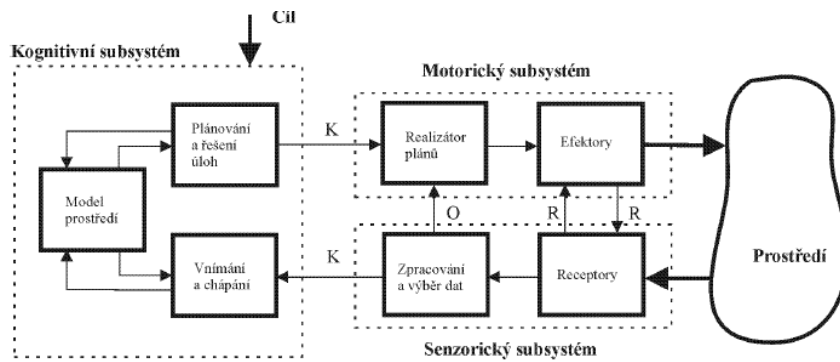
## 2.11 Kognitivní robot

Jedná se o roboty, které by měly být schopny fyzicky ovlivňovat prostředí ve kterém se nacházejí a svým chováním nahradit člověka. Robot musí reagovat na změnu v prostředí. Celý systém se skládá ze dvou hlavních částí. První část je mechanická, která definuje



strukturu jednotlivých částí, způsob pohybování, senzory, efekторы a zpracování vnějších dat. Druhá část představuje nadřazený systém, který zpracovává vstupní data, plánuje další úkony a vyhodnocuje provedené změny na základě vstupních dat ze senzorů. Celé schéma je znázorněno na obrázku 2.17. Efekторы zajišťují pohyb a receptory vyhodnocují fyzikální signály z prostředí. Motorický subsystém obsahuje jednotku pro zpracování dat, která vyhodnocuje relevantní důležitá data pro robota. Kognitivní subsystém provádí hlubší analýzu zpracovaných dat z receptorů. Taková analýza vyžaduje mít nějaký model prostředí a stanovené cíle s postupy pro různé řešení. Kognitivní systém principiálně uzavírá zpětnovazební smyčku a plánuje akční zásahy do prostředí [15].

Vývoj tohoto typu robota je, dle názoru autora diplomové práce, teprve na začátku a tuto problematiku čeká delší doba vývoje. Nasazení řídicího systému na jednu specifickou úlohu může již dnes pracovat spolehlivě.



Obrázek 2.17 Schéma kognitivního robota [15]

## 2.12 Mobilní robot

Na rozdíl od stacionárních robotů se mobilní roboty (dále jen MR) mohou pohybovat v prostředí. Existují dva základní modely MR, a to autonomní a dálkově řízené. Autonomní MR mají přesně dané úkony a trajektorie. Pomocí čidel je schopen autonomní MR zastavit, případně objet překážku a pokračovat ve vykonávání činnosti. Dálkově řízené MR vykonávají činnosti podle zásahu operátora vzdáleně.

Tato problematika MR pojednává o způsobu pohybu v prostoru. Podle kterého pohonného ústrojí se bude robotický systém pohybovat. Jakým způsobem překonávat překážky a jak se orientovat v prostoru. MR našly velké uplatnění v oboru logistiky, převážně autonomní model, který vykonává časté rutinní úkony. Na obrázku 2.18 je znázorněn MR s kombinací se stacionárním robotem. Lze tvrdit, že svým způsobem by se mohlo jednat o kognitivní model robotického systému. Systém obsahuje kamerové ústrojí po orientaci v prostoru a v klidovém režimu vypočítává nový souřadný systém pro manipulátor. Systém ale musí mít předem stanovené cíle, které má vykonat anebo se pohybuje pomocí dálkového ovládní [7], [15].



Obrázek 2.18 Mobilní robot AIMM [34]

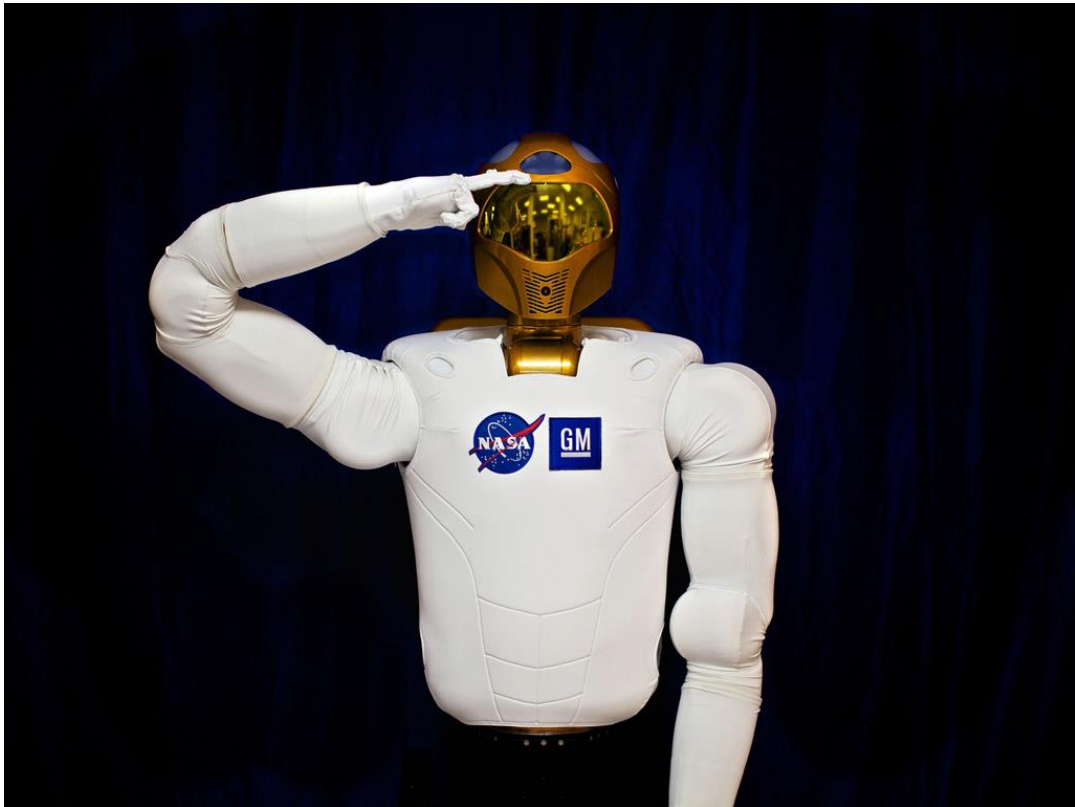
## 2.13 Servisní robot

Vývoj těchto robotů přebírá část vývoje od stacionárních robotů, což umožňuje nové možnosti vývoje. Oblast nasazení se stále rozšiřuje s uplatněním servisních robotů. Tato koncepce je značně složitá, protože servisní robot je vyráběn pro plnění různých a proměnlivých úkonů, nehledě na to, v jakém prostředí se budou vykonávat. Jedná se o velmi variabilní koncept robotů. Servisní robot disponuje nejen mechanickými ale i řídicími, navigačními a senzorickými systémy. Mechanický systém zahrnuje subsystémy, včetně mobilního systému, což přidává na složitosti celého systému už při návrhu [15].

*„Dle normy ISO 8373 je servisní robot definován takto: Servisní robot je volně programovatelné mobilní zařízení, jež částečně nebo plně automaticky vykonává úkony, které nejsou určeny přímo k průmyslové výrobě produktů, nýbrž poskytuje lidem a zařízením služby.“ [41]*

Servisní roboty jsou obecně univerzální, jelikož se vyvíjejí pro určité spektrum činností a jsou velmi podobné mobilním či stacionárním robotům.

Mezi nejpokročilejšího servisního robota patří robonaut R2, který je svým tvarem podobný člověku a předčil svůj vývoj. Z postupného testování došlo až k vývoji ovládnutí robonauta ze země se zpožděním 2 až 10 sekund na mezinárodní vesmírné stanici ISS. Robonaut má nahradit servisní činnosti astronautů a umožnit vykonávat tyto činnosti plně automaticky nebo vzdáleně ze země [16].



Obrázek 2.19 Robonaut 2 [35]

## 2.14 Přímá kinematická struktura

Kinematika popisuje geometrii pohybu a trajektorie robotického systému. Jedná se o mechanismy a jednotlivé části, které jsou vzájemně spolu spojeny a pohybují se vzhledem k sobě. Jednotlivé spoje neboli klouby nazýváme kinematické dvojice. Celý tento mechanismus nazýváme kinematickým řetězcem. Převážná většina kloubů nebo zápěstí stacionárních robotů jsou tvořeny rotačními nebo translačními klouby. Každý kloub má jeden stupeň volnosti. Translační klouby se mohou pohybovat pouze v ose pevně spojené s jiným kloubem. Cílem kinematiky je určit koncový bod vzhledem k rámu, v závislosti na kloubových proměnných.

Důležitou součástí analýzy robotů je úplný kinematický model mechanického systému. Jedná se o polohování a orientaci koncového efektoru v čase a tomu odpovídající průběh polohy jednotlivých kloubů a jejich natočení vůči sobě [17].

V kinematice je výhodou používání maticového počtu místo klasického vektorového počtu. Z tohoto důvodu jsou vektorové operace vyjádřeny pomocí maticových operací abychom zjednodušili zápis. Například vektor  $p$  je vyjadřován jako sloupcová matice v rovnici (2.1).

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = [p_x \quad p_x \quad p_x]^T, \quad (2.1)$$

Vektorový součin vektorů  $\mathbf{a}$  a  $\mathbf{b}$ , jehož výsledek je kolmý vektor  $\mathbf{c}$  na rovinu vektorů  $\mathbf{a}$  a  $\mathbf{b}$ . Vektor  $\mathbf{c}$  je vyjádřen jako součin antisymetrické matice vektoru  $\mathbf{a}$  matice vektoru  $\mathbf{b}$ .

$$\mathbf{c} = \mathbf{a}^T \times \mathbf{b}, \quad (2.2)$$

Pro realizaci vektorového součinu je zavedena antisymetrická matice, znázorněna rovnicí (2.3).

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

Kromě klasických ortogonálních souřadnic se využívá v kinematice tzv. homogenních souřadnic, které jsou čtyřrozměrné. Čtvrtá souřadnice má význam pro souřadnice bodu, kde je vždy rovno 1 a pro souřadnice vektoru je rovno 0. První tři souřadnice jsou stejné jako ortogonální souřadnice. Souřadnice bodu  $\mathbf{p}$  a  $\mathbf{a}$  je vyjádřena sloupcovou maticí [17].

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

V kinematice je nejvýhodnější popisovat vzájemnou polohu pomocí soustavy tzv. lokálního souřadného systému a jejich polohu porovnáváme vůči základnímu souřadnému systému.

Jednotlivé zobecňování souřadnic je definováno na základě lokálních souřadných systémů jako orientované vzdálenosti či úhly mezi příslušnými osami lokálních systémů. Proměnou, jenž udává velikost rotace nebo translace daného kloubu, obecně nazýváme kloubovou proměnou s označením souřadnice  $q_i$ . Zobecněné souřadnice pro všechny klouby tvoří vektor

$$\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n]^T, \quad (2.5)$$

Pro určení polohy, respektive pracovního nástroje potřebujeme znát nejen polohu koncového efektoru, který je definován souřadnicemi  $p_x, p_y, p_z$  v základním souřadném systému ale také jeho orientaci v prostoru danou třemi úhly vůči osám základního souřadného systému. Pro určení orientace nástroje je zaveden vektor  $\mathbf{o}$  ležící v ose posledního kloubu. Spojením vektoru polohy  $\mathbf{p}$  a vektoru orientace  $\mathbf{o}$  dostáváme polohu a orientaci nástroje. Vzniklý vektor má šest souřadnic a je definován následovně

$$\mathbf{w} = [\mathbf{p} \ \mathbf{o}]^T = [p_x \ p_y \ p_z \ o_x \ o_y \ o_z]^T, \quad (2.6)$$

Existují dvě úlohy, jedna řeší problém, kdy známe zobecněné souřadnice a hledáme polohu a orientaci koncového efektoru. Tato úloha je snadno řešitelná pomocí goniometrických vztahů mezi kinematickými dvojicemi a pomocí transformační matice pro přepočítání mezi různými souřadnými systémy. To je přímá úloha kinematiky. Druhá úloha se nazývá inverzní úloha kinematiky a řeší problém obráceně, kdy známe polohu a orientaci koncového bodu a hledáme zobecněné souřadnice. Tato úloha je složitější a může vést k nekonečně mnoho řešení nebo naopak nemusí existovat žádné řešení [17].

### 2.14.1 Transformace souřadnic

Cílem je získat přepočítání souřadnic lokálního souřadného systému (reprezentován jako systém  $\mathbf{o}$ ) do základního souřadného systému (reprezentován jako systém  $\mathbf{b}$ ), který je spojen s pracovním prostorem. Odvození maticových vztahů pro přepočítání z lokálního systému do základního je znázorněno na obrázku 2.20. Pro jednoznačnost je použit identický souřadný systém.

Vektor  $\mathbf{p}$  v součtovém tvaru je možné vyjádřit vůči souřadnému systému  $x_b, y_b, z_b$ .

$$\mathbf{p} = p_{xb}i_b + p_{yb}j_b + p_{zb}k_b, \quad (2.7)$$

A vůči souřadnému systému  $x_0, y_0, z_0$  ve tvaru

$$\mathbf{p} = p_{x0}i_0 + p_{y0}j_0 + p_{z0}k_0, \quad (2.8)$$

Souřadnice vektoru  $\mathbf{p}$  můžeme také získat vyjádřením průmětem vektoru  $\mathbf{p}$  do směru jednotlivých vektorů, a tedy jako skalární součin:

$$p_{xb} = i_b \mathbf{p}, \quad p_{yb} = j_b \mathbf{p}, \quad p_{zb} = k_b \mathbf{p}, \quad (2.9)$$

Pro nalezení transformačního vztahu do souřadnic vektoru  $\mathbf{p}$  vyjádřeného v souřadném systému  $x_b, y_b, z_b$ . Dosadíme vyjádřením vektoru  $\mathbf{p}$  v souřadném systému  $x_0, y_0, z_0$  a dostaneme rovnici

$$p_{xb} = i_b \mathbf{p} = i_b p_{x0} i_0 + i_b p_{y0} j_0 + i_b p_{z0} k_0, \quad (2.10)$$

$$p_{yb} = j_b \mathbf{p} = j_b p_{x0} i_0 + j_b p_{y0} j_0 + j_b p_{z0} k_0, \quad (2.11)$$

$$p_{zb} = k_b \mathbf{p} = k_b p_{x0} i_0 + k_b p_{y0} j_0 + k_b p_{z0} k_0, \quad (2.12)$$

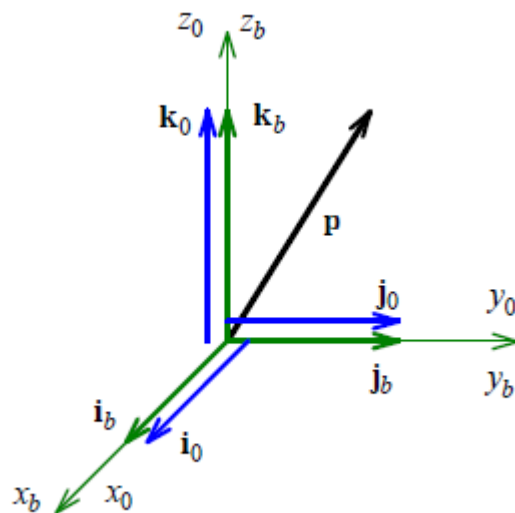
Rovnice můžeme vyjádřit pomocí maticového zápisu ve tvaru.

$$\begin{bmatrix} p_{xb} \\ p_{yb} \\ p_{zb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_b i_0 & i_b j_0 & i_b k_0 \\ j_b i_0 & j_b j_0 & j_b k_0 \\ k_b i_0 & k_b j_0 & k_b k_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{x0} \\ p_{y0} \\ p_{z0} \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

Další možnou variantou zápisu je symbolické vyjádření

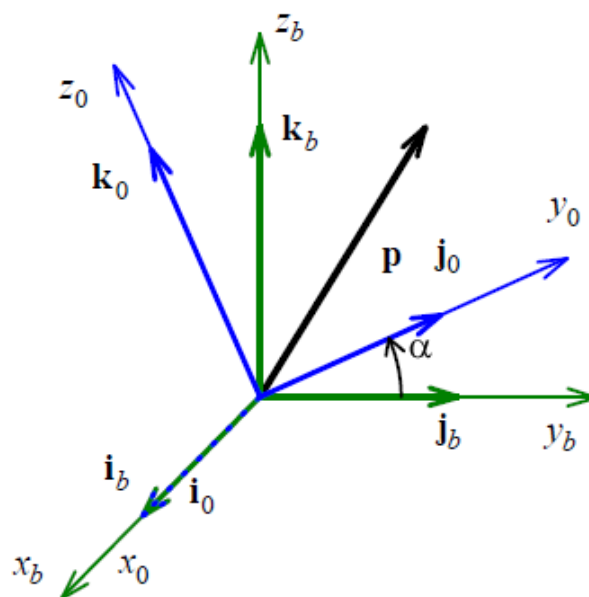
$$\mathbf{p}_b = \mathbf{R}_{b0} \times \mathbf{p}_0, \quad (2.14)$$

Maticový vztah vyjadřuje, že souřadnice vektoru  $\mathbf{p}$  přepočítáme z lokálního souřadného systému do základního souřadného systému, tak že zleva vynásobíme transformační maticí  $\mathbf{R}_{b0}$ . Indexy transformační matice označují, mezi kterými souřadnými systémy je prováděn přepočet [17].



Obrázek 2.20 Transformace souřadnic mezi souřadnými systémy [17]

### 2.14.2 Rotace souřadného systému



Obrázek 2.21 Rotace souřadného systému [17]

Na obrázku 2.21 je znázorněn pootočený lokální souřadný systém podél osy  $x$ , která je identická vůči základnímu souřadnému systému a otočená o úhel  $\alpha$ . Uvažujme, že skalární součin kolmých vektorů je nula a skalární součin identických jednotkových vektorů je jedna a skalární součin různoběžných jednotkových vektorů je  $\cos \alpha$ . Vezme-li v potaz rovnici

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} \pm \alpha\right) = \pm \sin \alpha, \quad (2.15)$$

Dostaneme transformační matici pro rotaci kolem osy  $x$  o úhel  $\alpha$  ve tvaru

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

Obdobně získáme transformační matici pro rotace kolem osy  $y$  a  $z$ .

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$\mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

Uvedené tři transformační matice umožňují přepočítat souřadnice i při vícenásobném natočení kolem různých os. Při natočení souřadného systému podél osy  $z$  a poté podél osy  $x$  s příslušnými uhly  $\alpha$ ,  $\gamma$ . Získáme rovnici pro přepočet souřadného systému [17].

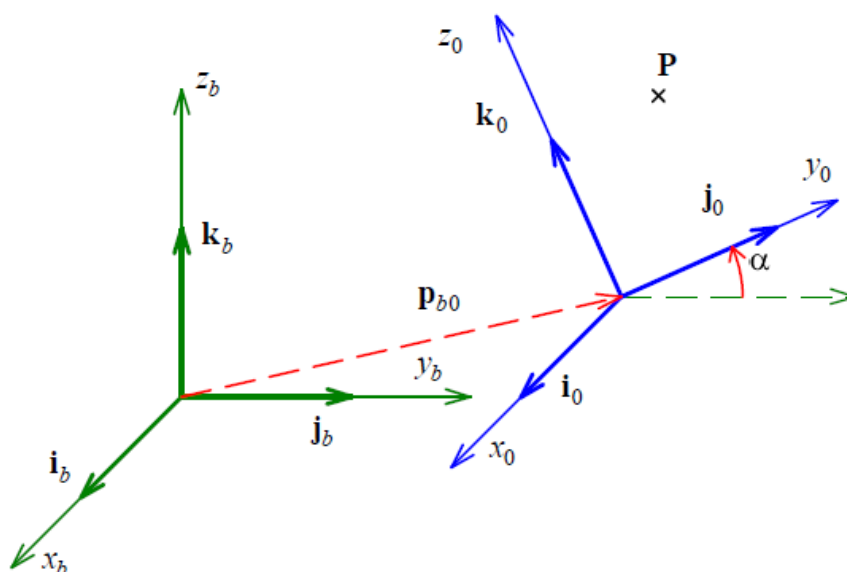
$$(\mathbf{p})_b = \mathbf{R}_{z,\gamma} \mathbf{R}_{x,\alpha} (\mathbf{p})_0, \quad (2.19)$$

### 2.14.3 Rotace a translace souřadného systému

Transformační matici je možné rozšířit. V případech, kdy dochází k natočení souřadného systému vůči sobě a posunutí počátku druhého souřadného systému vůči prvnímu. Pro přepočet souřadnic obecného bodu  $\mathbf{p}$  z lokálního souřadného systému do základního souřadného systému dostaneme rovnici

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{x,\alpha} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

Na obrázku 2.22 je znázorněn případ natočení a posunutí souřadného systému.



Obrázek 2.22 Rotace a translace souřadných systémů [17]

Vyjádření rovnice (2.20 lze napsat jako soustavu rovnic. Formálně rozšíříme o jednu rovnici a rozšířenou soustavu lze opět zapsat v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & p_y \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

A symbolicky

$$\mathbf{p} = (\mathbf{p})_b = \mathbf{A}_{b0} * (\mathbf{p})_0, \quad (2.22)$$

Uvedený maticový i symbolický tvar jednoznačně určuje transformační vztah pro přepočítání souřadnic bodu  $\mathbf{p}$  z posunutého a natočeného lokálního souřadného systému do souřadnic základního souřadného systému.

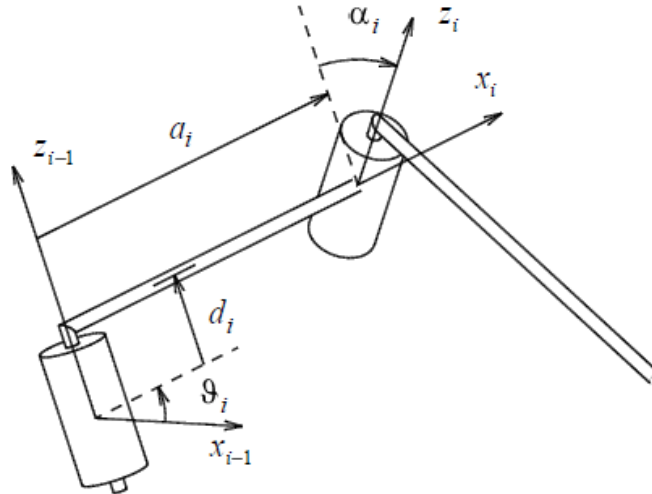
Homogenní transformační matice  $\mathbf{A}_{b0}$  má rozměr  $4 \times 4$  a obsahuje jednak submatici rotace  $\mathbf{R}$ , která vyjadřuje natočení souřadného systému. Poslední sloupec udává polohu počátku vyjádřenou v souřadnicích globálního souřadného systému. Poslední řádek homogenní transformační matice odpovídá fyzikálnímu významu jednotlivých sloupců. První tři sloupce vyjadřují homogenní souřadnice jednotkových vektorů  $i_0, j_0, k_0$  vyjádřených v souřadném systému  $x_b, y_b, z_b$ . Poslední sloupec vyjadřuje homogenní souřadnice počátku souřadného systému  $x_0, y_0, z_0$ .

Dle uvedených vztahů můžeme sestavit transformační matici pro libovolně vzdálené a natočené souřadné systémy [17].



### 2.14.4 Denavit – Hartenbergův princip rozmístění souřadných systémů

Souřadný systém lze umísťovat do jednotlivých kloubů v podstatě libovolně. Při dodržování konvence rozmístění souřadných systémů, je možné sestavovat transformační matici automaticky. Na obrázku 2.23 je ukázka principu koncepce rozmístěné souřadných systémů, které jsou orientovány v prostoru a spojené ramenem.



Obrázek 2.23 Denavit–Hartenbergova konvence [17]

Pro nalezení transformační matice mezi těmito souřadnými systémy, tak vykonáme fiktivní natočení, které povede k sjednocení obou souřadných systémů. To provedeme natočením kolem osy  $x_{i-1}$  aby natočení bylo rovnoběžné s osou  $x_i$ . Dále posuneme natočený kloub ve směru  $z_{i-1}$  o vzdálenost  $d_i$  tak aby  $x_{i-1}$  a  $x_i$  byli totožné. Nyní kdy máme oba souřadné systémy stejně natočené posuneme první souřadný systém o vzdálenost  $a_i$ , tím docílíme totožných souřadných systémů. Obecně uvedený princip tvrdí, že libovolně orientované a posunuté souřadné systémy je možné sjednotit pomocí čtyř jednotlivých pohybů a to rotací, translací, translací a zase rotací.

Transformační vztah mezi dvěma souřadnými systémy  $i - 1$  a  $i$  je dán čtyřmi jednoduchými pohyby, které lze popsat v homogenním tvaru transformačních matic.

Natočení osy  $x$  kolem osy  $z$  o úhel  $\gamma$ :

$$A_{z_{i-1}, \gamma_i} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i & 0 & 0 \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

Posunutí osy  $x$  ve směru osy  $z$  o vzdálenost  $d$ .

$$A_{z_{i-1}, d_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

Posunutí počátku  $i - 1$  podél osy  $x_i$  o vzdálenost  $a_i$

$$A_{x_i, a_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

Natočení osy  $z_{i-1}$  kolem  $x_i$  a uhel  $\alpha$

$$A_{x_i, \alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

Vynásobením jednotlivých dílčích transformačních matic v pořadí tak jak byli provedeny získáme výslednou transformační matici.

$$A_{i-1, i} = A_{z_{i-1}, \gamma_i} \cdot A_{z_{i-1}, d_i} \cdot A_{x_i, a_i} \cdot A_{x_i, \alpha_i}, \quad (2.27)$$

Po vynásobení v obecném tvaru získáme výslednou homogenní transformační matici.

$$A_{i-1, i} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i \cos \alpha_i & \sin \gamma_i \sin \alpha_i & a_i \cos \gamma_i \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i \cos \alpha_i & -\cos \gamma_i \sin \alpha_i & a_i \sin \gamma_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

Denavit–Hartenbergovy parametry  $\gamma_i, d_i, a_i, \alpha_i$  plně charakterizují geometrické vztahy mezi sousedními kinematickými dvojicemi.

Homogenní transformační matice dle rovnice (2.28) je univerzální mezi dvěma sousedními systémy. Výhodou je, že má stejný tvar pro všechny lokální souřadné systémy bez ohledu na typ kinematické dvojice. Pro rotační pohyb obsahuje transformační matice pouze jednu proměnou charakterizující úhel natočení a tři konstanty reprezentující ostatní rozměry a orientaci. Translační pohyb obsahuje opět pouze jednu proměnou, která udává posun  $d_i$  a ostatní parametry jsou konstantní.

Homogenní transformační matice mezi dvěma sousedními souřadnými systémy, má obecný tvar

$$A_{i-1, i} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

Kde  $\mathbf{R}$  je submatice vzájemné rotace souřadných systémů a vektor  $\mathbf{p}$  je posunutí jejich počátků. První tři sloupce mají fyzikální význam jednotlivých vektorů  $i_i, j_i, k_i$  vyjádřené v sousedním souřadném systému. Poslední sloupec matice udává homogenní souřadnice počátku základního systému vyjádřené v sousedním souřadném systému. Celková transformační matice mezi základním souřadným systémem a posledním souřadným systémem vznikne vynásobením jednotlivých transformačních matic. Výsledná transformační matice je funkcí všech kloubových proměnných a řeší přímou kinematickou úlohu.

$$\mathbf{T}_{bn} = \begin{bmatrix} R_{bn} & p_{bn} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_n & j_n & k_n & p_{bn} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

Pokud je potřeba přepočítat jiný bod, než z počátku posledního souřadného systému do základního souřadného systému použije se vztah z rovnice (2.31), za předpokladu známých velikostí posunů a natočení kinematických dvojic  $q_1, q_2, \dots, q_n$ .

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{bn}(q_1, q_2, \dots, q_n) \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

Pro přepočet souřadnic vektoru  $\mathbf{o}$  platí vztah:

$$\begin{bmatrix} o_{xb} \\ o_{yb} \\ o_{zb} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{bn}(q_1, q_2, \dots, q_n) \begin{bmatrix} o_{xn} \\ o_{yn} \\ o_{zn} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

Účelem Denavit–Hartenbergovy konvence je tedy vytvořené transformační matice mezi dvěma souřadnými systémy v universálním tvaru, tak abychom snadno provedli výpočet přímé kinematické úlohy. Do universálního tvaru je cyklicky dosazována jedna proměnná a tři konstantní parametry pro obdržení výsledné transformační matice  $\mathbf{T}_{bn}$ .

Obecně vztah platí i pro kinematickou strukturu s více klouby, a tak transformační matice mezi základním a posledním souřadným systémem je znázorněna ve tvaru rovnice (2.33) [17].

$$\mathbf{T}_{bn}(q_1, q_2, \dots, q_n) = A_{b0} \cdot A_{01}(q_1) \cdot A_{12}(q_2) \cdot \dots \cdot A_{n-1,n}(q_n), \quad (2.33)$$

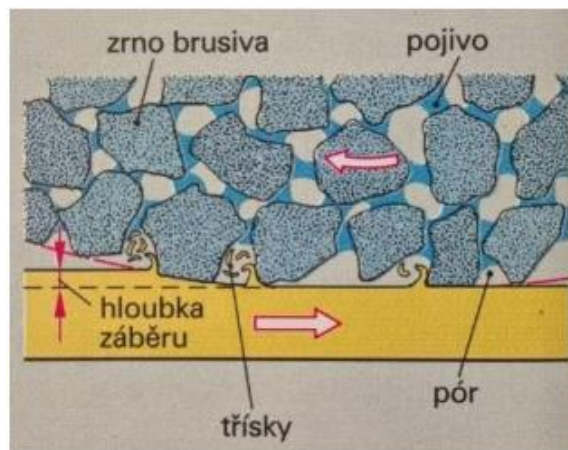
### 3. ZPŮSOB BROUŠENÍ A MĚŘENÍ

Jedná se o druh třískového obrábění, při kterém se pomocí břitu rezného nástroje odebírají částice materiálu ve tvaru třísek. Touto metodou jsou nejčastěji obrábějí rovinné, válcové, kuželové nebo tvarové plochy. V současné době se rozšiřují číslicově řízené obráběcí stroje, které umožňují vyrábět tvarově složitější výrobky. Hlavní výhoda spočívá v tvarové a rozměrové přesnosti obráběného objektu [38].

Nástroje jsou tvořeny směsí zrn brusiva a pojiva do vhodného tvaru, struktury a tvrdosti. Nejčastěji používaný druh brusiva je korund (oxid hliníku) nebo karbidy křemíku. Pojiva spojují jednotlivá brusná zrna a zároveň umožňují uvolnění opotřeбенých zrn, tím se dostávají do záběru nová ostrá zrna. Čas uvolnění zrn je závislý na typu broušeného materiálu. Na obrázku 3.1 je znázorněn princip broušení.

Charakteristické znaky broušení:

- Vznik celkového množství tepla a s tím spojená nutnost chlazení obrobku
- Nepravidelný úběr materiálu z důvodu rozdílné geometrie zrn.
- Schopnost přenosu malých rezných sil vlivem slabého upevnění zrn.
- Postupná ztráta rezné schopnosti nástroje, způsobená otupením ostří.

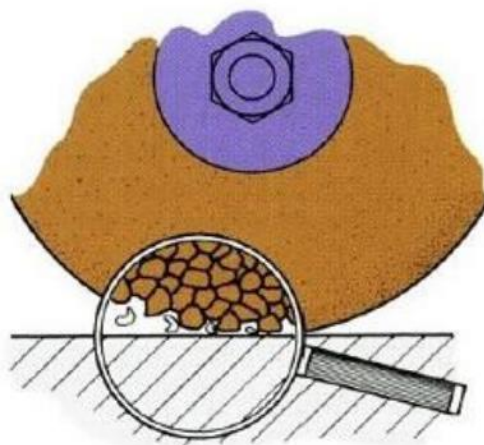


Obrázek 3.1 Princip broušení [38]

#### 3.1 Charakteristika broušení

Proces broušení patří do dokončovací fáze obrábění, které se vyznačuje dosažením vysoké přesnosti a drsností povrchu. Mezi další oblasti, kde je možné využít této metody je opracování materiálů, které mají vysokou pevnost a tvrdost povrchu. Jejich obrábění reznými nástroji je neefektivní nebo i nemožné. Odebírání materiálu vzniká ve formě malých částic (třísek). Při broušení dochází k nepravidelnému úběru třísky jednotlivými zrny brusného kotouče v důsledku rozdílných geometrických forem zrn a jejich nepravidelnému rozložení v brousicím kotouči viz obrázek 3.2. Rozměry třísek při

broušení dosahují velikosti v průřezu  $10^{-3} \text{ mm}^2$ , což má za důsledek zvýšení řezných sil (odpor). U broušení dochází k vysokým řezným rychlostem 30 až  $100 \text{ ms}^{-1}$ . Z důvodu velkého tření v místě řezu může dosáhnout teplota až  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , a to může způsobit roztavení třísky nebo změnu struktury povrchu. Proto je důležité intenzivně chladit brusný kotouč i broušený povrch technologickou kapalinou [39].



Obrázek 3.2 Nepravidelný úběr třísky [39]

### 3.1.1 Základní metody broušení

Dají se brousit různé povrchy v různých polohách a z toho vyplívají druhy a metody broušení. Tyto metody se dělí do 3 kategorií dle základního rozdělení broušících metod:

- Podle tvaru a způsobu vytvoření obrobeného povrchu
  - Rovinné broušení – výsledkem je rovinná plocha;
  - Broušení dokulata – slouží pro broušení rotačních ploch;
  - Broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem;
  - Tvarové broušení – výroba ozubených kol, závitů atd.;
  - Kopírovací broušení – na NC a CNC strojích;
  - Broušení tvarovými kotouči – pro výrobu tvarových ploch.
- Podle řezné části broušícího kotouče
  - Obvodové broušení – broušení obvodem kotouče;
  - Čelní broušení – broušení čelem kotouče.
- Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brusnému kotouči
  - Axiální broušení – osa kotouče je rovnoběžná s posuvem stolu;
  - Radiální broušení – broušící kotouč je radiální k hlavnímu posuvu stolu;
  - Obvodové zapichovací broušení – posuv stolu je plynulý radiální;
  - Čelní zapichovací broušení – posuv stolu je plynulý axiální [39].

Pro účel této práce je využita metoda broušení dokulata, jelikož se jedná kulatý mechanický díl.

## 3.2 Charakteristika měření

V dnešní době pojem měření je velmi specifická činnost, která závisí na mnoha faktorech a to, co chceme měřit, jak to chceme měřit a zásadní princip je jakou metodou nebo na jakém fyzikálním principu je založen měřicí přístroj. Dalším aspektem u měřicích přístrojů je, jakým způsobem vyhodnocujeme data a jakou veličinou jsou získány. Posledním a velmi zásadním kritériem je s jakou přesností chceme dosáhnout výsledného měření a od toho se odvíjí zvolený měřicí přístroj, který je pro danou činnost nejvhodnější. Měření je velmi rozsáhlé téma, a proto jsou zde uvedeny základní principy a metody, které byly použity pro realizace robotického pracoviště.

Měření povrchové struktury je řešeno redukcí na rovinu kolmou k povrchu. Získá se tím profil, ze kterého jsou obdrženy základní parametry. Dotyková metoda je jednou z nepoužívaných metod pro měření povrchové struktury [42].

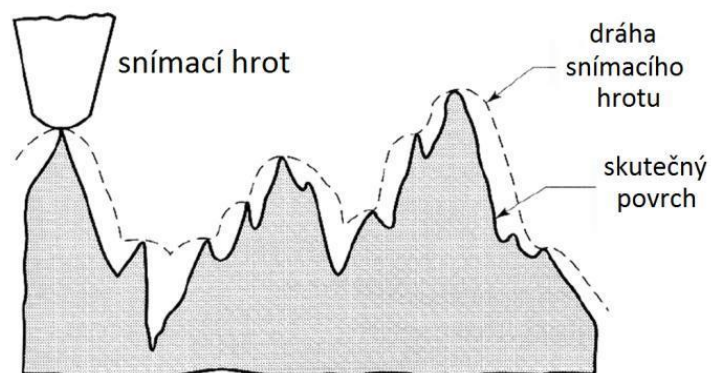
Hojně používaným měřidlem v oblasti automatizace je optický mikrometr, který měří statické i pohybuující se objekty. Bezkontaktní měření se využívá při kontrole rozměrů vstupujících součástí. [43].

### 3.2.1 Metody měření drsnosti

- Kvalitativní hodnocení – Jedná se o hodnocení drsnosti povrchu prostřednictvím lidského vnímání. Spolehlivost této metody je omezena rozlišovací schopností lidských smyslů a fyzikálních vlastností použitých pomůcek, jako je mikroskop.
- Nepřímé kvantitativní měření – U této metody měření je kontrolovaná plocha porovnávaná se vzorovým komparačním měřidlem (s etalonem).
- Dotykové profiloměry s postupnou transformací profilu – princip měření je rovnoměrné posouvání měřicího hrotu po kontrolovaném povrchu. Změna výšky hrotu způsobená nerovností povrchu je zaznamenávána v mnohonásobném zvětšení.
- Bezdotykové profiloměry – Jedná se o fotoelektrická zařízení s lasery, které využívá interferenčními a optickými metody [42].

### 3.2.2 Dotykové měřicí přístroje

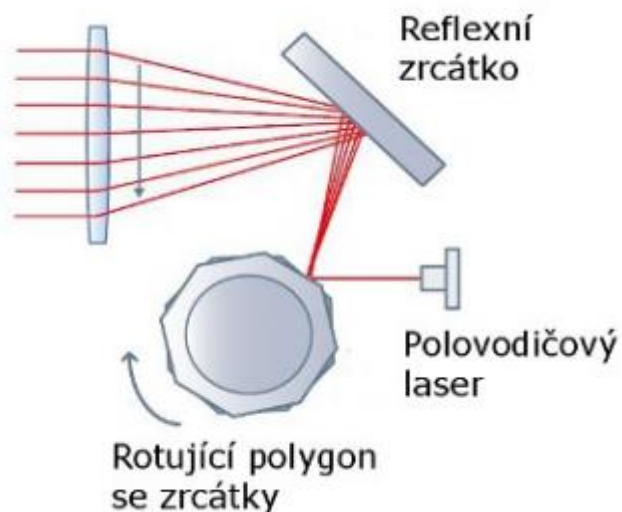
Podle normy ČSN EN ISO 3274 je definován dotykový měřicí přístroj jako zařízení, které používá ke snímání povrchu speciální hrot za účelem získání odchylky ve formě profilu povrch, výpočtu parametrů a možnosti záznamu profilu. Mezi důležité komponenty měření patří měřicí obvod. Jedná se o uzavřený řetězec, který zahrnuje všechny mechanické části, které spojují měřený objekt a špičku hrotu snímače. Zda dojde při měření celkového profilu nerovností až ke dnu největšího prohloubení. Nalezení největšího prohloubení závisí na geometrickém zakončení hrotu. Špička by měla tlačit na povrch silou, při které je kontinuálně spojena s měřeným povrchem. Tato problematika je znázorněna obrázkem 3.3 [42].



Obrázek 3.3 Snímání nerovností povrchu [23]

### 3.2.3 Princip funkce optických mikrometrů

Termín „optický mikrometr“ je zaveden a obvykle používán pro různé typy měřicích zařízení, které se liší od jeho struktur a funkcí. Jsou používány dva druhy optických detektorů, a to pro jednoduché a rychlé měření je zaměřen kolimovaný svazek paprsků skrze čočky na fotodiodu. V tomto případě velikost objektu (popř. pozice hrany) je měřena množstvím dopadajícího světla na fotodiodu. Druhým detektorem je řádkový snímač CCD-CMOS, který má univerzální využití a je přesnější. Snímač obdrží mnohem více informací o měřeném objektu než při použití fotodiody. Posouzení těchto informací je však výrazně složitější [43]. Na obrázku 3.4 je znázorněn detailněji princip funkce snímače.



Obrázek 3.4 Vysílač laserového skenovacího mikrometru [44]

### 3.2.4 Rozdělení optických mikrometrů

Základním kritériem je druh použitého detektoru, a to fotodioda nebo řádkový snímač. Nejdůležitějším kritériem pro rozdělení optických mikrometrů je zdroj světla (konstrukce vysílače). Jako zdroj světla se používají laserové nebo běžné světelné diody.

V optických mikrometrech, kde je přijímací prvek fotodioda, bývá vysílač v podobě laserové diody. U tohoto typu často výrobci neuvádí přesnost měření ale rozlišovací schopnost (např.: 0,005 % FSO a linearita  $\pm 2$  % FSO). Pro lepší představu lze chápat měřicí rozsah mikrometru jako šířku kolimovaného svazku.

Oba typy světelných zdrojů se používají v mikrometrech s řádkovými snímači a jsou podle konstrukce vysílače rozděleny do tří skupin – laserové, skenovací a LED diody. Obecně podle konstrukce jsou laserové diody podstatně jednodušší než běžné LED diody.

Mikrometry s LED diodami jsou dražší a složitější, ale získávají větší přesnost. Mají relativně složitější soustavu optických komponent ve vysílači a přijímači vzhledem k laserovým mikrometrům.

Tzv. laserové skenovací mikrometry využívají pro lepší osvětlení laserový paprsek rozmítaný rotujícím polygonem se zrcátky, znázorněno na obrázku 3.4. Nevýhodou tohoto typu je nižší frekvence měření a komplikovaná konstrukce s pohyblivými se součástmi. Pro dosažení výsledné přesnosti je využito průměrování velkého počtu výstupních hodnot [43].

### 3.2.5 Měřicí metody optických mikrometrů

*„Funkci optického mikrometru s řádkovým snímačem lze přizpůsobit konkrétním požadavkům pomocí tzv. měřicích módů. U optických mikrometrů s fotodiódou uživatel tuto možnost nemá. Volba měřicího módu znamená výběr hran objektů, jejichž poloha, popř. vzdálenost, uživatele zajímá. V závislosti na zvoleném módu detekuje mikrometr ty hrany v profilu jasu snímače, které vyhovují nastaveným kritériím, z pořadových čísel jednotlivých pixelů vyhodnotí jejich pozici, popř. použije algoritmy pro dosažení subpixelového rozlišení.“ [43].*

Základní metody zahrnují měření polohy konce objektu umístěného v aktivní oblasti mezi vysílačem a přijímačem, měření vzdálenosti mezi hranami souvislého objektu a měření vzdálenosti mezi dvěma objekty. Komplikovanější metody měření lze použít například při kontrole vývodů integrovaných obvodů. Relativně vysoká rychlost měření umožňuje použít metody pro pohyblivé se objekty [43].



## 4. ROZBOR ZADÁNÍ

V této kapitole jsou podrobněji rozebrány jednotlivá zařízení, včetně zvolených měřicích přístrojů, které vycházejí z návrhu a byly využity při realizaci výrobního pracoviště. Dále jsou specifikovány a popsány hlavní přednosti a technické parametry použitých přístrojů. Vybrané přístroje jsou stručně popsány na základě jejich principu, parametrů a vlastností. Jelikož se jedná o technologický proces, je zapotřebí brát v úvahu pravidelnou kontrolu a počítat s pravidelnější celkovou údržbou.

### 4.1 Specifikace řídicího systému

Hlavní vlastností systému je generování a vyhodnocování akčních signálů na základě vstupních hodnot z jednotlivých přístrojů. Další vlastností je zpracování výstupních dat a následné vyhodnocení výrobního procesu. Řízení komunikace je prováděno na základě digitálních vstupů a výstupů. Vstupní hodnoty reprezentují aktuální stav výrobního procesu a výstupní hodnoty řídí celý systém. Ovládání elektromagnetických ventilů vykonává řídicí jednotka R1C při konkrétním pohybu vyjmutí a zasunutí vzorku. K získání dat z měřicích přístrojů je použita RS232C komunikace. Řídicí systém umožňuje nastavení a ovládání jednotlivých přístrojů manuálně i automaticky v řídicím režimu a zároveň vizualizuje aktuální stavy jednotlivých přístrojů.

#### 4.1.1 Hlavní řídicí prvek

Řídicím prvkem je zvolen nadřazený průmyslový PC systém (IPC), který generuje signály pro jednotlivé přístroje. IPC slouží pro manuální ovládání jednotlivých komponent a pro možnost nastavení systému. V tomto případě můžeme snadněji rozšířit systém a použít bezpečnostní prvky typu koncový snímač polohy nebo optická závora, a zvýšit tak bezpečnost celého systému, eventuálně dosáhnout eliminace nežádoucího poškození.

Druhou možností je využít řídicí jednotku robota, která obsahuje jak rozšiřující, tak i bezpečnostní moduly. Navíc je možné připojit další moduly pro dosažení všech potřebných vstupů a výstupů systému. Robot pak vykonává kratší časové úkony a není tak časově vytížen, a zároveň je zásadním prvkem pro manipulaci se vzorky a návaznosti jednotlivých výrobních činností. Z hlediska optimalizace je robotická část nejvíce proměnlivou v celém procesu. Procesy pro obrábění a měření lze modifikovat, avšak nedosahují znatelného zrychlení procesu pro jeden celý cyklus. Měřicí stanice bude pokaždé měřit přibližně stejně dlouho.

#### 4.1.2 Modulární řešení

Systém je stavěn způsobem, aby každý dílčí proces byl universální, lehce nahraditelný a nezávislý na ostatních procesech. Tímto se systém stává modulární, kdy lze jednoduše

nahradit brusku jiným typem. Poté stačí pouze seřadit body pro robota a připojit uchopovací systém pomocí elektromagnetických ventilů.

Dále se nabízí možnost jednoduchého rozšíření o další broušící proces nebo celý výrobní proces, který by mohl existovat vedle stávajícího řešení, a robot by tak mohl využít celý pracovní prostor. Při rozšíření výrobního procesu může nastat problém s potřebným množstvím digitálních vstupů a výstupů, které jsou potřeba pro posílání BCD kódu. Každá část se nastavuje individuálně, čímž lze celý systém jednoduše upravit pro jiný výrobek.

#### **4.1.3 Komunikace systému**

V průmyslovém odvětví je způsob komunikace dost zásadní a naráží na problémy jiných výrobců. Často se lze setkat ve výrobním odvětví s mnoha zařízeními od jiných dodavatelů a každý používá jiné rozhraní, jiný typ formátu, nebo podporuje pouze jeden komunikační protokol. Variant je mnoho a tuto problematiku řeší softwary jako je MES, ERP atd. Pro tuto práci byl zvolen jednoduchý princip komunikace, a to na základě binárních vstupů a výstupu. Jedná se totiž o univerzální systém, který není navržen pro uplatnění v průmyslovém využití. Řešení komunikace je pouze pomocí binárních hodnot a jedná se o nejlevnější dostupnou možnost. Na druhou stranu použití průmyslových sběrnic typu profiBUS, DeviceNet, CANopen atd. umožňuje kompatibilitu s více zařízeními a zejména toto řešení je výhodné pro celou výrobní linku. Jedná se o bezpečnější a rychlejší komunikaci. Hlavní výhodou použití komunikačních sběrnic je způsob komunikace, kdy získáváme více informací než jenom pouhé binární kombinace. Některé průmyslové protokoly umožňují monitorování jednotlivých prvků či uzlů v síti. Často nastává situace v průmyslu, kdy společnosti mají několik zařízení, ale každé používá jiný komunikační protokol a pro takové situace se může uplatnit BCD kód jako vhodná varianta. Kde naopak neřešíme kompatibilitu jednotlivých zařízení, ale počet příslušných portů.

#### **4.1.4 Zakázané zóny**

Prostorové zakázané zóny lze dělit do dvou variant, kterými jsou softwarová a mechanická. Mechanická varianta omezuje rozsah pohybu robota a je potřeba rozebrat zakrytovanou část kloubu robota a do patřičných otvorů vložit speciální šroub, kterým se omezí pracovní rozsah mechanicky. V podstatě se jedná o bezpečnější variantu a v případě, že by omylem došlo ke spuštění jiného kódu, nemohlo by dojít k poškození. Jediná porucha by mohla vzniknout při maximální provozní rychlosti robota, kdy by mohlo dojít k povolené vůli mezi klouby, kde je umístěn speciální šroub. Po takovém incidentu je ideální provést kalibraci znovu. Softwarová varianta je více škálovatelná a lze tak jednoduše měnit zakázané zóny. Softwarová metoda není omezená mechanickou částí, zakázanou zónu lze zvolit efektivněji.

## 4.2 Stacionární robot – Comau Racer R5

Pro danou úlohu byl zvolen stacionární robot od společnosti Comau, modelová řada Racer R5, teoretický rozsah a schopnost manipulace je 0,8 metrů od středu základny.

Jedná se o šestiosého stacionárního robota znázorněného na obrázku 4.1. Maximální zatížení na přírubě robota je 5 kg. Robot váží 32 kg a disponuje stupněm ochrany krytu IP54. Umožňuje připojení tlakového vzduchu nebo elektrického napětí pro ovládání připevněného efektoru. K řídicímu systému je možné se připojit pomocí ethernetu.



Obrázek 4.1 Robot Racer R5

### 4.2.1 Pracovní režim

Aby mohl být řídicí systém uveden do provozu, musí být výhradně uvnitř chráněné oblasti. Rovněž je nutné zkontrolovat, zda v normálních podmínkách robota neexistuje žádná překážka uvnitř chráněného území. Pokud je nutné omezit pracovní plochu robota, provede se to pomocí mechanického kolíku.

Prostor pro instalaci robota musí být, pokud možno bez jakýchkoliv překážek, které by mohly bránit nebo úplně omezit jeho pohyblivost. Při montáži robota a řídicí jednotky musí být zkontrolováno, zda jsou nosné šrouby bezpečně upevněné. Spojení mezi řídicí jednotkou a napájecí sítí musí být provedeno pomocí speciálního kabelu, který je součástí robotického manipulátoru.

Před zahájením programu se musí provozovatel robotického systému ujistit, že neexistují žádné potenciálně nebezpečné podmínky, a že se uvnitř chráněného prostoru nikdo nenalézá. Před uvedením do provozu uvnitř chráněného prostoru je potřeba se přesvědčit, že všechny nezbytné bezpečnostní zařízení jsou v provozuschopném stavu. Zvláštní pozornost je třeba věnovat při programování pomocí ručního ovládacího panelu. V této situaci, ačkoli jsou všechna hardwarová i softwarová bezpečnostní zařízení aktivní, je pohyb robota závislý na operátorovi.

Aktivace automatického provozu je povolena pouze s robotickým systémem, jež je integrován uvnitř prostoru s ochranami. Před spuštěním automatického režimu musí

obsluha zkontrolovat robota a provést kontrolu systému. Zvláštní pozornost je třeba věnovat při volbě dálkového režimu, ve kterém může nastat situace, kdy PLC provádí automatické operace při zapnutí a startování systému [19].

#### **4.2.2 Integrovaní robota**

V závislosti na aplikacích a provozních požadavcích může být robot instalován na podlahu, ke stěně, na nakloněné rovině nebo na stropě. V případě všech možných řešení musí být robot vždy instalován na nosné konstrukci vložené mezi robotem, základnou a montážní plochou. Je možné omezit osu zdvihu, a to v závislosti na konfiguraci návrhu. Omezení pohybu lze provést mechanickým dorazem, viz kapitola 4.1.4. Omezení osy zdvihu umožňuje, aby se zabránilo případné kolizi s jinými částmi stroje. Mechanický doraz musí být upevněn na jednom z šesti otvorů se závitými přítomnými na robotické základně. Je možné použít maximálně dva mechanické pevné dorazy [19].

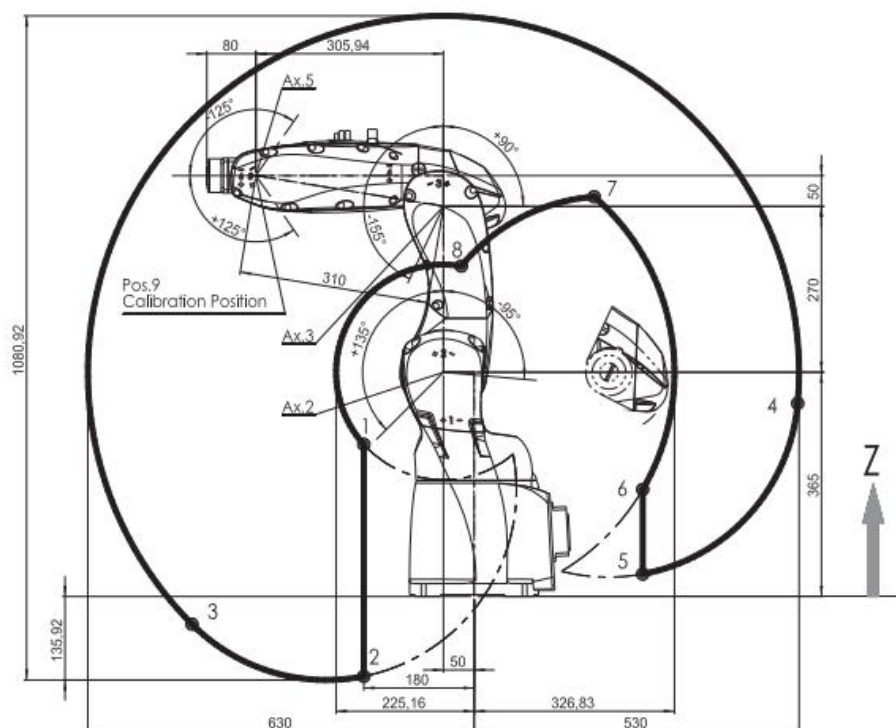
#### **4.2.3 Kalibrace**

Robot je mechanicky vybaven možností k provedení kalibrace os robota. Jedná se o mechanický klíč, který umožňuje provést správnou ruční kalibraci každé osy robota. Nástroj pro kalibraci musí být vložen do specificky vyznačených míst na každé ose robota, aby se dosáhlo mechanické kalibrace zářezů. Na efektoru probíhá kalibrace pomocí vhodných šroubů a natáčením se nástroj zarovná. [19].

#### **4.2.4 Technické specifikace**

Robot je stroj speciálně navržen a konstruován pro použití v průmyslovém prostředí. Pro správnou funkci musí být robot uzavřen s konkrétní řídicí jednotkou, přičemž funkce řídicí jednotky musí být v souladu s připojeným robotem. Robot Racer R5 je zvláště vhodný pro aplikace jako montáž, manipulace a manipulace nástrojů pro stroje [19].

Pracovní sférický prostor, v kterém dokáže robot manipulovat s předměty, je znázorněn na obrázku 4.2. Černě zvýrazněná oblast popisuje maximální dosažení koncového bodu.



Obrázek 4.2 Pracovní rozsah modelu Racer R5 [19]

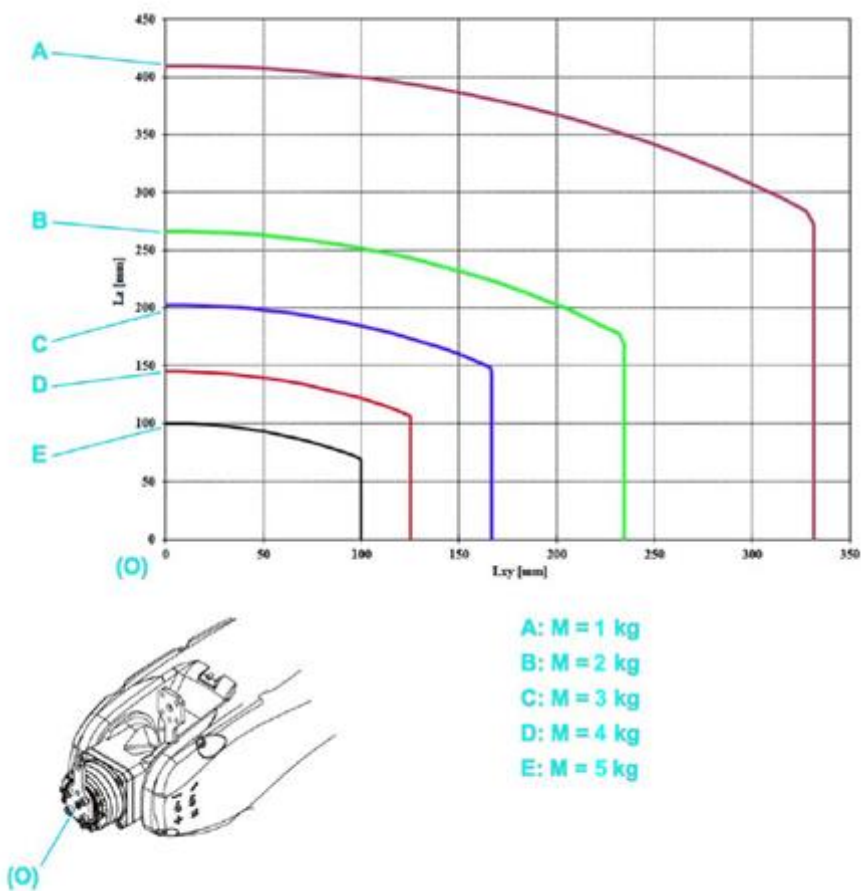
Tabulka 4.1 popisuje maximální natočení jednotlivých kloubů, které jsou značeny od základny robotického systému. Základna je označena číslicí 1.

Tabulka 4.1 Natočení jednotlivých kloubů

Označení kloubů	Maximální natočení kloubů (rychlost otáčení)
<b>Kloub 1 (Ax.1)</b>	$\pm 170^\circ$ (400°/s)
<b>Kloub 2 (Ax.2)</b>	- 85° až 135° (360°/s)
<b>Kloub 3 (Ax.3)</b>	- 155° až 90° (400°/s)
<b>Kloub 4 (Ax.4)</b>	$\pm 200^\circ$ (500°/s)
<b>Kloub 5 (Ax.5)</b>	$\pm 125^\circ$ (500°/s)
<b>Kloub 6 (Ax.6)</b>	$\pm 2700^\circ$ (800°/s)

#### 4.2.5 Koncový efektor

Následující obrázek 4.3 znázorňuje diagram maximálního zatížení na přírubě robota. Setrvačnost je uvedena v grafu křivek, jenž se vztahují k zatížení těžiště působící na přírubu. Celkem je znázorněno pět křivek, které jsou definovány zatížením od 1 kg (A) až po maximální zatížení robota, tedy 5 kg (E). Z obrázku lze vypořadovat, že při větším zatížení dochází ke zmenšení schopnosti manipulace v prostoru.



Obrázek 4.3 Zatížení koncového efektoru [19]

#### 4.2.6 Řídicí jednotka

Společnost Comau nabízí celkem tři řady systémů pro řízení robotů. Jednotka R1C je navržena pro zjednodušené a multifunkční ovládání 6osých a 4osých robotů. Je určena zejména pro modely Racer R3, Racer R5 a Rebel-S. Jedná se o modulární koncept, kde jsou určité prvky připraveny na rozšíření systému. Pro úpravu programu systému se využívá TeachPendant (TP5) nebo připojený software přes ethernet kabel. Řídicí jednotka se může stát síťovým uzlem v síti. Software obsahuje širokou škálu funkcí a to, kontrolování detekcí kolize s nastavením definovaných parametrů (ruční manipulaci, vytváření, úpravy pohybů krok za krokem, monitorování funkcí systému). Dále umožňuje automatické přepočítávání koncového zatížení, synchronizaci robotů, sledování senzorů nebo dopravníku, pohyby pro svařování nebo paletizaci, kontrolování rychlosti kloubů a mnoho dalších funkcí. Ne každá z těchto vlastností je dostupná pro jednotku R1C, některé softwarové funkce jsou primárně určeny pro výkonnější jednotku C5G nebo C5Compact. Systémy umožňují automatické nebo dálkové řízení, kdy pomocí PLC můžeme provádět automatické operace zapnutí nebo spuštění programu vzdáleně.

Řídicí jednotka R1C vyžaduje uživatelské rozhraní TP5, WinR1C nebo RoboShop.

- TP5 se používá k ručnímu ovládní robotu. Umožňuje programování, provádění a úpravu pohybů robotu krok za krokem. Navíc dodává řídicí a monitorovací funkce systému a zahrnuje bezpečnostní opatření.
- WinRIC, RoboSim a Roboshop jsou softwary pro rozhraní mezi osobním počítačem a řídicí jednotkou. Obsahují funkce pro editaci, překládání a spouštění souborů. Dále nabízí možnosti pro zadávání příkazů přímo do řídicí jednotky a zobrazování chyb. Komunikace mezi zařízeními je založena na protokolu TCP/IP.

K dispozici je možnost konfigurace I/O FieldBus modulů, pro komunikační protokoly Profinet, Profibus, DeviceNet, CANopen, EtherCAT a Ethernet/IP.

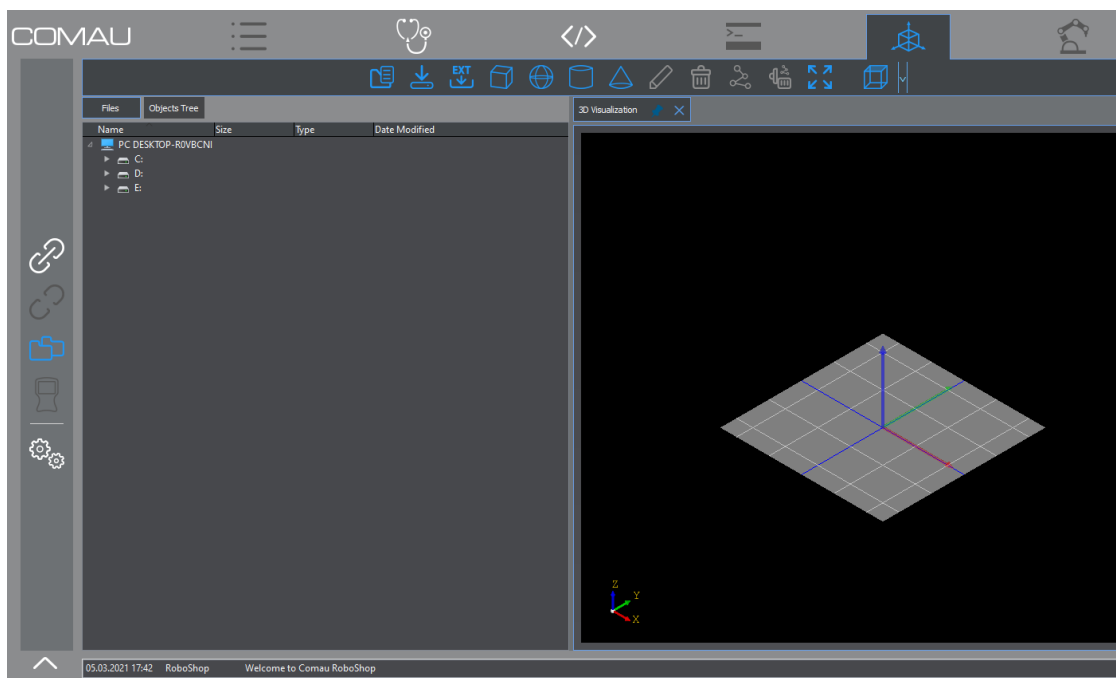
Jak bylo zmíněno výše, jedná se o modulární řešení. Tabulka 4.2 popisuje připojené moduly k řídicí jednotce, pouze poslední dva z uvedených jsou připraveny k použití a vyvedeny na výstupní konektor x31. Řídicí jednotka obsahuje navíc moduly pro bezpečnostní obvody, které nejsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 4.2 Rozšiřující moduly

Označení karty	Vlastnosti karty
<b>X20PS2100</b>	Napájecí 24 VDC
<b>X20DI9371</b>	12 Digitálních vstupů
<b>X20DO6322</b>	16 Digitálních výstupů
<b>X20AI2622</b>	2 Analogové výstupy
<b>X20AO2622</b>	2 Analogové vstupy
<b>X20CM1941</b>	Resolver modul
<b>X20DC1198</b>	Interface module SSI
<b>X20DS1828</b>	Hiperface modul

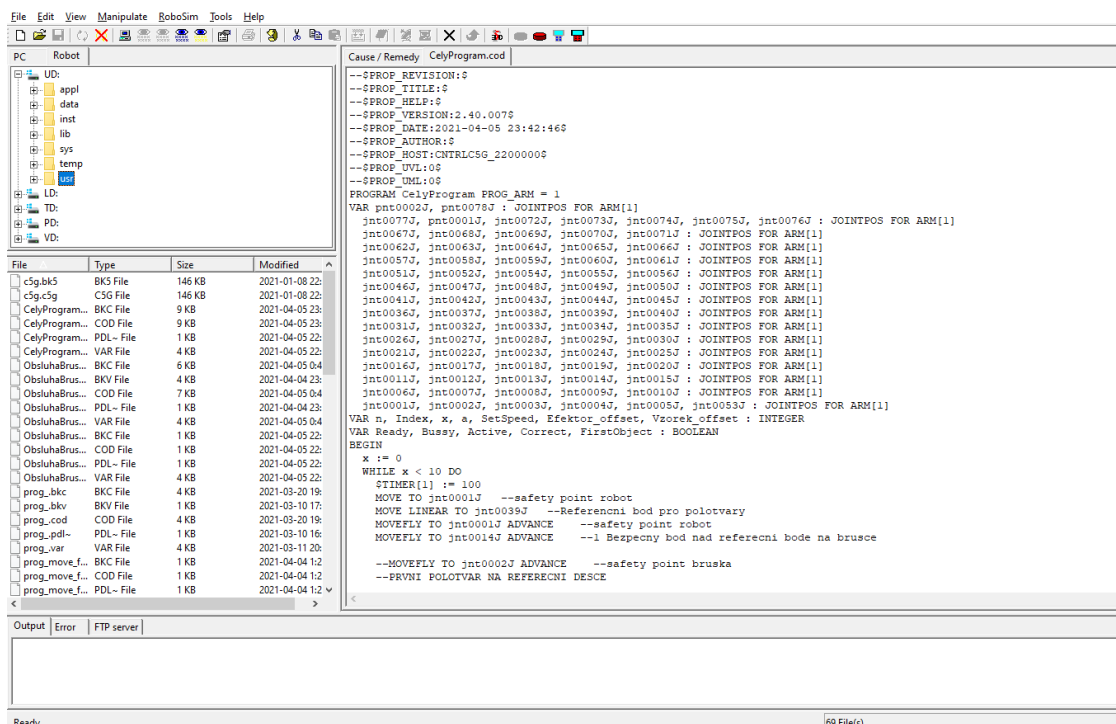
#### 4.2.7 Vývojové prostředí

Společnost Comau nabízí dva softwarové programy. Obě varianty umožňují ovládní a virtualizaci robotických systémů. Prvním softwarem je RoboSim, druhým pak novější typ s názvem Roboshop, který byl pro tuto práci využit. Software Roboshop umožňuje virtualizaci v reálném čase s aktuálními hodnotami natočení jednotlivých kloubů. Lze programovat přímo přes software připojení k řídicí jednotce robotu. Dále Roboshop umožňuje prohlížení, třídění a čtení chyb nebo akcí, ke kterým došlo na řídicí jednotce. V editoru je pak možné přidávat jednoduché objekty definované programem, které lze upravovat. Software obsahuje terminál pro přímou komunikaci s řídicí jednotkou, a navíc je možné přímo vkládat nebo odebírat soubory. Na obrázku 4.4 je znázorněno vývojové prostředí. Tento software byl využit při realizaci systému pro nastavení pohybů a souřadných bodů v prostoru.



Obrázek 4.4 Roboshop

Druhý program RoboSim byl využit pro optimalizaci pohybů a vykreslení jednotlivých úkonů, které jsou podrobněji popsány v kapitole 6. Na obrázku 4.5 je znázorněno vývojové prostředí RoboSim.



Obrázek 4.5 RoboSim



#### 4.2.8 Programovací jazyk

PDL2 jazyk je vyvinut a vyvíjen společností COMAU, která zajišťuje správu, podporu a celkový servis robotických manipulátorů. Důrazně se doporučuje, aby se zabránilo používání cyklů v programu, jelikož tím dochází k neustálému opakování cyklu a zbytečně se tak využívá výpočetní výkon procesoru [20].

Základní příkazy jsou velmi podobné programovacím jazykům jako je C++ a mnoho dalších. Jedná se o jinou interpretaci zadaného výrazu. Mezi příkazy standardního typu patří například: FOR, WHILE, DO, WHEN, DELAY, WRITE, REPEAT, RESUME, SELECT, MOVE, OPEN, GOTO, PAUSE, WAIT, které jsou intuitivní svým názvem. Nicméně tyto funkce jsou pro základní a elementární ovládání. Software RoboShop a předchozí verze RoboSim obsahují spoustu pokročilejších funkcí pro robotické manipulátory. Jedná se o speciální funkce pro kooperaci více robotů v jednom algoritmu. Umožňuje změnu systémových funkcí nebo změnu souřadného systému. Programovací jazyk obsahuje režim pro sváření, kde je možné definovat všechny potřebné parametry, jako je trajektorie, typ sváření, rychlost, amplituda, a dokáže určit, v jakých bodech má být změněn typ pohybu, aby nedošlo k proražení materiálu při sváření. Dále obsahuje režimy pro práci se senzory, dopravníky, semaforey a také režim s paletizací.

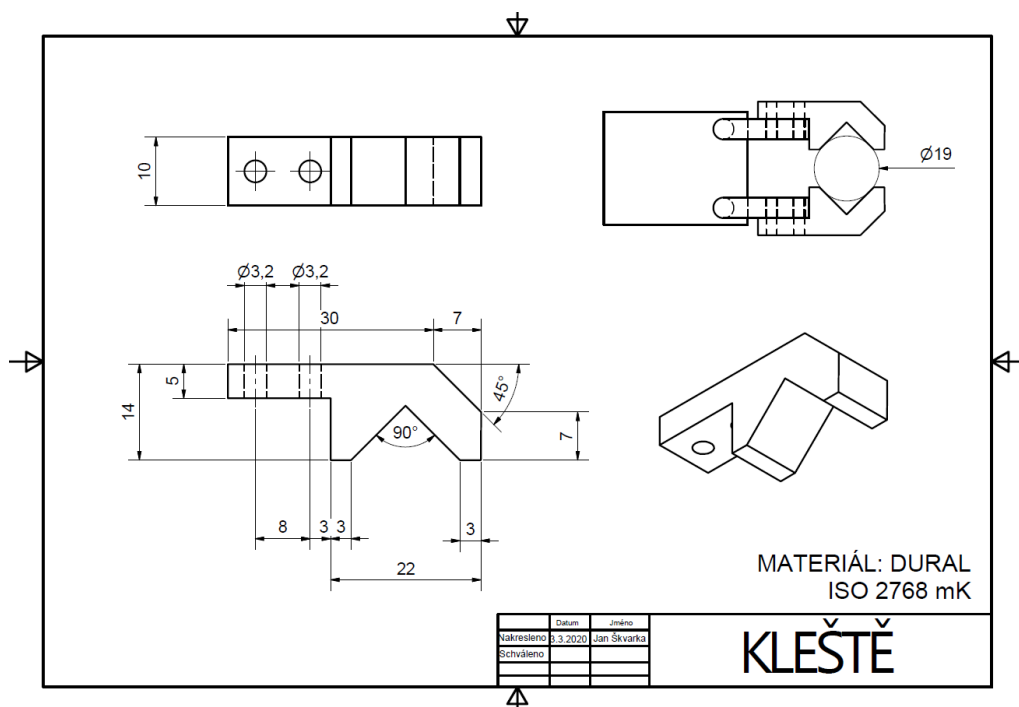
#### 4.2.9 Použitý koncový efektor

Jako akční prvek byl připevněn na koncový bod robota pneumatický úhlový efektor, který je vybaven magnetickým písem pro snímání polohy, pracovním médiem je stlačený vzduch. Uchopovací efektor je od společnosti Stránský a Petržík, Pneumatické válce spol. s.r.o., a jedná se o modelovou řadu PMCHA 16 [36]. Efektor je znázorněn na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6 Pneumatický úhlový efektor [36]

Na akční části byly přimontovány obrobené kleště pro svírání vzorků. Rozšíření chapadla je znázorněno na obrázku 4.7. Kleště jsou navrženy na vzorek o průměru 19 mm, ale je možné uchopit i větší nebo menší kulaté předměty. Svírající úhel kleští nikdy neuchopí předmět po celé části, proto je možné uchopit větší předmět. Nejedná se o ideální použití pro větší objekty, avšak pro předměty do 22 mm zůstane schopnost manipulace zachována.



Obrázek 4.7 Akční prvek koncového efektoru [23]

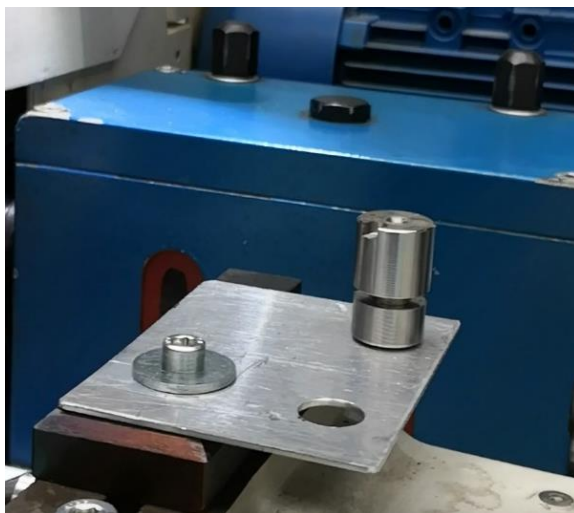
### 4.3 Nástrojová bruska – BUA 16 CNC

„Hrotová bruska BUA 16 CNC (výrobce původní mechaniky stroje TOS a.s.) v provedení s řídicím systémem MIKRONEX SN 600.4 je určena pro klasické vnější broušení nakulato malých a vysoce přesných součástí. Umožňuje broušení ruční i broušení v automatických pracovních cyklech. Ovládací panel řídicího systému je umístěn na otočném rameni, na kterém jsou soustředěny všechny ovládací prvky pro obsluhu stroje. Pro snadné nastavování polohy, případně pro ruční broušení, je k dispozici ruční ovládací kolečko. V systému jsou výrobcem instalovány cykly pro broušení vnějších rotačních a kuželových ploch obrobků podélným nebo zapichovacím způsobem. Bruska umožňuje rovněž broušení čelních ploch samostatně nebo současně s válcovými plochami a při použití zařízení pro vnitřní broušení (jiné provedení) také broušení vnitřních válcových a kuželových otvorů.“ [22]



Obrázek 4.8 Universální nástrojová bruska [22]

Při realizaci systému byl přidán pomocný zásobník k nástrojové brusce. Zásobník je znázorněn na obrázku 4.9 a slouží k rychlé výměně vzorku. Toto rozšíření je možné eliminovat, použitím dvojitého koncového efektoru.



Obrázek 4.9 Přídavný zásobník pro výměnu vzorku

## 4.4 Mikrometr – RXi senzor

Senzor RXi je vysoce přesný laserový mikrometr pro průmyslové aplikace. Pro komunikaci s PC poskytuje analogové nebo sériového rozhraní (RS232). Metodou detekce je laserový paprsek s prvkem CMOS. Výrobce udává rozsah měření 140  $\mu\text{m}$  až 28 mm s rozlišením 0,4375  $\mu\text{m}$ . Všechny parametry jsou zobrazeny v tabulce 4.3, senzor je znázorněn na obrázku 4.10.

Tabulka 4.3 Technické specifikace výrobce laserového senzoru RXi

Název zařízení	RXi senzor
Metoda detekce	Laserový paprsek s prvkem CMOS
Zdroj světla	Laserová dioda třídy I 670 $\mu\text{m}$
Výstup	Sériové nebo analogové napětí
Měřicí rozsah	140 $\mu\text{m}$ až 28 mm
Rozlišení	0,4375 $\mu\text{m}$
Doba odezvy	0,391 ms
Nelinearita	0,1 % z celkového rozsahu
Napájení	12 až 24 VDC / 80 mA
Připojení	2×M5 (4 pin) konektor
Rozměry	Vysílač 58×50×15 mm a Přijímač 54×50×15 mm
Hmotnost	200 g

Komunikace mezi senzorem a hostitelem probíhá v binárním formátu, který má předdefinované hodnoty pro nastavení rychlosti komunikace a typu měření. Celkem je šest režimů měření a dva volné režimy pro uživatele [21].

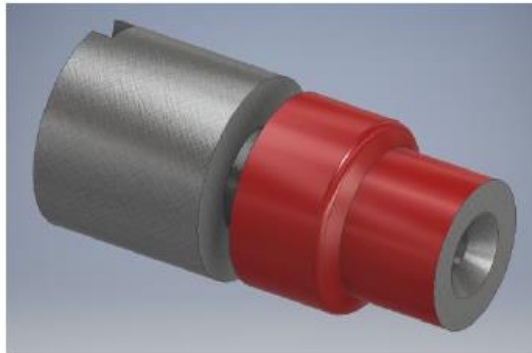


Obrázek 4.10 Mikrometr RXi laser [21]

## 4.5 Vzorek

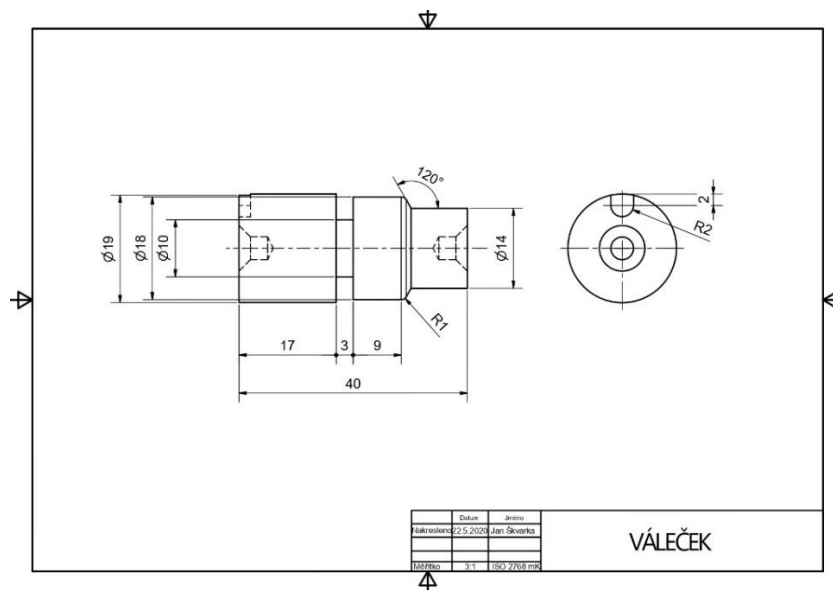
„Jako zkušební vzorek pro ukázkový výrobní proces je zadána následující součást: jedná se o soustružený váleček se zápichem z běžné konstrukční oceli. Na 3D modelu je červeně znázorněna část, která je broušena. Jedná se o 4 tvarové úseky:

1. válec,  $\text{Ø}18 \text{ mm}$
2. rádius  $R1$
3. zkosení  $30^\circ$
4. válec  $\text{Ø}14 \text{ mm}$ “



Obrázek 4.11 Vzorek (Váleček) [23]

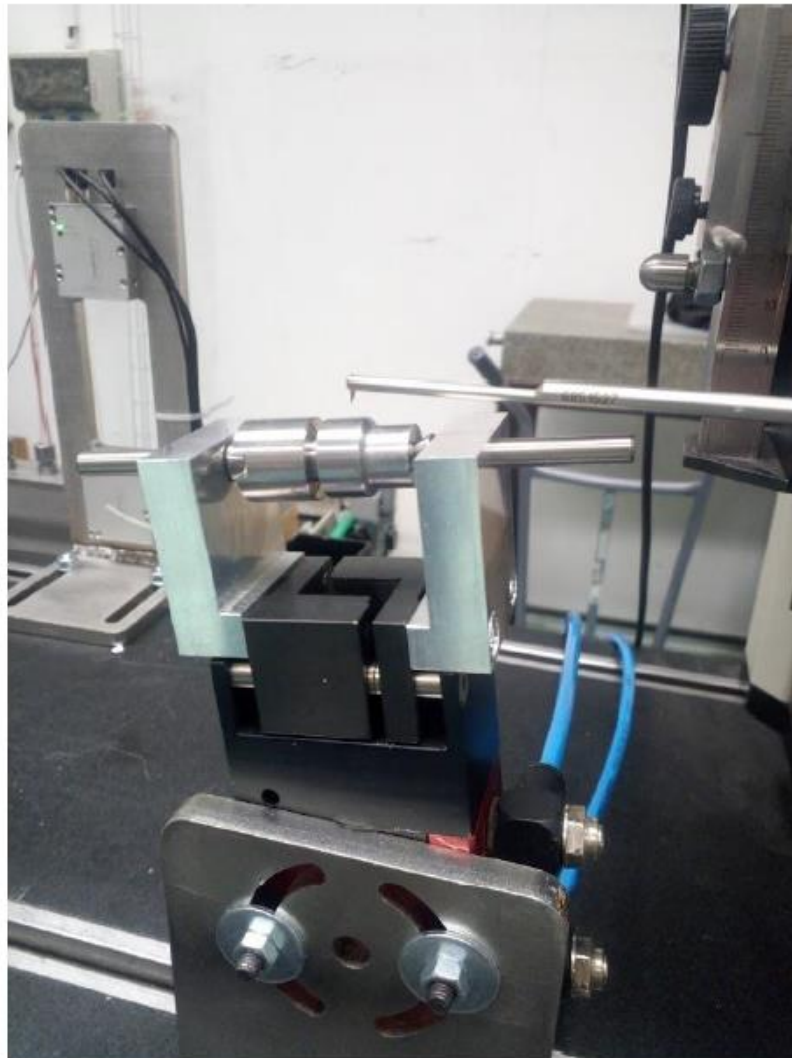
„Váleček má dva středící důlky, za které je upínán mezi hroty na brusce a následně i do přípravku k měření konturografem. Na čele se nachází vyfrézovaná drážka, do které zapadne unašeč brusky pro přenos krouticího momentu. Nebroušená část ( $\text{Ø}19 \text{ mm}$ ) slouží pro uchopení válečku při manipulaci.“ [23]. Technický výkres vzorku je převzat od autora a znázorněn na obrázku 4.12.



Obrázek 4.12 Výkres vzorku (Válečku) [23]

## 4.6 Konturograf – Mahr XC 2

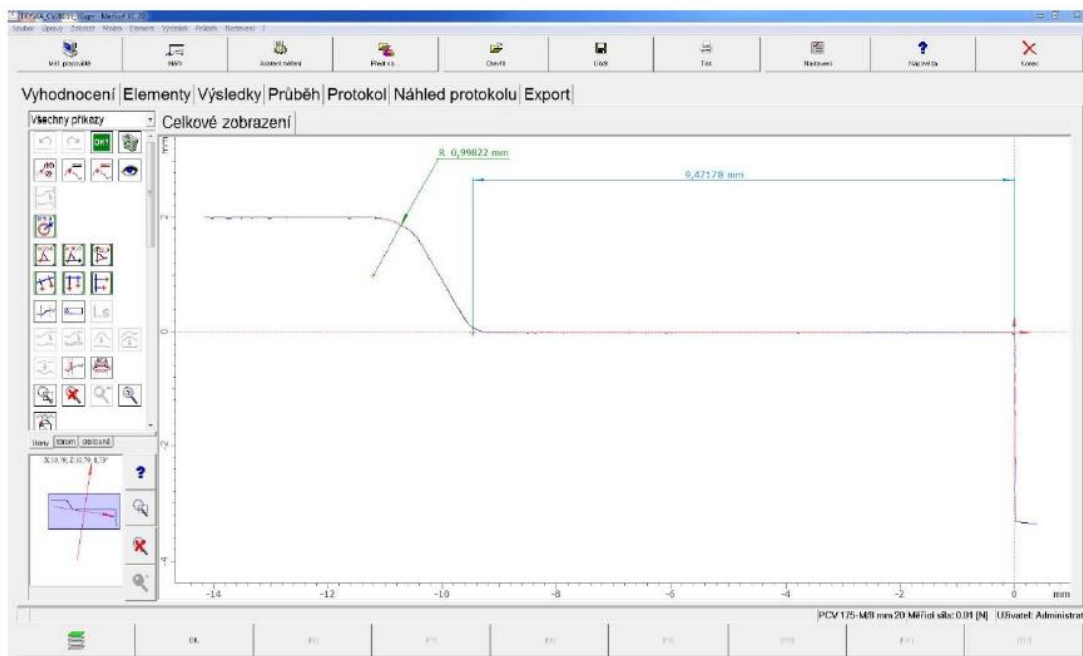
„Profilový konturograf je schopen měřit drsnosti povrchu v závislosti na velikosti poloměru špičky snímací jehly. Ve zkušebním procesu má za úkol změřit vnější konturu na povrchu válečku, ze které je vyhodnocován radius  $R1$  a délka od  $30^\circ$  zkosení po konec válečku. Vzhledem k tomu, že profil povrchu se nepohybuje v mikrometrových, ale milimetrových jednotkách, je zajištěna přesnost měření. Důležitými otázkami v tomto oddíle je hlavně to, jak musí být součást napolohována a umístěna, aby docházelo k měření pouze na horní straně válečku a nedocházelo k jeho odklonu. Výrobce v katalogu u robota uvádí i přesnost polohování –  $0,03\text{mm}$ , což by znamenalo výrazné vybočení válečku. Proto bylo nutno použít pro upnutí válečku pneumatického přípravku znázorněného na obrázku níže.“ [23]



Obrázek 4.13 Upínací přípravek pro Mahr XC 2 [23]

„Upínání je realizováno hydraulicky mezi dva kalené hroty, které zajistí napolohování válečku přes středící důlky a zajistí tak pozici válečku pro měření konturografem. Celý upínací aparát je nakloněn, aby docházelo k co nejpřesnějšímu snímání kontury profilu válečku a aby byl zajištěn plynulý sjezd měřicí jehly po čele válečku na konci měření. Takto realizovaný sjezd je ke snímači citlivější, než kolmý pád na konci měření a náraz do kalené jehly. Naklonění zároveň umožňuje snazší přístup robota k upínači, který se nachází na okraji pole dosahu robota.“

„Výsledné měření realizované na profilovém konturografu poskytuje data o velikosti a tvaru rádiusu a zkosení na válečku. Tyto informace jsou dále zasílány na brusku, kde dojde k jejich vyhodnocení, korekci kotouče, nebo jeho orovnění. Níže je přiložen výstup z jednoho z měření jak v jeho grafickém znázornění v měřicím systému, tak v jeho datové podobě ukládané a odesílané k dalšímu zpracování na brusku.“ [23]



Obrázek 4.14 Průběh výsledného měření na systému Mahr XC 2 [23]

## 4.7 NEXCOM – APPC 1540T

APPC 1540T je průmyslový počítač, který je využit pro generování řídicích signálů, zpracování dat, vyhodnocení regulačních zásahů, vizualizaci aktuálních stavů a umožňuje ruční ovládání. Tento průmyslový počítač je tvořen 15palcovou dotykovou LCD obrazovkou a je určen pro všestranné průmyslové aplikace. Podporuje WWAN/WLAN a mobilní 3,5G připojení prostřednictvím dvou mini-PCIe slotů [40].



Obrázek 4.15 Řídící PC pro generování a distribuci signálů

Na obrázku 4.15 je znázorněn ovládací panel, který ovládá celý navržený systém. V tabulce 4.4 jsou popsány základní parametry průmyslového PC [40].

Tabulka 4.4 Základní technická specifikace APPC 1540T

Název zařízení	Nexcom APPT 1540T
<b>Konstrukce</b>	Kovové šasi
<b>Úroveň ochrany</b>	IP65 Přední strana
<b>Typ dotykové obrazovky</b>	Odporový princip
<b>Procesor</b>	Intel Celeron J1900, 2 GHz, 2M L2 cache
<b>Typ Paměť</b>	4 GB DDR3L (1066, 1333)
<b>Rozšíření</b>	2 × mini-PCIe (Wi-Fi a 3.5G modul)
<b>USB</b>	2 × USB 2.0, 1x USB 3.0
<b>Ethernet</b>	2 × RJ45 (10/100/1000 Based-Tx)
<b>COM</b>	2 × RS232/422/485 w/ 2.5kv
<b>Podpora OS</b>	Windows 8,7 32-bit/64-bit, WinCE 7.0
<b>Průmyslové protokoly</b>	EtherCAT, EtherNet/IP, PROFINET, DeviceNet...

#### 4.7.1 Quido ETH 8/8

K IPC byl připojen rozšiřující I/O modul, který komunikuje přes ethernet. Jedná se o modul, který obsahuje 8 digitálních vstupů a 8 výstupních relé s přepínacími kontakty. Tento modul umožňuje ovládání standardními protokoly: MODBUS TCP2, SNMP, HTTP GET, Spinel. Je možné ovládat modul přes webové rozhraní. Zvláště je vhodný pro čtení stavu čidel nebo snímačů z PC. Modul lze využít k monitoringu bezpečnostních čidel nebo autonomnímu řízení na základě naměřených teplot [12].





Obrázek 4.16 Rozšiřující modul *Quido ETH 8/8* [12]

## 4.8 Pneumatický systém

V mnoha průmyslových odvětvích se lze setkat s pneumatickými systémy pro ovládání akčních členů, motorů, dorazů, kontaktů, posunů atd. Pneumatický systém velmi pomohl v rozvoji automatizace a v tomto návrhu se uvažuje s pneumatickým systémem pro ovládání koncového efektoru robota a upínacího přípravku. Držák vzorků pro měření má pohyblivé obě části. Je tedy potřeba nastavit robotický řetězec spolu se vzorkem do středu držáku. Pojezd na brusce je přisouván pouze z jedné strany, kde dochází k přiřazení na hrot středovou dírkou vzorku. Pro celé řešení postačí tři hlavní obvody, přičemž jeden se připojí do vstupních otvorů robotické základny a zbylé dva obvody jsou zavedeny do elektromagnetických ventilů, které ovládají upínací přípravek pro měřicí zařízení konturografu a unašeče v nástrojové brusce. Pro řízení jsou vybrány elektromagnetické ventily od společnosti Festo. Konkrétně typ CPE10-M1BH-5L-M7.

Jedná se o rozváděcí ventil, který umožňuje blokovat, otevírat nebo měnit směr média. Činnost ventilu spočívá v rozvádění průtoku mezi dvěma nebo více přístroji. Ventily jsou popisovány počtem možných připojených (dvoucestný, třicestný), počtem funkčních stavů (2 polohy, 3 polohy), způsobem ovládání (manuálně, elektricky, mechanicky, stlačeným médiem) a způsobem, jakým se vrací ventil do původní polohy (tlakem, pomocí pružiny) [24].



Obrázek 4.17 Elektromagnetický ventil CPE10-M1BH-5L-M7 [24]

Použitý ventil je znázorněn na obrázku 4.17. Na straně pístnice každého válce na zatlačování byl do portu pro přívod vzduchu umístěn škrťací ventil. Tabulka 4.5 popisuje základní parametry elektromagnetického ventilu.

Tabulka 4.5 Technické specifikace ventilu CPE10-M1BH-5L-M7

Název zařízení	Elektromagnetický ventil CPE10-M1BH-5L-M7
Typ ovládnání	Elektrické
Řízení	Nepřímé
Konstrukce	Pístové šoupátko
Princip těsnění	Měkký
Jmenovitý průtok	M7: 350 l/min, M5: 180 l/min
Velikost závitu	M7, M5
Čas sepnutí	16 ms
Materiál krytu	Hliníkový odlitek
Provozní tlak	3 až 8 Bar
Řídicí tlak	3 až 8 Bar
Teplotní pracovní rozsah	-5 až 50 °C
Napájecí napětí	24 V DC

Pro zajištění stálého tlaku bylo využito redukčního ventilu MS4-LR-1/4-D6-AS. Ventil má konstruovanou otočnou hlavici s aretací pro zajištění ovládnání s možností uzamknutí, což zajišťuje ochranu před změnou nastavených hodnot. Redukční ventil udržuje stálý tlak (sekundární strana) nezávisle na výkyvech a spotřebě tlaku (primární strana). Mezi kladné vlastnosti tohoto ventilu patří malý pokles průtoku při velkém tlaku a integrovaný zpětný ventil pro zpětného proudění z odvětrávání výstupu [25].

Tabulka 4.6 Technické specifikace ventilu MS4-LR-1/4-D6-AS

<b>Název zařízení</b>	<b>Elektromagnetický ventil MS4-LR.1/4-D6-AS</b>
<b>Průtok</b>	1000 až 7000 l/min
<b>Teplotní rozsah</b>	-10 až 60 °C
<b>Provozní tlak</b>	0,3 až 7 Bar
<b>Konstrukce</b>	Přímo řízený membránový redukční ventil
<b>Regulační rozsah</b>	1800 l/min

Redukční ventil odděluje pneumatickou část navrženého systému od celé soustavy, která je součástí provozní haly. Pokud není možnost použití lokální pneumatické soustavy, tak je zapotřebí rozšířit navržený systém o kompresor, který zajistí potřebný stálý tlak. Na obrázku 4.18 je znázorněn použitý redukční ventil a tabulka 4.6 popisuje parametry ventilu.



Obrázek 4.18 Redukční ventil MS4-LR-1/4-D6-AS

Na propojení pneumatického systému byly použity hadice z plastu PNU s kalibrovaným vnějším průměrem od firmy FESTO, která v tomto odvětví nabízí velký sortiment. Jedná se o ohnivzdorný materiál UL94 HB. Byl navržen do energetických řetězců v úlohách s vysokým tlakem. Výrobce udává až pět milionů provozních cyklů dle normy Festo 942021. Provozním médiem může být vzduch, vakuum nebo voda. Provozní tlak je závislý na teplotě a rozsah je od -35 až do 60 °C [26].

## 5. ŘEŠENÍ SYSTÉMU

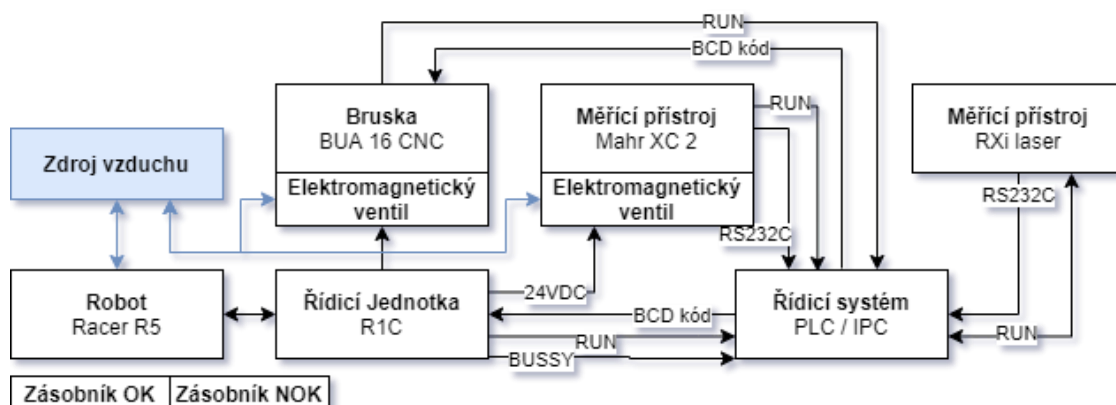
První část a odladění celého systému se zabývala složením komponent do ideální trajektorie robota. Robotický manipulátor Racer R5 je z hlediska dosahu ideální volbou. Bez problémů pokryje veškeré žádané manipulační úkony. Celý prostor pro manipulaci je navržen v rozsahu 180°.

Druhá část implementace spočívala v konfiguraci vstupů a výstupů. Připojení a otestování ventilu k řídicí jednotce R1C a celkové propojení všech zařízení. Nastavení trajektorií pro dosažený požadovaných poloh a bezpečných bodů pro manipulaci mezi všemi přístroji.

### 5.1 Realizovaný systém

Majitelem společnosti Mikronex s.r.o. bylo rozhodnuto pro variantu s nadřazením systémem. Celý systém je řízen IPC, které generuje signály pomocí BCD kódu a dvou proměnných pro identifikaci stavů. Zároveň zpracovává výstupní data z měřicího senzoru. Z PC systému jsou vyvedeny ke každému procesu čtyři binární výstupy. Tři pro binární kombinaci a jeden pro identifikaci proměnné „Run“. Robotický manipulátor obsahuje celkem šest sekvenčních podprogramů, které jsou aktivovány kombinací BCD kódu. Kombinací tří binárních hodnot můžeme rozlišovat až osm podprogramů. Tyto podprogramy jsou pro manipulaci se zásobníkem vyjmutí a zasunutí vzorku, kdy při zakládání vzorků se inkrementuje hodnota indexu v zásobníku. Další podprogramy jsou pro obsluhu brusky, měřicích stanic a opakovanému měření na senzoru RXi. Řízení upínacích přípravků pro vzorky je inicializováno a ovládáno robotickým řídicím systémem při provádění jednotlivých podprogramů.

Blokové schéma navrženého systému je znázorněn na obrázku 5.1, které vychází z obrázku 1.1. Na obrázku lze vidět jednotlivé propojení systému.



Obrázek 5.1 Blokový diagram navrženého systému

Po celém provedeném procesu se vyhodnocují naměřené parametry. Rozhodující je přechodný tvar vzorku. Existují tři možné varianty, které mohou nastat. První variantou vzorek nesplňuje toleranční mez, systém rozhodne o změně parametru brusky a pošle příkaz robotu, aby zasunul vzorek zpět do brusky, kde se provede korekční cyklus. Pokud nastane situace, že vzorek je podbroušen a nesplňuje hodnoty, tak nastává druhá varianta a vzorek je zasunut do kategorie neopravitelných kusů. Ve třetí variantě nastává ideální případ, že bude vzorek vyhovovat stanoveným limitům a bude zařazen na své původní místo v zásobníku.

### 5.1.1 Řídicí systém

Na základě digitálního vstupního signálu  $\$DIN[8]$ , který slouží jako signalizace pro zahájení čtení BCD kódu, který je na dalších binárních vstupech  $\$DIN[9]$ ,  $\$DIN[10]$  a  $\$DIN[11]$ . Dle vstupní hodnoty kódu je přiřazena patřičná část programu, po vykonání se program vrátí na začátek této struktury a čeká na vstupní signál pro zahájení programu. Celkem je využito sedm kombinací pro volání podprogramu a jedna kombinace zůstává prázdná pro rezervní program nebo rozšíření o další výrobní část. V návrhu bylo počítáno pouze s pěti kombinacemi, které slouží k obslužení celého procesu. Přibyla varianta podprogramu pro opakované měření na senzoru RXi a varianta pro inicializaci robota do počáteční polohy s nastavením indexu na první vzorek.

Při aktivaci libovolného podprogramu se nastaví výstupní digitální signál  $\$DOUT[10]$  na logickou úroveň „TRUE“ a po provedení všech příkazů se opět nastaví na úroveň „FALSE“. Toto slouží k signalizaci řídicího IPC pro stav, že robot je zaneprázdněn a nemůže přijímat příkazy. IPC generuje BCD kombinaci pouze v případě, kdy je aktivní robot a je nastavena vstupní hodnota od robota na hodnotu „FALSE“. Níže je znázorněna řídicí struktura robotického systému.

```

WAIT FOR $DIN[8]                --Signal pro zahájení čtení BCD kódu
  IF $DIN[9]=0 THEN              --1.BCD kód
    IF $DIN[10]=0 THEN          --2.BCD kód
      IF $DIN[11]=0 THEN        --3.BCD kód
        Prg8                    --Volný program
      ELSE
        Prg4                    --Měření MAHR XC 2
      ENDIF
    ELSE
      IF $DIN[11]=0 THEN        --Program pro opakované měření na RXi
        Prg6
      ELSE
        Prg2                    --Obsluha Brusky
      ENDIF
    ENDIF
  ELSE
    IF $DIN[10]=0 THEN          --Restartovani programu + inicializace
      IF $DIN[11]=0 THEN
        Prg7
      ELSE
        Prg3                    --Měření na RXi laseru
      ENDIF
    ENDIF
  
```

```

ELSE
  IF $DIN[11]=0 THEN
    Prg5          --Založit vzorek
  ELSE
    Prg1          --Vyjmout vzorek
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF

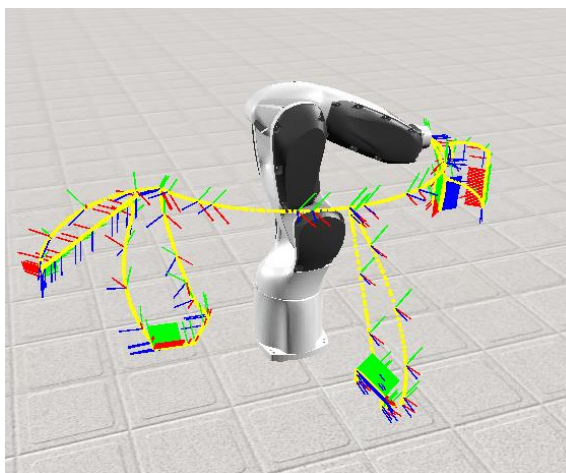
```

### 5.1.2 Trajektorie robotického systému

Pro pohyb robota jsou navrženy lineární pohyby v prostoru odebírání vzorků, kde je potřeba odebírat vzorek lineárně vzhůru ze zásobníku. Při špatném nelineárním posunu, může dojít nejen k poškození daného vzorku, ale i koncového efektoru, případně i zásobníku, jestli že by byl vyroben z křehkého materiálu.

Při zakládání vzorků zpět do zásobníku je vhodné snížit provozní rychlost robota pro případnou kolizi při zasouvání. Pohyby mezi pracovními stanicemi nejsou omezeny a budou prováděny kruhovými trajektoriemi, kdy je robot z hlediska rychlosti nejefektivnější, při tomto způsobu manipulace. Robotický řetězec zůstane ve stejné poloze, pouze se otáčí celý kinematický řetězec v základně a softwarově se přepočítá souřadný systém pro koncový bod.

Před každým procesem je v bezpečné vzdálenosti od daného stroje vytvořen bezpečnostní bod. Tento bod slouží k inicializaci podprogramu pro obsluhu daného stroje a je navržen ke všem možným kombinacím volání podprogramu, tak aby nedocházelo k nárazům a nebyly poškozeny jakékoliv části včetně koncového efektoru. Celý program se tak nemusí vykonávat sekvenčně a robot může vykonávat různé podprogramy. Sekvenčně se provádí pouze úkony pro obsluhu daného výrobního procesu a s nimi spojené řízení ventilů pro umístění vzorku. V bezpečnostních bodech robot signalizuje aktuální stav. Na obrázku 5.2 je vykreslena trajektorie pro manipulaci celého cyklu.

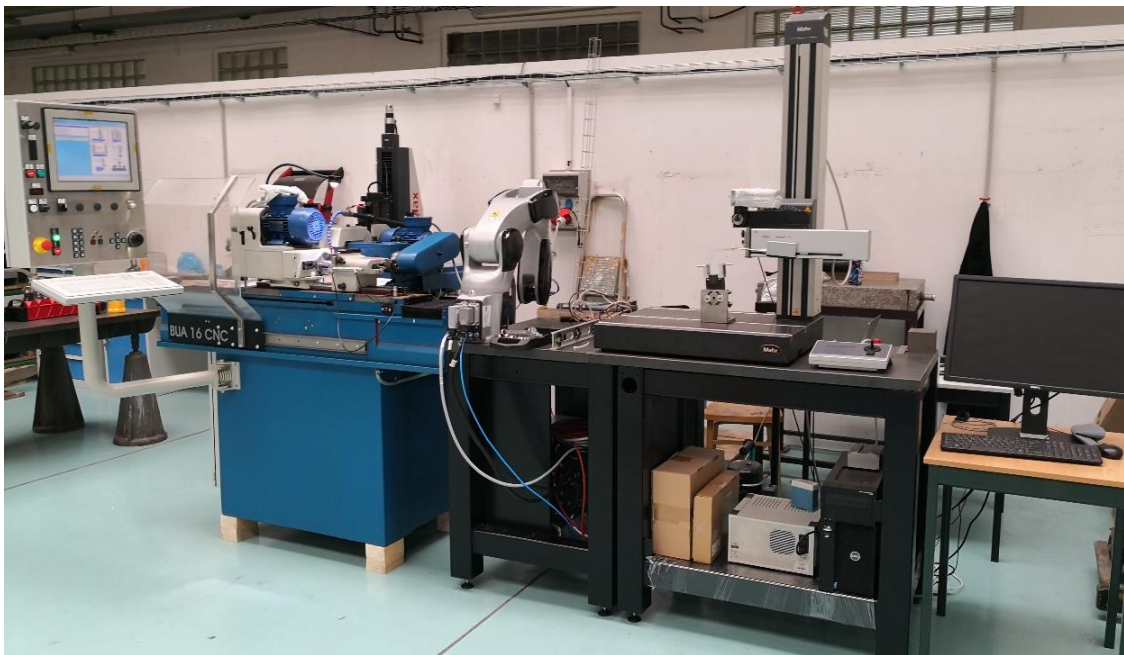


Obrázek 5.2 Trajektorie pro jeden výrobní cyklus

## 5.2 Rozmístění

Prvotní návrh spočíval v umístění výrobních strojů do trojúhelníku, aby se minimalizovala trajektorie pohybu. Propojení systému bylo navrženo každý s každým, ale při realizaci vznikla topologie zapojení do hvězdice. Komunikace mezi měřicím senzorem a nástrojovou bruskou je poměrně nadbytečné, jelikož vyhodnocená data musí zpracovat řídicí systém. Navíc způsobem zapojením do hvězdice byl redukován počet propojení navrženého systému.

V konečném rozložení došlo k optimalizaci umístění a zařízení jsou téměř vedle sebe v jedné ose. Robot je umístěn ve středu a dosahuje do všech potřebných pozic s malou možností prodloužení pozic. Uchopovací bod uvnitř brusky je téměř na konci pracovního prostoru robotického manipulátoru. Varianta přidělení na strop nebo zeď, by patřičně zmenšila pracovní prostor. V tomto případě robotický manipulátor dostatečně pokryje veškerá potřebná místa. Stolek pod robotem i konturografem je stejně vysoký z železné konstrukce, jen vrchní část, je z masivní dřevěné desky, ke které je robot připevněn. Při maximální rychlosti robota, nedocházelo k posunutí, ale pouze k vibracím.



Obrázek 5.3 Realizace robotického pracoviště

## 5.3 Zásobník

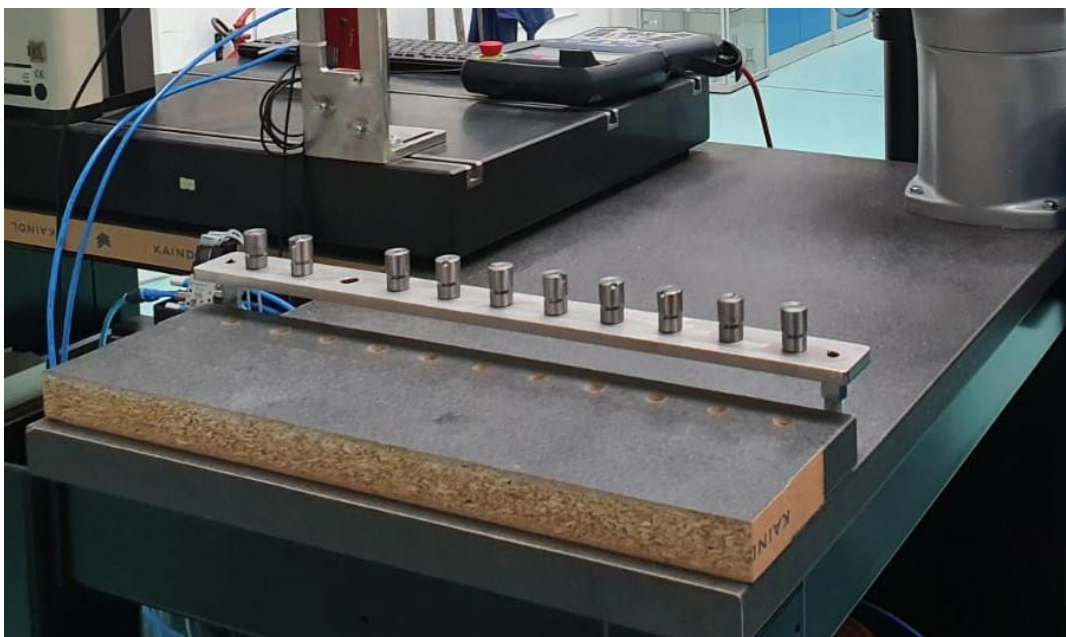
Snaha byla vytvořit univerzální způsob pro paletizaci vzorků. První pokus vznikl na základě uchopovacího bodu pro první vzorek. Od tohoto vzorku se robot posouval s každým novým vzorkem o 50 mm podél zásobníku. Vykroužené otvory v zásobníku jsou velmi přesné a není prostor pro toleranci, čímž může nastat problém při nesprávném zasouvání vzorků. Při zasouvání vzorku je velmi důležité mít přesně nastavenou pozici

koncového bodu. Při tomto řešení se nedosáhlo 100 % úspěšnosti při zasunutí všech vzorků. Jedním faktorem je uchopení pomocí čelistí, což může mít vliv při zasouvání, jelikož vzorek má možnost pohybu a naklonění při opakovaném stisknutí. Další faktor v problematice založení vzorku do zásobníku, je v posouvání, které je lineární a přesné. Velmi důležitý je první bod, který musí být přesně nad středem prvního otvoru v zásobníku. V důsledku nepřesnosti se s každým dalším vzorkem přidává malá hodnota a nedochází ke správnému umístění.

Další návrh pro řešení zasouvání bylo vytvoření vlastního souřadného systému. Byl definován střed souřadného systému do středu prvního vzorku a pro určení osy x byl vybrán poslední vzorek v zásobníku, tak aby osa procházela středem všech bodů. Ani v tomto řešení nedocházelo ke 100% úspěšnosti zasouvání.

Optimální varianta, vznikla přidáním bodu těsně nad otvor pro každý vzorek. Zásobník má kapacitu jedenácti vzorků, a tak přibylo do celého systému 11 bodů navíc aby se docílilo úspěšného zasouvání.

Jednodušší variantou pro dosažení 100 % zasouvání je zvětšení otvoru v zásobníku nebo zvětšení vrchní části v konickém tvaru, aby nedocházelo k zadrhnutí vzorku při zasouvání. Zásobník je znázorněn na obrázku 5.4.



Obrázek 5.4 Zásobník pro vzorky

Při realizaci bylo využito pouze jednoho zásobníku. V navrženém systému je připravena struktura pro variantu s druhým zásobníkem. Pro tuto variantu jsou použity stejné souřadné body a je tedy zapotřebí nastavit nové pozice při realizaci systému s dvěma zásobníky. Je zapotřebí dát si pozor na umístění druhého zásobníku, jelikož odebírání se provádí kolmo ke vzorku a pro robota je potřeba dostatečné místo pro manipulaci. Z tohoto důvodu nemohou být dva zásobníky za sebou. Musí být od sebe

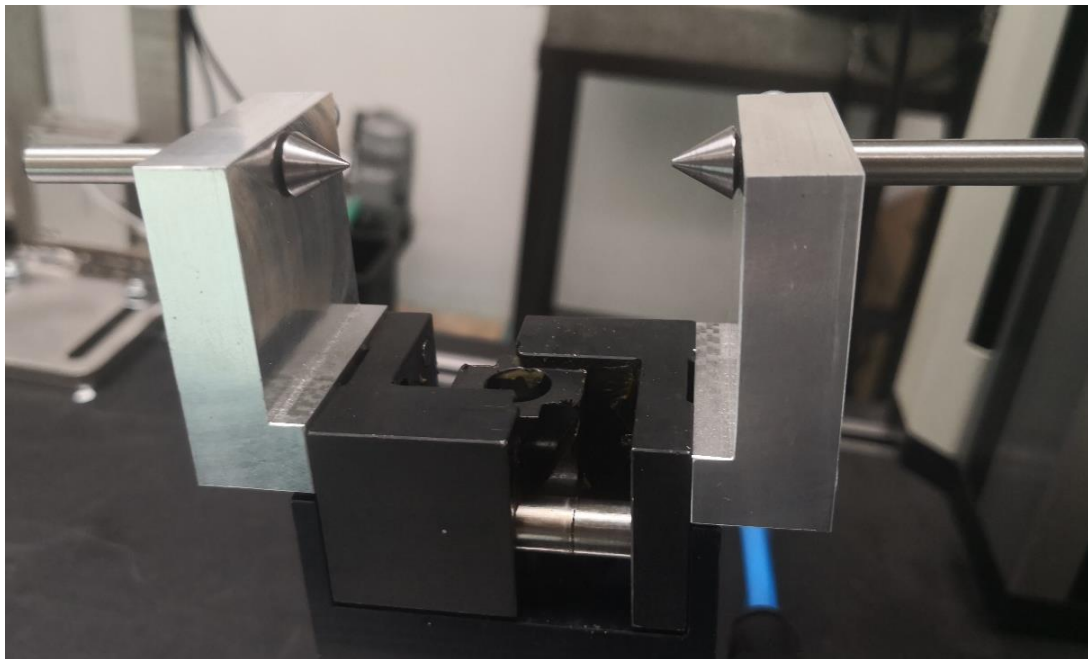


v dostatečné vzdálenosti, aby robotický systém byl schopen se dostat do uchopovacího bodu, aniž by zavadil o první zásobník. Nabízí se varianta použití těchto dvou zásobníků nad sebou anebo v kaskádovém zastoupení.

Dle teorie druhý zásobník není potřeba jelikož se jedná o adaptivní systém, který se neustále přizpůsobuje z naměřených hodnot a neměly by docházet k variantě špatně vyrobeného kusu.

## 5.4 Přípravek

Obrázek 5.5 znázorňuje upínací přípravek, který je součástí měřicího přístroje Mahr XC 2. Uzamykání a odemykání probíhá rychle a lineárně. Rychlost je závislá na přivodním tlaku. V ideálním uchopení se vzorek nepohne a zůstane na stejném místě. Po provedení měření kontury robot najede zpět do stejné pozice, kde nejprve uchopí vzorek a poté otevře držák. Maximální možný vstupní element musí být menší než 60 mm. Vzorek v držáku musí být přesně orientován, a to z důvodu měření kontury.



Obrázek 5.5 Upínací přípravek (Držák u konturografu Mahr XC 2)

## 5.5 Inovativní řešení

Jako inovativní řešení by bylo vhodné rozšířit řídicí systém koncovými senzory pro identifikaci klíčových procesů, aby nedocházelo k nežádoucím procesům.

Další varianta ke zvýšení bezpečnosti by závisela na finančních možnostech a k celé struktuře by se přidalo bezpečností PLC pro zvýšení bezpečnosti. Zároveň by bylo vhodné navrhnout řešení, které bude splňovat funkční bezpečnost a požadovanou úroveň

zabezpečení. Obecně na posuzování funkční bezpečnosti se využívají harmonizované normy, které stanovují a definují patřičné opatření. Harmonizované normy obsahují nebo odkazují na přidružené normy, které s konkrétní normou souvisejí. Pro robotické systémy a zařízení tomu odpovídá norma EN ISO 10 218-1. Tato práce byla experimentálním řešením pro možné rozšíření systému a nebyla řešena funkční bezpečnost. Jednalo se pouze o zkušební návrh.

Možnost, jak docílit zasunutí vzorku s maximální přesností, je přidat kamerový systém, který by mohl posouvat s robotem na základě obrazových dat. Systém by vyhodnocoval, jakým směrem se má pohnout robotický systém a po každé změny by docházelo k vyhodnocení dat a následujícího posunutí nebo zasunutí obrobku. Tato varianta by se dala vyřešit pomocí koncového snímače nebo laserového snímače, který by byl bezprostředně vycentrován pro ideální zasunutí vzorku.

Jedna z dalších myšlenek je vytvoření softwaru, pro návrh optimální trajektorie při zadání pozičních bodů a vymezení zakázaných prostorů. Pro návrh trajektorie je možné využít neuronové sítě, které by mohly vyhodnocovat ideální trajektorie z různých hledisek. Do systému by se tak zadalo kritérium na nejrychlejší trajektorie a systém by mohl například v simulaci vykreslit barevně odlišený prostor, kde je optimální řešení. Další aspektem by mohlo být kritérium na nejméně energeticky náročnou trajektorii nebo na nejkratší úsek. Při těchto návrzích existují různé varianty a také je možnost využití neuronových sítí.

## 6. OPTIMALIZACE

Při realizaci bylo dosaženo 77 bodů v prostoru pro dosažení požadovaných pozic. Pro menší počet výsledných bodů se využívají určité body několikrát, přičemž umožňují stejné pozicování s výrobkem nebo bez něj. Hlavní důraz je kladen na bezpečné pohybování v blízkosti zasunutí a vysunutí vzorku, kde musí být pohyby bezprostředně prováděny lineárně. V blízkosti těchto pozic je softwarově snižená rychlost, aby se tyto pohyby vykonávaly pokaždé za snížené rychlosti i v situaci, ve které bude řídicí systém nastaven na maximální provozní rychlost. Tím se samozřejmě výrobní proces zpomaluje, ale je zajištěno bezpečné odebírání a zasouvání vzorků na požadované pozice.

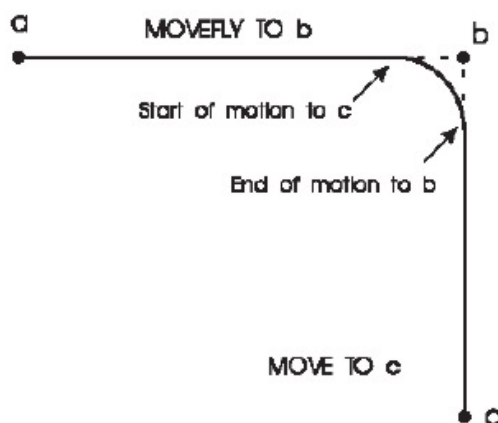
Sekvence pro jeden vzorek se skládá z 18 translačních pohybů, 37 lineárních pohybů a 8 relativních posunů k aktuálnímu bodu. Místo relativních vektorů lze použít lineární pohyb, kde je zapotřebí definovat bod na konci dané trajektorie. Výhoda této strategie se uplatňuje při použití kaskádově vykrouženého zásobníku. Na základě vyhodnocených dat lze zařazovat výrobky do patřičné kategorie a stále přitom vycházet z jednoho referenčního bodu. Tímto způsobem lze ušetřit poměrně dost času při inicializaci proměnných v prostoru.

Poslední vzorek se nachází téměř až na koncových bodech robota, a proto tato sekvence obsahuje dva pohyby navíc při vysunutí a zasunutí vzorku. Celková sekvence pro obsluhuje posledního vzorku se skládá z 79 pohybů.

Z časové hlediska se optimalizace zaměřuje na body, které nejsou lineární. Nejrychlejší pohyby jsou rotační či translační s ohledem na singulární body, kde robotický systém snižuje rychlost z konstrukčních důvodů. Z toho důvodu je cílem optimalizovat pohyby mezi jednotlivými výrobními procesy a návazností jednoho procesu na druhém.

Další aspekt pro zvýšení efektivity a zkrácení časového intervalu spočívá v rozšíření odkládacího pomocného zásobníku u brusky, který je navržen pro dva vzorky a slouží k rychlé výměně. Při rozšíření o možnost třetího vzorku, by mohl robot v mezičase, kdy není využíván, připravit další vzorek k obrábění. V případě korekce prvního vzorku by takto připravený stav neomezil cyklus. Po zasunutí do výsledné kategorie by robot začal rovnou obsluhovat brusku, čímž by došlo k modifikaci a zrychlení výrobního procesu.

Abychom docílili plynulosti pohybu, byly upraveny pohybové funkce. Programovací jazyk PDL2 nabízí funkci „MOVEFLY TO“, která interpoluje křivku v blízkosti zadaného bodu, a navíc umožňuje definovat parametry pro samotné provedení. Touto vlastností docílíme plynulosti pohybu a zkrátíme časový interval. Průběh této funkce je znázorněn na obrázku 6.1 a provedený průběh v simulaci na obrázku 6.2.



Obrázek 6.1 Průběh trajektorie [19]

Pro změnu parametrů a modifikaci procesu pohybu lze využít systémové proměnné. Proměnná \$FLY\_TYPE lze použít ke zkrácení doby a přiblížení trajektorie k požadovanému bodu. Proměnná \$FLY\_PER slouží k ovlivnění rychlosti ramene, avšak pouze za předpokladu nastavení proměnné na hodnotu FLY\_NORM.

Proměnná \$FLY\_PER ovlivňuje spojení mezi trajektoriemi. Hodnota je vyjádřena v procentech. Existují dvě možnosti, jak uplatnit tuto systémovou funkci – můžeme přiřadit proměnnou pro konkrétní bod nebo definovat hodnotu na začátku programu. Bezpečnější variantou je přiřazení této vlastnosti pro konkrétní pohyb.

Systém definuje sférickou oblast kolem koncového bodu a pomocí proměnné \$FLY\_TYPE lze nastavit tři předdefinované varianty přesnosti. První varianta NOSETTLE je ukončena, jakmile robot dokončí zpomalení k požadovanému bodu. Varianta COARSE a FINE jsou totožné, rozdílnou částí je pouze přesnost, kde pro FINE je to přesnost sférické oblasti s poloměrem 0,5 mm a pro variantu COARSE je to poloměr 1,5 mm, kde musí být ukončen pohyb.

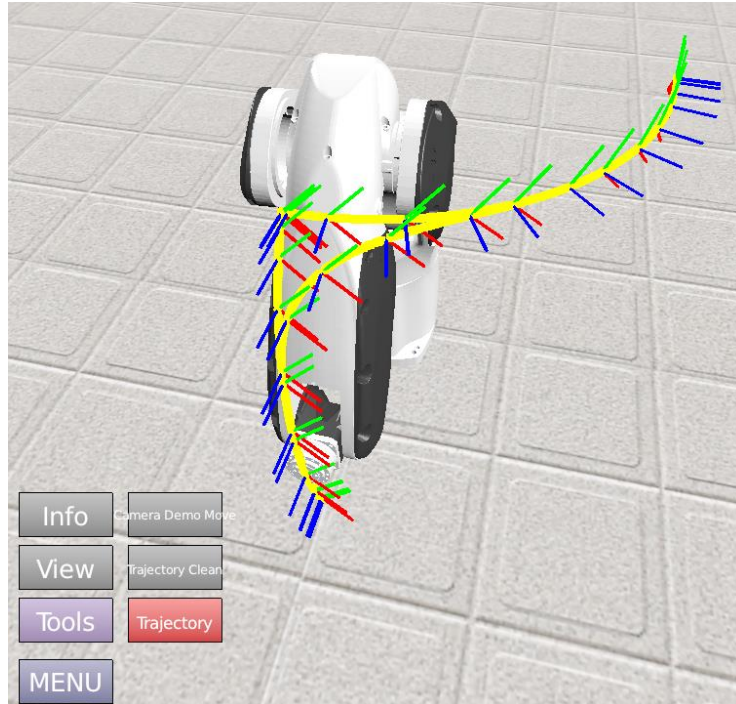
Druhá část, kterou lze softwarově ovlivnit je zrychlení a zpomalení mezi dvěma body. Pro nastavování těchto parametrů jsou opět k dispozici předdefinované proměnné. Změnou hodnoty \$ARM\_OVR lze ovlivnit náběžné a sestupné průběhy rychlosti. Defaultně je systémem nastavena na maximální hodnotu.

## 6.1 Trajektorie

Původní návrh obsahuje bezpečnostní body v blízkosti daného zařízení, pro které vykonává obsluhu podprogramu a poté se opět vrací do tohoto bodu. V návaznosti na výrobním procesu lze nastavit robota a posunout jej do následujícího bezpečnostního bodu. Tím se docílí plynulosti pohybu a zároveň pomocí těchto bodů se bude robot pohybovat po bezpečné trajektorii. Předdefinovaná funkce \$FLY\_PER je defaultně nastavena na hodnotu 100. Při této hodnotě se interpolují body v maximální vzdálenosti od zadaného bodu. Můžeme nastavit tuto funkci na hodnotu 10, kdy robot projíždí

v blízkosti bodu, ale nezastavuje kinematický řetězec. Lze využít této vlastnosti buď pro konkrétní pohyb nebo pro celý program při definování na začátku programu.

Pro konkrétní bezpečný bod před odebráním vzorku ze zásobníku a následné trajektorie k obráběcí brusce byla využita vlastnost interpolace s defaultní hodnotou. Změna této trajektorie je znázorněna na obrázku 6.2. Simulace byla provedena softwarem RoboSim, který umožňuje vykreslit trajektorii.



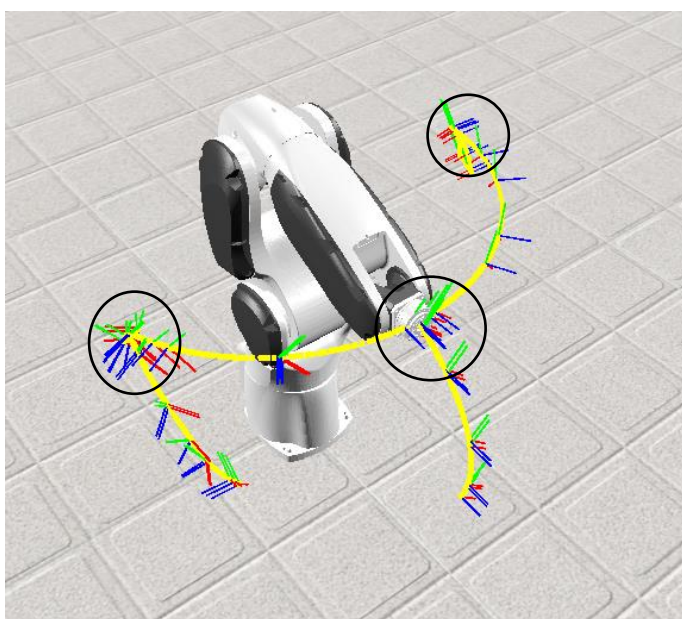
Obrázek 6.2 Trajektorie mezi třemi body

Původní trajektorie vytváří při vykonávání pohybu téměř pravý úhel, navíc se v tomto bezpečnostním bodě zastaví celý kinematický řetězec. Trajektorie s využitím interpolace je viditelně zkrácena a urychluje průběh. Řídicí systém vypočítává plynulost trajektorie v blízkosti požadovaného bodu. V případě původního průběhu systém určuje zpomalení kinematického řetězce k požadovanému bodu. Po dosažení požadovaného bodu systém vyhodnocuje následující trajektorii, kdy musí vypočítat zrychlení na konstantní rychlost k následujícím souřadnicím. V tomto bodě tedy dochází ke snížení rychlosti až do chvíle, kdy je celý kinematický řetězec zastaven. Po zastavení se celý řetězec uvede do pohybu. V blízkosti tohoto bodu dochází ke zpomalení do nulových rychlostí a poté se systém opět zrychluje na konstantní rychlost.

K vyhodnocení těchto změn, byly použity interní časovače za účelem získání časových údajů pro celý pohyb vykonávání. Testování bylo provedeno se třemi nastavenými rychlostmi robota, a to 25 %, 50 % a 100 %. Pro každou nastavenou rychlost se provedlo měření desetkrát, poté se vyhodnotila průměrná hodnota. Při interpolaci byla provedená trajektorie rychlejší o 14,9 % vůči původní trajektorii při 25% rychlosti nastavení robotického systému. Pro nastavenou rychlost systému na 50 % bylo dosaženo

pomocí interpolace zrychlení trajektorie o 15,8 % a při maximální rychlosti se docílilo zrychlení trajektorie o 17,7 % vůči původním průběhům při identickém nastavení řídicího systému.

Na obrázku 6.3 je vykreslen průběh celého výrobního cyklu, který obsahuje pouze bezpečnostní body a první bod z každého procesu. Při dosažení prvního bodu dochází k natočení koncového efektoru do požadované polohy. Bezpečnostní body jsou zvýrazněny černými kruhy. Hlavním důvodem, proč jsou použity tyto body je výsledná trajektorie, která se provádí v bezpečném prostoru mezi přístroji. Pokud by tyto body nebyly inicializované, trajektorie by se zkrátila a došlo by tak ke kolizi. V simulaci nejsou znázorněny přístroje, které jsou umístěny v těsné blízkosti robota. Rozmístění přístrojů bylo znázorněno na obrázku 5.3.

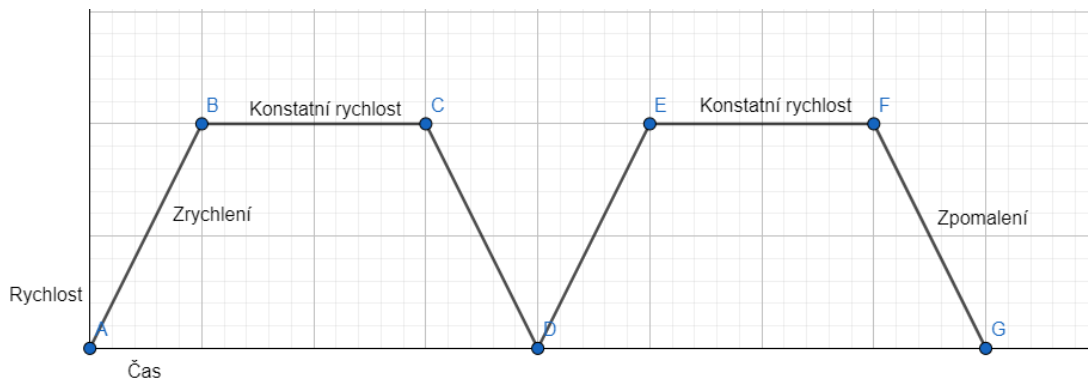


Obrázek 6.3 Trajektorie v bezpečném prostoru pro celý výrobní proces

Pro plynulost manipulace byly mezi jednotlivými obsluhami pracovišť aplikovány systémové funkce pouze pro interpolaci pohybu. Tato funkcionality nemá využití při vsunutí nebo vysunutí vzorku, proto je pouze využita při manipulaci z jednoho výrobního procesu na následující. V simulaci byly použity stejné sekvence příkazů a požadované body v prostoru z realizace systému. Po použití systémové funkce pro interpolaci bodů bylo docíleno snížení vykonávaného časového intervalu o 9 % vůči původnímu návrhu.

## 6.2 Průběhy rychlostí

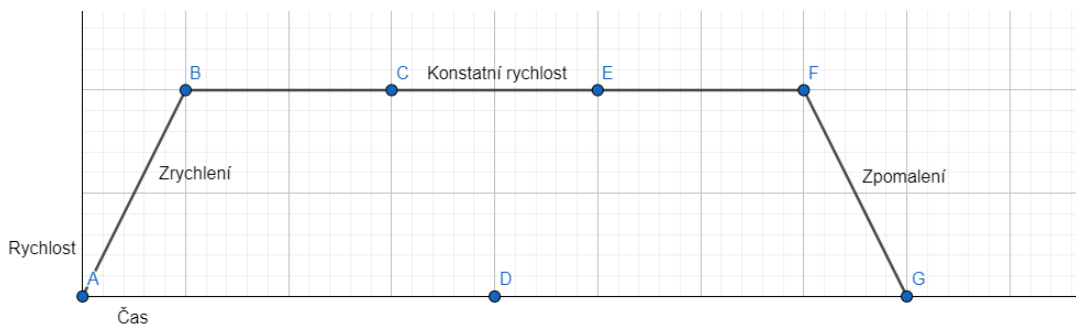
Tato kapitola se zaměřuje na konkrétní trajektorie, které vycházejí z obrázku 6.2. V předchozí kapitole byla popsána možnost interpolace v blízkosti zadaného bodu, kde byla zkrácená výsledná trajektorie a plynulost vykonávaného pohybu.



Obrázek 6.4 Průběh trajektorie mezi třemi body

Na obrázku 6.4 je znázorněn průběh rychlostí robotického systému. Robot vykonává pohyb z libovolného bodu A do bodu G. Jak je z obrázku patrné, je možné rozdělit průběh do třech částí (úseček), a to na zrychlení, konstantní rychlost a zpomalení. Pro tento samostatný pohyb byl změřen čas v simulaci programu RoboSim, kde při nastavení rychlosti na 25 % trval průběh průměrně 1748ms pro první část pohybu. Pro druhou část pohybu byl změřen čas 1409ms. Konkrétně se jedná o pohyby znázorněné na obrázku 6.2, kde celkový průběh trajektorie trval 3157ms.

Následnou úpravou pomocí systémové interpolace byla zkrácena trajektorie i časový interval za účelem dosažení stejných pozic v prostoru. Trajektorie byla provedena v blízkosti bezpečnostních bodů. Vyhodnocený časový interval byl při maximální interpolaci zkrácen o necelých 25 %. Průběh je znázorněn na následujícím obrázku 6.5.



Obrázek 6.5 Průběh trajektorie mezi třemi body s interpolací

Existují dvě proměnné, které ovlivňují tyto náběžné hrany. Jedná se o předdefinování proměnné \$GEN\_OVR a \$ARM\_OVR, které se vyjadřují v procentech. \$GEN\_OVR funguje převážně pro čtení a je možné ji modifikovat z ručního ovladače. Proměnnou \$ARM\_OVR lze editovat v programu, a navíc je závislá na proměnné \$GEN\_OVR. Změnou hodnoty \$ARM\_OVR můžeme zvýšit nebo snížit rychlost a docílit tak zrychlení nebo zpomalení. Tyto předdefinované proměnné byly nastaveny na 100 %, robotický

system tedy vykonával nejrychlejší průběhy v závislosti na nastavení \$GEN\_OVR, kterou je možné nastavit z TP5. Při zapnutí nebo restartování řídicího systému se tato proměnná vždy nastaví na maximální výchozí hodnotu. Tato vlastnost není ideální z hlediska testování systému a je nutné si na tuto funkcionalitu dát pozor.

### 6.3 Optimalizace pohybu

Pro minimalizování trajektorie, souřadných bodů a jednotlivých posloupností výrobního systému je možné určité body vynechat, čímž lze docílit optimálního času a návaznosti pohybů. Například po vysunutí vzorku ze zásobníku není potřeba vracet koncový efektor zpět do referenčního bodu před zásobníkem, ale je vhodné použít úkon k dosažení bezpečného bodu u obráběcí brusky.

Minimalizace trajektorie je možné posuzovat ze znalostí realizace návrhu. Určování, které pohyby by se daly eliminovat ze simulace, je poměrně složité. Pokud bychom měli všechny technické výkresy, bylo by možné analyzovat a vyhodnotit optimální trajektorii v simulaci. Pro tento případ je simulace využita pro získání časových intervalů a minimalizování pohybu na základě realizace a znalosti posloupnosti výrobního procesu. Při simulaci průběhu byly analyzovány body, které je možné vynechat. Jedná se o přechodný bod mezi měřicími stanicemi. Dále to jsou body pro obsluhu brusky s referenčním zásobníkem, kde jich bylo použito více než je potřeba.

Výsledným řešením bylo dosaženo snížení výrobního cyklu o 31 % při nastavení provozní rychlosti na 50 %. Je nutné poznamenat, že se jedná o testování v simulaci a v reálném nasazení může být tato hodnota odlišná. Navíc největší časové prodloužení je při měření na konturografu a obrábění, kdy robotický systém provede v návaznosti příslušný podprogram a dále je nevyužit. Při simulaci byl systém zastaven na 300 ms a poté pokračoval cyklus. Z tohoto důvodu nelze brát tento procentuální poměr jako výsledné zrychlení výrobního procesu. Jedná se pouze o časové intervaly pohybových sekvencí mezi jednotlivými stanovišti.

### 6.4 Referenční zásobník

Na obrázku 4.9 je přidělána kovová destička k obráběcí brusce. Tuto destičku můžeme jednoduše rozšířit o další otvor pro možnost připravení třetího vzorku. Tím by došlo ke zkrácení dvou pohybových funkcí a k využití časového prostoru v době, kdy je robot neaktivní a čeká na další povel.

Pro tuto variantu přibyla funkce s proměnnou, která identifikuje stav připraveného vzorku. Funkce je volána pouze po založení vzorku do konturografu, kde robotický systém nemanipuluje s žádným vzorkem a může tak vykonat jinou proceduru, než vykoná samotný proces na měření kontury.



Při založení vzorku po vykonaném výrobním cyklu systém kontroluje proměnnou, zdali není připraven vzorek u obráběcí brusky. Pokud je vzorek připraven, robot začne vykonávat proceduru vytažením vzorku z brusky a založí připravený vzorek.

Při realizaci systému bylo nastaveno v podprogramu pro obsluhu konturografu příkaz, který vyčkával, až se provede měření. Po ukončení cyklu na konturografu řídicí systém poslal příkaz pro pokračování vykonávání robotické sekvence. Robot v této situaci vyčkával na příkaz, aby mohl dokončit podprogram. Zároveň robot nemohl přijímat žádné jiné příkazy a po celou dobu byl signalizován zaneprázdněný stav. Proto bylo využito volání dalšího podprogramu pro založení následujícího vzorku do referenčního zásobníku, kdy po vykonání dané části podprogramu robot opět vyčkává na signál pro vyjmutí vzorku z konturografu. Toto řešení taktéž není optimální, a proto byla upravena sekvence pro obsluhu brusky rozdělením na dvě části. První část, která vsouvá vzorek do upínacího přípravku, byla přidána k obsluze mikrometru. Druhá část je samostatná rutina sloužící pro vyjmutí vzorku z konturografu. Výhodou rozdělení je, že robotický systém může přijímat jiné příkazy. Navíc je výrobní cyklus efektivnější, jelikož robot může připravit vzorek k brusce, než se vykoná měření na konturografu.

## 6.5 Vstupní podmínky

K návrhu byla přidána proměnná, která inicializuje nastavení systému. Defaultně je nastavena na hodnotu 0, pro kterou je charakteristické, že vzorek je založen v obráběcí brusce. Při návrhu byla tato vlastnost pokaždé stejná, tedy bylo počítáno s tím, že vzorek bude pokaždé založen v brusce a první procedura tak vykoná založení vzorku do referenčního zásobníku, poté obslouží brusku a vymění vzorky. Proměnná slouží k identifikaci stavu obráběcí brusky. Při defaultním nastavení systém předpokládá, že v brusce je založen vzorek. Při změně této proměnné systém rovnou umísťuje vzorek do brusky. Tato funkcionality se ověřuje pouze na začátku inicializace programu viz níže.

```
IF VzorekVBrusce THEN
    PrvniZalozeni
ENDIF
```

Pokud je nastavena hodnota na TRUE vykoná se podprogram pro založení prvního vzorku přímo do brusky a zároveň je připraven druhé vzorek do referenčního zásobníku. Následně celá struktura řídicího programu postupuje stejným způsobem, jako tomu je při defaultním nastavení. Pouze nastala možnost definování vstupních podmínek. Bez této funkcionality je zapotřebí pokaždé upevnit vzorek do brusky. Pokud tam vzorek nebude, provede se první měřicí cyklus bez vzorku.

## 6.6 Zdrojový kód – snížení rychlosti

Při zasunutí a vyjmutí vzorku byla využita systémová funkce na snížení rychlosti při vykonávání konkrétního pohybu. To zajistilo, že při jakémkoliv nastavení rychlosti se daný pohyb vykoná za snížené rychlosti. Navržený způsob se vykonával správně, avšak

nebylo to navrženo zcela optimálně. Po vykonání daného pohybu byla defaultně nastavena hodnota na 25 % rychlosti. Po provedení vyjmutí prvního vzorku celý systém už vykonával pohyby pouze se čtvrtinou rychlosti, i když při spuštění systému byla nastavena hodnota na vyšší rychlost. Toto je znázorněno níže

```
$PROG_SPD :=5  
MOVE TO LINEAR VEC(0,0,50) IN UFRAME  
$PROG_SPD :=25
```

Programovací jazyk PDL2 umožňuje provádět pohyby s podmínkami. Tato vlastnost byla využita k optimálnímu řešení, kde byla při definování snížena rychlost v podmínce. Vykonávací struktura je tak efektivněji prováděna a nedochází ke snížení rychlosti celého systému. Zdrojový kód je kratší při využití podmínky, jelikož předchozí řešení snižovalo rychlost při každé manipulaci se vzorkem, což pro jeden cyklus bylo použito pětkrát. Tato podmínka je volána spolu s požadovaným pohybem viz níže, kde jsou znázorněny tři varianty použití. Pro toto řešení byli využity řádkové syntaxe snížení rychlosti.

```
MOVE TO jnt0001j WITH CONDITIONS[1]  
MOVE TO jnt0001j WITH $PROG_SPD =5  
MOVE TO LINEAR VEC(0,0,50) IN UFRAME WITH $PROG_SPD =5
```

Tímto bylo ušetřeno pár řádku oproti předchozímu řešení, ale hlavním efektem je, že tato nastavená provozní rychlost se vykonává pouze pro daný pohyb.

## 7. ADAPTACE SYSTÉMU

Princip adaptace systému pracuje na základě výstupních hodnot z měřicích systémů, na jejichž základě systém rozhodne, zda se obráběcí proces provede znovu, nebo se vzorek zasune do patřičné kategorie. Ze statických a průměrovaných dat lze podle měřicího senzoru upravovat parametry brousicího cyklu. Vyhodnocující se celkem tři parametry a to průměr, přechodný tvar a délka. Pokud vzorek nesplňuje jednu z těchto zadaných hodnot, tak je vyvolán regulační zásah pro korekční cyklus v obráběcí brusce. Po korekci je vzorek znovu měřen a vyhodnocován dle nastavených mezí.

Adaptace systému na různé velikosti vzorku, je vyřešena přídavným vektorem, který je potřeba nastavit na začátku skriptu. Nastavení musí být provedeno pouze při změně vzorku, výchozí stav je nastaven pro konkrétní vzorek, na který je tento systém navržen. Vektorový posun je zapotřebí řešit v souvislosti se dvěma problémy. Prvním je změna průměru, kde je koncový efektor nastaven na střed vzorku. Je tedy možné předělat akční část na větší rozměr průměru a není potřeba kalibrovat koncový bod, pouze změřit rozdíl mezi použitou akční částí a novou. Předpokládá se použití stejného schéma akčního prvku, jako bylo použito na obrázku 4.7. Lze změřit rozdíl z výkresu a použít vzdálenost středů jako vstupní vektor.

Druhým problémem je omezení konstrukcí upínacího rozměru v nástrojové brusce, kde je maximální vstupní délka obráběcího předmětu 60 mm. Opět je pro tento případ použit přídavný posuvný lineární vektor, který je potřeba definovat při změně vstupního materiálu. Tato část zasahuje pouze při vkládání do uchopovacího systému nástrojové brusky a konturografu. U založení vzorku u konturografu je potřeba znát rozdílnou délku. Uchopovací systém svírá vzorek symetricky, a proto řídicí systém používá polovinu zadané délky pro umístění vzorku do středu upíná. Je možné použít větší upínací přípravek ale po výměně je potřeba vycentrovat uchopovací bod přesně do středu.

### 7.1 Vstupní podmínky

K návrhu systému přibyla funkce, které slouží pro inicializaci. Tuto podmínku je nutné nastavit před spuštěním systému. Při realizaci systému bylo definované, že v obráběcí brusce je umístěn vzorek. Navržený systém by provedl danou trajektorii bez vzorku, pokud by nebyl usazen v unašeči brusky. Došlo by tak k založení prvního vzorku do brusky, a proto bylo navržené řešení rozšířeno o inicializaci tohoto stavu.

Při spuštění skriptu robotický systém kontroluje tuto hodnotu a na základě nastavení systém provede příslušnou sekvenci pro založení prvního vzorku přímo do brusky nebo vykoná rutinu pro výměnu vzorků.

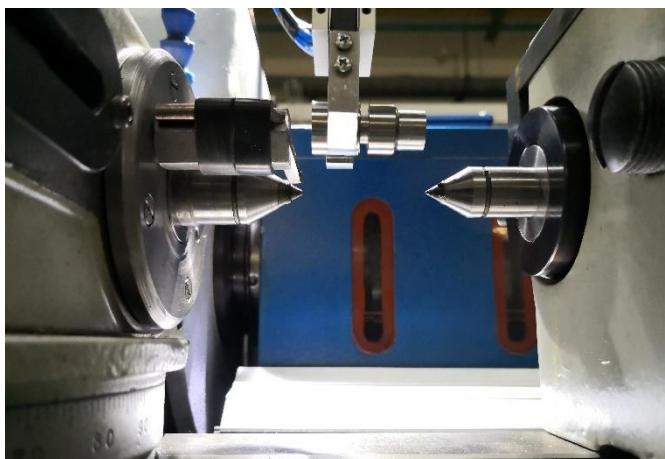
Pokud bychom použili další digitální vstup pro identifikaci tohoto stavu, bylo by možné toto individuálně ovládat z řídicího systému.

Nabízí se varianta, která by byla pravděpodobně nejefektivnější, jenž spočívá v přidělení bezkontaktního senzoru na koncový efektor robota, který by před vyjmutím vzorku zkontroloval, zda je upevněn obrobek v unašeči brusky. Nicméně tuto variantu je možné vyřešit čtením nebo otestováním výstupu, který ovládá elektromagnetický ventil pro unašeč v obráběcí brusce. Případně by mohl být přidělán optický nebo kapacitní senzor k unašeči brusky a tím by bylo možné získat informaci o založeném vzorku.

## 7.2 Různý vstupní materiál

Do určité míry je systém adaptibilní na změnu vstupního materiálu, ovšem omezující technické parametry lze najít. Prvním je maximální délka vzorku, kterou je schopen upínací přípravek uchytit, což je limitující podmínka pro vstupní objekt. Druhým omezujícím parametrem je schopnost uchopení vzorku, a to od průměru 12 mm až do 22 mm s tím, že se předpokládá kulatý objekt.

Délka vstupního objektu je omezená maximálním uchopením v přípravku, kde je potřeba umístit vzorek přímo do středu, jelikož přípravek svírá předmět symetricky. Pro navržený vzorek je tato situace nastavena takovým způsobem, aby nedocházelo k posunutí vzorku uvnitř akčního přípravku. Aby systém zasouval delší vzorek do středu upínacího přípravku, je potřeba změřit rozdíl vzdáleností a zadat tuto hodnotu do inicializace programu. Systém použije tuto hodnotu jako relativní vektor posunutí při zasunutí vzorku. Pro upínací přípravek systém používá polovinu této vzdálenosti, jelikož je potřeba přesné pozice pro ideální sevření. Další problematickou částí, která je řešena opět relativním vektorem, je vysunutí vzorku, kde je potřeba, aby byl vzorek vysunut ze zásobníku o patřičnou vzdálenost, jinak by mohlo dojít k zadrhnutí o hranu a ztrátu vzorku. Při zasouvání se jedná o stejnou situaci. Na obrázku 7.1 je znázorněno zasunutí do brusky. Lze vidět uchopenou část vzorku, která je přesně orientovaná k pevné části unašeče brusky.



Obrázek 7.1 Zasunutí vzorku do obráběcí brusky

Pro vzorky s větším průměrem je nastaven inicializační parametr, který definuje posun středu koncového efektoru. Předpokládá se s využitím stejného akčního přípravku, pouze se zvětšením uchopovacího úhlu a posunutím středu koncového bodu. Při úpravě akčního prvku není potřeba provést kalibraci koncového bodu, protože bod pro uchopení je nastaven do středu. Změna po úpravě je pouze v posunutí tohoto středového bodu, a proto je třeba zadat přesný rozdíl vzdálenosti původního středu od zvětšeného, nebo zmenšeného akčního přípravku. Při manipulaci v prostoru je tato změna zanedbatelná, jediný rozdíl, na který se systém musí přizpůsobit, jsou situace při zasunutí a vysunutí vzorku. Pro vyřešení tohoto problému bylo použito relativního vektoru, kterým se zajistí posunutí koncového bodu od původního bodu o hodnotu, která reprezentuje rozdíl mezi navrženým a upraveným akčním členem. Tím je zajištěno přesné usazení a vyjmutí vzorku v požadovaných pozicích. Níže je znázorněno, jak je to programově vyřešené. Příkaz reprezentuje lineární pohyb daný vektorem s absolutními hodnotami v uživatelském souřadném systému se sníženou rychlostí na 5 %.

```
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0,0,-(50+Vzorek_offset)) IN UFRAME WITH  
$PROG_SPD_OVR = 5
```

### 7.3 Adaptační obrábění brusky

Systém je navržen pro změnu parametru obráběcího cyklu v závislosti na změřených hodnotách ze senzoru RXi, který vyhodnocuje průměr a z konturografu, který vyhodnocuje přechodný tvar a délku vzorku. Z těchto dat jsou analyzovány rozdíly broušení, ke kterým dochází v každém cyklu, a při překročení stanoveného limitu se generuje signál pro změnu parametrů broušicího cyklu.

Jelikož se jedná o přesné broušení, je dobré vzít do úvahy i situaci, kdy se mění broušicí kotouč, který je totiž při prvním cyklu neopracovaný a může tak dojít k podbroušení vzorku, čímž se stane nevyhovujícím a nebude splňovat limity. Tento rozdíl by bylo možné eliminovat z historických dat, které byly naměřeny v průběhu několika cyklů, ale je zapotřebí tato data zaznamenávat a vyhodnocovat. Z dat můžeme identifikovat, o jakou hodnotu průměrně ubývá broušicí kotouč s každým cyklem.

## 8. ŘÍDICÍ SYSTÉM

Majitelem společnosti bylo rozhodnuto přidat nadřazené průmyslové PC, které generuje signály pro ovládání příslušných přístrojů. Systém zpracovává hodnoty z měřicích systémů a vyhodnocuje akční zásahy na základě změřených dat a nastavených mezích. Systém je navržen tak, že neustále upravuje parametry z vyhodnoceného měření a identifikuje opotřebením brousícího kotouče. Teoreticky by neměla nastat situace, kdy vzorek nevyhovuje limitům, jelikož systém neustále upravuje brousící parametry. Níže je znázorněno defaultní nastavení řídicího systému s výchozími hodnotami.

```
14      ;aktuální průměr na brusce
10      ;aktuální délka na brusce
1       ;aktuálně zadaný rádius
0.002  ;velikost korekce průměru
0.01   ;velikost korekce délky
0      ;povolení korekce průměru (0-zakázáno 1-povoleno)
0      ;povolení korekce délky
0      ;povolení orovnění
0      ;statická korekce mikrometru
0.002  ;minimální odchylna pro korekci průměru
0.004  ;minimální odchylna pro korekci délky
0.005  ;minimální odchylna rádiusu pro orovnění
5      ;číslo kanálu COM pro PLC
1      ;povolení PLC enable=1 disable=0
0      ;číslo kanálu COM pro mikrometr
1      ;povolení mikrometru enable=1 disable=0
198.164.0.10 ;IP adresa komunikace s měřidlem
c:\PRACOVNI\WIN-APLIKACE\BergerRobot\PGM\      ;cesta pro soubor XML
123    ;heslo pro změny
pokus.pgm ;program při startu
1      ;výpis programu (0-NE 1-ANO)
```

Vzorek je vyhodnocován na základě třech parametrů a to průměr, délka a přechodný tvar. Každý vzorek musí splňovat všechny tři parametry a rozhodujícím prvkem je přechodný tvar, který je primárně nejdůležitější. Z odchylny přechodného tvaru se identifikuje výměna brousícího kotouče.

K softwaru jsou připraveny konfigurační soubory, které slouží ke změně brousících parametrů na základě vygenerovaného akčního zásahu z vyhodnocení měřicího cyklu. Jedná se o soubor, který obsahuje sekvenci příkazů pro řídicí software a je znázorněn níže

```
;Program celého cyklu
LABEL 1
CEKEJ B      ;test ukončení brusky
IF KOR 0 THEN 10
IF KOR 2 THEN 11
IF KOR 3 THEN 12
IF KOR 4 THEN 13
IF KOR 5 THEN 14
IF KOR 6 THEN 15

LABEL 10
BRUSKA 1      ;start brusky bez všeho
GOTO 30
```

```

LABEL 11
BRUSKA 2      ;start brusky s orovněním
GOTO 30

LABEL 12
BRUSKA 3      ;start brusky s korekcí X+
GOTO 30

LABEL 13
BRUSKA 4      ;start brusky s korekcí X-
GOTO 30

LABEL 14
BRUSKA 5      ;start brusky s korekcí Z+
GOTO 30

LABEL 15
BRUSKA 6      ;start brusky s korekcí Z-
GOTO 30

LABEL 30
ROBOT 2
CEKEJ R
PRUMER 1
CEKEJ P
ROBOT 3
CEKEJ R
KONTUR 1
CEKEJ K
SLEEP 1000
POCITEJ
ROBOT 4
CEKEJ R

ENDPRG

```

Příkaz „ROBOT 1“ generuje aktivační signál na vstupní hodnotě \$DIN[8] a následně nastavenou kombinaci na dalších třech vstupech, jak bylo popsáno v kapitole 5.1.1. Těmito hodnotami se nastavují výstupní hodnoty řídicího programu. Stejnou analogií tento princip funguje i pro brusku, kde dochází ke změně parametrů. Akční signál \$DIN[8] je používán pro zahájení komunikace na všech podprogramech robota. Při aktivování pro měření na senzoru RXi systém získává v řádu 2 až 3 tisíc hodnot o změřeném průměru. Následně systém vyhodnotí průměrnou hodnotu z této sady dat. Měření je zahájeno, jakmile je celý objekt uvnitř měřeného prostoru.

Společností Mikronex s.r.o. byl vyvinut software pro individuální nastavení jednotlivých přístrojů nebo spuštění automatického režimu v řídicí jednotce APPC 1540T. Software byl naprogramován v jazyce PowerBasic. Tento software používá právě zmíněné konfigurační soubory, podle kterých generuje příslušné signály. Naměřená data z konturografu se ukládají ve formátu XML (angl. eXtensible Markup Language). Řídicí systém zpracovává výstupní soubor po dokončení měření a vyhodnocuje, jestliže vzorek vyhovuje nastaveným mezím nebo vyvolá korekční zásah a vzorek zasune do brusky. Na

obrázku 8.1 je znázorněn vytvořený software pro manuální a automatické řízení výrobního procesu.

The screenshot shows the Mikronex control software interface. It features a left sidebar with machine status indicators, a central data table for machine parameters, a right sidebar with a history log and control buttons, and a bottom status bar with cycle counters.

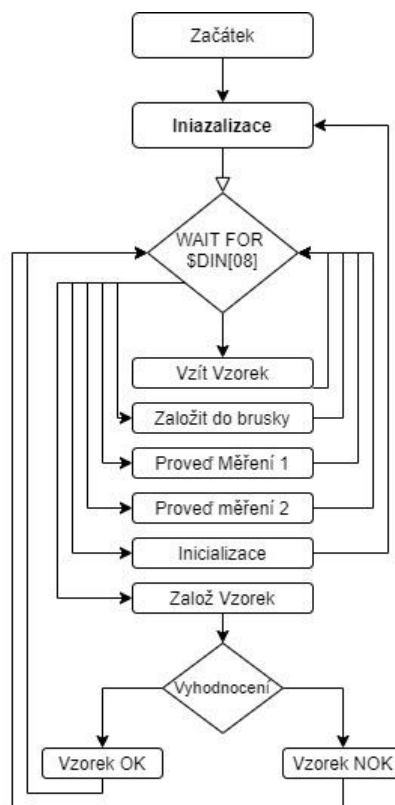
Machine/Module	Status	Parameter	Value
BRUSKA	RUN	Aktuálně zadáný průměr součásti	14.000
	BUSY	Aktuálně zadaná délka součásti	10.000
	STOP	Aktuálně zadáný rádius součásti	1.000
	STOP	Velikost korekce průměru v X	0.002
ROBOT	RUN	Velikost korekce délky v Z	0.010
	BUSY	Korekce průměru v X	zakázáno
	STOP	Korekce délky v Z	zakázáno
	STOP	Orovnání kotouče	zakázáno
MĚŘENÍ 1	RUN	Průměr měřený mikrometrem	0.000
	BUSY	Odchylka průměru po měření	-14.000
	STOP	Statická korekce mikrometru	0.000
	STOP	Minimální odchylka pro korekci	0.003
MĚŘENÍ 2	RUN	Požadavek korekce průměru	KOREKCE X+
	BUSY	Délka měřená konturografem	0.000
	STOP	Rádius měřený konturografem	0.000
	STOP	Odchylka délky profilu	-10.000
REZERVA	RUN	Odchylka rádiusu profilu	-1.000
	BUSY	Min. odchylka pro korekci délky	0.003
	STOP	Min. odchylka rád. pro orovnění	0.003
	STOP	Požadavek korekce délky v Z	KOREKCE Z+
REZERVA	RUN	Požadavek na orovnění kotouče	OROVNÁNÍ
	STOP		

Obrázek 8.1 Řídicí software pro manuální a automatické ovládání

## 8.1 Návrh řídicího systému z jednotky R1C

Je navrhnutá varianta, která umožňuje tuto funkcionalitu naprogramovat do řídicí jednotky R1C. V rámci realizace nebylo možné ověřit tento systém. Tato jednotka disponuje programovatelným automatem od společnosti B&R, která má výhodu v tom, že se programuje v jazyce C. Převážná většina konkurenčních PLC, má vytvořený vlastní programovací jazyk. Navíc uvnitř řídicí jednotky R1C je připravena DIN lišta pro rozšiřující moduly. Z tohoto důvodu bylo navrženo druhé řešení, kde hlavním řídicím systémem je robotický systém. Tím je celý systém zjednodušen o jedno zařízení. Navržený systém vychází ze stávajícího řešení a vývojový diagram je znázorněn na obrázku 8.2. Systém využívá stejných pohybových funkcích, pouze se rozšířily a upravily podprogramy a hlavní řídicí smyčka. Pro tento případ je nastavena posloupnost výrobního cyklu s adaptací pro korekční cyklus a založením do výstupní kategorie.





Obrázek 8.2 Vývojový diagram řídicího systému z jednotky R1C

Navržené řešení, vystačilo se zabudovanými moduly, které jsou k dispozici. Jedná se o dvě digitální karty s 16 vstupy a výstupy, které jsou podrobněji popsány v tabulce 8.1, a popsán význam jednotlivých vstupů a výstupů.

Tabulka 8.1 Rozšiřující moduly

Označení	Význam	Označení	Význam
\$DOUT[1]	korekce X+	\$DIN[1]	Signál pro čtení ze senzoru
\$DOUT[2]	korekce X-	\$DIN[2]	BCD 1. kód
\$DOUT[3]	korekce Z+	\$DIN[3]	BCD 2. kód
\$DOUT[4]	korekce Z-	\$DIN[4]	BCD 3. kód
\$DOUT[5]	Orovnání	\$DIN[5]	Run Bruska
\$DOUT[6]	Broušení	\$DIN[6]	Finish Bruska
\$DOUT[7]	Ventil Bruska	\$DIN[7]	Run Konturograf
\$DOUT[8]	Ventil Konturograf	\$DIN[8]	Finish Konturograf
\$DOUT[9]	Nevyužito	\$DIN[9]	OK/NOK vzorek
\$DOUT[10]	Nevyužito	\$DIN[16]	Signál pro inicializaci

Tato varianta oproti předchozímu řešení není modulární z pohledu řízení. Řídicí struktura má danou posloupnost jednotlivých podprogramů, které jsou definovány

v jednotce R1C. Varianta s nadřazeným IPC je z hlediska řízení modulární a nemusí být vykonáno sekvenčně. Případně nadřazený systém může ovládat výrobní procesy nezávisle jeden na druhém s využitím jednoho manipulátoru. Nadřazený systém se jeví jako ideální řešení, není výpočetně zatěžován a v případě rozšíření systému není potřeba zasahovat do stávajícího řešení pouze se rozšíří systém, definují se konfigurační soubory.

Tento návrh je pouze experimentálním řešením, které nebylo ověřeno, jelikož nebyla možnost otestovat toto řešení. Navržené řešení vychází z původního návrhu s nadřazeným systémem. Jsou zachovány, stejné pohybové funkce. Pouze došlo k definování sekvenčního cyklu, rozšíření o vyhodnocovací funkci a změnění významu digitálních vstupů a výstupů, které jsou popsány v tabulce 8.1.

Po teoretické stránce je systém téměř identický pouze se liší význam jednotlivých vstupních a výstupních hodnot a jejich celkový počet. Z pohledu minimalizace řešení je tento systém řízení ideální volbou a to proto, že robot je klíčovým strojem mezi jednotlivými výrobními procesy. Pro zvýšení přesnosti by mohli být přidány koncové body nebo senzory, které by potvrdzovali založený stav vzorku v zásobníku. Toto už jsou funkcionality nadbytečné a bezpečnostní, pro funkčnost daného řešení to nemá významný vliv na výrobní proces.

## 9. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat adaptivní robotické pracoviště pro přesné broušení. Navržený systém realizuje reálnou aplikaci pro automatizovaný výrobní proces, který může být aplikován a rozšířen pro sériovou výrobu. Jelikož je systém navržen modulárně, je možné návrh využít na několik odlišných výrobních procesů.

Praktická část diplomové práce je rozdělena na dvě pasáže, kdy v první pasáži bylo vytvořeno navržené řešení pro robotické pracoviště s popisem jednotlivých částí, které byly zapotřebí pro kompletování navrženého řešení.

Ve druhé pasáži praktické práce je popsána trajektorie vykonávaných pohybů, které byly optimalizovány společně s respektováním bezpečnostních bodů. Na základě optimalizace jednotlivých bodů bylo analyzováno zrychlení výrobního procesu o 31 %. Následně se analyzoval způsob návaznosti procesů s minimalizováním počtu výkonových pohybů. V této části byla popisována možná řešení adaptace na změnu vstupních parametrů, a to včetně limitujících podmínek. Systém adaptivně upravuje parametry pro broušící algoritmus z naměřených dat ze senzorů.

Nejvíce problematickou částí v návrhu bylo založení vzorku zpět do zásobníku. Jednalo se o velmi přesně vykroužené otvory, do kterých se musel vzorek zasouvat přesně. Bylo popsáno několik řešení, jako výsledné nastavení bylo zvoleno definování souřadného bodu přesně nad otvorem zásobníku a tím bylo docíleno úspěšného zasunutí pro každý vzorek. Dále byl navrhnout řídicí systém z robotické jednotky R1C, který vychází z realizovaného řešení a zachovává pohybové vlastnosti. Tento systém nebyl vyzkoušen, ale bylo by vhodné tento systém vyzkoušet a realizovat v návaznosti na tuto práci.

Výsledkem práce je navržený systém pro robotizované pracoviště, které může být využito na široké spektrum výrobních procesů. Systém je adaptivní na vstupní parametry zadaného objektu, které je nutné definovat do řídicího algoritmu. Na základě nasbíraných dat je možné analyzovat, s jakým poměrem ubude broušící kotouč při každém cyklu, čímž lze predikovat výměnu kotouče.

## LITERATURA

- [1] COLLINS, Daniel. What is a Cartesian robot?. *Linear Motion Tips* [online]. Linear Motion Tips, 2018. [cit. 2021-03-26] Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/what-is-a-cartesian-robot/>
- [2] GOUBEJ, Michal, Martin ŠVEJDA a Michal SCHLEGEL. *Úvod do mechatroniky, robotiky a systémů řízení pohybu* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~msvejda/URM/materialy/Uvod%20do%20mechatroniky.pdf>. Skripta. Západočeská univerzita v Plzni, Katedra Kybernetiky.
- [3] History of Robotics. *ROBOTICK SISTEM* [online]. ROBOTIK SISTEM, 2019 [cit. 2021-03-26] Dostupné z: [http://www.robotiksystem.com/robotics\\_history.html](http://www.robotiksystem.com/robotics_history.html)
- [4] Executive Summary World Robotics 2020 Industrial Robots. *International Federation of Robotics* [online]. 2020, 4 s. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: [https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive\\_Summary\\_WR\\_2020\\_Industrial\\_Robots\\_1.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Industrial_Robots_1.pdf)
- [5] KOLÍBAL, Zdeněk; KNOFLÍČEK, Radek. Morfologická analýza stavby průmyslových robotů. 1.vydání. Košice : VIENALA, 2000. 185 s. ISBN 80-88922-27-5.
- [6] CLASIFICATION OF ROBOTS BY OPERATION ENVIROMENT. *ROBOTICK SISTEM* [online]. ROBOTIK SISTEM, 2019 [cit. 2021-03-26] Dostupné z: <http://www.robotiksystem.com/robotinfo.html>
- [7] KOHÚT, Josef. *Aplikace průmyslových robotů v oblasti svařování* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/11418/final-thesis.pdf?sequence=6>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Radek Knoflíček
- [8] ROBOTS AND APPLICATIONS OF ROBOTICS. *ROBOTICK SISTEM* [online]. ROBOTIK SISTEM, 2019 [cit. 2021-03-26] Dostupné z: [http://www.robotiksystem.com/robotics\\_applications.html](http://www.robotiksystem.com/robotics_applications.html)
- [9] RUMÍŠEK, Pavel. *Automatizace: roboty a manipulátory* [online]. Brno, 2003 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm\\_mechanizace\\_a\\_automatizace\\_roboty\\_rumisek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm_mechanizace_a_automatizace_roboty_rumisek.pdf). Skripta. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [10] Robot nebo kobot? V čem se liší? Talentica [online]. ČR: Eva Vaculíková, 2018, 5.4.2018 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.talentica.cz/robot-nebo-kobot/>
- [11] JELÍNEK, Aleš a Adam CHROMÝ. *Vybrané partie z robotiky* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z:

- [https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/Vybrane\\_partie\\_z\\_robotiky.pdf](https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/Vybrane_partie_z_robotiky.pdf).  
Skripta. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [12] Quido ETH 8/8. *Papouch store* [online]. Papouch store s.r.o., 2019 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://papouch.com/quido-eth-8-8-8-vstupu-8-rele-teplomer-ethernet-p4648/#gallery>
- [13] Cylindrical robot type. *All On Robots* [online]. All On Robots, 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.allonrobots.com/cylindrical-robot.html>
- [14] Spherical robots. *All On Robots* [online]. All On Robots, 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.allonrobots.com/spherical-robots.html>
- [15] ŠOLC, František a Luděk ŽALUD. ROBOTIKA [online]. Brno, 2002 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <http://media1.wgz.cz/files/media1:5100dca52f8f1.pdf.upl/Robotika.pdf>. Skripta. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [16] SOUMYA Susan John. Robonaut-the space robot inspired by NASA. *Longdom publishing SL* [online], 2020 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.longdom.org/abstract/robonautthe-space-robot-inspired-by-nasa-57927.html>
- [17] SKAŘUPA, Jiří. Roboty a manipulátory [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: [http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta\\_PRaM.pdf](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf). Učební text. Vysoká škola Báňská, Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2613-4
- [18] ŠTÁBL, Martin. Řešení kinematických úloh robota EPSON PROSIX C3 [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/39141>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce František Šolc.
- [19] COMAU, *Racer5 Robot: Technical Specifications, Transport and Installation and Maintenance*, version 1. 2017, [cit. 2021-03-26].
- [20] COMAU, *PDL2 Programming Language: System software C5GPlus – RIC*, version 3. 2018, [cit. 2021-03-26].
- [21] Metralight. *RXi Sensor* [online]. METRALIGHT, Inc. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.metralight.com/products/doc/rxi/rxi.pdf>.
- [22] Mikronex, *BUA16CNC*, [Online]. MIKRONEX s.r.o. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BUA16CNC.pdf>.
- [23] ŠKVARKA, JAN. *Využití robotizace při měření strojírenských součástí* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/90055>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Výrobní a materiálové inženýrství. Vedoucí práce Lubomír Štajnochr.

- [24] Festo Czech Republic. *Ventily CPE, Compact Performance* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z:  
[http://www.festo.com/cat/cs\\_cz/data/doc\\_cs/PDF/CZ/CPE\\_CZ.PDF](http://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/CPE_CZ.PDF)
- [25] Festo Czech Republic. *Redukční ventily MS-LR/LRB/LRP/LRPB/LRE, řada MS* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z:  
[https://www.festo.com/cat/cs\\_cz/data/doc\\_CS/PDF/CZ/MS-REGULATORS\\_CZ.PDF](https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/MS-REGULATORS_CZ.PDF)
- [26] Festo Czech Republic. *Hadice z plastu, kalibrovaný vnější průměr* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z:  
[https://www.festo.com/cat/cs\\_cz/data/doc\\_cs/PDF/CZ/OD-TUBING\\_CZ.PDF](https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/OD-TUBING_CZ.PDF)
- [27] BURIÁN, František. *Stacionární roboty 2017: Anatomie, Kinematika*. [Přednáška]. Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav automatizace a měřicí techniky, 10.4.2017 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z:  
[https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/prednasky/2017\\_MRBT\\_stacionarni.pdf](https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/prednasky/2017_MRBT_stacionarni.pdf)
- [28] WR Industrial Robots 2019\_Chapter\_1. International Federation of Robotics [online]. 2020, 18 s. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z:  
[https://ifr.org/downloads/press2018/WR%20Industrial%20Robots%202019\\_Chapter\\_1.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/WR%20Industrial%20Robots%202019_Chapter_1.pdf)
- [29] International Federation of Robotics [online]. Frankfurt – Germany: IFR, 2018 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z:  
[https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation\\_WR\\_2020.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf)
- [30] SCARA ROBOT: Rebel-S6-0.45. *Berger Positec motion technology* [online]. Berger Positec, s.r.o. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.regulacni-pohony.cz/inpage/rebel-s6-0-45/>
- [31] Berger Positec motion technology. *Malé roboty, nosnost do 16 kg* [online]. Berger Positec, s.r.o. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.regulacni-pohony.cz/inpage/male-do-16-kg/>
- [32] Berger Positec motion technology. *ROBOT DELTA 3* [online]. Berger Positec, s.r.o. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.regulacni-pohony.cz/inpage/robot-delta-3/>
- [33] Berger Positec motion technology. *AURA-170-2.8* [online]. Berger Positec, s.r.o. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.regulacni-pohony.cz/inpage/aura-170-28/>
- [34] DÖMEL Andreas. AIMM. *Institute of Robotics and Mechatronics* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11409/#gallery/29194>
- [35] Robots IEEE. *Robonaut 2. ROBOTS your guide to the world of robotics*. [online]. 2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z:  
<https://robots.ieee.org/robots/robonaut/?gallery=photo1>
- [36] Stránský a Petřžík, *Pneumatická úhlová chapadla: řada MCHA* [online]. 2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z:

- <https://www.stranskyapetrzik.cz/pneu/pneumaticke-valce/valce-upinaci-menu/valce-mcha/>
- [37] VIKTORA, Josef. *Návrh robotického pracoviště pro ohýbačku vodičů* [online]. Plzeň, 2019 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/37467/1/Diplomova\\_prace\\_JV\\_2K18.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/37467/1/Diplomova_prace_JV_2K18.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Kamil Kosturika
- [38] KUDLÁČ, Lukáš. *Optimalizace procesu obrábění u odlitků z vysokotlakého lití* [online]. Pardubice, 2016 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/68714/KudlacL\\_OptimalizaceProcesu\\_PS\\_2017.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/68714/KudlacL_OptimalizaceProcesu_PS_2017.pdf?sequence=4&isAllowed=y). Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Pavel Švanda.
- [39] FARSKÝ, Jindřich. *Vliv řezných podmínek na kvalitu obrobku a zatížení vřetena při broušení na 5-ti osé brusce* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27902/1/DP\\_FARSKY\\_Jindrich.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27902/1/DP_FARSKY_Jindrich.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Miroslav Zetek.
- [40] APPC 1540T. *NEXCOM* [online]. NEXCOM International Co, 2021 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.nexcom.com/Products/industrial-computing-solutions/panel-pc/applied-panel-pc/appc-1540t-panel-pc#>
- [41] VALENTA, Jan. *Robotizované pracoviště pro paletování dílů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/191789/final-thesis.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Vetiška.
- [42] NEZDAŘILÍKOVÁ, Martina. *Metrologická konfirmace měřidla* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41432](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41432). Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Petr Koška.
- [43] ZELINKA, Ondřej. *Bezkontaktní měření rozměrů – optické mikrometry* [online]. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, roč. 2009, č. 4. ISSN 1210-9592 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/bezkontaktni-mereni-rozmeru-opticke-mikrometry-2009\\_04\\_38860\\_5757/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/bezkontaktni-mereni-rozmeru-opticke-mikrometry-2009_04_38860_5757/)
- [44] MEJZLÍK, Jiří. *Návrh jednoúčelového stroje pro měření průhybů* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=101916](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101916). Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Pavel Houška.

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

BCD	Binary Coded Decimal – Dvojkově kódované desítkové číslo
CCD-CMOS	Charge-Couple Device – Complementary metal-oxide semiconductor – Zařízení s vázanými náboji a komplementárního polovodiče oxidu kovu
CNC	Computer Numerical Control – Počítačem řízený obráběcí stroj
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor – Komplementární polovodič oxidu kovu
DoF	Degrees of Freedom – počet stupňů volnosti
ERP	Enterprise Resource Planning – Plánování podnikových zdrojů
FSO	Full Scale Output – Z měřicího rozsahu
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol – Protokol pro přenos HTML stránek a souvisejících souborů.
IPC	Industrial Personal Computer – Průmyslový osobní počítač
IT	Information Technology – Informační technologie
ISS	International Space Station – Mezinárodní vesmírná stanice
LED	Light-Emitting Diode – Elektroluminiscenční dioda
LCD	Liquid Crystal Display – Display s kapalnými krystaly
MES	Manufacturing Executions Systems – Výrobní informační systém
MR	Mobilní robot
NC	Numerical Control – Číslicové řízení
PC	Personal Computer – Osobní počítač
PLC	Programmable Logic Controller – Programovatelný automat
SCARA	Selective Compliance Articulated Robot Arm – Selektivní kompatibilní kloubové robotické rameno
SIM	Subscriber Identity Module – Účastnická identifikační karta
SNMP	Simple Network Management Protocol – Protokol pro řízení a sběr informací ze síťových zařízení.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle – Bezpilotní letoun
USB	Universal Serial Bus – Univerzální sériová sběrnice
WLAN	Wireless Local Area Network – Lokální bezdrátová síť
WWAN	Wireless Wide Area Network – Širokopásmová bezdrátová síť



XML eXtensible Markup Language – Rozšířitelný značkovací jazyk

Symboly:

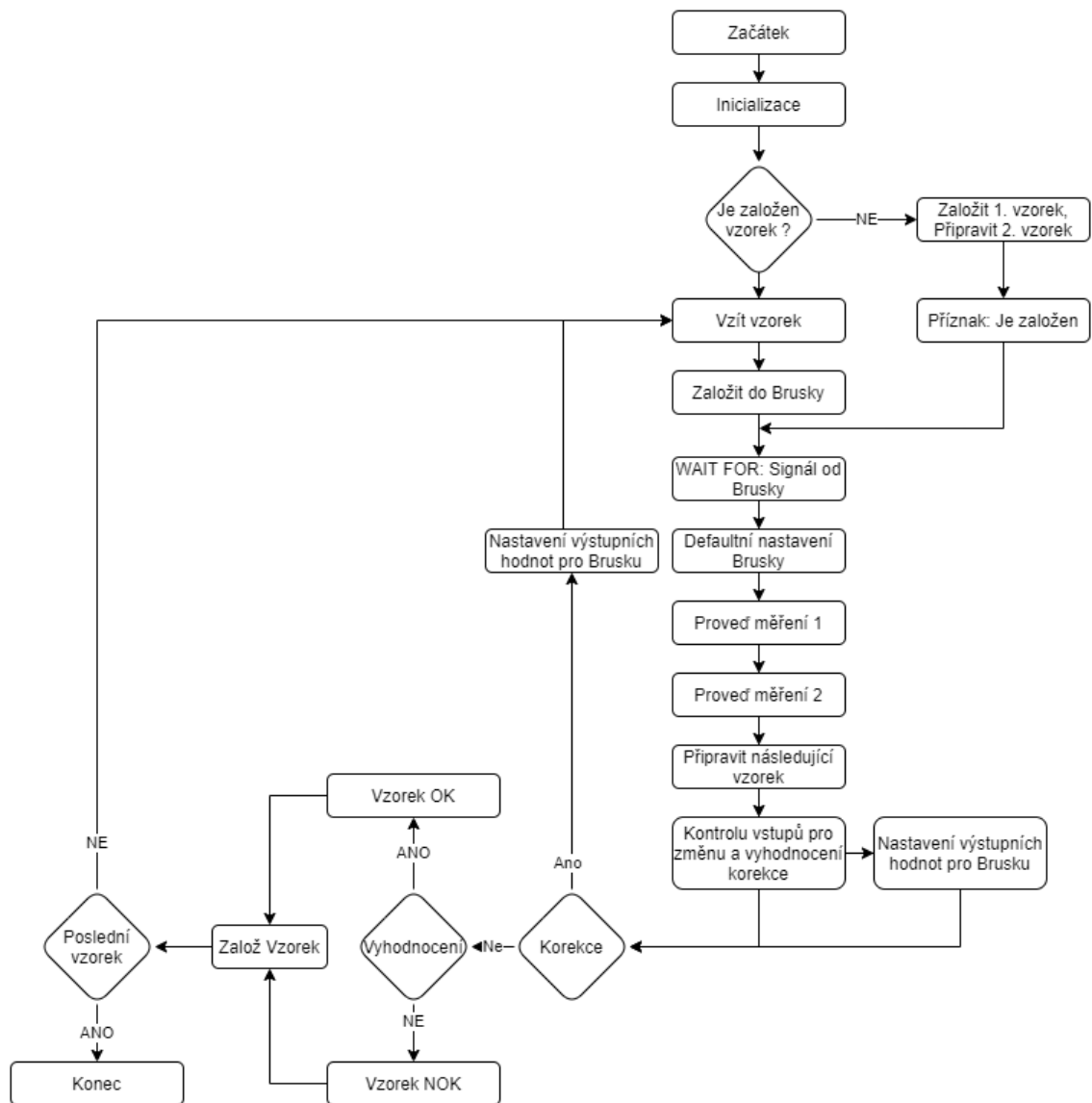
$a$	Vektor vzdálenosti	
$\alpha$	Úhel natočení	(°)
$A_{bo}$	Homogenní transformační matice	
$b$	Vektor vzdálenosti	
$\beta$	Úhel natočení	(°)
$^{\circ}C$	Teplota	(°)
$\gamma$	Úhel natočení	(°)
$d$	Vektor vzdálenosti	
GHz	Frekvence	(Hz)
$ms^{-1}$	Rychlost	
$o$	Vektor orientace	
$p$	Vektor polohy	
$q$	Kloubová proměnná	
$R$	Matice rotace	
$R_{x,\alpha}$	Matice rotace kolem osy $x$ o úhel $\alpha$	
$R_{y,\beta}$	Matice rotace kolem osy $y$ o úhel $\beta$	
$R_{z,\gamma}$	Matice rotace kolem osy $z$ o úhel $\gamma$	
$T_{bn}$	Výsledná transformační matice	
VDC	Napětí	(V)

# SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - VÝVOJOVÝ DIAGRAM .....	98
PŘÍLOHA B – TABULKA SIMULOVANÝCH TRAJEKTORIÍ .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.99
PŘÍLOHA C - FOTOGRAFIE ROBOTICKÉHO PRACOVÍŠTĚ .....	100
PŘÍLOHA D - OBSAH PŘILOŽENÉHO CD .....	102

# Příloha A - Vývojový diagram

## A.1 Vývojový diagram řídicího systému



Obrázek A.1 Vývojový diagram řídicího systému

## Příloha B - Tabulka simulovaných trajektorií

### B.1 Tabulka naměřených hodnot

Tabulka B.1 Trajektorie vycházející z obrázku 6.2

Číslo měření	Naměřená hodnota [ms]	Optimalizovaná trajektorie [ms]
1. měření	3351	2539
2. měření	3404	2536
3. měření	3368	2536
4. měření	3375	2541
5. měření	3371	2539
6. měření	3354	2546
7. měření	3346	2541
8. měření	3344	2541
9. měření	3344	2544
10. měření	3346	2555
Průměr	3360.3	2541.8
Procentuálně	100	75.64

### B.2 Tabulka naměřených hodnot

Tabulka B.2 Pro celou sekvenci pohybů pro jeden vzorek při rychlosti 50 %

Číslo měření	Naměřená hodnota [ms]	Optimalizovaná trajektorie [ms]
1. měření	33458	22204
2. měření	33470	23392
3. měření	33542	23411
4. měření	33844	23392
5. měření	34744	23399
6. měření	34120	23375
7. měření	33969	23447
8. měření	33582	23428
9. měření	33520	23387
10. měření	33443	23512
Průměr	33769.2	23294.7
Procentuálně	100	68.98

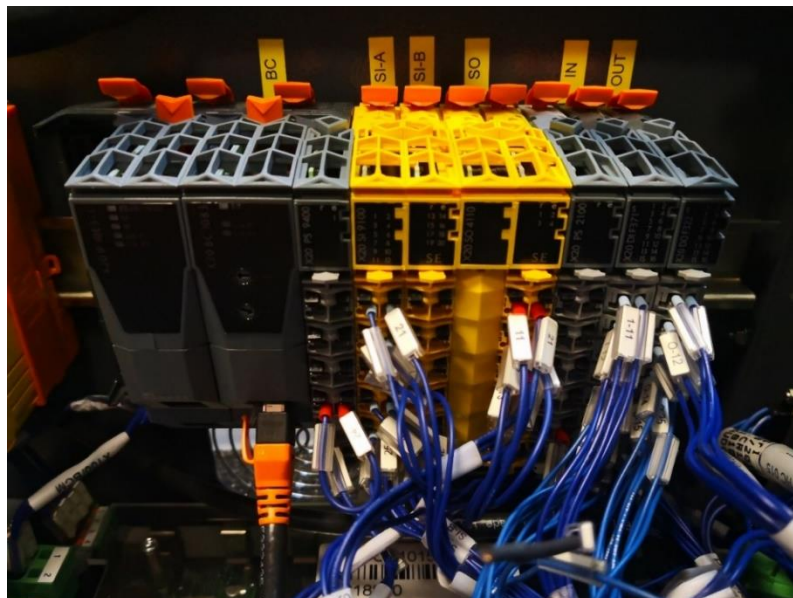
## Příloha C - Fotografie robotického pracoviště

### C.1 Pohled pracovního rozsahu R1C



Obrázek C.2 Manipulační prostor robota Racer R5

### C.2 Řídicí jednotka R1C a rozšiřující moduly



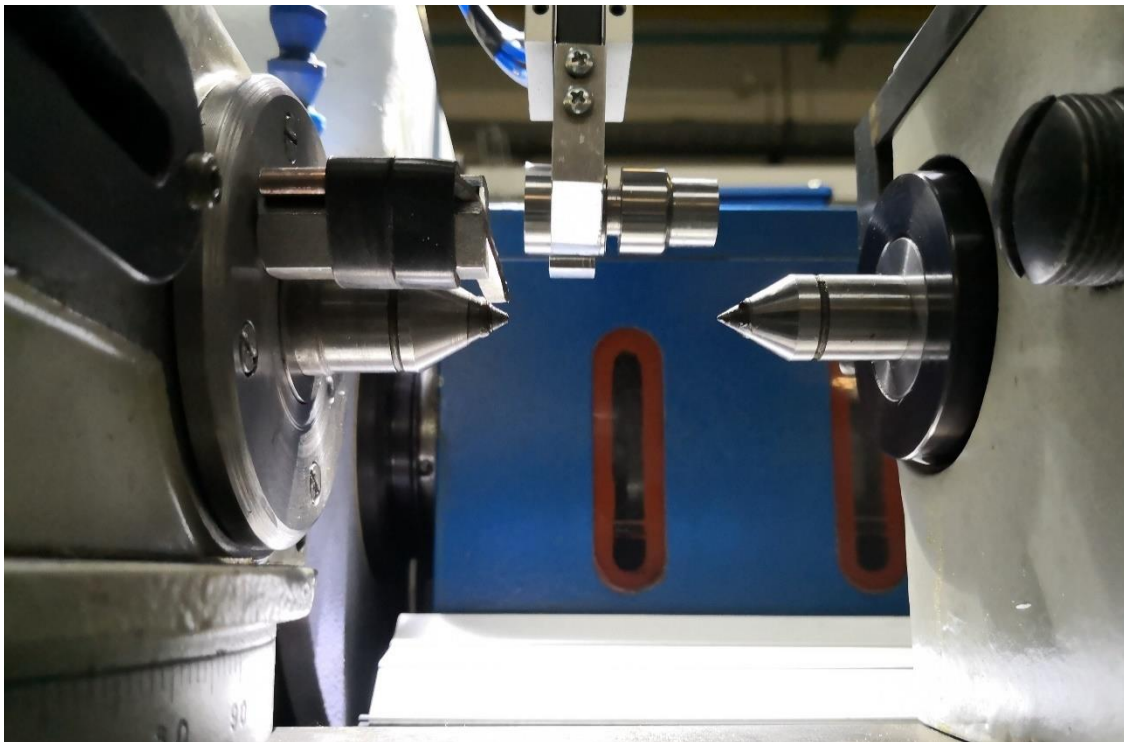
Obrázek C.3 Řídicí a rozšiřující moduly jednotky R1C

### C.3 Založení do přípravku u konturografu



Obrázek C.4 Zasunutí vzorku do upínacího přípravku

### C.4 Založení vzorku do brusky



Obrázek C.5 Uchycení vzorku v unašeci obráběcí brusky

# Příloha D - Obsah přiloženého CD

## D.1 Struktura CD

Přiložené CD obsahuje:

- Elektronickou podobu této práce:
  - Složka *DP\_Jech\_Filip\_208292\_2021*
- Vývojové diagramy
  - Složka *Vyvojove\_diagramy*
- Zdrojové kódy PDL2
  - Složka *Comau\_Zdrojove\_kody*
- Tabulky naměřených hodnot
  - Složka *Tabulky\_Namerenych\_Hodnot*
- Fotografie robotického pracoviště
  - Složka *Fotodokumentace*