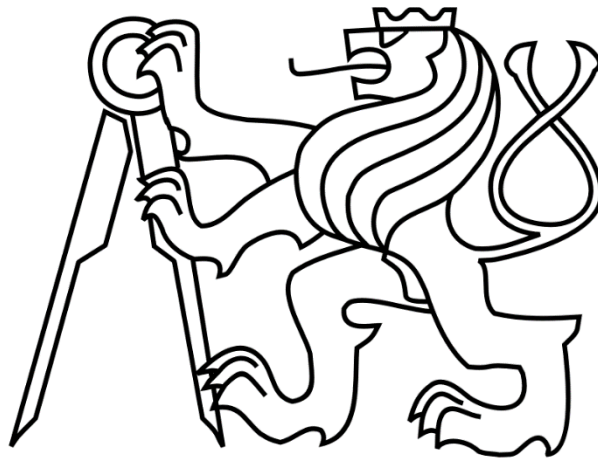


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Implementace normy ISO 9283 pro měření přesnosti polohování
průmyslových robotů

Jakub Vlk

2023

BP 0292

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vlk** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **501366**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Implementace normy ISO 9283 pro měření přesnosti polohování průmyslových robotů

Název bakalářské práce anglicky:

ISO 9283 implementation for robot positioning accuracy measurement

Pokyny pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je vývoj softwaru na generování programů pro řízení polohy robotů pro implementaci normy ISO 9283 na vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti polohování průmyslových robotů. Poloha koncového efektoru robotu bude měřena laser trackerem a součástí bakalářské práce bude konstrukční návrh přípravků pro uchycení koutového odražeče.

Osnova práce: Uvedení do řešené problematiky; rešerše v oblasti měření přesnosti polohy a řízení robotů ; vývoj software, verifikace na reálném robotu.

Rozsah grafické části: Potřebné obrázky, tabulky, grafy, 3D vizualizace.

Rozsah textové části: cca 40 – 60 stran.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 9283: Manipulační průmyslové roboty - Technické parametry a související zkušební metody

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Štěpán Chládek, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **24.09.2023**

Ing. Štěpán Chládek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis díkara(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 22.7.2023

.....

Jakub Vlk

Poděkování

V první řadě bych chtěl vyjádřit poděkování své rodině, která při mně stála po celou dobu mého studia a podporovala mě ve všech ohledech, které si jen člověk dokáže představit. Bez této podpory bych nebyl schopný se dostat do fáze, kdy píšu tato slova a chtěl bych jim tedy alespoň těmito řádky vyjádřit svoji vděčnost za vše, co pro mě udělali.

Dále bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, panu Ing. Štěpánu Chládkovi, Ph.D., který mi umožnil tuto práci zpracovávat a byl mi při její tvorbě nápomocen.

Anotace

Autor:	Jakub Vlk
Název BP:	Implementace normy ISO 9283 pro měření přesnosti polohování průmyslových robotů
Rozsah práce:	68 str., 32 obr., 6 tab.
Školní rok vyhotovení:	2022/23
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Štěpán Chládek, Ph.D.
Konzultant:	
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Měření přesnosti polohování průmyslových robotů dle normy ISO 9283
Klíčová slova:	průmyslový robot, přesnost polohování, dopředná kinematika, inverzní kinematika, laser tracker, koutový odražeč
Anotace:	Tato bakalářská práce se zaměřuje na implementaci normy ISO 9283 na měření přesnosti polohování průmyslových robotů a její experimentální ověření na robotu Stäubli TX2-90. Je navržen a vytvořen program, který dle požadavků normy, parametrů měřicího zařízení a měřicího pracoviště generuje souřadnice pro polohování robotu.

Annotation

Author:	Jakub Vlk
Title of bachelors dissertation:	ISO 9283 implementation for robot positioning accuracy measurement
Extent:	68 p., 32 fig., 6 tab.
Academic year:	2022/23
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machinery and Equipment
Supervisor:	Ing. Štěpán Chládek, Ph.D.
Consultant:	
Submitter of the Theme:	CTU FME
Application:	Positioning accuracy measurement of industrial robots according to ISO 9283
Key words:	industrial robot, positioning accuracy, forward kinematics, inverse kinematics, laser tracker, retroreflector
Annotation:	This bachelor's thesis focuses on the implementation of ISO 9283 standard for measuring the positioning accuracy of industrial robots and its experimental verification on the Stäubli TX2-90 robot. A program has been designed and created to generate robot positioning coordinates according to the standard requirements and the parameters of the measuring equipment and measuring station.

Obsah

1. Úvod.....	13
2. Cíle práce	14
3. Průmyslové roboty	15
3.1. Použití průmyslových robotů	15
3.2. Programování průmyslových robotů.....	16
3.3. Souřadnicové systémy průmyslových robotů	17
4. Kinematika průmyslových robotů	19
4.1. Kinematické struktury průmyslových robotů.....	19
4.1.1. Druhy kinematických řetězců	19
4.1.2. Kinematická struktura robotu s šesti stupni volnosti	20
4.2. Základní úlohy řízení polohy robotu.....	21
4.3. Denavitova – Hartenbergova úmluva pro popis kinematiky.....	21
5. Přesnost a opakovatelnost průmyslových robotů.....	24
5.1. Definice přesnosti a opakovatelnosti	24
5.2. Norma ISO 9283	25
5.2.1. Přesnost polohování dle normy ISO 9283	25
5.2.2. Opakovatelnost polohování dle normy ISO 9283.....	26
5.3. Měření přesnosti průmyslových robotů	26
5.3.1. Měření přesnosti najížděním na artefakty.....	27
5.3.2. Měření přesnosti laserinterferometrem.....	29
5.3.3. Měření přesnosti pomocí laser trackeru.....	30
5.4. Kalibrace průmyslových robotů.....	31
6. Rozbor řešeného problému	32
6.1. Postup vlastního řešení.....	32

7.	Návrh přípravku pro upevnění koutového odražeče	34
7.1.	Požadavky na přípravek	34
7.2.	Mechanické rozhraní robotu	35
7.3.	Návrh a podoba přípravku.....	36
7.3.1.	Lůžka pro koutový odražeč.....	36
7.3.2.	Podoba přípravku.....	37
8.	Program pro přípravu trajektorie	38
8.1.	Koncepce.....	38
8.2.	Příprava trajektorie pro robot	39
8.3.	Výpočet natočení koncového efektoru.....	42
8.4.	Ověření dostupnosti bodů	44
8.4.1.	Schéma a D-H parametry robotu Stäubli TX2-90	44
8.4.2.	Řešení inverzní kinematické úlohy.....	46
8.4.3.	Řešení dopředné kinematické úlohy	49
8.5.	Výstupy programu.....	50
9.	Měření.....	52
9.1.	Návrh a výroba upraveného přípravku.....	52
9.2.	Příprava robotu a měřicí pracoviště	54
9.3.	Vyhodnocení přesnosti polohování.....	56
9.4.	Vyhodnocení opakovatelnosti polohování.....	57
10.	Závěr	58
	Seznamy.....	60
	Seznam použité literatury.....	60
	Seznam obrázků	66
	Seznam tabulek	67



Seznam použitého softwaru	67
Seznam příloh	68

Přehled použitých veličin a jednotek

Zkratka veličiny	Popis veličiny	Jednotka
AP_p	přesnost polohování dle ISO 9283	[mm]
l_p	délka paprsku vysílaného laser trackerem (vzdálenost měřená laser trackerem)	[mm]
l_2	délka druhého členu robotu Stäubli TX2-90	[mm]
l_4	délka čtvrtého členu robotu Stäubli TX2-90	[mm]
L	délka prostorové úhlopříčky měřicí krychle	[mm]
n	počet najetí do stejné polohy	[-]
R_x	úhel natočení kolem osy x souřadnicového systému Tool	[°]
R_y	úhel natočení kolem osy y souřadnicového systému Tool	[°]
R_z	úhel natočení kolem osy z souřadnicového systému Tool	[°]
RP_l	opakovatelnost polohování dle ISO 9283	[mm]
$U_{x,y,z}$	přesnost laser trackeru	[μm]
x_p	souřadnice x měřicího bodu v souřadnicovém systému Robroot	[mm]
x_{tr}	souřadnice x bodu O_{tracker} v souřadnicovém systému Robroot	[mm]
x_1^E	poloha x koncového bodu translační části vzhledem k prvnímu souřadnicovému systému robotu.	[mm]
x_2^E	poloha x koncového bodu translační části vzhledem k druhému souřadnicovému systému robotu.	[mm]
x_c	souřadnice x zadané polohy robotu	[mm]
\bar{x}	souřadnice x shluku bodů, dosažených při n-násobném najíždění do stejné polohy	[mm]

Zkratka veličiny	Popis veličiny	Jednotka
x_j	souřadnice x j-té robotem dosažené polohy	[mm]
y_p	souřadnice y měřicího bodu v souřadnicovém systému. Robroot	[mm]
y_{tr}	souřadnice y bodu $O_{tracker}$ v souřadnicovém systému Robroot	[mm]
y_1^E	poloha y koncového bodu translační části vzhledem k prvnímu souřadnicovému systému robotu	[mm]
y_2^E	poloha y koncového bodu translační části vzhledem k druhému souřadnicovému systému robotu	[mm]
y_c	souřadnice y zadané polohy robotu	[mm]
\bar{y}	souřadnice y shluku bodů, dosažených při n-násobném najíždění do stejné polohy	[mm]
y_j	souřadnice y j-té robotem dosažené polohy	[mm]
z_p	souřadnice z měřicího bodu v souřadnicovém systému Robroot	[mm]
z_{tr}	souřadnice z bodu $O_{tracker}$ v souřadnicovém systému Robroot	[mm]
z_c	souřadnice z zadané polohy robotu	[mm]
\bar{z}	souřadnice z shluku bodů, dosažených při n-násobném najíždění do stejné polohy	[mm]
z_j	souřadnice z j-té robotem dosažené polohy	[mm]
φ_1 (až φ_6)	úhly natočení motoru robotu	[rad]



Přehled použitých zkratek

Zkratka	Vysvětlení
PRaM	průmyslové roboty a manipulátory
s.s.	souřadnicový systém
D-H úmluva	Denavitova – Hartenbergova úmluva
SMR	Spherically Mounted Retro-reflector (sféricky montovaný koutový odražeč)
TCP	Tool Center Point (středový bod nástroje)

1. Úvod

Automatizace a robotizace jsou v dnešní době dva velice důležité a známé termíny a je více než pravděpodobné, že se s nimi setkáme ve většině průmyslových odvětví.

Využití robotů v průmyslu je opravdu široké a pokrývá širokou škálu činností. U některých činností na roboty nejsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu jejich práce (například na opakovatelnost či přesnost), ale jak už tomu ve vyvíjející se civilizaci bývá, i zde dochází k posunu kupředu a průmyslové roboty se používají v aplikacích, kde jsou nároky na jejich přesnost a opakovatelnost vysoké.

Průmyslové roboty jsou do výroby nasazovány ve větší části případů proto, aby bylo docíleno větší produktivity práce. Dokáží určitou činnost totiž vykonávat opakovaně rychleji, přesněji a s menším počtem chyb než lidská obsluha. V takovém případě je u průmyslových robotů důležitá spíše opakovatelnost, tedy například jak přesně je robot schopen opakovaně zakládat určitý předmět na jedno místo. Průmyslové roboty se ale také začínají implementovat v aplikacích jako je obrábění, kde je samozřejmě důležitým parametrem přesnost polohování daného robotu, jelikož obrobený dílec má určité tolerance, které je nutné dodržet. Na rozdíl od opakovatelnosti výrobci obvykle neuvádějí přesnost průmyslového robota v technické dokumentaci (viz Obr. 1.1) a musí tedy být zjištěna experimentálně.

Tato bakalářská práce se zabývá řešením implementace normy ISO 9283 na měření přesnosti polohování průmyslových robotů a jeho experimentálním ověřením na průmyslovém robotu Stäubli TX2-90.

	TX2-90
Load capacity	14 kg
Reach (between axis 1 and 6)	1000 mm
Number of degrees of freedom	6
Repeatability - ISO 9283	± 0.03 mm
Weight	114 kg
UL certification	✓

Obr. 1.1: technické specifikace robotu Stäubli TX2-90 [12].

2. Cíle práce

Úkolem této bakalářské práce je vývoj programu pro řízení polohy robotu pro implementaci normy ISO 9283 na vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti polohování průmyslových robotů. Poloha koncového efektoru robotu bude sledována laser trackerem a součástí práce je také konstrukční návrh přípravku pro uchycení koutového odražeče na přírubu robotu.

Norma ISO 9283 stanovuje požadavky na trajektorii robotu při měření přesnosti a opakovatelnosti polohování, tyto požadavky je nutné při návrhu a tvorbě programu aplikovat. Program má na základě vzájemné polohy laser trackeru a robotu optimalizovat trajektorii tak, aby bylo zajištěno plynulé měření bez nutnosti natáčení koutového odražeče. Součástí programu má být také ověření dostupnosti bodů generované trajektorie a jednoduchá simulace robotu v normou daném měřicím prostoru.

Návrh přípravku pro uchycení koutového odražeče má respektovat požadavky normy i výrobce robotu.

Součástí cílů této práce je verifikace programu na průmyslovém robotu Stäubli TX2-90 měřením a vyhodnocením přesnosti a opakovatelnosti polohování.

3. Průmyslové roboty

Jelikož se tato práce zabývá problematikou průmyslových robotů, je následující kapitola věnována základním pojmům, které se týkají této problematiky, jako je samotná definice, použití, způsoby programování a typy souřadnicových systémů robotů.

Definice slovního spojení průmyslový robot je hned několik. Například tato definice byla publikována prof. P. N. Beljaninem [1]:

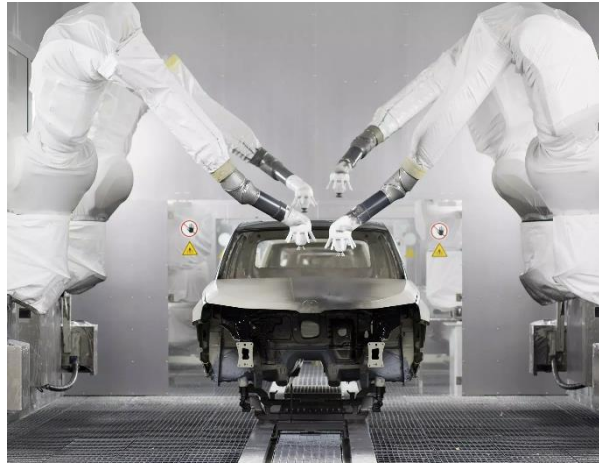
„Průmyslový robot je autonomně fungující stroj – automat, který je určen k reprodukci některých pohybových a duševních funkcí člověka při provádění pomocných a základních výrobních operací bez bezprostřední účasti člověka a který je k tomuto účelu vybaven některými jeho schopnostmi (sluchem, zrakem, hmatem, pamětí apod.), schopností samovýuky, samoorganizace a adaptace, tj. přizpůsobivosti k danému prostředí.“

Protože je slovní spojení průmyslový robot poměrně dlouhé a jeho neustálé opakování by zabíralo mnoho místa, používá se v odborné literatuře pro průmyslové roboty a manipulátory zkratka **PRaM**.

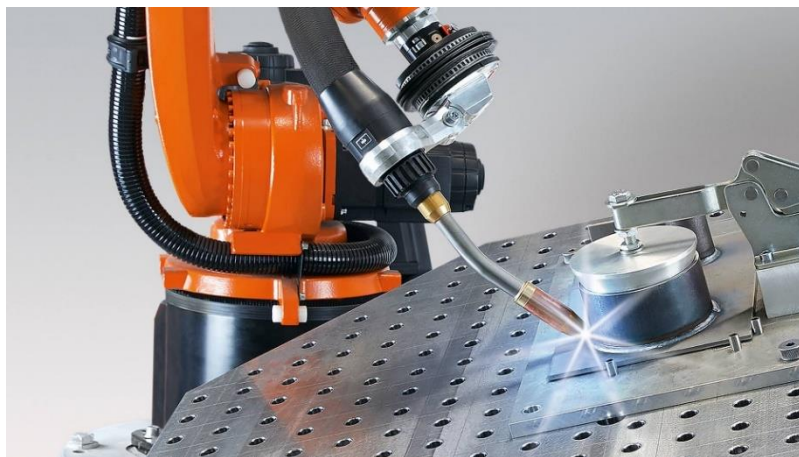
3.1. Použití průmyslových robotů

Průmyslové roboty se v dnešní době vyskytují už skoro ve všech odvětvích průmyslu. Má to hned několik důvodů. Jedním z hlavních je to, že robot dokáže vykonávat určitou činnost opakovaně stále stejně, dnes již s vysokou opakovatelností a přesností, a je tedy dosahováno zvýšení produktivity práce a také snížení počtu vadných dílů (odstranění chyby způsobené lidským faktorem). Roboty lze implementovat do mnoha procesů, jako je například lepení, svařování, lakování, manipulace a zakládání, dávkování, balení, testy a kontrola či montáž [3]. V současnosti se průmyslové roboty začínají také používat v oblasti obrábění, lékařství a kosmického průmyslu.

Robot implementován do procesu obrábění dokáže obrobit tvarově velice složité dílce a také je schopný dostupit plochy, které mají i pro CNC obráběcí centrum disponující 5 osami, nedostupnou polohu. Příklady použití průmyslových robotů jsou uvedeny na následujících obrázcích.



Obr. 3.1: roboty implementované do procesu lakování ve společnosti Škoda Auto [6].



Obr. 3.2: robot pro svařování v ochranné atmosféře od společnosti KUKA [4].

3.2. Programování průmyslových robotů

Různé roboty používají různé programovací jazyky a každý programovací jazyk je svým způsobem specifický. Například roboty Stäubli používají programovací jazyk VAL 3, roboty Kuka jazyk KRL apod. Programování lze rozdělit na dva hlavní způsoby, které nezávisí na tom, jaký programovací jazyk robot používá. Jedná se o programování **on-line** a **off-line**.

On-line programování obsluha robotu provádí přímo na pracovišti pomocí řídicího panelu a robot musí být u on-line programování fyzicky přítomen [10]. Výhodou tohoto programování může být to, že obsluha může robot tzv. „učit“ a není potřeba psaní složitého kódu. Naprogramované příkazy se dají také velice lehce a rychle ověřit.

Off-line programování spočívá v definování přesných souřadnic, kam má robot polohovat, a následné 3D virtuální simulaci pohybu robotu, vše v softwarovém prostředí [10]. K definování souřadnic a přesných pohybů se používá programovací jazyk, který daný robot podporuje a program je po vytvoření nahrán do řídicího systému robotu. Výhodou tohoto druhu programování je, že robot při tvorbě programu nemusí být fyzicky přítomen.

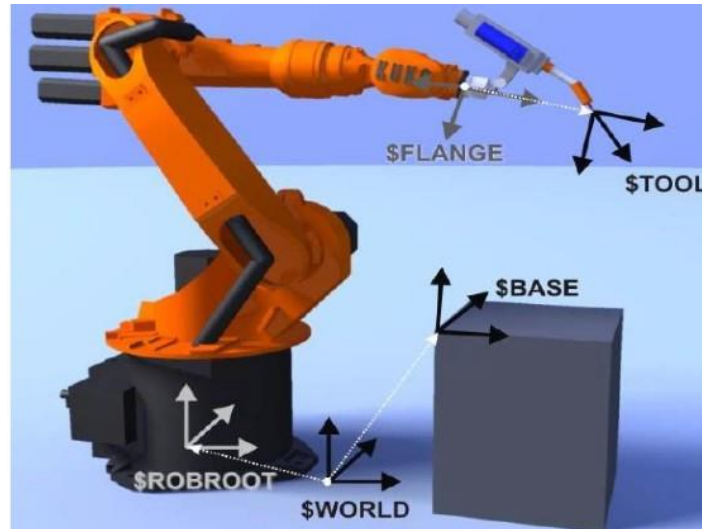
3.3. Souřadnicové systémy průmyslových robotů

Pro správnou funkci průmyslových robotů musí být zaveden souřadnicový systém, aby bylo možné jednoznačně definovat polohu v prostoru. Souřadnicových systémů, které je možné použít, je několik, ať už se jedná o kartézský, polární či sférický s.s. V problematice průmyslových robotů se nejčastěji využívá kartézského s.s. Zaváděno jich je hned několik, každý se vztahuje k určité části robotu či pracovního prostoru, kde robot operuje (viz Obr. 3.3). [40]

Souřadnicové systémy průmyslových robotů jsou:

- **Souřadnicový systém Robroot** – základní s.s. robotu. Definuje polohu robotu vůči souřadnicovému systému světa a je umístěn v patě robotu (tedy v jeho základně). [40]
- **Souřadnicový systém World** – s.s., který je nejčastěji umístěn v patě robotu (tedy je shodný, jako souřadnicový systém Robroot). Jeho poloha ale může být libovolně měněna a jeho umístění záleží na obsluze. Je základní pro s.s. Robroot a Base. [40]
- **Souřadnicový systém Flange** – s.s. umístěn ve středu příruby robotu (tedy v jeho mechanickém rozhraní). [40]
- **Souřadnicový systém Tool** – s.s. používán pro definici polohy nástroje. Je umístěn v jeho středovém bodě TCP (TCP – Tool center point). Definuje ho obsluha a je vztažen k s.s. Base. [40]

- **Souřadnicový systém Base** – umístěn libovolně dle obsluhy. Je vztažen k s.s. World a definuje pracovní prostor robotu. [40]



Obr. 3.3: souřadnicové systémy průmyslových robotů [40].

4. Kinematika průmyslových robotů

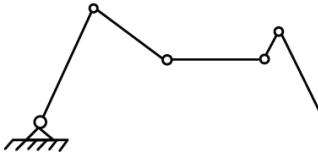
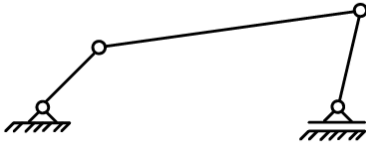
4.1. Kinematické struktury průmyslových robotů

Průmyslový robot je pohybovým mechanismem, který se ve své podstatě skládá z několika binárních členů spojených do kinematického řetězce. Binární členy jsou spojeny pomocí kinematických dvojic (KD). V kinematických řetězcích průmyslových robotů se využívají hlavně dva typy kinematických dvojic (vazeb) – vazba rotační (otočná) a vazba translační (posuvná) [7], [10]. Jak vazba rotační, tak vazba translační odebírá každá jeden stupeň volnosti. Vazby, které odebírají více stupňů volnosti, se u spojení jednotlivých členů průmyslových robotů zpravidla nepoužívají.

4.1.1. Druhy kinematických řetězců

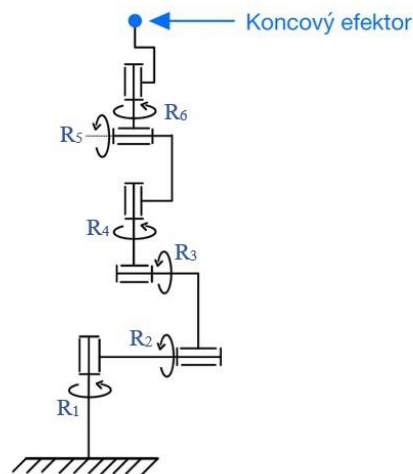
Jak už je uvedeno výše, spojením základních členů kinematickými dvojicemi vznikne kinematický řetězec. Podle toho, jak jsou členy připojeny k rámu, můžeme kinematické řetězce rozdělit na **otevřené** a **uzavřené**, kombinací obou těchto řetězců vytvoříme řetězec kombinovaný [7]. Pro schematické zobrazení obou druhů řetězců viz Tab. 4.1.

Tab. 4.1: druhy kinematických řetězců a jejich schémata.

Druh kinematického řetězce	Schéma
Otevřený řetězec	
Uzavřený řetězec	

4.1.2. Kinematická struktura robotu s šesti stupni volnosti

Hlavním předmětem této práce je implementace normy ISO 9283 pro měření přesnosti polohování průmyslových robotů, konkrétně průmyslových robotů s šesti stupni volnosti (verifikace by měla být provedena na robotu Stäubli TX2-90). Jednoduché kinematické schéma průmyslového robotu TX2-90 od firmy Stäubli je uvedené na Obr. 4.1. Na Obr. 4.2 je pro lepší představu zobrazena skutečná podoba tohoto robotu. Kinematická struktura tohoto robotu se skládá z šesti rotačních kinematických dvojic (R_1 až R_6). Kinematické dvojice translační se u šestiosých průmyslových robotů zpravidla nepoužívají. Koncový efektor je zařízení, pomocí kterého je robot schopný provádět své úkoly, například zachycovač, svařovací pistole, stříkací pistole apod. [11].



Obr. 4.1: kinematické schéma šestiosého průmyslového robotu Stäubli TX2-90.



Obr. 4.2: robot Stäubli TX2-90 [12].

4.2. Základní úlohy řízení polohy robotu

V kinematice robotů rozlišujeme dvě základní úlohy, kterými je možné popsat pohyb jednotlivých členů robota (zejména pohyb koncového efektoru). Jedná se o **přímou** a **inverzní** úlohu. [13]

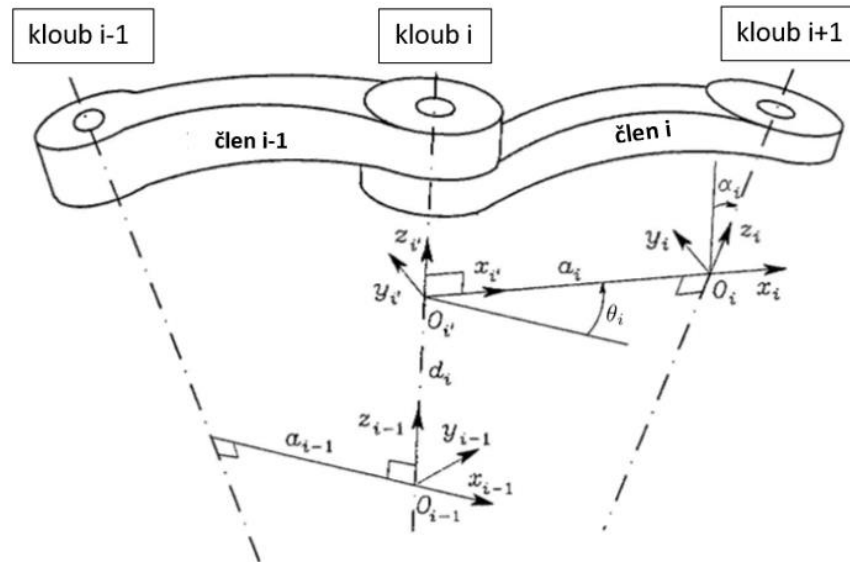
V **přímé** úloze jsou známy natočení pohonů a na jejich základě je zjišťována poloha koncového efektoru robotu [13]. Jedna z nejpoužívanějších metod při použití přímé úlohy je metoda maticová. Při použití maticové metody musí být každému tělesu přiřazen vlastní s.s. Pohyb jednoho tělesa vůči tělesu druhému je poté vyjádřen transformací mezi s.s. těchto těles, transformace se vyjádří pomocí příslušné transformační matice. Použití přímé kinematické úlohy při řízení polohy robotů není příliš vhodné, ve většině případů totiž známe požadovanou polohu koncového efektoru a je potřebné zjistit natočení pohonů, které tuto polohu zajistí.

Inverzní úloha je pro řízení polohy robota mnohem vhodnější, ale jedná se také o mnohem složitější problém. V inverzní úloze je známa poloha koncového efektoru robotu a jsou určeny natočení pohonů [13]. Programátor tedy u modelu, kde je použita inverzní kinematická úloha, programuje polohu koncového efektoru robota v s.s. základny či s.s. Robroot. Poloha koncového efektoru je v kartézském s.s. určena 6 parametry, těmito parametry jsou souřadnice x , y , z a úhly R_x , R_y , R_z .

4.3. Denavitova – Hartenbergova úmluva pro popis kinematiky

Základní princip, jak popsat kinematiku robotu či manipulátoru, zavedl již v roce 1875 Franz Reuleaux. Jeho princip byl symbolickým jazykem, který měl popsat kinematiku určitého mechanismu. Bohužel tento popis nezahrnoval všechny proměnné, které jsou potřebné pro popis, a tak bylo jeho použití silně limitováno. [14]

Mezi dnes nejpoužívanější úmluvy, které slouží pro popis kinematiky (respektive umístění s.s. jednotlivých členů) PRaM, patří D-H úmluva. Princip této úmluvy je vysvětlen dle Obr. 4.3, který byl přejat z [15].



Obr. 4.3: D-H úmluva [15].

Na Obr. 4.3 je znázorněno spojení dvou členů (ramen manipulátoru), pomocí rotační vazby. Předpokládáme-li znalost s.s. F_{i-1} (o středu O_{i-1} a souřadných osách x_{i-1} , y_{i-1} , z_{i-1}), lze pomocí D-H úmluvy definovat s.s. F_i (o středu O_i a souřadných osách x_i , y_i , z_i) následovným způsobem: [15]

- Nejdříve zvolíme souřadnou osu z_i totožnou s osou rotace (respektive osy translace – jedná-li se o kinematickou dvojici translační) kloubu $i+1$ a osu z'_i podél osy rotace (respektive translace) kloubu i [15].
- Nyní umístíme počátek O_i s.s. F_i do průsečíku osy z_i a normály os z_{i-1} a z_i , následně umístíme počátek O'_i s.s. F'_i do průsečíku osy z_{i-1} a téže normály [15].
- Nyní zvolíme osu x_i a x'_i tak, že bude vést podél normály ve směru od kloubu i do kloubu $i+1$ [15].
- Nakonec zvolíme osu y_i a y'_i tak, aby výsledné s.s. byly pravotočivé [15].

S použitím D-H úmluvy jsme nyní schopni popsat vzájemnou polohu mezi s.s. F_{i-1} a s.s. F_i pouze pomocí 4 D-H parametrů [15]. Těmito parametry jsou:

- a_i – vzdálenost mezi počátky O_i a O'_i

- d_i – vzdálenost mezi počátky O_{i-1} a O'_i
- α_i – úhel mezi osami z_{i-1} a z_i daný pootočením s.s. F'_i podél osy x'_i
- θ_i – úhel mezi osami x_{i-1} a x_i daný pootočením s.s. F_{i-1} podél osy z_{i-1}

Vztah, který bude vyjadřovat vzájemnou polohu s.s. F_{i-1} a F_i lze vyjádřit za pomoci výše zmíněných D-H parametrů a homogenních transformačních matic následovně ($\sin(x) = s_x$; $\cos(x) = c_x$):

$$T_i^{i-1} = P(z, d_i) \cdot R(z, \theta_i) \cdot P(x, \alpha_i) \cdot R(x, \alpha_i) \quad (1)$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Výsledná transformační matice:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & \alpha_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & \alpha_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Matice P značí transformační matici pro posuvný pohyb, matice R transformační matici pro rotační pohyb. Písmena v závorce značí nejdříve osu příslušného posuvného, respektive rotačního pohybu a poté parametr, o který daný posuv, respektive rotace probíhá.

D-H úmluva je použitelná i pro paralelní/skoro paralelní osy a po zavedení *i-tého* s.s. je *i+1* s.s. jednoznačný. Největší nevýhoda je právě u “skoro paralelních“ os, kde spojnice těchto mimoběžek může ležet extrémně daleko. Roku 1985 zavedl S. Hayati modifikovanou verzi D-H úmluvy, pomocí které je možné řešit manipulátor, jehož po sobě jdoucí klouby mají paralelní, nebo “skoro paralelní“ osy. Více o této metodě je možné nalézt v [16].

5. Přesnost a opakovatelnost průmyslových robotů

Jak uvádí kapitola 3.1, využití průmyslových robotů je v dnešní době velice široké a zahrnuje i odvětví průmyslu, kde je kladen veliký důraz na hodnoty přesnosti a opakovatelnosti. Proto je nutné tyto pojmy vysvětlit, uvést, co na ně má vliv a v neposlední řadě popsat, jak je možné je měřit.

Přesnost a opakovatelnost je ovlivněna mnoha faktory, například výrobními tolerancemi jednotlivých komponent robota, nepřesnostmi při montáži, nepřesnostmi a vůlemi v samotných pohonech, konečnou přesností odměřování (v naprosté většině případů se u robotů integruje nepřímé odměřování polohy, tzn. na motorech) či třením jednotlivých kinematických dvojic. [20]

5.1. Definice přesnosti a opakovatelnosti

Přesnost polohování robota – Přesnost polohování vyjadřuje, jak přesně robot dokáže dosáhnout požadované polohy, která je dána programem. Je dána rozdílem mezi programovanou polohou a skutečně dosaženou polohou. [21]

Opakovatelnost polohování robota – Opakovatelnost vyjadřuje schopnost robota dosahovat opakovaně stejné polohy. Měřítkem opakovatelnosti je poloměr koule, která má střed v těžišti dosažených bodů, a poloměr rovný vzdálenosti středu a nejvzdálenějšího dosaženého bodu od tohoto středu [21].



Obr. 5.1: schematické zobrazení přesnosti a opakovatelnosti [22].

Přesnost a opakovatelnost jsou dva velice důležité pojmy pro průmyslovou praxi a je nutné mezi nimi rozlišovat, jelikož oba pojmy mají pro různé aplikace různé významy (viz Obr. 5.1).

Z Obr. 5.1 je patrné, že když má robot vysokou opakovatelnost, tak to nemusí zaručit jeho vysokou přesnost.

Přesnost a opakovatelnost polohování je blíže specifikována normou ISO 9283, viz [21]. Tato norma dále také specifikuje další důležité technické parametry (přesnost a opakovatelnost orientace, přesnost a opakovatelnost dráhy aj.), a také udává, jak tyto parametry zkoušet a vyhodnocovat.

5.2. Norma ISO 9283

Norma ISO 9283 je součástí mezinárodních norem, které se zabývají manipulačními průmyslovými roboty. Ostatní mezinárodní normy definují témata, jako je bezpečnost, obecné charakteristiky, souřadnicové systémy, terminologie aj. Tato norma definuje důležité technické parametry, přesně popisuje, jak tyto parametry specifikovat a také doporučuje, jak je zkoušet a vyhodnocovat. Slouží také jako dorozumívací prostředek mezi výrobcí robotů a jejich uživateli, jelikož přesně definuje parametry, které jsou v průmyslu často výchozími pro výběr příslušného robota. [21]

V kapitole 5.1 byly zavedeny pojmy přesnost a opakovatelnost polohování a byl vysvětlen jejich rozdíl. O těchto pojmech, jakožto důležitých technických parametrech, hovoří také norma ISO 9283. Definuje jejich geometrický význam a také jejich matematickou interpretaci.

5.2.1. Přesnost polohování dle normy ISO 9283

Přesnost polohování průmyslových robotů se dle normy ISO 9283 vypočte pomocí rovnic (4) až (7) [21].

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (6)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (7)$$

5.2.2. Opakovatelnost polohování dle normy ISO 9283

Opakovatelnost polohování průmyslových robotů se dle normy ISO 9283 vypočte pomocí rovnic (8) až (11) [21].

$$RP_l = \bar{l} + 3 \cdot S_l \quad (8)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (9)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (10)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

5.3. Měření přesnosti průmyslových robotů

Způsobů, jakými lze přesnost robota měřit, je mnoho. Dají se použít různé technické prostředky, ať už se jedná o kontaktní či bezkontaktní sondy, laserová zařízení (laserinterferometr, laser tracker či laser tracer) nebo různá další speciální zařízení určená pro zjištění přesnosti robota.

V [23] jsou měřeny statické a dynamické vlastnosti tří průmyslových robotů. Při měření statických vlastností se měřila přesnost při polohování podél lineárních os rovnoběžných se souřadnicovými osami x, y a z na určitých vzdálenostech. Dále se také měřila opakovatelnost (při polohování z jednoho či z více směrů). K statickému měření byl použit laserinterferometr (více o laserinterferometrech viz kapitola 5.3.2) Renishaw XL-80. Dynamické měření se zabývalo měřením kruhovitosti a také testem rohových odchylek. Kruhovitost byla měřena zařízením Renishaw QC20-W telescopic ballbar, více informací i tomto zařízení viz [24]. Rohové odchylky se měřily laser trackerem (více

o laser trackeru viz kapitola 5.3.3) při různých rychlostech polohování. Přestože autoři vždy specifikují parametry robota (rychlost polohování, rozsah vzdáleností, aj.) a uvádějí vnější podmínky, měření nebylo provedeno dle normy ISO 9283.

V [25] provedli autoři měření pouze dvou statických vlastností tří průmyslových robotů. Měřila se přesnost při lineárním pohybu v ose x a y (5 bodů po 500 mm) a následně se také měřila přímost při lineárním pohybu v ose y (odchyly se měřili v ose x a v ose z). Pro měření byl použit laserinterferometr firmy Renishaw.

V [26] se k měření přistupovalo stochasticky. Měření se provedlo pomocí trojice digitálních indikátorů, každý disponoval přesností 3 μm .

V [27] provedli autoři měření opakovatelnosti v každém nezávislém směru pomocí pravděpodobnostního modelu a metody Monte Carlo.

Nejlepší výsledky měření přináší většinou metody bezkontaktní. U bezkontaktních metod nedochází ke kontaktu měřicího zařízení, a tedy nedochází ke vnesení neurčitých sil, které by následně mohly ovlivnit výsledek měření. [28]

5.3.1. Měření přesnosti najížděním na artefakty

Najíždění na artefakty je princip měření, který se zakládá na přesně dané (a známé) poloze artefaktů. Artefaktem může být například granitová krychle nebo kalibrační koule [29]. Kalibrační koule se umísťují většinou ve větším počtu do řady za sebe nebo do specificky určeného tvaru – závisí na typu a požadavcích na měření. Měří se buď bezkontaktně nebo pomocí kontaktních (dotykových) sond.

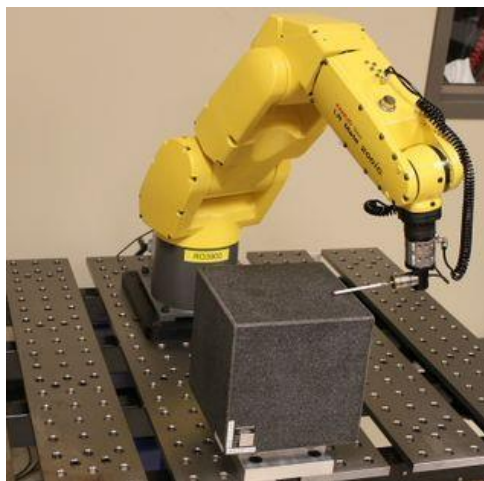
Bezkontaktní měření nabízí například firma IBS, a to pomocí své sondy IBS Trinity. Bezdrátová sonda je umístěna na koncovém efektoru robotu a najíždí na artefakty, jejichž poloha je známa s přesností větší než jeden mikrometr.

Artefakty jsou zde koule umístěné v řadě za sebou na podstavci z karbidu křemíku. Následně dojde k vyhodnocení chyby, které se robot dopustil při polohování na programovanou pozici. Při měření lineárních os je dosahováno přesnosti $0,2 \mu\text{m}$ [30].



Obr. 5.2: bezkontaktní sonda IBS trinity při najíždění na artefakty [30].

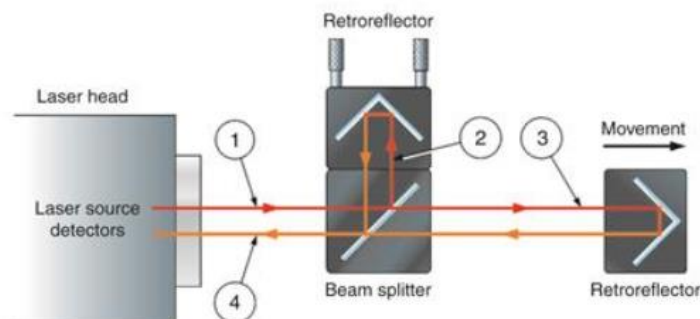
Kontaktní měření probíhá velmi podobným způsobem jako výše zmíněné bezkontaktní. Na koncovém efektoru robotu je umístěna kontaktní (dotyková) sonda, která najíždí a dotykem snímá polohu artefaktu, která je předem známa. Následně dojde k vyhodnocení chyby polohování robotu. Často používanými dotykovými sondami jsou například sondy od společnosti Renishaw. Přesnost tohoto měření závisí na přesnosti použité sondy. Dotyková sonda TP200 od společnosti Renishaw dosahuje přesnosti při měření 2-D tvaru až $\pm 0,8 \mu\text{m}$ a při měření 3-D tvaru až $\pm 1 \mu\text{m}$. [31].



Obr. 5.3: měření přesnosti dotykovou sondou na granitové krychli [31].

5.3.2. Měření přesnosti laserinterferometrem

Laserinterferometr je zařízení, které pracuje na způsobu rozdělení vstupního paprsku světla na dva identické paprsky. Každý z těchto paprsků prochází po rozdílné dráze a vznikne tedy fázový rozdíl. Fázový rozdíl vytvoří interferenční obrazec, který je následně rozpoznán detektorem. [32]



Obr. 5.4: princip laserinterferometru na schématu [32].

Laserový paprsek (1), který vychází ze zdroje, je v interferometru rozštěpen na dva paprsky – referenční (2) a měřicí (3). Tyto paprsky jsou odraženy zpět dvěma odražeči (zrcátky) a před dopadem na detektor interferují (vytvoření fázového rozdílu). Detektor pak podle interference vyhodnotí, k jak velkému posuvu pohyblivého odražeče došlo. [32]

Jako příklad je uveden interferometr XM-60 od společnosti Renishaw, který dokáže měřit chyby podél lineární osy ve všech šesti stupních volnosti bez toho, aniž by bylo nutné měnit nastavení přístroje. Uváděná přesnost tohoto zařízení je při lineárním měření na vzdálenosti od 0 do 4 metrů $\pm 0,5$ ppm. [33]



Obr. 5.5: laserinterferometr Renishaw XM-60 [33].

5.3.3. Měření přesnosti pomocí laser trackeru

Laser tracker je zařízení, které se používá pro přesné měření polohy bodu v prostoru a je tedy vhodný i pro sledování pohybu koncového efektoru robotu. Výhodou měření tímto zařízením je, že se dá použít přímo v pracovním prostředí a dosahuje se i na velké vzdálenosti relativně vysokých přesností. Laser tracker je přenosné zařízení a jeho ustavení není složitý proces. Obsluha je tedy schopna měření zrealizovat v poměrně krátkém čase přímo na pracovišti příslušného robota.

Principem je neustálé sledování polohy sondy, která je upevněna na koncovém efektoru robotu. Sonda je tvořena sféricky montovaným koutovým odražečem (SMR). Poloha je sledována laserovým paprskem a je odečítána v polárních souřadnicích (jedna vzdálenost a dva úhly) [28]. Místo SMR může být také laserovým paprskem sledována bezdrátová kontaktní sonda nebo přenosný skener. Nejpresnější měření je ale s použitím SMR [34]. Rovnice udávají přesnost $15 \pm 3\mu\text{m}/1\text{m}$ [35].

Zjišťovat vzdálenost je možné dvěma způsoby:

- **Měření vzdálenosti pomocí interferometru (IFM)** – vzdálenost je měřena s využitím interferometru, jehož funkce je popsána v kapitole 5.3.2. Nevýhodou tohoto způsobu je ztráta informace o pohybu sledovaného objektu při přerušení laserového paprsku, kdy je nutné obnovení s.s. [36].
- **Měření absolutní vzdálenosti (ADM)** – tato metoda funguje na principu zaznamenání doby letu laserového paprsku k reflektoru a zpět. Na základě toho je poté možno určit absolutní vzdálenost mezi přístrojem a reflektorem. Výhodou této metody je možnost pokračovat v měření i při přerušení paprsku. Nevýhodou je menší přesnost oproti výše zmiňované IFM. [28]

Jako příklad je uveden laser tracker Leica Absolute Tracker AT960. Jeho přesnost je závislá na měřené vzdálenosti a je možné ji popsat závislostí [37]:

$$U_{x,y,z} = \pm 15 \mu m + (6 * l_p / 1000) \mu m \quad (12)$$

Více informací o tomto vztahu a jeho podmínkách platnosti je k nalezení v [37].



Obr. 5.6: laser tracker Leica Absolute Tracker AT960 [37].

5.4. Kalibrace průmyslových robotů

Tato kapitola je úzce spjata s kapitolou předchozí, jelikož kalibrace je proces, který cílí na zvýšení přesnosti průmyslových robotů. Kalibrací dochází ke zvýšení přesnosti pomocí softwarových úprav, nedochází ke změnám mechanické struktury robotu [38]. Měřicí systémy, které se ke kalibrování používají, odpovídají těm, které jsou uvedeny v kapitole 5.3.

Kalibrace je proces určování reálných parametrů, které popisují charakteristiky struktury průmyslového robota. Tyto parametry se mohou dělit na kinematické a dynamické (nebo také v [38] nazývané nekinematické) a je tedy možné mluvit o kalibraci kinematické (také nazývaná kalibrací druhého stupně) a kalibraci dynamické, respektive nekinematické (také nazývané kalibrací třetího stupně). Kinematické parametry popisují například délky ramen robotu či relativní orientace os kloubů. Dynamické parametry popisují hmoty ramen a kloubů a také vnitřní tření kinematických dvojic.

6. Rozbor řešeného problému

Před začátkem řešení je důležité charakterizovat si problém a určit jednotlivé body vlastního řešení. Implementovat normu ISO 9283 na měření přesnosti polohování průmyslových robotů je komplexní problém a je vhodné ho rozdělit na dílčí problémy, jejichž splnění povede k úspěšnému dokončení zadání.

V této kapitole jsou zmíněny hlavní body postupu vlastního řešení, které jsou následně podrobně rozebrány v nadcházejících kapitolách

6.1. Postup vlastního řešení

I. Navržení přípravku pro uchycení koutového odražeče

Pro určení rozdílu programované polohy a polohy, které robot skutečně dosáhne je potřeba použít jednu z metod měření přesnosti průmyslových robotů, které byly uvedeny v kapitole 5.3.

V implementované metodě je pro měření uvažován laser tracker Leica Absolute Tracker AT960 (viz kapitole 5.3.3).

Aby bylo možné toto měření provést, je potřeba na přírubu robotu nějakým způsobem umístit koutový odražeč, a právě proto je nutné navrhnout přípravek, který tuto funkci bude zajišťovat. Normou je také stanovena hmotnost přípravku, tu je tedy také nutné při návrhu zohlednit.

II. Příprava trajektorie pro robot

Norma přesně definuje měřicí prostor, body v tomto prostoru, do kterých robot má při měření polohovat, přesné pořadí těchto bodů a také kolikrát se má jednotlivý polohovací cyklus opakovat. Je tedy potřeba vytvořit program, který na základě vstupních informací daných normou a typem robotu vygeneruje sekvenci bodů v prostoru, do kterých bude robot při měření polohovat a v kterých se bude vyhodnocovat rozdíl mezi naměřenou a programem danou polohou.

III. Výpočet úhlů natočení koncového efektoru robotu

Vstupy při programování robotu jsou krom souřadnic polohy koncového efektoru robotu v prostoru také úhly natočení s.s. Tool (R_x, R_y, R_z).

Jelikož koutový odražeč, který je pomocí přípravku připevněn na přírubu robotu, má určitý akceptační úhel (běžně se tyto hodnoty pohybují kolem 60°), je nutné vypočítat úhly natočení koncového efektoru tak, aby paprsek z laser trackeru dopadl na koutový odražeč pod úhlem, který bude vyhovovat jeho akceptačnímu úhlu.

Hlavním důvodem tohoto kroku je zamezení nutnosti natáčení koutového odražeče a zajištění plynulého měření.

IV. Ověření dostupnosti bodů

Po provedení kroku II a III jsou k dispozici všechny potřebné vstupy pro vyřešení inverzní kinematické úlohy robotu. Výstupem z inverzní kinematické úlohy jsou úhly natočení jednotlivých motorů robotu, tyto úhly jsou porovnány s rozsahy uvedenými v technických specifikacích robotu a z toho je určeno, zda je daný bod pro robot dosažitelný.

V. Zjednodušená simulace

S využitím výstupů z inverzní kinematické úlohy je možné provést dopřednou kinematickou úlohu a následně vykreslit zjednodušený model robotu v měřicím prostoru.

VI. Měření a vyhodnocení přesnosti polohování robotu

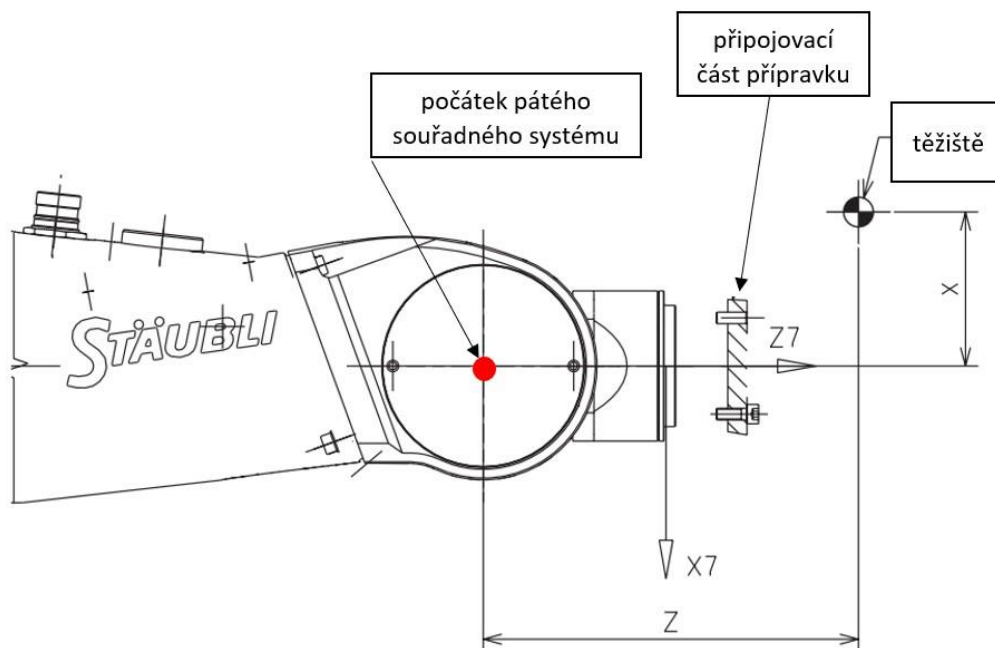
Po úspěšném splnění předchozích kroků bude možné povést měření a následně výsledky pomocí vztahu uvedených v normě zpracovat a vyhodnotit přesnost polohování daného průmyslového robotu.

7. Návrh přípravku pro upevnění koutového odražeče

Tato kapitola se věnuje návrhu přípravku pro uchycení koutového odražeče. Přípravek je navržen přímo na mechanické rozhraní (přírubu) robotu **Stäubli TX2-90**, jehož přesnost bude zjišťována a který je umístěn v laboratořích CIIRC. Z toho vyplývá, že se nejedná o univerzální přípravek pro využití při měření jakéhokoliv robotu, ale při dodržení dále uvedených požadavků je možné zkonstruovat přípravek pro libovolný robot. Například ale všechny roboty série TX90 společnosti Stäubli mají přírubu stejných rozměrů.

7.1. Požadavky na přípravek

- Snadná montáž na přírubu robotu s jednoznačným zajištěním polohy přípravku (aby došlo k jednoznačnému definování polohy SMR v s.s. Flange).
- Taková konstrukce přípravku, která zajistí průběh měření při plném zatížení robotu (tedy hmotnost přípravku i s přípojovacími prvky musí být rovna maximální nosnosti robotu). Tento požadavek vychází z normy. Robot Stäubli TX2-90 má při 100% nominální rychlosti maximální nosnost **7 kg** [41].
- Taková konstrukce, která zajistí, aby poloha těžiště přípravku vzhledem k pátému s.s. robotu byla $z = 165 \text{ mm}$ a $x = 75 \text{ mm}$ (viz Obr. 7.1) [41].



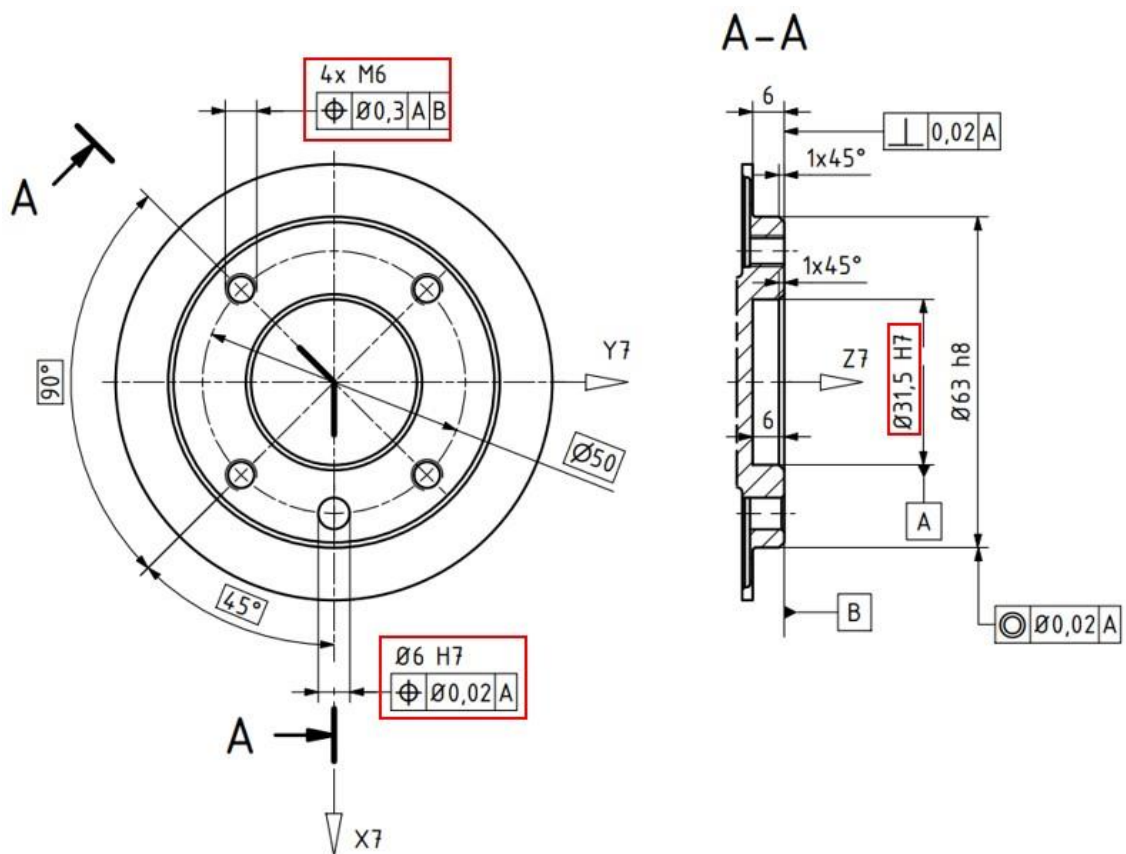
Obr. 7.1: poloha těžiště přípravku [41, upraveno].

7.2. Mechanické rozhraní robotu

Klíčovými vstupy pro konstrukci přípravku jsou rozměry, které jsou patrné z výkresu příruby (viz Obr. 7.2). Červeným rámečkem jsou na obrázku ohrazeny důležité připojovací rozměry. Na obrázku je také vyznačen poslední s.s. robotu (označen číslem 7), který je shodný se s.s. mechanického rozhraní robotu.

Význam jednotlivých rozměrů příruby je následující:

- Přípravek je středěný na přesnou díru $\varnothing 31,5$ H7.
- Jednoznačné definování polohy přípravku je zajištěno pomocí díry $\varnothing 6$ H7 s využitím válcového kolíku dle ISO 2338.
- Přípravek je připevněn čtyřmi šrouby pomocí závitových děr M6 umístěných na roztečné kružnici o $\varnothing 50$.



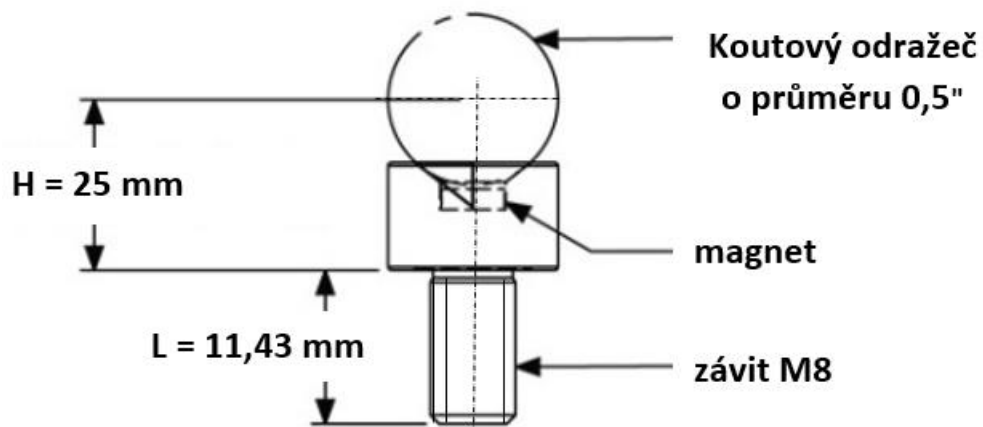
Obr. 7.2: výkres mechanického rozhraní robotu s vyznačenými připojovacími rozměry [41, upraveno].

7.3. Návrh a podoba přípravku

7.3.1. Lůžka pro koutový odražeč

Koutový odražeč se umísťuje do magnetického lůžka. Typů lůžek pro upevnění koutového odražeče je velké množství a je tedy potřeba zvolit, které lůžko bude použito k upevnění koutového odražeče při měření. Koutový odražeč, který bude použit při měření, má průměr 0,5" (12,7 mm) a vnější povrch je tvořen přesnou broušenou koulí.

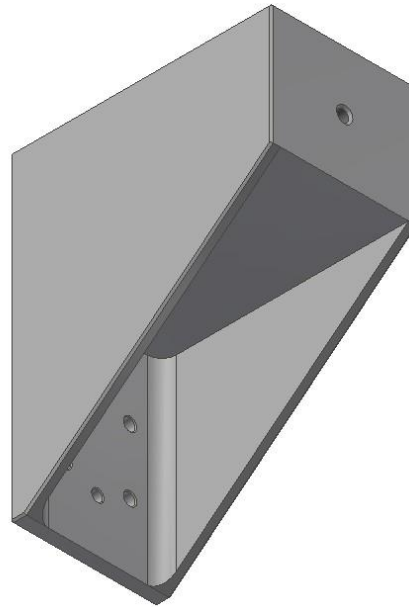
Díky jednoduchosti montáže a také dle doporučení vedoucího práce byla zvolena lůžka od společnosti **Hubbs**, konkrétně se jedná o typ **.5 SMT - 25mm - M8 x 1,25**. Podoba a rozměry lůžka viz Obr. 7.3. Koutový odražeč je na lůžko připevněn pomocí magnetu a lůžko bude na přípravek připevněno pomocí závitů M8, kterým zvolené lůžko disponuje.



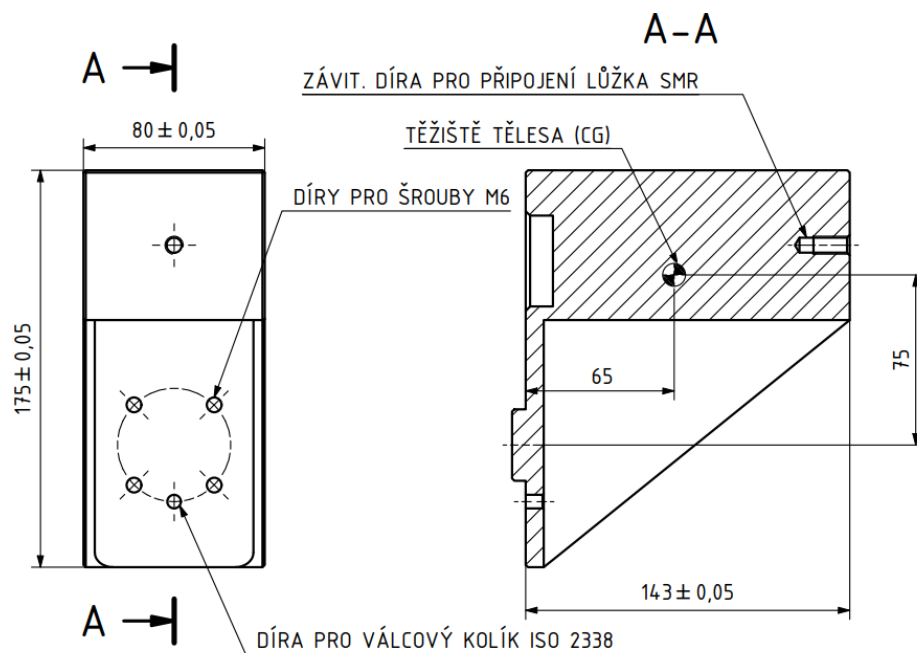
Obr. 7.3: lůžko .5 SMT - 25 mm - M8X1,25.

7.3.2. Podoba přípravku

Dle požadavků v kapitole 7.1, podoby a rozměrů příruby, která je uvedena v kapitole 7.2, a typu lůžka uvedeného v kapitole 7.3.1 byl navržen přípravek, který je uveden na Obr. 7.4. Na Obr. 7.5 je pro lepší představu zobrazen výřez z výkresu přípravku, kde jsou uvedeny pouze připojovací rozměry. Výkres přípravku se všemi potřebnými rozměry a informacemi je uveden v příloze (viz příloha VP1).



Obr. 7.4: 3D model přípravku.



Obr. 7.5: výřez z výkresu přípravku s připojovacími rozměry.

8. Program pro přípravu trajektorie

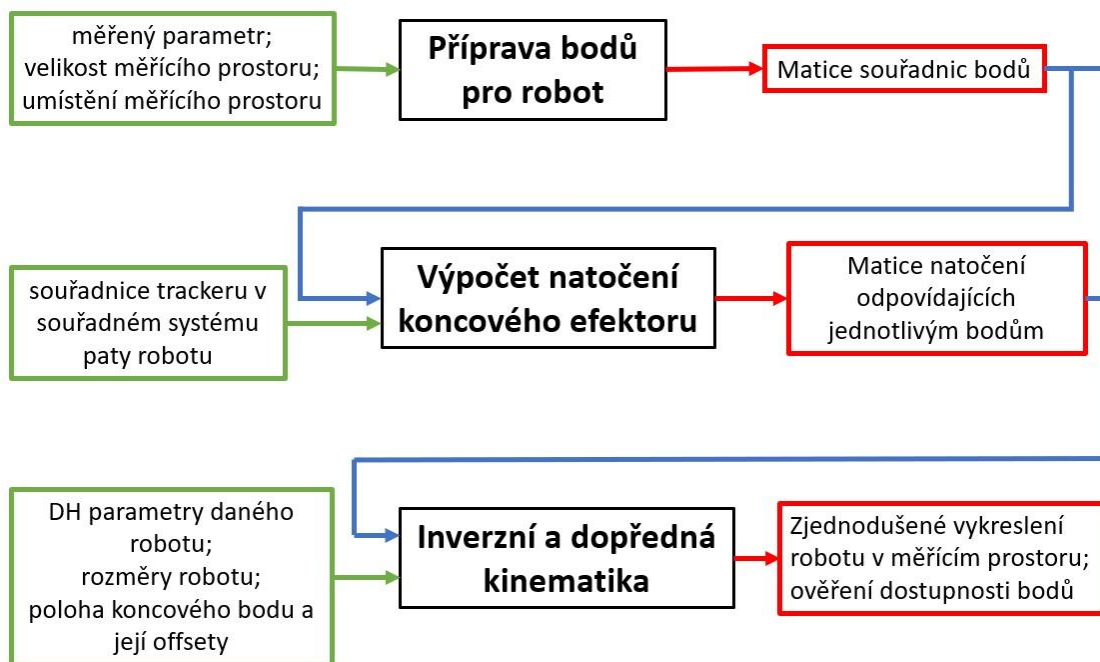
Tato kapitola popisuje návrh programu, který implementuje normu ISO 9283 a všechny její požadavky přípravou souřadnic bodů pro měření. Výstupem z tohoto programu jsou souřadnice, do kterých robot dle normy má polohovat, a to v přesném pořadí a také požadovaném počtu opakování. Celý program je vytvořen v prostředí systému Matlab. Jelikož požadavky na měřený prostor, souřadnice bodů pro měření a všechny ostatní náležitosti norma uvádí stejně jak pro měření přesnosti polohování, tak pro měření opakovatelnosti polohování je tento program možné využít i pro implementaci normy ISO 9283 pro měření opakovatelnosti polohování průmyslových robotů. Návod k obsluze programu, jehož tvorbu popisuje tato kapitola, je uveden v příloze (viz příloha TP1).

8.1. Koncepce

Koncepce programu je znázorněna na blokovém diagramu, kde jsou znázorněny vstupy do dílčích bloků a také jejich výstupy. Procesy, které probíhají v jednotlivých blocích a na jakých principech jsou založeny vysvětlují následující kapitoly.

Popis blokového diagramu:

- V ČERNÝCH blocích jsou dílčí části programu
- V ZELENÝCH blocích jsou vstupy do dílčích částí programu, které jsou do programu zadávány obsluhou. Tyto vstupy vycházejí z požadovaného měřeného parametru, typu robotu a také dispozice pracoviště, ve kterém měření probíhá.
- V ČERVENÝCH blocích jsou výstupy z dílčích částí programu.
- MODRÝMI šipkami jsou znázorněny vstupy do dílčích částí programu, které vznikly jako výstupy z předchozích částí.



Obr. 8.1: blokový diagram programu.

8.2. Příprava trajektorie pro robot

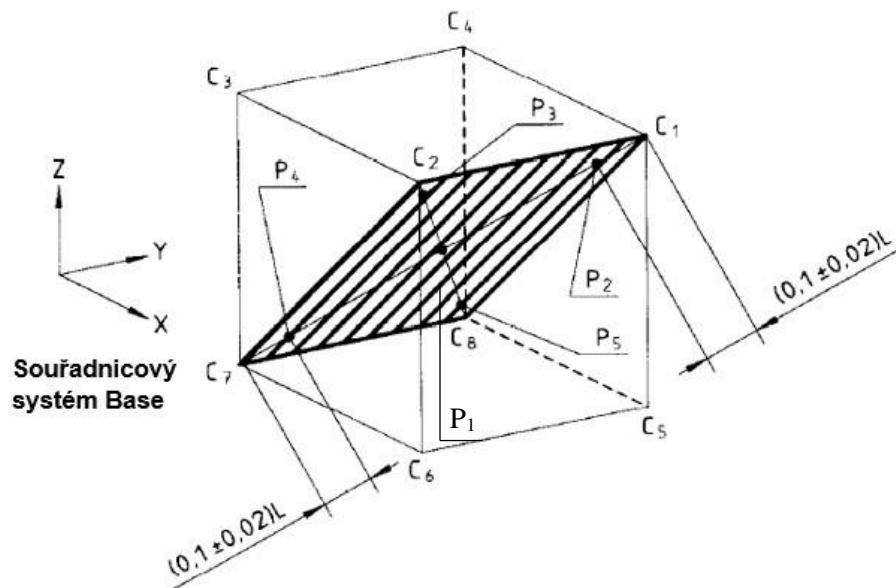
Body, do kterých robot při měření polohuje jsou normou ISO 9283 [21] přesně definovány a jejich generování tedy probíhá přesně podle požadavků uvedených v normě.

Měřicím prostorem je jediná krychle, v této krychli je definována rovina, ve které na prostorových úhlopříčkách leží body, do kterých robot musí při měření polohovat. V normě [21] je uváděno několik možností umístění této roviny pro roboty s 6 stupni volnosti, jejichž měřením se tato práce zabývá, je ale přesně definováno, jaká rovina má být pro měření použita. Měřicí prostor, používaná rovina a body, do kterých bude robot polohovat (**body P_1 až P_5**) jsou patrné z Obr. 8.2.

Na krychli a její umístění jsou kladeny určité požadavky a z těchto požadavků vyplývá i poloha bodů. V zjednodušené formě tyto požadavky zní takto: (pro detailnější informace týkající se měřicího prostoru a bodů viz [21])

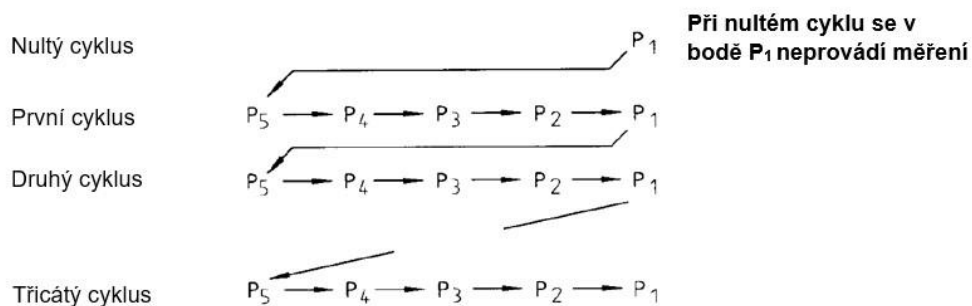
- **Krychle má být umístěna v té části prostoru s největším předpokládaným využitím.**
- **Objem krychle má být největší možný vzhledem k pracovnímu rozsahu jednotlivých os robotu.**

- **Hrany krychle mají být rovnoběžné se souřadnicovým systémem Base.**



Obr. 8.2: měřicí prostor dle ISO 9283 s vyznačenými body [21, upraveno].

Norma ISO 9283 [21] také přesně definuje pořadí, kterým mají být body robotem procházeny a také uvádí, kolikrát se má tato sekvence opakovat (tedy počet cyklů). Obr. 8.3 uvádí jednu ze dvou možností procházení bodů, pro druhou možnost viz [21]. Pro měření přesnosti polohování a opakovatelnosti polohování je normou stanovený počet cyklů 30.

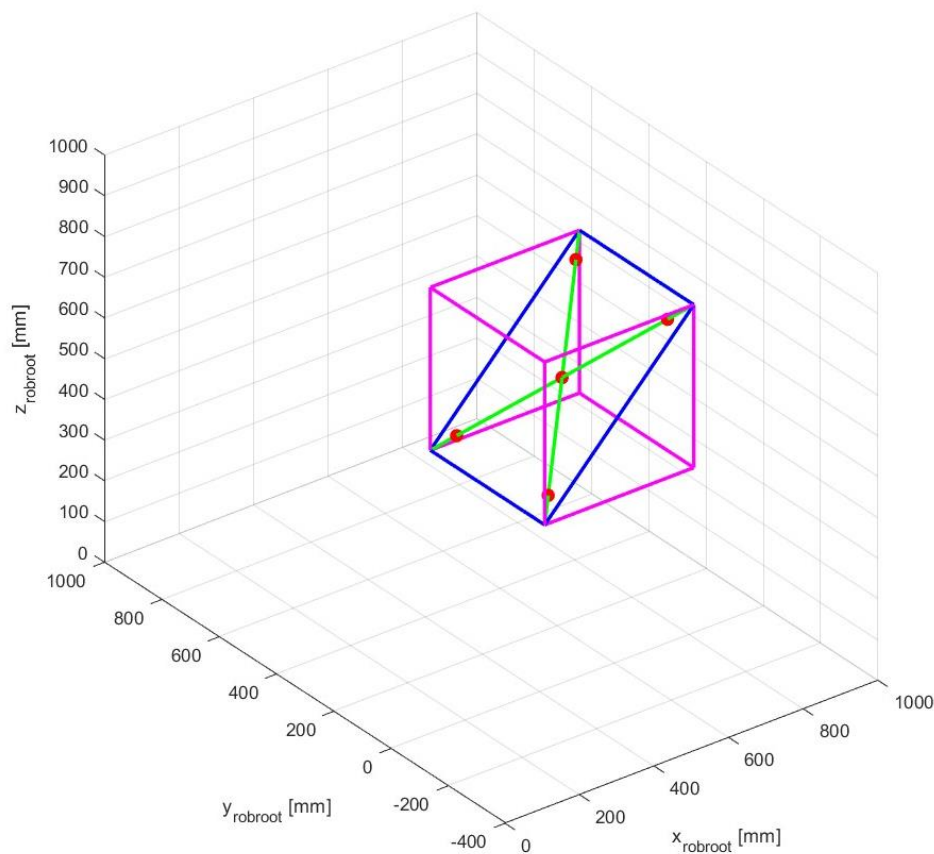


Obr. 8.3: sekvence průchodu bodů dle ISO 9283 [21].

Nyní jsou už známy všechny potřebné informace ke správnému vytvoření měřicího prostoru a vygenerování bodů pro robot.

Výstupem této části programu je matice bodů, do kterých bude robot polohovat a také grafické znázornění měřicího prostoru (viz Obr. 8.4). Růžovou barvou je zobrazen měřicí prostor (krychle), modře poté vybraná plocha, zeleně prostorové úhlopříčky a červeně body, do kterých robot bude při měření polohovat.

Je nutné podotknout, že osy s.s. Base byly uvažovány rovnoběžné se s.s. Robroot, z čehož plyne, že hrany krychle jsou rovnoběžné se s.s. Robroot. Je také nutné uvést, že bod C_7 je umístěn do počátku s.s. Base, osy souřadnicového systému Base mají stejné směry jako osy uvedené na obrázku měřicího prostoru z normy (viz Obr. 8.2). Měřicí body jsou generovány pro robot v s.s. Robroot.

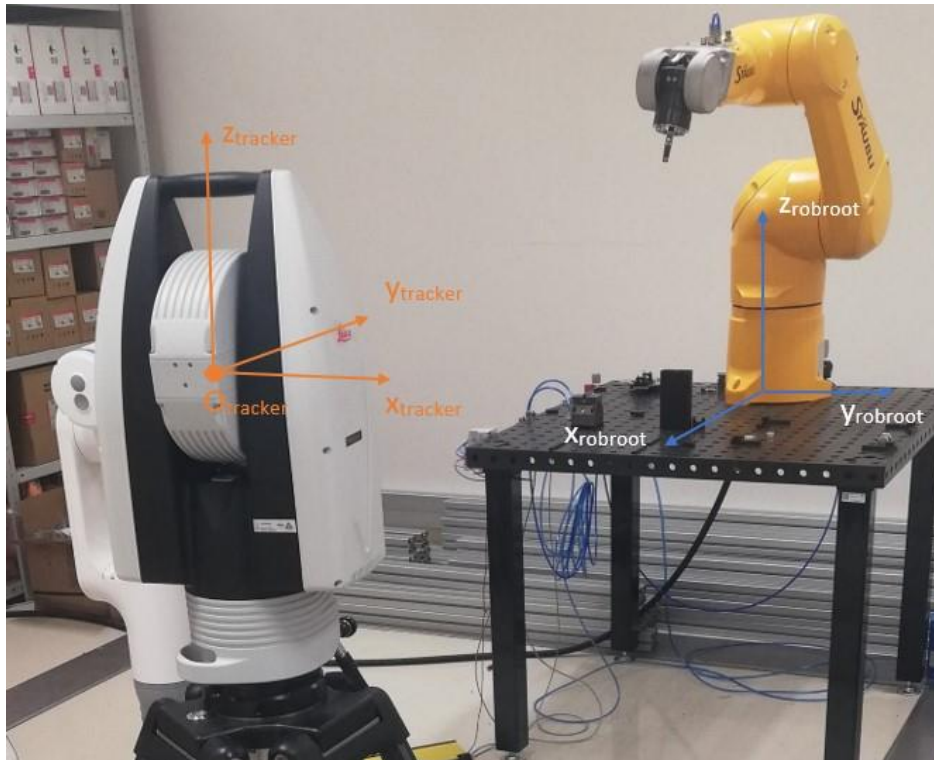


Obr. 8.4: grafické znázornění měřicího prostoru a bodů pro robot v souřadnicovém systému Robroot.

8.3. Výpočet natočení koncového efektoru

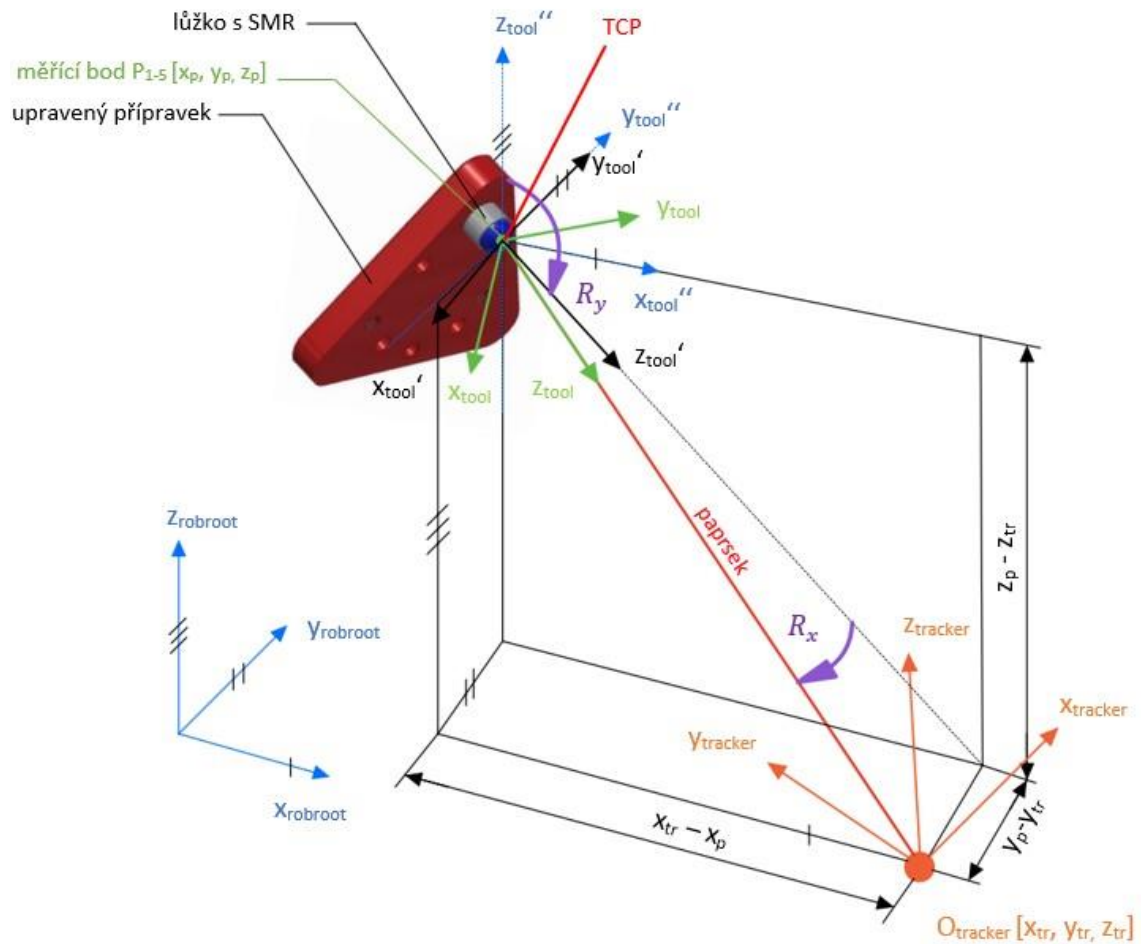
Tato kapitola se zabývá optimalizací polohy koncového efektoru robotu výpočtem jeho natočení tak, aby paprsek na koutový odražeč dopadal pod úhlem vyhovujícím akceptačnímu úhlu daného koutového odražeče a bylo tedy zamezeno nutnosti natáčení koutového odražeče. Toho je dosaženo výpočtem takového natočení koncového efektoru (přípravku) v prostoru, tak že laserový paprsek z trackeru dopadá na koutový odražeč vždy kolmo k osám x_{Tool} , y_{Tool} a je totožný s osou z_{Tool} (viz Obr. 9.2).

Na Obr. 8.5 je zobrazeno pracoviště robotu. Aby bylo možné vypočítat příslušné natočení, je nutné zjistit polohu s.s. laser trackeru vzhledem k s.s. Robroot. K tomu je použit kalibrační program, který po polohování robotu do bodů, které odpovídají vrcholům měřicí krychle, vypočte transformaci mezi souřadnicovými systémy robotu a laser trackeru. Použitý program k určení transformace využívá kvaterniony a jeho princip byl popsán roku 1986 Bertholdem K. P. Hornem, více o tomto způsobu zjištění transformace mezi dvěma s.s. je k zjištění v [43]. Samotný program je uveden v příloze (viz příloha EP4).



Obr. 8.5: měřicí pracoviště robotu Staubli TX2-90 s vyznačenými souřadnicovými systémy.

Po zjištění této transformace už je známa poloha bodu O_{tracker} v s.s. Robroot a realizován výpočet uhlů R_x, R_y, R_z dle Obr. 8.6 a rovnic (13) až (16), které z tohoto obrázku vyplývají.



Obr. 8.6: schéma geometrie pro výpočet natočení koncového efektoru.

$$R_x = \arcsin\left(\frac{y - y_{tr}}{l_p}\right) \quad (13)$$

$$R_y = 90^\circ + \arctan\left(\frac{z - z_{tr}}{x_{tr} - x}\right) \quad (14)$$

$$R_z = 0 \quad (15)$$

$$l_p = \sqrt{\left(\sqrt{(x_{tr} - x)^2 + (y - y_{tr})^2}\right)^2 + (z - z_{tr})^2} \quad (16)$$

8.4. Ověření dostupnosti bodů

Tato kapitola se věnuje řešení inverzní a dopředné kinematické úlohy za účelem ověření dostupnosti generovaných bodů a simulace robotu v měřicím prostoru.

Inverzní a dopředná kinematická úloha je vyřešena pro robot **Stäubli TX2-90**.

8.4.1. Schéma a D-H parametry robotu Stäubli TX2-90

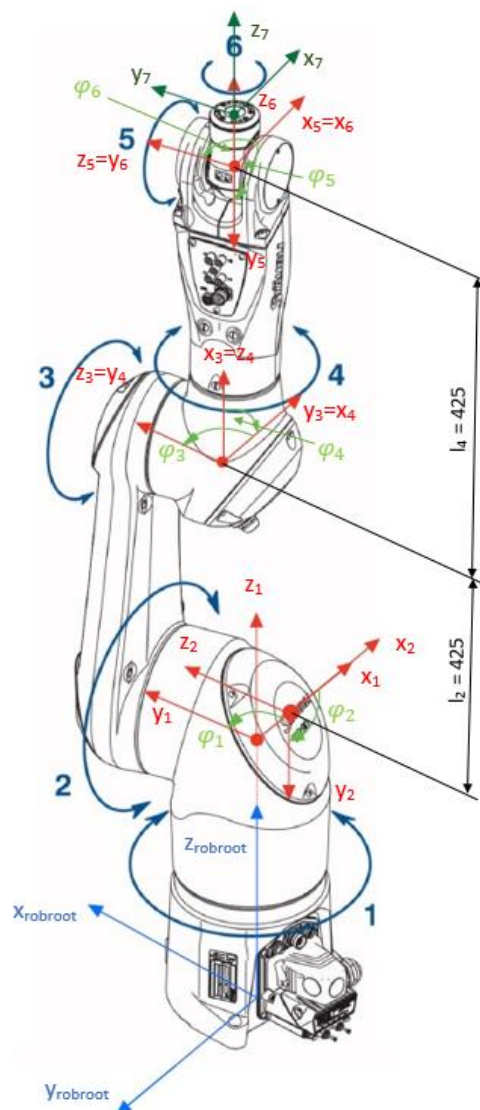
Robot Stäubli TX2-90 je průmyslový robot s šesti stupni volnosti (viz Obr. 8.7). Zelenými šipkami jsou na obrázku vyznačeny kladné směry rotací jednotlivých motorů robotu, úhly natočení jednotlivých motorů jsou značeny φ . Pro přehlednost je toto schéma ve dvou sdružených 2-D pohledech se zakótovanými důležitými rozměry uvedeno v příloze (viz příloha TP3).

D-H parametry robotu Stäubli TX2-90, které vycházejí z Obr. 8.7 a přílohy TP3 jsou uvedeny v Tab. 8.1.

Tab. 8.1: D-H parametry robotu Stäubli TX2-90.

Kloub	θ [°]	d [mm]	a [mm]	α [°]
1	0	0	50	-90
2	-90	50	425	0
3	90	0	0	90
4	0	425	0	-90
5	0	0	0	90
6	0	100	0	0

Úhly θ jsou dle definice z kapitoly 4.3 úhly mezi osami x_{i-1} a x_i dané pootočením s.s. F_{i-1} podél osy z_{i-1} . Osy z jsou vždy osami rotace jednotlivých motorů robotu a tuto skutečnost je tedy potřeba zohlednit při dosazování do rovnice D-H úmluvy, jelikož je nutné započítat jak proměnnou složku (úhel φ_i), tak konstantní složku (úhel θ_i). Do rovnice (3) je tedy za úhel θ_i při dalších výpočtech dosazován součet úhlu θ_i , který je odečten z tabulky s D-H parametry (viz) a úhlu φ_i , který vzejde z řešení inverzní kinematické úlohy.



Obr. 8.7: 3D schéma Staubli TX2-90 [12, upraveno].

8.4.2. Řešení inverzní kinematické úlohy

Inverzní kinematická úloha je často složitým problémem, jelikož může vést na soustavu nelineárních rovnic. Pro analytické řešení musí být splněny podmínky řešitelnosti [42]:

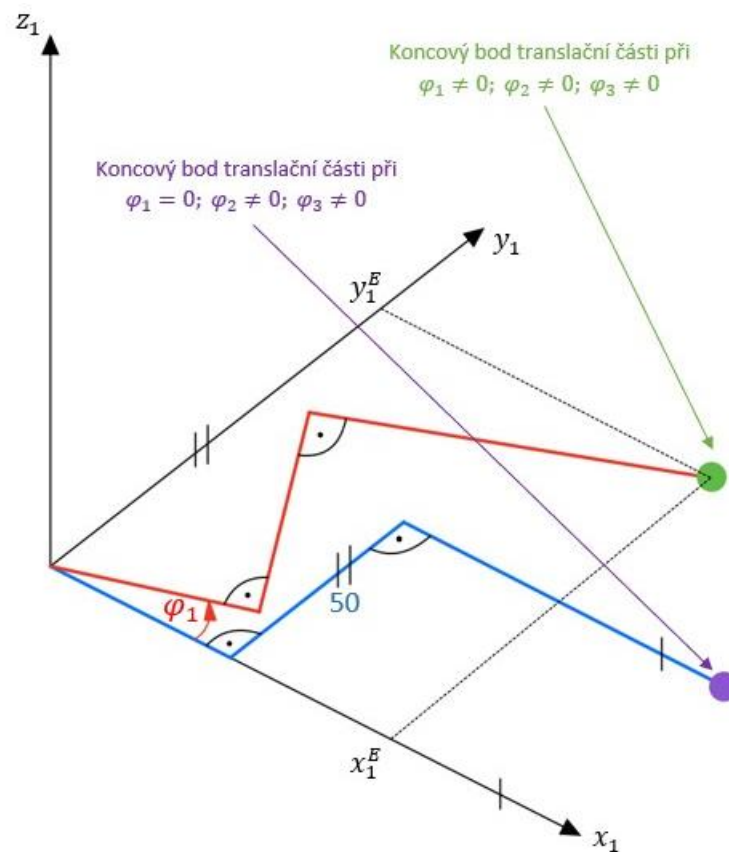
- Pro robot se šesti stupni volnosti tři po sobě jdoucí rotační klouby mají osy protínající se v jednom bodě nezávisle na pohybu.
- Pro robot s šesti stupni volnosti tři po sobě jdoucí osy musí být rovnoběžné.

Struktura robotu Stäubli TX2-90 splňuje podmínky analytického řešení a v této práci bude za účelem zjednodušeného modelování situace měření a také ověření dosažitelnosti bodů tato metoda použita.

Pro vyřešení inverzní kinematiky manipulátoru analytickou cestou neexistuje žádný obecný návod či postup. V této práci bylo postupováno stejně jako v [15]. Složitá inverzní kinematická úloha byla rozdělena na dvě jednodušší kinematické úlohy, a to translační část, která řeší parametry φ_1 až φ_3 , a sférické zápěstí, které řeší parametry φ_4 až φ_6 . Rovnice (20) – (22) pro parametry φ_4 až φ_6 vycházejí přesně z [15]. Rovnice (17) – (19) pro parametry φ_1 až φ_3 musely být kvůli rozdílné konstrukci robotu Stäubli TX2-90 oproti robotu řešenému v [15] modifikovány.

Translační část

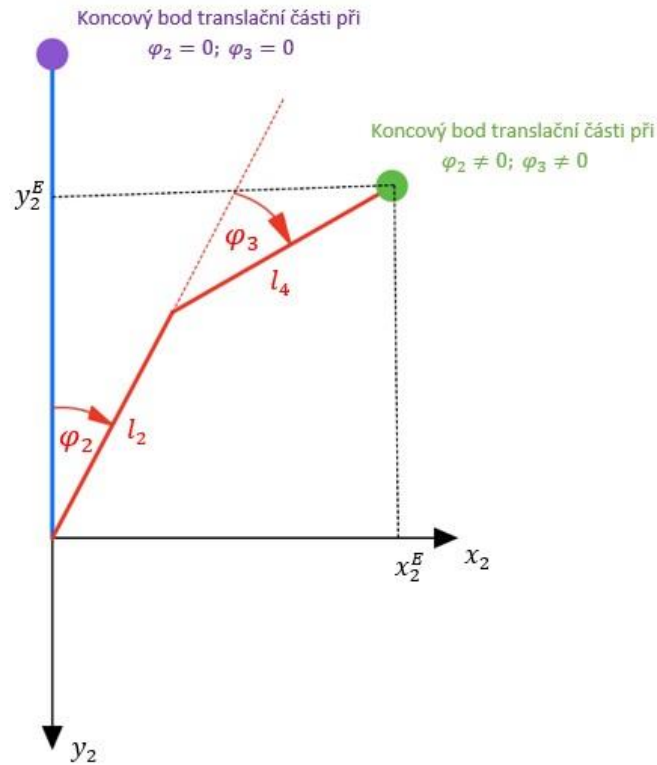
Jak už bylo napsáno, tato část řeší úhly φ_1 až φ_3 . Po výpočtu úhlu φ_1 se z robotu stane lehce řešitelný planární robot a úhel φ_2 a φ_3 je za pomoci goniometrie již jednoduché určit. Výpočtu úhlu φ_1 vychází ze schématu, které zobrazuje průmět prvních třech členů robotu do roviny $x_1 - y_1$ (viz Obr. 8.8.)



Obr. 8.8: schéma geometrie pro výpočet úhlu φ_1 .

$$\varphi_1 = \operatorname{atan} \left(\frac{y_1^E}{x_1^E} \right) - \operatorname{asin} \left(\frac{50}{\sqrt{(x_1^E)^2 + (y_1^E)^2}} \right) \quad (17)$$

Rovnice pro výpočet úhlu φ_2 a φ_3 (rovnice (18) a (19)) vychází z obrázku, který znázorňuje průmět 2. a 3. členu robotu do roviny $x_2 - y_2$ (viz Obr. 8.9).



Obr. 8.9: schéma geometrie pro výpočet úhlu φ_2 a φ_3 .

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \operatorname{atan}\left(\frac{y_2^E}{x_2^E}\right) - \operatorname{acos}\left(\frac{(x_2^E)^2 + (y_2^E)^2 + l_2^2 + l_4^2}{2 \cdot l_2 \cdot \sqrt{(x_2^E)^2 + (y_2^E)^2}}\right) \quad (18)$$

$$\varphi_3 = \pi - \operatorname{acos}\left(\frac{l_2^2 + l_4^2 - (x_2^E)^2 - (y_2^E)^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_4}\right) \quad (19)$$

Sférické zápěstí

Jak již bylo řečeno, výpočet úhlů φ_4 až φ_6 vychází přesně z [15]. Tento výpočet je pro roboty této struktury vždy stejný a je uveden v rovnicích (20) až (22).

$$\varphi_4 = \operatorname{atan2}(a_y^4, a_x^4) \quad (20)$$

$$\varphi_5 = \operatorname{atan2}\left(\sqrt{(a_x^4)^2 + (a_y^4)^2}, a_z^4\right) \quad (21)$$

$$\varphi_6 = \text{atan2}(s_z^4, -n_z^4) \quad (22)$$

- Kde funkce $\varphi_i = \text{atan2}(a, b)$ značí čtyřkvadrantový arcus tangens. Tato funkce respektuje znaménka argumentů a , b a vrací korektní řešení ve všech kvadrantech.
- prvky a_x^4 , a_y^4 , a_z^4 , s_z^4 a n_z^4 jsou prvky matice R_7^4 , tedy matice rotace, která je submaticí matice přechodu s.s. 4, do s.s. 7 – matice T_7^4 .

$$T_7^4 = \begin{bmatrix} & \mathbf{R}_7^4 & \mathbf{O}_7^4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$R_7^4 = \begin{bmatrix} c_{\varphi_4} c_{\varphi_5} c_{\varphi_6} - s_{\varphi_4} s_{\varphi_6} & -c_{\varphi_4} c_{\varphi_5} c_{\varphi_6} - s_{\varphi_4} c_{\varphi_6} & c_{\varphi_4} s_{\varphi_5} \\ s_{\varphi_4} c_{\varphi_5} c_{\varphi_6} - c_{\varphi_4} s_{\varphi_6} & -s_{\varphi_4} c_{\varphi_5} c_{\varphi_6} + c_{\varphi_4} c_{\varphi_6} & s_{\varphi_4} s_{\varphi_5} \\ & -s_{\varphi_5} c_{\varphi_6} & c_{\varphi_5} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} n_x^4 & s_x^4 & a_x^4 \\ n_y^4 & s_y^4 & a_y^4 \\ n_z^4 & s_z^4 & a_z^4 \end{bmatrix} \quad (24)$$

kde:

- $\sin(x) = s_x$; $\cos(x) = c_x$

Je nutné podotknout, že v této práci jsou uvažována pouze řešení pro jednotlivé parametry natočení uvedená v rovnicích (17) až (22). Tyto rovnice počítají jednotlivé parametry natočení pro případ “elbow up“, tedy prolomení ramen robotu “nahoru“. Existují i jiná řešení, které tato práce neuvažuje a nebudou zde rozebírány. Pro podrobný popis jednotlivých řešení viz [15].

8.4.3. Řešení dopředné kinematické úlohy

Dopředná úloha je na rozdíl od přechodí inverzní vždy analyticky řešitelná a vede tedy běžně k mnohem snazšímu řešení.

Vstupem do této části jsou úhly natočení motorů φ_i , které byly získány pomocí inverzní kinematické úlohy.

Dopředná kinematická úloha je řešena za pomoci Denavitovy – Hartenbergovy úmluvy pro popis kinematiky popsané v kapitole 4.3. Každá transformační matice T_i^{i-1} závisí přímo na aktivní kloubové souřadnici φ_i [15].

Přímou kinematickou úlohu sériového manipulátoru, který má n kloubů, lze poté formulovat následovně:

$$T_n^1 = \prod_{i=2}^n T_i^{i-1}(\varphi_i) \quad (25)$$

kde transformační matice T_i^{i-1} je dána dle D-H úmluvy vztahem (3). D-H parametry dosazované do jednotlivých transformačních matic byly již určeny dříve (viz Tab. 8.1). Do rovnice (3) je za konstantu θ_i vždy dosazen součet úhlu φ_i a θ_i , jak už bylo vysvětleno dříve.

8.5. Výstupy programu

Výstupy programu, který implementuje normu ISO 9283 na měření přesnosti polohování průmyslových robotů, byly zobrazeny již v blokovém diagramu v kapitole 8.1, zde budou tyto výstupy rozberány podrobněji.

Matice souřadnic bodů pro robot

Rozeř této matice záleží vždy na způsobu průchodu bodů, které uvádí norma ISO 9283. Vždy je ale rozeř této matice $N \times 3$, kde N je celkový počet bodů, do kterých robot při měření polohuje. Pro první způsob prostupu bodů (viz Obr. 8.3) je $N=151$ a matice má tedy rozeř 151×3 . V prvním sloupci je vždy souřadnice x bodu, v druhém sloupci souřadnice y a v třetím souřadnice z . Všechny tyto souřadnice jsou udávány v souřadnicovém systému Robroot. Výstupem je také vykreslení těchto souřadnic (viz Obr. 8.4).

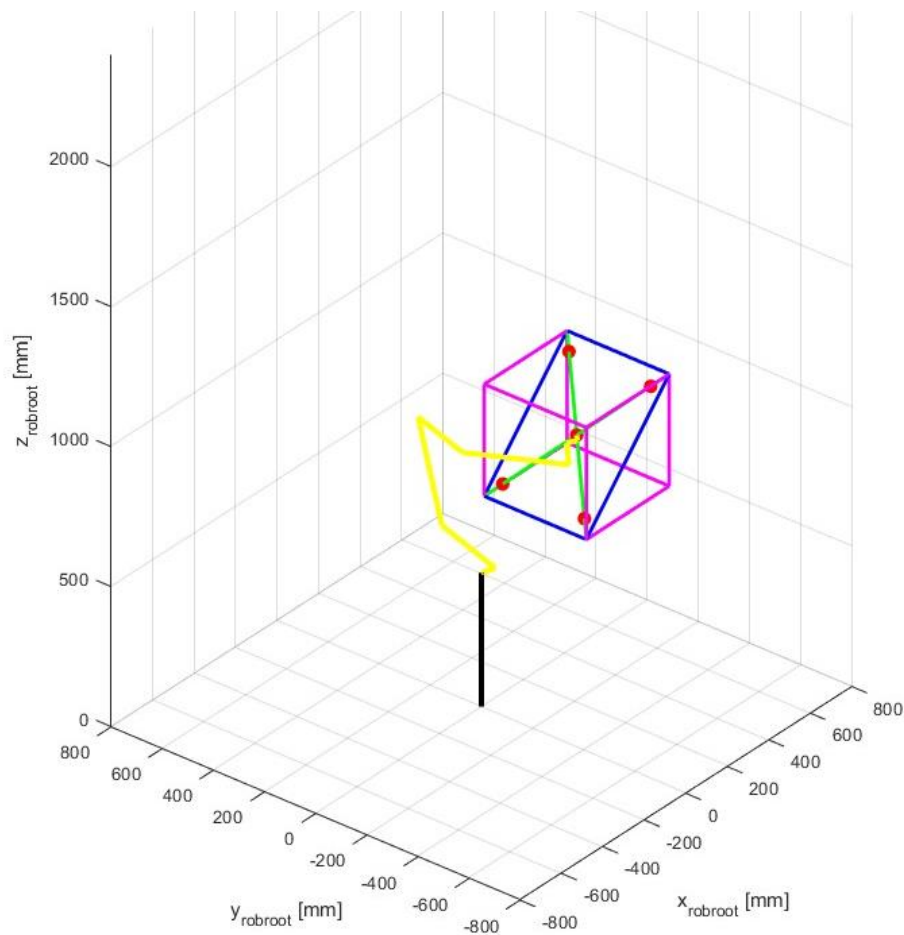
Matice úhlů natočení koncového efektoru

Rozeř této matice je $N \times 3$ a také závisí na způsobu prostupu bodů. Číslo N je rovno N z přechozího bodu a pro první způsob prostupu bodů je tedy $N=151$ a matice má rozeř 151×3 . V prvním sloupci je vždy úhel R_x , v druhém sloupci úhel R_y a v třetím

úhel R_z . Řádek matice vždy odpovídá řádku v matici s body polohování – tedy natočení vždy přísluší danému bodu, do kterého robot polohuje.

Vykreslení robotu v měřicím prostoru a ověření dostupnosti bodů

Tento výstup vychází z části programu s inverzní a dopřednou kinematikou (viz Obr. 8.10). Žlutě jsou vykresleny pohyblivé části robotu, černě je pak vyznačena nepohyblivá část robotu. Ověření dostupnosti bodů je zakomponováno přímo v programu. Kdyby došlo k tomu, že by robotu byly zadány souřadnice, do kterých není kvůli rozsahu jednotlivých os schopný polohovat, program zahlásí, že rozsah příslušné osy není vyhovující pro tento bod, a tedy není možno bodu dosáhnout. V takovém případě je nutné změnit umístění měřicího prostoru, jeho velikost či ověřit, zda nebude možné se do daného bodu dostat při použití dalších řešení pro jednotlivé natočení motorů, která tento program neuvažuje. V opačném případě zahlásí, že rozsah osy je vyhovující pro tento bod.



Obr. 8.10: zjednodušený model robotu v s.s. Robroot při polohování do bodu P_1 .

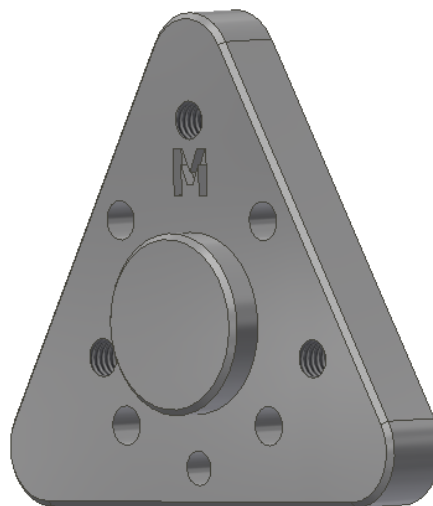
9. Měření

Tato kapitola je věnována verifikaci vytvořeného programu, která je provedena měřením přesnosti a opakovatelnosti polohování robotu Stäubli TX2-90 v laboratořích Českého institutu informatiky, robotiky a kybernetiky na ČVUT v Praze.

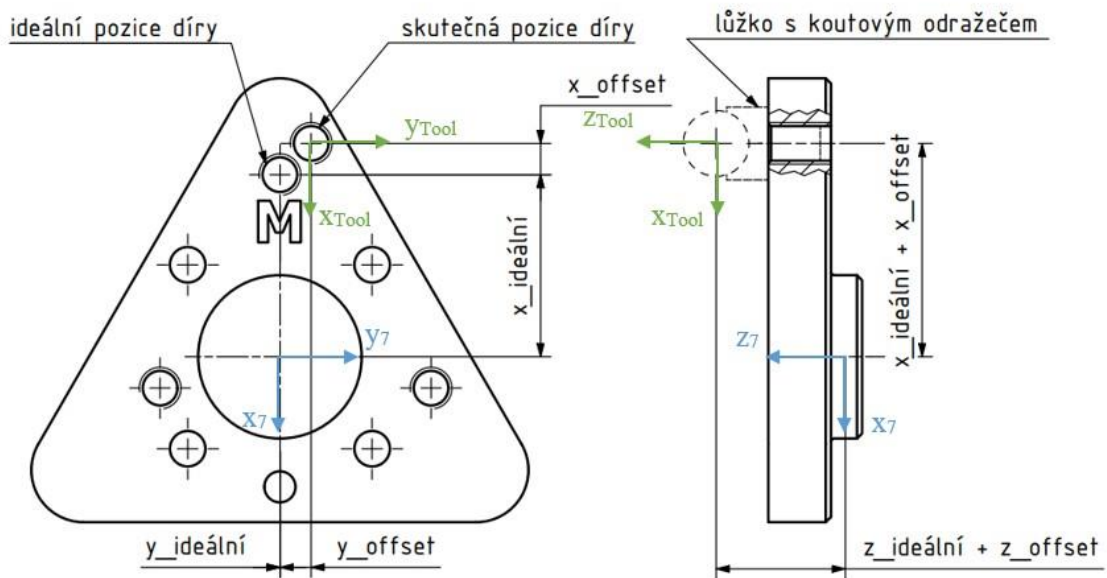
9.1. Návrh a výroba upraveného přípravku

Za účelem verifikace softwaru je vyroben upravený přípravek. Pro výrobu upraveného přípravku je zvolena technologie 3D tisku a je znázorněn na Obr. 9.1, výkres je uveden v příloze (viz příloha VP2). Jelikož hlavní připojovací element – tedy válcový čep o $\varnothing 31,5 j6$ – není po 3D tisku válcový a nedosahuje požadované přesnosti, je tato část po 3D tisku obrobena na CNC frézce.

Aby bylo možné přesně určit polohu koncového bodu přípravku (tedy polohou s.s. Tool) vzhledem k s.s. mechanického rozhraní (viz Obr. 9.2, označen číslem 7), bylo potřeba ho změřit na souřadnicovém měřicím stroji a zjistit, jak se skutečné rozměry liší od rozměrů ideálních a tyto rozdíly (neboli offsety) zaznamenat. Tyto offsety jsou následně potřebné při zadávání polohy TCP do řídicí jednotky robotu a také v programu inverzní a dopředné kinematiky. Přípravek s vyznačenými důležitými rozměry a jejich offsety je uveden na Obr. 9.2, hodnoty rozměrů a offsetů jsou poté uvedeny v Tab. 9.1 (na obrázku je také vyznačen poslední s.s. robotu).



Obr. 9.1: 3D model přípravku pro verifikaci.



Obr. 9.2: schéma přípravku pro verifikaci s rozměry.

Tab. 9.1: hodnoty poloh a offsetů s.s. Tool vzhledem k s.s. 7 robotu.

	osa x	osa y	osa z
ideální poloha [mm]	-35	0	38
offset [mm]	0,23	-0,12	0,27

Přípravek pro verifikaci obsahuje navíc další dvě závitové díry. Tyto díry zajistí, aby bylo možné tento přípravek použít i při kalibraci. Tři závitové díry jsou umístěny ve vrcholech obecného trojúhelníku. Toto umístění zajistí, aby při rotaci poslední osy robotu opisoval každý koutový odražeč jinou kružnici a bylo tedy možné každý jednoznačně identifikovat. Při použití přípravku pro měření bude lůžko s koutovým odražečem umístěno pouze v díře, která je označena písmenem “M”.

Montáž přípravku pro využití při měření:

- I. Do závitových děr jsou zašroubována lůžka a na magnety se připevní koutové odražeče. Pro měření přesnosti polohování se zašroubuje pouze jedno lůžko, a to do té díry, která má označení “M”.
- II. Válcový čep přípravku o $\varnothing 31,5$ j6 je zasunut do díry příruby o $\varnothing 31,5$ H7.
- III. Přípravek je natočen tak, aby díra pro válcový kolík byla přesně proti díře v přírubě a zasunutím (či jemným naklepnutím gumovou paličkou) válcového kolíku je zajištěna poloha.

- IV. Pomocí čtyř šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M6 je přípravek připevněn na přírubu robotu.

9.2. Příprava robotu a měřicí pracoviště

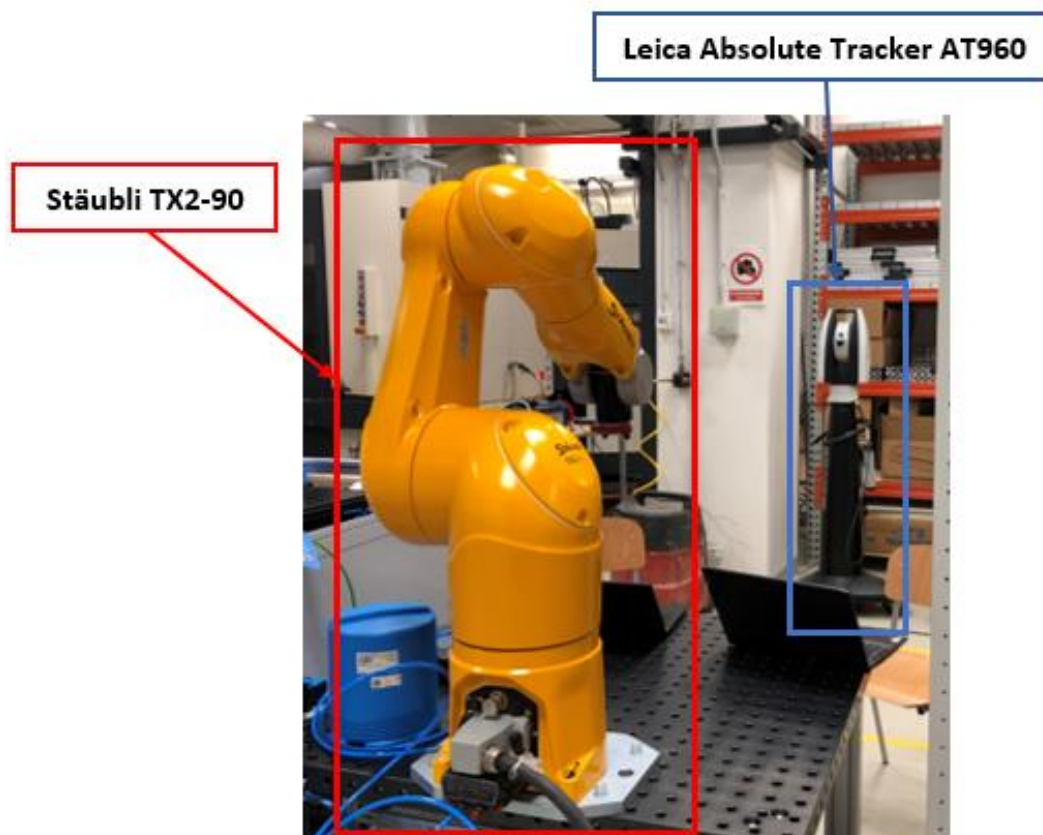
Před samotným měřením je potřeba na přírubu robotu připevnit upravený přípravek (viz kapitola 7), lůžka pro SMR a také SMR (viz Obr. 9.3). Jelikož se jedná o měření, je na přípravku připevněn pouze jeden SMR.



Obr. 9.3: sestavený přípravek na přírubě robotu.

Následně je ustaven a zaměřen laser tracker. Pomocí programu pro přípravu bodů jsou pro robot vygenerovány body, do kterých bude při měření polohovat. Program pro robot je vytvořen off-line v programu VAL3 a následně nahrán do robotu.

Měřicí pracoviště se skládá z robotu Stäubli TX2-90 s přípevněným přípravkem nesoucím SMR, laser trackeru Leica Absolute Tracker AT960 a počítače propojeného s trackerem (viz Obr. 9.4). Parametry měřicí krychle byly určeny ze znalosti údajů uvedených v [12] (viz Tab. 9.2).



Obr. 9.4: měřicí pracoviště.

Tab. 9.2: parametry měřicí krychle při experimentu.

Parametr	Hodnota [mm]
Velikost strany krychle a	300
Poloha počátku krychle – x	300
Poloha počátku krychle – y	-150
Poloha počátku krychle – z	200

9.3. Vyhodnocení přesnosti polohování

Měření nebylo provedeno při plném zatížení robotu, jelikož byl použit pouze upravený přípravek, jehož hmotnost i se spojovacím materiálem dosahuje přibližně 220 gramů. Bylo také provedeno 5 cyklů, namísto normou požadovaných 30, jako způsob průchodu bodů byl zvolen způsob 1 (viz kapitola 8.2). Toto měření nesplňuje tedy všechny podmínky uvedené v normě ISO 9283, jeho účelem bylo ale ověření funkce programu a této práce, jakožto celku. Data získaná při měření z laser trackeru jsou uvedena v příloze (viz příloha EP10)

Byly provedeny tři kalibrace s.s. robotu a s.s. trackeru, k dispozici jsou tedy tři matice translace a tři matice rotace, které popisují transformaci mezi těmito s.s. Tyto matice jsou ve formátu softwaru Matlab (.m) uvedeny v příloze (viz příloha EP7 a EP8).

Přesnost polohování se dle normy ISO 9283 vyhodnocuje v každém měřicím bodě (tedy v bodech P_1 až P_5) za použití rovnic (4) až (7) uvedených v kapitole 5.2.1. Všechna vyhodnocená data jsou uvedena v příloze TP2, v Tab. 9.3 jsou uvedené výsledné hodnoty přesnosti polohování ve všech pěti měřicích bodech.

Tab. 9.3: hodnoty přesnosti polohování v měřicích bodech.

Bod	Přesnost polohování AP_P [mm]
P1	0,0302
P2	0,0805
P3	0,0801
P4	0,0431
P5	0,0587

Z vyhodnocených dat je patrné, že přesnost polohování robotu Stäubli TX2-90 je **0,0805 mm**. Tato hodnota byla naměřena v bodě P_2 a je srovnatelná s hodnotou v bodě P_3 . Tyto dva body jsou nejvíce vzdálenými body (viz obrázek měřicí krychle v kapitole 8.2), z čehož vyplývá, že největší rozdíl mezi programem danou a skutečně dosaženou polohou je v těch částech pracovního prostoru, kde je robot nejvíce natažený a má tedy nejmenší tuhost.

Program, který na základě naměřených dat vyhodnocuje přesnost a opakovatelnost polohování je uveden v příloze (viz příloha EP9).

Při vyhodnocování dat je také potřeba vzít v úvahu přesnost měření samotného laser trackeru, která je dána rovnicí (12) (viz kapitola 5.3.3). Laser tracker byl po kalibraci a prostředí bylo optimální. Při experimentu byla měřená vzdálenost $l_p = 2300 \text{ mm}$ a přesnost laser trackeru v tomto konkrétním případě je tedy $\pm 21,9 \mu\text{m}$.

9.4. Vyhodnocení opakovatelnosti polohování

Norma ISO 9283 uvádí stejné požadavky na měření jak pro přesnost polohování, tak pro opakovatelnost polohování. Z naměřených dat je tedy možné dopočítat také opakovatelnost polohování robotu.

Opakovatelnost polohování byla vypočítána z rovnic (8) až (11) uvedených v kapitole 5.2.2.

K vyhodnocení jsou použita stejná naměřená data jako v kapitole 9.3. Všechna vyhodnocená data jsou uvedena v příloze TP2, v Tab. 9.4 jsou uvedené výsledné hodnoty opakovatelnosti polohování ve všech pěti měřicích bodech.

Tab. 9.4: hodnoty opakovatelnosti polohování v měřicích bodech.

Bod	Opakovatelnost polohování RP_1 [mm]
P1	$\pm 0,0131$
P2	$\pm 0,0157$
P3	$\pm 0,0190$
P4	$\pm 0,0138$
P5	$\pm 0,0149$

Z vyhodnocených dat je patrné, že opakovatelnost polohování robotu Stäubli TX2-90 je $\pm 0,019 \text{ mm}$. V tomto případě, na rozdíl od přesnosti polohování, je možné porovnat výsledek s hodnotou uváděnou výrobcem. Uváděná hodnota opakovatelnosti polohování dle ISO 9283 robotu Stäubli TX2-90 je $\pm 0,03 \text{ mm}$ (viz Obr. 1.1). Měření bylo provedeno pouze se zátěží přibližně 220 gramů, nikoli při plném zatížení, jak již bylo zmíněno výše. Tato skutečnost by mohla být důsledkem toho, že měřením zjištěná opakovatelnost polohování má menší hodnotu, než výrobcem uvedená hodnota dle ISO 9283.

I v tomto případě je potřeba vzít v úvahu přesnost měření samotného trackeru, která je stejná jako při měření přesnosti polohování, tedy $\pm 21,9 \mu\text{m}$.

10. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření programu, který bude implementovat normu ISO 9283 na měření přesnosti polohování průmyslových robotů. Následně také konstrukční návrh přípravku, který bude sloužit pro upevnění koutového odražeče na přírubu robotu a v neposlední řadě také verifikace výstupů práce na reálném robotu.

Součástí řešení vlastní části práce je řešerše problematiky průmyslových robotů, jejich kinematiky, řízení a také samotné normy ISO 9283 a jejich požadavků. Dále bylo nutné seznámit se se způsoby a technickými prostředky, kterými bude možné měření provést.

Jelikož úkol této práce byl komplexní problém, na úvod řešení bylo potřeba rozebrat zadání a stanovit jednotlivé body postupu, které povedou k úspěšnému splnění zadání práce.

Nejdříve se práce věnovala návrhu přípravku, který bude zajišťovat připevnění koutového odražeče na přírubu robotu. Při tomto návrhu bylo nutné respektovat rozměry příruby robotu, rozměry lůžka pro upevnění koutového odražeče a také požadavky normy a požadavky výrobce robotu. Pro experimentální ověření funkčnosti práce byl navržen upravený přípravek, který byl následně vyroben technologií 3D tisku a s ohledem na asymetrické uchycení koutových odražečů může být použit také při kalibraci průmyslových robotů.

Vlastní program aplikuje požadavky normy na měřicí prostor a měřicí body, tedy na body, do kterých robot při měření polohuje. Norma přesně stanovuje umístění těchto bodů v pracovním prostoru robotu, sekvenci pořadí průchodu bodů a také počet cyklů. Na základě těchto informací byl v prostředí systému Matlab vytvořen program, který při zadání velikosti a umístění měřicího prostoru generuje souřadnice bodů, které jsou následně použity při programování polohy robotu. Pro zajištění plynulého měření a odstranění nutnosti natáčení koutového odražeče byl do programu umístěn výpočet natočení koncového efektoru robotu, který zajistí optimalizaci polohy koncového efektoru robotu. Tato natočení se následně využijí při programování robotu a zajistí dopadání paprsku na koutový odražeč vždy tak, aby došlo k jeho odražení zpět k laser trackeru a nebylo přerušeno měření. Program může při špatném umístění či špatném stanovení velikosti měřicí krychle generovat souřadnice i pro body, které nebude robot

s ohledem na jeho pracovní rozsah schopen dostupit. Právě díky této skutečnosti byl program doplněn řešením inverzní kinematické úlohy robotu Stäubli TX2-90, která pro vygenerované souřadnice vypočte úhly natočení motorů robotu, tyto úhly jsou následně porovnány s rozsahy uvedenými výrobcem a je vyhodnoceno, zda jsou body pro robot dostupné.

V poslední části práce byla provedena verifikace výstupů průmyslovým robotem Stäubli TX2-90. Byla vyhodnocena přesnost polohování $0,0805\text{ mm}$ a opakovatelnost polohování $\pm 0,019\text{ mm}$. Hodnotu opakovatelnosti polohování bylo možné porovnat s hodnotou, kterou uvádí výrobce a která by měla odpovídat požadavkům normy ISO 9283. Výrobcem uváděná hodnota je $\pm 0,03\text{ mm}$. Měření bylo provedeno za použití upraveného přípravku, jehož hmotnost i se spojovacím materiálem činí přibližně 220 g , namísto normou požadovaných 7 kg . Tato skutečnost by mohla být důsledkem toho, že měřením zjištěná opakovatelnost má nižší hodnotu než výrobcem uvedená.

Cíle této bakalářské práce byly splněny, byl navržen a zkonstruován přípravek, který ponese koutový odražeč při měření. Následně byla implementována norma ISO 9283 na měření přesnosti polohování průmyslových robotů, a to vytvořením programu, který na základě požadavků této normy připravuje body trajektorie robotu pro měření.

Seznamy

Seznam použité literatury

- [1] KOLÍBAL, Zdeněk. Průmyslové roboty I: Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů (PRaM). Brno: skriptum VUT Brno, 1993. 188 s. ISBN 80-214-0526-0.
- [2] HLAVÁČ, Václav. Úvod do robotiky [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/51Robotika/01UvodRobotika.pdf>
- [3] Průmysloví roboti – typy a jejich využití v průmyslu. *MobilMania.cz* [online]. 9. prosince 2021 [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://mobilmania.zive.cz/clanky/prumyslovy-roboti---typy-a-jejich-vyuziti-v-prumyslu/sc-3-a-1353542/default.aspx>
- [4] Roboty pro svařování v ochranné atmosféře KUKA. *Industrial intelligence 4.0_beyond automation | KUKA AG* [online]. [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/pr%C5%AFmyslov%C3%A1-odv%C4%9Btv%C3%AD/kovopr%C5%AFmysl/sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-v-ochrann%C3%A9-atmosf%C3%A9-roboty-pro-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-v-ochrann%C3%A9-atmosf%C3%A9-kuka>
- [5] Fiedler c.n.c. Technology: Firemní video – Fiedler c.n.c. Technology s.r.o. 2017. *Stripeddog.cz* [online]. [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://stripeddog.cz/fiedler/>
- [6] VALÁŠEK, Dominik. Nová lakovna Škody má 66 robotů a lidé se v ní nepředrou. *Garáž.cz* [online]. 22. 8. 2019 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/nova-lakovna-skody-ma-66-robotu-a-lide-se-v-ni-nepredrou-21002416>
- [7] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2022-10-26]. ISBN 978-80-248-1522-0. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf

- [8] Yaskawa Motoman GP-series 6-axis robots. *Foodengineeringmag.com* [online]. August 9, 2018 [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: <https://www.foodengineeringmag.com/articles/97700-yaskawa-motoman-gp-series-6-axis-robots>
- [9] Lineární tříosé roboty Sepro. *Kubousek.cz* [online]. [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://kubousek.cz/sk/produkty/linearni-triose-roboty-sepro/>
- [10] BLECHA, Petr, Zdeněk KOLÍBAL, Radek KNOFLÍČEK, Aleš POCHYLÝ, Tomáš KUBELA, Radim BLECHA a Tomáš BŘEZINA. *Mechatronika: Modul 10: Robotika* [online]. Techn. Univ., 2011 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8054951-Mechatronika-modul-10-robotika.html>
- [11] ČSN ISO 8373. *Roboty a robotická zařízení - Slovník*. Praha: Svaz strojírenské technologie Praha, 2012, 48 stran. 186501.
- [12] TX2-90 industrial robot range. *Staubli.com* [online]. [cit. 2022-11-01]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/hu/en/robotics/products/industrial-robots/tx2-90.html>
- [13] VALÁŠEK, Michael. *Kinematika robotických systémů: Učební texty k semináři* [online]. 18.2.2011 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_06_1102.PDF
- [14] DENAVIT, Jacques a Richard HARTENBERG. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *ASME Journal of Applied Mechanics*. Evanston, ILL, 1955, (77), 215-221.
- [15] ŠVEJDA, Martin. *Kinematika robotických architektur* [online]. Plzeň, 2011 [cit. 2022-11-05]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2011/rigo.pdf. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [16] HAYATI, Saeid a M. MIRIMIRANI. Improving the Absolute Positioning Accuracy of Robot Manipulators. *Journal of Robotic Systems*. Wiley, 1985, 2(4), 397-413. ISSN 0741-2223.
- [17] KR 6 R900 sixx. *Kuka.com* [online]. [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000205456_en.pdf

- [18] GP4: Extremely Fast, Precise Robot. *Motoman.com* [online]. [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/assembly-handling/gp-series/gp4>
- [19] TX200 range: 6 axis industrial robots. *Staubli.com* [online]. [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/content/dam/robotics/brochures/6-axis/datasheet/TX200-6-axis-product-data-sheet-EN.pdf>
- [20] ZHANG, Xiangpeng, Wenjie TIAN, Lina WANG a Tian HUANG. Evaluation and prediction method of robot pose repeatability based on statistical distance. *Mechanism and Machine Theory* [online]. Volume 179. 2022 [cit. 2022-10-20]. ISSN 0094-114X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105122>
- [21] ČSN EN ISO 9283. *Manipulační průmyslové roboty - Technické parametry a související zkušební metody*. Druhé vydání. Praha: Český normalizační institut, 1999, 64 stran. 186525.
- [22] Grafické zobrazení pojmů přesnost a opakovatelnost polohování CNC stroje. *Profika.cz: Přesnost a opakovatelnost CNC obráběcího stroje* [online]. [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://www.profika.cz/presnost-opakovatelnost>
- [23] SLAMANI, Mohamed, Ahmed JOUBAIR a Ilian BONEV. A comparative evaluation of three industrial robots using three reference measuring techniques. *Industrial Robot: An International Journal* [online]. 2015, 19 October 2015, **42**(6), 572-585 [cit. 2022-11-7]. ISSN 0143-991x. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/IR-05-2015-0088>
- [24] Systém ballbar QC20: Průmyslový standard pro rychlé, jednoduché a účinné ověření obráběcího stroje. *Renishaw.cz* [online]. [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/system-ballbar-qc20--11075>
- [25] YOUNG, Ken a Craig Graeme PICKIN. Accuracy assessment of the modern industrial robot. *Industrial Robot: An International Journal* [online]. 2000, 1 December 2000, **27**(6), 427-436 [cit. 2022-11-7]. ISSN 0143-991x. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/01439910010378851>
- [26] BRETHÉ, Jean-François a Brayima DAKYO. A stochastic ellipsoid approach to repeatability modelisation of industrial manipulator robots. In: *IEEE/RSJ International*

Conference on Intelligent Robots and Systems [online]. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2002, s. 1608-1614 [cit. 2022-11-07]. ISBN 0-7803-7398-7. Dostupné z: https://www.academia.edu/57862477/A_stochastic_ellipsoid_approach_to_repeatability_modelisation_of_industrial_manipulator_robots

[27] EL HAMI, Abdelkhalak a Bouchaïb RADI. *Uncertainty and Optimization in Structural Mechanics* [online]. Great Britain: ISTE, 2013 [cit. 2022-11-07]. ISBN 978-1-84821-517-7. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr&id=zT_9xcUUJMC&oi=fnd&pg=PA5&ots=GGIxzjrB8P&sig=aGSWYVvuMEHjGCRCC6mcIWnkbMYw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

[28] PROKOP, Martin. Co je laserový tracker a jak se s ním měří?. *Automa* [online]. 2009, **2009**(8-9), 40-41 [cit. 2022-11-07]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/39584.pdf

[29] JOUBAIR, Ahmed a Ilian A. BONEV. Non-kinematic calibration of a six-axis serial robot using planar constraints. *Precision Engineering* [online]. 2015, **40**, 325-333 [cit. 2022-11-10]. ISSN 0141-6359. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.12.002>

[30] Position Analyzer. *Ibspe.com* [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://www.ibspe.com/machine-qualification/position-analyzer>

[31] TP200: Kompaktní sonda s výměnou modulů využívá tenzometrické mechanismy, díky nimž dosahuje vyšší přesnosti a delší životnosti, než je tomu u kinematických spínacích dotykových sond. *Renishaw.cz* [online]. [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/tp200--6671>

[32] Jak funguje interferometrický systém?. *Renishaw.cz* [online]. [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>

[33] Víceosé kalibrátory XM-60 a XM-600: Měření šesti stupňů volnosti v libovolné orientaci najednou. *Renishaw.cz* [online]. [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/viceose-kalibratory-xm-60-a-xm-600--39258>

[34] MARTIN, Joel. Quality 101: Laser Tracking Fundamentals. *Qualitymag.com* [online]. May 14, 2007 [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/85066-quality-101-laser-tracking-fundamentals>

- [35] YU, C., F. KARL, M. ILARDO, M. KE a S. SHARMA. How Accurate Can a Laser Tracker Be?. *Qualitydigest.com* [online]. May 16. 2018 [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: <https://www.qualitydigest.com/inside/cmsc-article/how-accurate-can-laser-tracker-be-051618.html>
- [36] *OMC Technical Brief - Laser Tracker* [online]. Stansted: Optical Metrology Centre, 2001 [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/Tech_Briefs/TechBrief_LaserTracker.pdf
- [37] *LEICA ABSOLUTE TRACKER AT960* [online]. Germany: Hexagon Metrology, 2014, November 2014 [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: http://www.microtop.ro/uploads/attachments/Leica_AT960_brochure_en_web_en.pdf
- [38] ELATTA, A.Y., Li Pei GEN, Fan Liang ZHI, Yu DAOYUAN a Luo FEI. An Overview of Robot Calibration. *Information Technology Journal* [online]. 2004, 3(1), 74-78 [cit. 2022-12-01]. ISSN 1682-6027. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Bahram-Ravani/publication/224729865_An_Overview_of_Robot_Calibration/links/54b803df0cf28faced61c61d/An-Overview-of-Robot-Calibration.pdf
- [39] BERNHARDT, Roger a S.L. ALBRIGHT. *Robot Calibration* [online]. London: Chapman & Hall, 1993 [cit. 2022-12-02]. ISBN 0-412-49140-0. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=A3ksLnOEK4C&oi=fnd&pg=PR9&dq=S.L.+Albright+R.+Bernhardt.+Robot+Calibration&ots=nWYH6VSJyK&sig=9ZQfzYE5ScnBny_cxOPZX1bldqOY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [40] SHAH, Bhavin C., Devendra NAGAL a Swati SHARMA. COORDINATE SYSTEMS FOR INDUSTRIAL ROBOTS. *International Journal For Technological Research In Engineering* [online]. 2016, 191-193 [cit. 2023-04-19]. ISSN 2347-4718. Dostupné z: <https://www.ijtre.com/images/scripts/16141.pdf>
- [41] *Arm - TX series 90 family: Characteristics* [online]. 2005 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: [http://www.geigerhandlingusa.com/Assets/TX90_B155529044\(2\).pdf](http://www.geigerhandlingusa.com/Assets/TX90_B155529044(2).pdf)
- [42] VLADIMÍR, Smutný. *Přímá a inverzní kinematika otevřených kinematických řetězců*. [online] Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky (CIIRC), ČVUT.



[cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/serial-notecz.pdf>

[43] HORN, Berthold K. P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A* [online]. 1987, **4**(4), 629-642

[cit. 2023-06-12]. ISSN 1084-7529. Dostupné z: doi:10.1364/JOSAA.4.000629

Seznam obrázků

Obr. 1.1: technické specifikace robotu Stäubli TX2-90 [12].....	13
Obr. 3.1: roboty implementované do procesu lakování ve společnosti Škoda Auto [6].	16
Obr. 3.2: robot pro svařování v ochranné atmosféře od společnosti KUKA [4].	16
Obr. 3.3: souřadnicové systémy průmyslových robotů [40].....	18
Obr. 4.1: kinematické schéma šestiosého průmyslového robotu Stäubli TX2-90.	20
Obr. 4.2: robot Stäubli TX2-90 [12].	20
Obr. 4.3: D-H úmluva [15].	22
Obr. 5.1: schematické zobrazení přesnosti a opakovatelnosti [22].....	24
Obr. 5.2: bezkontaktní sonda IBS trinity při najíždění na artefakty [30].	28
Obr. 5.3: měření přesnosti dotykovou sondou na granitové krychli [31].	28
Obr. 5.4: princip laserinterferometru na schématu [32].....	29
Obr. 5.5: laserinterferometr Renishaw XM-60 [33].	29
Obr. 5.6: laser tracker Leica Absolute Tracker AT960 [37].....	31
Obr. 7.1: poloha těžiště přípravku [41, upraveno].....	34
Obr. 7.2: výkres mechanického rozhraní robotu s vyznačenými připojovacími rozměry [41, upraveno].....	35
Obr. 7.3: lůžko .5 SMT - 25 mm - M8X1,25.....	36
Obr. 7.4: 3D model přípravku.....	37
Obr. 7.5: výřez z výkresu přípravku s připojovacími rozměry.	37
Obr. 8.1: blokový diagram programu.	39
Obr. 8.2: měřicí prostor dle ISO 9283 s vyznačenými body [21, upraveno].....	40
Obr. 8.3: sekvence průchodu bodů dle ISO 9283 [21].	40
Obr. 8.4: grafické znázornění měřicího prostoru a bodů pro robot v souřadnicovém systému Robroot.	41

Obr. 8.5: měřicí pracoviště robotu Stäubli TX2-90 s vyznačenými souřadnicovými systémy.	42
Obr. 8.6: schéma geometrie pro výpočet natočení koncového efektoru.	43
Obr. 8.7: 3D schéma Stäubli TX2-90 [12, upraveno].	45
Obr. 8.8: schéma geometrie pro výpočet úhlu φ_1	47
Obr. 8.9: schéma geometrie pro výpočet úhlu φ_2 a φ_3	48
Obr. 8.10: zjednodušený model robotu v s.s. Robroot při polohování do bodu P_1	51
Obr. 9.1: 3D model přípravku pro verifikaci.	52
Obr. 9.2: schéma přípravku pro verifikaci s rozměry.	53
Obr. 9.3: sestavený přípravek na přírubě robotu.	54
Obr. 9.4: měřicí pracoviště.	55

Seznam tabulek

Tab. 4.1: druhy kinematických řetězců a jejich schémata.	19
Tab. 8.1: D-H parametry robotu Stäubli TX2-90.	44
Tab. 9.1: hodnoty poloh a offsetů s.s. Tool vzhledem k s.s. 7 robotu.	53
Tab. 9.2: parametry měřicí krychle při experimentu.	55
Tab. 9.3: hodnoty přesnosti polohování v měřicích bodech.	56
Tab. 9.4: hodnoty opakovatelnosti polohování v měřicích bodech.	57

Seznam použitého softwaru

- Matlab (verze R2022b)
- Autodesk Inventor Professional 2023

Seznam příloh

Textové přílohy

- Příloha 1 – TP1 – návod k použití programu
- Příloha 2 – TP2 – vyhodnocená data z měření
- Přílohy 3 – TP3 - 2D schéma robotu Stäubli TX2-90

Elektronické přílohy

- Příloha 1 – EP1 – text bakalářská práce (název souboru: *BP_VLK_0292_f.pdf*)
- Příloha 2 – EP2 – program pro přípravu bodů pro robot (název souboru: *Implementace_ISO9283_final_v01_9_6.mlx*)
- Příloha 3 – EP3 – funkce D-H notace (název souboru: *DH.m*)
- Příloha 4 – EP4 – program pro získání transformace mezi souřadnými systémy (název souboru: *Ziskani_Transformace_LeicaRHR2StrojXYZ_UPRAVENO.m*)
- Příloha 5 – EP5 – program využívající kvaterniony (název souboru: *absoluteOrientationQuaternion.m*)
- Příloha 6 – EP6 – program pro přepočítání dat ze souřadného systému RHR laser trackeru do souřadného systému XYZ robotu (název souboru: *prepocet_LeicaRHR_robotXYZ.mlx*)
- Příloha 7 – EP7 – transformační matice posuvu mezi souřadným systémem laser trackeru a robotu (název souborů: *T_01.mat, T_02.mat, T_03.mat*)
- Příloha 8 – EP8 – transformační matice rotace mezi souřadným systémem laser trackeru a robotu (název souboru: *R_01.mat, R_02.mat, R_03.mat*)
- Příloha 9 – EP9 – program pro vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti polohování (název souboru: *vyhodnoceni.mlx*)
- Příloha 10 – EP10 – naměřená data z laser trackeru (název souboru: *mereni_PIP5.csv, mereni_PIP5_02.csv*)

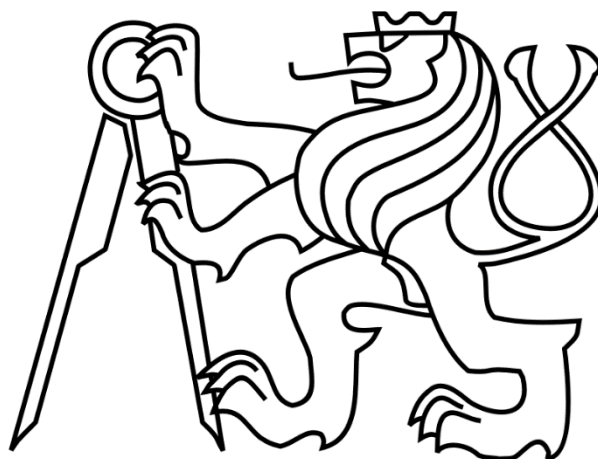
Výkresová dokumentace

- Příloha 1 – VP1 - přípravek pro uchycení SMR (číslo výkresu: *BP_0292_01*)
- Příloha 2 – VP2 - přípravek pro verifikaci (číslo výkresu: *BP_0292_02*)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Implementace normy ISO 9283 pro měření přesnosti polohování
průmyslových robotů

Textové přílohy

Jakub Vlk

Příloha 1 – TP 1 – návod k použití programu

UPOZORNĚNÍ: Při stažení příloh z webu KOS či dspace dojde k přepsání názvu jednotlivých souborů! Například soubor původně pojmenován **DH.m** dostane název **F2-BP-2023-Vlk-Jakub-priloha-DH.m**. Program by poté například tuto funkci nemohl najít. Proto je důležité upravit název souboru a část “**F2-BP-2023-Vlk-Jakub-priloha-**“ z názvu odstranit.

1) Požadavky na software

Program pro implementaci normy ISO 9283 je vytvořen v softwaru Matlab. Je tedy potřeba mít pro použití tohoto programu Matlab nainstalovaný v počítači (odkaz na produkt: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>). Program pro implementaci normy využívá funkce symbolických proměnných a je potřeba mít v Matlabu nainstalovaný doplněk **Symbolic Math Toolbox** (odkaz na tento doplněk: <https://www.mathworks.com/products/symbolic.html>).

2) Nahrání souborů

Nejdříve je nutné umístit samotný program a všechny další důležité podprogramy do vašeho **výchozího adresáře softwaru Matlab**.

- Do adresáře umístěte soubor **Implementace_ISO9283_final_v01_9_6.mlx**. Tento soubor obsahuje hlavní program.
- Do adresáře umístěte soubor **DH.m**. Tento soubor obsahuje funkci Denavitovy – Hartenbergovy úmluvy a bez něj nebude hlavní program fungovat.

3) Spuštění programu

Poznámka:

Program je koncipován hlavně pro měření na robotu Stäubli TX2-90. Pokud se jedná o měření na jiném robotu, než je tento robot, je nutné změnit DH parametry robotu vzhledem k tomu, jak jsou definovány souřadné systémy jednotlivých kloubů a také délky ramen vzhledem ke geometrii robotu. Je nutné brát na vědomí, že část s dopřednou a inverzní kinematikou není univerzální pro jakýkoliv robot s 6 stupni volnosti a není tedy zaručena její funkčnost. Pokud bude část s kinematickými úlohami hlásit problém, je možné ji vyřadit z funkce tím, že se celá tato část (tedy od nadpisu “Inverzní kinematika“)

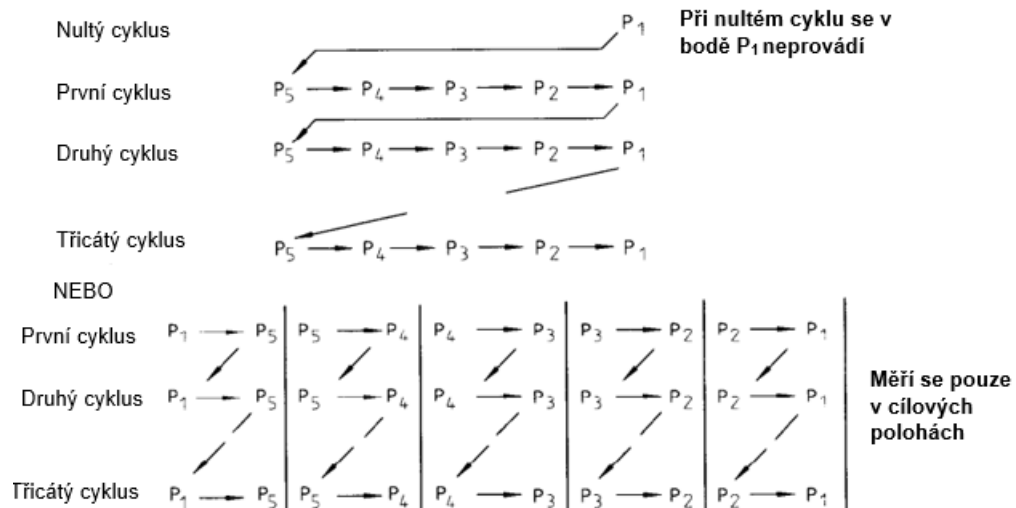
vybere a stiskne se “%“. Program pro generaci bodů a výpočet natočení koncového efektoru bude funkční nezávisle na této části a bude tedy možné získat souřadnice měřicích bodů v prostoru.

Pozor na to, jak je definován souřadný systém Robroot, zkušební krychle má hrany rovnoběžné s tímto souřadným systémem. Pokud tomu tak nebude, nebudou správně generovány měřicí body P₁ – P₅.

- Program spustíte tlačítkem “Run“, nebo stisknutím klávesy “F5“
- V Command Window se zobrazí hláška: “Zadejte číslo charakterizující řádek bodu, pro který chcete zobrazit robot:“. Pro volbu bodu viz Obrázek 1. Například při prvním způsobu průchodu bodů a zadání čísla “1“ program vykreslí robot v bodě P₁.
- V Command Window se zobrazí hláška: “Zadejte číslo, které reprezentuje požadovaný měřený parametr: (1 - jednosměrná přesnost polohy, NEBO 2 - jednosměrná opakovatelnost polohy)“.
 - Při měření jednosměrné přesnosti polohy zadejte číslo 1 a potvrďte tlačítkem “Enter“
 - Při měření jednosměrné opakovatelnosti polohy zadejte číslo 2 a potvrďte tlačítkem “Enter“
- Následně se v Command Window zobrazí hláška: “Zadejte velikost strany krychle [mm]:“. Pro robot Stäubli TX2-90 zadejte 300 a potvrďte tlačítkem “Enter“ (pro jiný robot je nutné velikost krychle stanovit na základě rozsahu os robotu – objem krychle musí být maximální možný).
- Následně se v Command Window zobrazí hláška: “Zadejte polohu x počátku zkušební krychle (bodu C7) v s.s. Robroot: [mm]“. Toto umístění se volí dle místa největšího předpokládaného využití robotu. Pro zkoušku měření na robotu Stäubli TX2-90 zadejte hodnotu 300 a potvrďte tlačítkem “Enter“.
- Následně se v Command Window zobrazí hláška: “Zadejte polohu y počátku zkušební krychle (bodu C7) v s.s. Robroot: [mm]“. Toto umístění se volí dle místa

největšího předpokládaného využití robotu. Pro zkoušku měření na robotu Stäubli TX2-90 zadejte hodnotu -150 a potvrďte tlačítkem “Enter“.

- Následně se v Command Window zobrazí hláška: “Zadejte polohu z počátku zkušební krychle (bodu C7) v s.s. Robroot: [mm]“. Toto umístění se volí dle místa největšího předpokládaného využití robotu. Pro zkoušku měření na robotu Stäubli TX2-90 zadejte hodnotu 200 a potvrďte tlačítkem “Enter“.
- Následně se v Command Window zobrazí hláška: “Zadejte způsob průchodu bodů, viz norma. 1 - měření P5-P4-P3-P2-P1 NEBO 2 - měření P1 - P5, P5 - P4, ...:“. Zde zadejte Vámi zvolený způsob průchodu bodů, pro více informací viz norma ISO 9283.
 - Pro první způsob zadejte číslo 1 a potvrďte tlačítkem “Enter“. – **doporučeno**
 - Pro druhý způsob zadejte číslo 2 a potvrďte tlačítkem “Enter“.



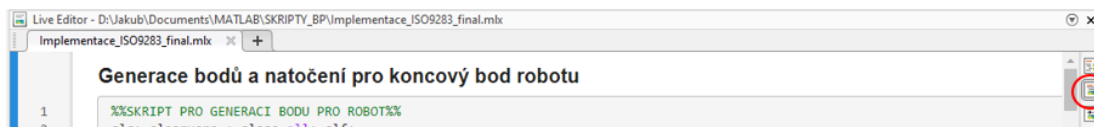
Obrázek 1 - Možné způsoby průchodu bodů.

- Následně se v Command Window zobrazí hláška: “Zadejte polohu x počátku s.s. trackeru v s.s. Robroot [mm]:“ Tato poloha je potřeba určit kalibrační souřadných systémů před měřením, při kterém je zjištěn vztah mezi s.s. laser trackeru a s.s. Robroot. Pro zkoušku programu zadejte libovolné číslo, například 1000 a, potvrďte tlačítkem “Enter“.

- Následně se v Command Window zobrazí hláška: “Zadejte polohu **y** počátku s.s. trackeru v s.s. Robroot [mm]:“ Tato poloha je potřeba určit kalibrační souřadných systémů před měřením, při kterém je zjištěn vztah mezi s.s. laser trackeru a s.s. Robroot. Pro zkoušku programu zadejte libovolné číslo, například 0, a potvrďte tlačítkem “Enter“.
- Následně se v Command Window zobrazí hláška: “Zadejte polohu **z** počátku s.s. trackeru v s.s. Robroot [mm]:“ Tato poloha je potřeba určit kalibrační souřadných systémů před měřením, při kterém je zjištěn vztah mezi s.s. laser trackeru a s.s. Robroot. Pro zkoušku programu zadejte libovolné číslo, například 100, a potvrďte tlačítkem “Enter“.
- Nyní nechte program doběhnout do konce.

4) Práce s výstupy

- Je doporučeno si v rozhraní Matlabu nastavit, aby výstupy daného programu byly pod daným řádkem (částí), kde byla operace realizována. Jak se tohoto nastavení docílí, je na vyznačeno na Obrázek 2 (tlačítko je červeně zakroužkováno).



Obrázek 2 - Vyznačení nastavení Matlab rozhraní.

- Hlášky, které sdělují, zda je rozsah motorů dostačující pro příslušný bod, jsou zobrazeny pod výpočtem daného parametru natočení, například jak je uvedeno na Obrázek 3. Bod, pro který je provedena kontrola, odpovídá bodu, pro který je vykreslen robot (tedy volba parametrem “q“, viz krok 3)

```

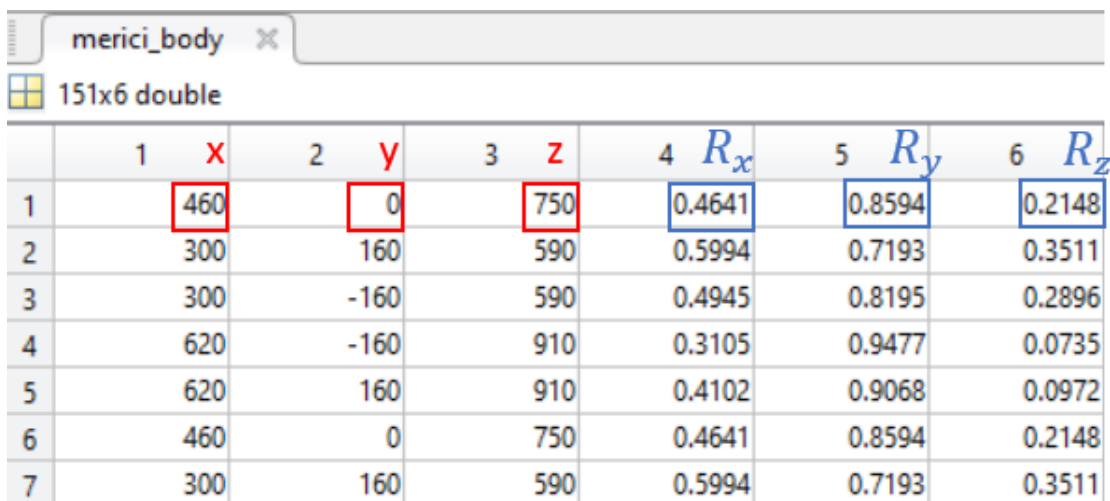
358     %Výpočet úhlu fi_3 (elbow up)%
359
360     fi3 = -pi + acos((-a^2-b^2+l_2^2+l_3^2)/(2*l_2*l_3));
361
362     if (deg2rad(-145)<=fi3)&&(fi3<=deg2rad(145))
363         disp('Rozsah motoru 3 je vyhovující pro tento bod')
364     else
365         disp('Rozsah motoru 3 není vyhovující pro tento bod')
366     end
367
368 end

```

Rozsah motoru 2 je vyhovující pro tento bod
Rozsah motoru 3 je vyhovující pro tento bod

Obrázek 3 - Vyznačení hlášek o kontrole rozsahu.

- Pokud jeden z motorů nebude mít dostatečný rozsah, zobrazí se pod částí programu s inverzní kinematikou hláška: “Bod pro robot není dostupný, je potřeba změnit polohu či velikost krychle.“ Pokud jsou všechna natočení v rozsahu daných motorů, zobrazí se hláška “Bod je pro robot dostupný.“
- Matice měřicích bodů a jim příslušících úhlů natočení se nachází ve Workspace pod názvem “*merici_body*“. Tyto souřadnice budou zadávány do robotu při jeho programování. Program také vytvoří soubor .csv do kterého jsou tyto souřadnice zapsány. Zapsány jsou ve stejném pořadí jako na Obrázek 4, oddělovačem je čárka. Tento soubor se nachází ve složce, kde je uložen program a nese název “*souradnice_pro_robot*“.



	1 X	2 Y	3 Z	4 R_x	5 R_y	6 R_z
1	460	0	750	0.4641	0.8594	0.2148
2	300	160	590	0.5994	0.7193	0.3511
3	300	-160	590	0.4945	0.8195	0.2896
4	620	-160	910	0.3105	0.9477	0.0735
5	620	160	910	0.4102	0.9068	0.0972
6	460	0	750	0.4641	0.8594	0.2148
7	300	160	590	0.5994	0.7193	0.3511

Obrázek 4 - Popis prvků v matici měřicích bodů.

- Zjednodušený model robotu je zobrazen na úplném konci programu. Obrázek je možné zvětšit a s modelem natáčet v prostoru dle libosti.

Příloha 2 – TP2 – vyhodnocená data z měření

Vyhodnocená data – měření 1 – přesnost polohování [mm]

Bod	Měření 1/Csys Align 01	Měření 1/Csys Align 02	Měření 1/Csys Align 03
P1	0.028735	0.025728	0.025275
P2	0.078102	0.085159	0.086023
P3	0.080275	0.08297	0.085463
P4	0.047117	0.046043	0.045033
P5	0.062258	0.056886	0.058686

Vyhodnocená data – měření 2 – přesnost polohování [mm]

Bod	Měření 1/Csys Align 01	Měření 1/Csys Align 02	Měření 1/Csys Align 03
P1	0.03498	0.033373	0.033302
P2	0.074054	0.078892	0.080598
P3	0.074967	0.07642	0.080548
P4	0.041713	0.040694	0.038105
P5	0.059933	0.057201	0.057201

Vyhodnocená data – měření 1 – opakovatelnost polohování [mm]

Bod	Měření 1/Csys Align 01	Měření 1/Csys Align 02	Měření 1/Csys Align 03
P1	0.016194	0.016	0.016
P2	0.023458	0.0091362	0.01256
P3	0.014336	0.020059	0.014361
P4	0.014234	0.01256	0.015953
P5	0.019671	0.023151	0.020973

Vyhodnocená data – měření 2 – opakovatelnost polohování [mm]

Bod	Měření 1/Csys Align 01	Měření 1/Csys Align 02	Měření 1/Csys Align 03
P1	0.010517	0.0093046	0.010517
P2	0.013232	0.018556	0.016999
P3	0.017115	0.019976	0.028347
P4	0.015481	0.015261	0.0095285
P5	0.0095285	0.0080829	0.0080069

Příloha 3 – TP3 – 2D schéma robotu Stäubli TX2-90

