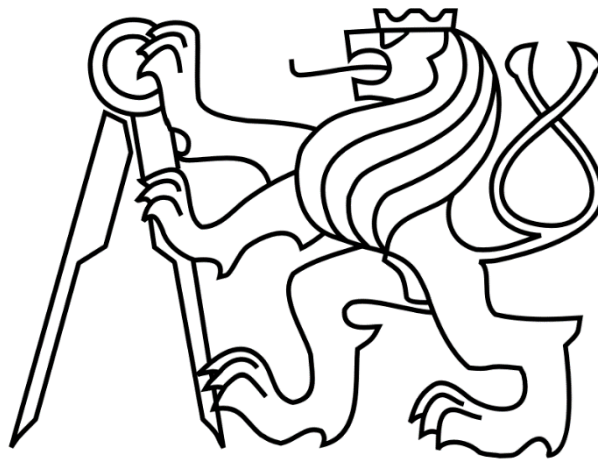


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

Zvýšení přesnosti robotů

2020

Bc. Zarat Ni

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ni** Jméno: **Zarbat** Osobní číslo: **413892**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Průmysl 4.0**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Zvýšení přesnosti robotů**

Název diplomové práce anglicky:

**Robot accuracy improvement**

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Tvorba matematického modelu robotu s modelem chyb (geometrické rozměry, chyby polohování kloubů atd.) a návrh kalibrace robotu v omezeném pracovním prostoru pomocí měření kalibračních bodů; Osnova práce: 1) Rešerše v oblasti přesnosti robotů, způsobu měření a kalibrace, 2) Tvorba matematického modelu robotu s chybami, dopředná i inverzní kinematická úloha, 3) Návrh algoritmu pro výpočet korekce v omezeném pracovním prostoru, 4) Simulační testování; Rozsah grafické části: grafy průběhů chyb v omezeném pracovním prostoru; Rozsah textové části: 60-80 stran;

Seznam doporučené literatury:

ŠIKA, Z. et al. Calibrability as Additional Design Criterion of Parellel Kinematic Machines. Elsevier, 2012, č. 50, s. 48-63. ISSN 0094-114X; STEJSKAL, V. a M. VALÁŠEK. Kinematics and Dynamics of Machinery. New York: Marcel Dekker, 1996. ISBN 0824797310; RAGHAVAN, M. a B. ROTH. Inverse Kinematics of the General 6R Manipulator and Related Linkages. The American Society of Mechanical Engineers, 1993, č. 115, s. 502-08. ISSN 1050-0472;

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

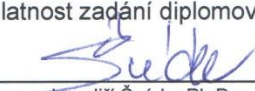
**Ing. Jiří Švéda, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS**

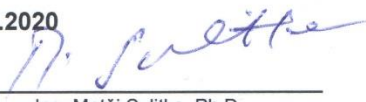
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

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

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2020**

  
Ing. Jiří Švéda, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

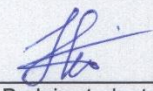
  
Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

  
\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém 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 19.7.2020

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Švédovi, Ph.D. a Ing. Štěpánu Chládkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a pomoc během vypracování celé diplomové práce.

## **Anotace**

Autor:	Bc. Zarbat Ni
Název DP:	Zvýšení přesností robotů
Rozsah práce:	66 str., 40 obr., 18 tab., 2 grafy
Školní rok vyhotovení:	2020
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú 12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Štěpán Chládek, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Zvýšení přesností robotu v omezeném kalibračním prostoru
Klíčová slova:	Průmyslový robot, robot, laser tracker, artefakty, omezený prostor
Anotace:	Diplomová práce se zabývá popisem způsobu kalibrace průmyslového robotu pomocí různých technologií a popisem metodiky pro zvýšení přesností robotu v omezeném pracovním prostoru. Zvýšení přesností robotu v omezeném pracovním prostoru vychází ze změření odchylky bodů v rozích toho prostoru a následné interpolaci odchylek pro polohování robotu v tomto omezeném prostoru. Celý postup byl simulován v prostředí Matlab na vytvořeném simulačním modelu zvoleného robotu. Následně vytvořený algoritmus byl použit na reálných hodnotách měření robotu a laser trackeru.

## **Annotation**

Author:	Bc. Zarbat Ni
Title of master dissertation:	Increasing the accuracy of robots
Extent:	66 p., 40 fig., 18 tab., 2 graphs
Academic year:	2020
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Consultant:	Ing. Štěpán Chládek, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU FME
Application:	Increasing the accuracy of the robot in a limited calibration space
Key words:	Industrial robot, robot, laser tracker, artifacts, limited space
Annotation:	<p>The diploma thesis deals with the description of the method of calibration of an industrial robot using various technologies and the description of the methodology for increasing the accuracy of the robot in a limited working space. The increase in the accuracy of the robot in a limited working space is based on the measurement of the deviation of the points in the corners of that space and the subsequent interpolation of the deviations for the positioning of the robot in this limited space. The whole procedure was simulated in the Matlab environment on the created simulation model of the selected robot. The subsequently created algorithm was used on real values of robot and laser tracker measurements.</p>

## Obsah

1. Úvod.....	11
2. Cíl práce .....	12
3. Kalibrace robotů.....	13
3.1 Kritéria přesnosti a zdroje chyb .....	13
3.1.1 Měřicí systémy .....	13
3.1.2 Matematické principy.....	14
3.2 Proces kalibrace průmyslových robotů .....	14
3.2.1 Modelování .....	14
3.2.2 Měření .....	14
3.2.3 Identifikace.....	14
3.2.4 Validace .....	14
3.3 Technologie pro kalibrace a zvýšení přesností robotů .....	15
3.3.1 Laser tracker.....	15
3.3.2 VX track .....	16
3.3.3 ZIS kalibrační jednotka .....	18
3.3.4 „Aktive target“ od společností API.....	18
3.3.5 Leica T-Mac .....	19
3.3.6 TCP jednotka.....	21
3.3.7 Kalibrace robotu pomocí artefaktu.....	23
3.3.8 Porovnání probraných metodik a technologií pro kalibrace robotu .....	25
4. Kinematický model robotů.....	27
4.1 Denavitův-Hartenbergův princip .....	28
4.2 Dopředná kinematika .....	29
4.3 Inverzní kinematika.....	35
5. Návrh algoritmu pro zvýšení přesnosti robotu.....	41
5.1 Paletka s 8 body .....	41
5.2 Paletka s 4 body .....	46
6. Zpracování reálných hodnot měření.....	52
6.1 Měření pomocí robotu a laser trackeru .....	52
7. Závěr .....	56
Seznam použité literatury.....	57
Seznam obrázků .....	59

Seznam grafu.....	60
Seznam tabulek .....	60
Seznam použitého Software.....	61
Seznam příloh .....	61



## Seznam zkratek

API	Automation Precision Inc.
AP	Accuracy of position
ADM	Absolute Distance Measurement
CIIRC	Czech Institute of Informatics, Robotics and Cybernetics
DH	Denavit Hartenberg
IFM	Interferometr
RP	Repeatability of position
SMR	Retroreflektor
STS	Smart Track senzor
T-Mac	Tracker Machine control senzor
TCP	Tool Center Point

## Použité veličiny

$a_i$	[mm]	Hodnota translace v Denavit-Hartenbergova metodě
$d_i$	[mm]	Parametr translace v DH
$H_i$	[-]	Transformační matice DH mezi systémy $x_i, y_i, z_i$ , a $x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$
$O_i$	[-]	Začátek souřadného systému
$Rot_{(\varphi_x)}$	[-]	Matice rotačního pohybu kolem osy x
$Trans_{(x,y,z)}$	[-]	Matice posuvného pohybu ve směru
$v$	[mm]	Hodnota odchylky v bodě
$v_{qx}$	[mm]	Interpolovaná hodnota v ose X
$v_{qy}$	[mm]	Interpolovaná hodnota v ose Y
$v_{qz}$	[mm]	Interpolovaná hodnota v ose Z
$x_q$	[mm]	Požadovaná hodnota v ose X
$y_q$	[mm]	Požadovaná hodnota v ose Y
$z_q$	[mm]	Požadovaná hodnota v ose Z
$\alpha_i$	[rad]	Hodnota rotace v Denavit-Hartenbergova metodě
$\alpha$	[rad]	Úhel natočení kloubu pro řešení Jointu 2
$\beta_1$	[rad]	První úhel pro řešení Jointu 2
$\beta_2$	[rad]	Druhý úhel pro řešení Jointu 2
$\theta_i$	[rad]	Parametr rotace v Denavit-Hartenbergova metodě
$P_{x,y,z}$	[mm]	Poloha konečného efektoru v ose X, Y, Z
$\varphi$	[rad]	Úhel natočení kloubu pro řešení Jointu 3

## 1. Úvod

Na počátku 60. let byly v USA vytvořeny první průmyslové roboty na světě. Byly schopné pracovat 24 hodin denně a tím pádem nahradily tři směny pracovníků v tvrdé, špinavé a nebezpečné práci. Jejich vývoj od té doby velmi pokročil. Zvýšila se jejich účinnost, rychlost a přesnost polohování. Roboty navíc měly obrovskou výhodu vůči lidské práci, jelikož mohly pracovat ve stísněných prostorech, plynových komorách anebo za podmínek vysoké teploty a tlaku. Již není možné si představit velké výrobní závody bez průmyslových robotů. Počet instalovaných průmyslových robotů v továrnách každoročně roste. Velký důraz je kladen na přesnost polohování robotů, která je nezbytná pro manipulaci s díly o menší velikosti. Ke zvýšení přesnosti robota se používají zařízení ve výrobě, jako jsou kamerové systémy, laser trackery apod. Kromě toho lze optimalizovat přesnost robota ještě ve stadiu vývoje. K tomuto účelu slouží matematické modely, které dovolují zjistit potenciální chyby polohování, aniž by došlo k využití robotů v reálném provozu. V této práci jsou zkoumány způsoby zvýšení přesnosti polohování robota v omezeném pracovním prostoru na základě matematického modelu. Práce je založená na měření kalibračních bodů a následném vyhodnocení odchylek vzniklých v průběhu měření těchto bodů. Na základě vyhodnocených chyb v měřených kalibračních bodech je sestavena kalibrační tabulka, která je následně využita k optimalizaci a zvýšení přesnosti polohování robota uvnitř omezeného prostoru.

## 2. Cíl práce

Cílem této diplomové práce je identifikace přesnosti pracovního prostoru vybraného robota, porovnání různých způsobů, technologie a metod kalibrace a také způsobů zvýšení přesností robotů. Dalším krokem je vytvoření algoritmu, který bude sloužit ke korekce polohy robota v omezeném pracovním prostoru pomocí naměřených kalibračních bodů.

Úkony pro naplnění cíle práce jsou:

- Rešerše v oblasti přesnosti robotů, způsobu měření a kalibrace.
- Vytvoření matematického modelu robota s dopřednou a inverzní kinematikou a následné zavedení chyb do kinematiky robota.
- Návrh algoritmu pro výpočet korekce v omezeném pracovním prostoru.
- Simulační testování.

### 3. Kalibrace robotů

Kalibrace robotů je proces používaný ke zlepšení přesnosti polohování robotů, zejména průmyslových robotů, které jsou vysoce opakovatelné, ale nejsou přesné. Kalibrace robotů se provádí pomocí změn v softwaru bez změn v jeho kinematice. Některé vlivy, například tolerance použitých komponent, přesnost montáže součástí atd, mohou být pomocí kalibrací různým způsobem eliminovány [1].

V závislosti na typu chyby lze kalibraci rozdělit do tří různých úrovní. Kalibrace první úrovně pouze modeluje chyby vyvolané rozdílem skutečných a nominálních hodnot posunutí kloubů. Kalibrace druhé úrovně je známá jako kinematická kalibrace. Tato kalibrace je zaměřená na geometrii robota, která zohledňuje úhlové odchylky a délky kloubů. Třetí úroveň kalibrace anebo nekinematická kalibrace modeluje chyby jiné než geometrické, například jako tuhost a tření. Pro většinu praktických potřeb jsou často dostačující pouze chyby 1. a 2. úrovně kalibrace [2],[3].

Kalibrovaný robot má vyšší absolutní i relativní přesnost polohování ve srovnání s nekalibrovaným robotem. Tedy skutečná poloha koncového efektoru robotu lépe odpovídá poloze vypočtené z matematického modelu. Kromě kalibrace robota se může provádět i kalibrace jeho nástrojů a obrobků pro lepší minimalizaci vznikajících nepřesností a zlepšení bezpečnosti procesů.

#### 3.1 Kritéria přesnosti a zdroje chyb

Mezinárodní norma ISO 9283 stanovuje různá kritéria pro průmyslové roboty a navrhuje zkušební postupy za účelem získání příslušných hodnot jejich parametrů. Nejdůležitějšími a zároveň nejčastěji používanými jsou kritéria přesnosti (AP – Accuracy of Position) a opakovatelnosti pozice (RP – Repeatability of Position). Opakovatelnost je zvláště důležitá, když se robot pohybuje manuálně směrem k pozicím příkazů („Teach-In“). Pokud je program robota generován 3D simulací (off-line programování), je také nezbytná absolutní přesnost.

Pro provedení korekce chyb u robota existuje různé způsoby a technologie jako například: využití měřicích systému, použití matematických principů atd.

##### 3.1.1 Měřicí systémy

Korekce chyb u robotu může být provedená na základě měřicích systémů. Existují různé možnosti pro měření pozice u průmyslových robotů, např. dotyk referenčních částí palet, využití ultrazvukových senzorů vzdálenosti, laserová interferometrie, teodolity, laserové triangulace. Kromě toho existují kamerové systémy, které mohou být připevněny k buňce robota nebo na montážní desce robota a snímají pozice referenčního objektu. Mezi výrobce měřicích a kalibračních systémů patří společnosti jako Bluewrist, Dynalog, RoboDK, FARO Technologies, Creaform, Metris, Metronor, Wiest, Teconsult a Automated Precision Inc. atd.

### 3.1.2 Matematické principy

Korekce chyb může být provedena také analyticky pomocí matematických metod a principů. Pro kinematickou kalibraci musí být vyvinut kompletní kinematický model geometrické struktury, jehož parametry lze poté vypočítat pomocí matematické optimalizace využívající dopředné a inverzní kinematiky robotu. Společné chování systému lze popsat pomocí funkce vektorového modelu vstupních a výstupních vektorů. Pro řešení problémů kinematické optimalizace jsou vhodné numerické metody, například metoda nejmenších čtverců, nebo modifikovaná kvazi-Newtonova metoda. Tento postup poskytuje opravené kinematické parametry pro měřený stroj, které pak mohou být například použity k aktualizaci systémových proměnných v řídicí jednotce robotu.

## 3.2 Proces kalibrace průmyslových robotů

Proces kalibrace průmyslových robotů se skládá ze čtyř hlavních kroků:

### 3.2.1 Modelování

Modelování je v podstatě matematický model, který co nejpřesněji popisuje kinematický model robota. Pro průmyslové roboty se nejčastěji používá Denavitova-Hartenbergova (DH) metoda. Tato metoda je založena na použití homogenních matic představujících transformaci referenčních rámců, které robot spojuje. Kompletní kinematický model by měl zahrnovat kinematické chyby (např. chyby délek ramen, umístění robota v pracovním prostoru). Pomocí modelování je snazší zjistit, kde se nachází největší chyba a jak ji můžeme kalibrovat.

### 3.2.2 Měření

Měření je velmi důležitý krok v procesu kalibrace, protože umožňuje sběr dat, která budou použita při zjištění chyb parametrů. Nejpoužívanější metody zahrnují měření polohy koncového efektoru robota pomocí 3D měřících zařízení, jako je laser tracker (viz Laser tracker) nebo 3D kamerový systém (viz. VX track).

### 3.2.3 Identifikace

Hlavním cílem identifikace je určení chyb parametrů pro robota. V dnešní době existují dva hlavní přístupy: kalibrace dopředné kinematiky a kalibrace inverzní kinematiky. První metoda je kalibrace dopředné kinematiky, která se skládá z identifikace minimalizací zbytkových polohových chyb nebo minimalizací chyb úhlu kloubu. Druhá metoda se nazývá inverzní kalibrace. Tato metoda spočívá v měření a stanovení chyby (chyb) v každém kloubu.

### 3.2.4 Validace

Po identifikaci chyb parametrů jsou tato data posouzena řídicí jednotkou robota za účelem vytvoření simulovaného modelu použitého robotem, který by měl být podobný skutečnému modelu. V důsledku toho by se měla zlepšit přesnost robota. Validace tedy umožňuje potvrzení účinnosti identifikovaných hodnot parametrů robota.

### 3.3 Technologie pro kalibrace a zvýšení přesností robotů

Dnes existuje celá řada různých technologií a technik pro kalibraci a zlepšení přesnosti robota. Tato kapitola se bude zabývat některými nejčastěji používanými technologiemi pro kalibraci a zlepšení přesnosti robotů v průmyslovém prostředí.

#### 3.3.1 Laser tracker

Laser trackery jsou přístroje, které měří přesně velké objekty určováním polohy optických cílů držených proti těmto objektům. Principem měření je konstantní sledování polohy sondy s koutovým odražečem, který je umístěn buď na povrchu měřeného objektu, přímo na konci efektoru nebo na speciální hlavě robota (viz *Obrázek 1*).



*Obrázek 1 Kalibrace robotu pomocí laser trackeru [5]*

Zařízení se využívá samostatně nebo může být využito ve dvojici jako interferometr (IFM – interferometry) a absolutní délkoměr (ADM – Absolute Distance Measurement). Měření lze importovat do různých typů softwarů pro znázornění vykreslených bodů nebo výpočtu odchylky měřených bodů od správné polohy. Sondy jsou známé jako „retroreflektivní“, protože odrážejí laserový paprsek nazpět ve stejném směru, ze kterého pocházely (v tomto případě zpět k laser trackeru). Jeden typ terče, který se běžně používá, se nazývá sféricky namontovaný retroreflektor (SMR – spherically mounter reflectors), nebo ještě známý jako „Corner Cubes“ který se podobá kuličkovému ložisku se zrcadlenými povrchy, které jsou do něj vyříznuty (viz *Obrázek 2*) [5].



Obrázek 2 Zrcadlový odražeč laser trackeru [7]

Přesnost laser trackeru se často udává jako součet konstantní přesnosti a přesnosti vztažené ke vzdálenosti měřeného objektu. Laser tracker má přesnost kolem 0,025 mm na vzdálenost několika metrů, ale tyto parametry se mohou lišit u každého výrobce. Porovnání přesností výrobců laser trackeru jsou vidět v tabulce (viz *Tabulka 1*).

Tabulka 1 Porovnání laser trackeru

Výrobce	Automated Precision Inc.	FARO Technologies	Leica Geosystems AG
Název produktu	Omnitrac2	Ion	AT901
Typ Laseru	ADM	ADM, IFM	ADM, IFM
Přesnost	$\pm 25\mu\text{m}$	$\pm 16\mu\text{m}$	$\pm 15\mu\text{m}$
Měřicí vzdálenost	200 m	55 m	160 m
Hmotnost	11 kg	19,5 kg	22 kg

Inkrementální měření frekvenčně stabilizovaným laserem může být často přerušeno kvůli nestabilitě procesu měření. To bývá označováno jako hlavní nevýhoda u laser trackerů. Pro odstranění tohoto problému se používá princip měření absolutní vzdálenosti ADM (Absolute Distance Measurement), kde se zaměřuje paprsek na konkrétní požadované místo, které je změřeno bez ztráty přesnosti měření.

Laser tracker nachází své uplatnění hlavně v leteckém, těžkém, lodním a stavebním průmyslu, ale nejvíce se používá pro měření velkých dílu.

### 3.3.2 VX track

Kamera dynamického sledování VXtracker (viz *Obrázek 3*), která je klíčovou součástí VXelements, plně integrované 3D softwarové platformy Creaform. VXtracker

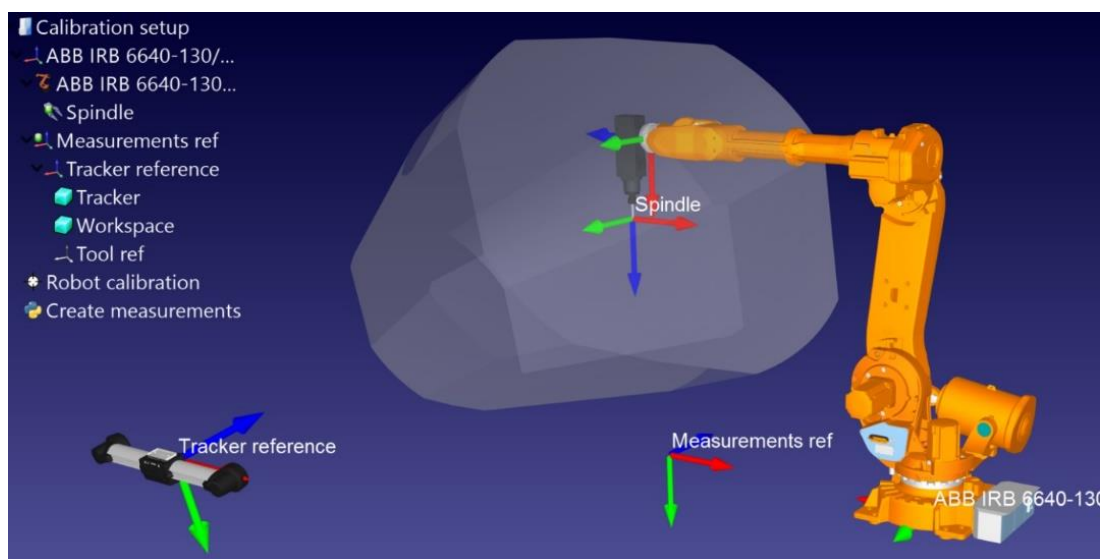


také přichází s C-Track, který společně tvoří kompletní přenosné 3D řešení měření. Pomocí VXtrackeru lze urychlit výrobní procesy a procesy kontroly kvality, kontroly sestavení a monitorování nárazových testů. Přesně a efektivně měří polohu a orientaci reflektorů ve vesmíru; všechna měření lze provádět současně. To umožňuje řídit posuny, procesy sestavování pohonů nebo měřit deformace [8].



Obrázek 3 VX Tracker [8]

Kamera se používá ke kalibraci robota tak, že se na hlavní části robota nastaví zvláštní značky, které kamera následně zaregistruje a sleduje pohyb těchto značek v prostoru. (viz Obrázek 4). Časté aplikace, které se provádí pomocí VXtrackeru: kontrola montáže, sledování deformace, sledování pohybu na běžících částech, dynamické řízení procesu, příprava na havarijní testy, kalibrace a hodnocení na místě, korekce kurzu v reálném čase, počítačové vedení sestav, zachycení pohybu. Spolu s touto kamerou existuje software, který dokáže na základě naměřených dat porovnat rozdíly mezi pohybem skutečného robota a robota simulovaného v programu, a z toho vyhodnotit rozdíl, jak se robot odchyluje v různých směrech a na základě těchto dat provádí korekce pohybu na robotu.



Obrázek 4 Kalibrace robota pomocí VXtrackeru [9]

### 3.3.3 ZIS kalibrační jednotka

Dalším měřicím systémem pro kalibraci robota je ZIS kalibrační jednotka (viz *Obrázek 5*), která může kalibrovat nejen přístroj robota ale zároveň i celého robota. Tato jednotka je velmi pohodlná pro kalibrace robotů s malými pracovními prostory robotů, protože je bezdrátová a funguje skrze připojení přes WiFi k počítači, který je připojen ke kontroléru robota.

Kalibrace se provádí umístěním speciální sondy na hlavu robota, poté robot přejede na speciální joystick, ke kterému se připojí skrze sondu. Pomocí pomalého nájezdu do různých směrů os jsou zaznamenávány hodnoty odchylek v pohybu robota pomocí speciálního softwaru „RoboCal“. Po ukončení pohybu software vyhodnotí odchylky a dále využívá již zkalibrovaný pohyb robota. Výhody měření pomocí této jednotky jsou: vysoká přesnost ( $<0,1$  mm), rychlá a snadná aplikace, napájení z baterie, záznam naměřených hodnot pro analýzu a protokolování. Software „RoboCal“ umožňuje záznam, vizualizace a analýzu naměřených hodnot, export naměřených hodnot ve formátu dxf, snadné a postupné uživatelské vedení pro kalibrace [10].



*Obrázek 5 ZIS kalibrační jednotka [10]*

### 3.3.4 „Aktivní target“ od společností API

API (Automated Precision Inc.) je společnost, která vyrábí novou generaci sférického namontovaného retroreflektoru, která se nazývá „aktivní target“ nebo „aktivní cíl“ (viz *Obrázek 6*). Tato „aktivní target“ je instalována přímo na zápěstí robota. Ze stacionárního laseru trackeru je vyslán laserový paprsek, který přímo zasáhne „aktivní target“ a neumožní ztratit laserový paprsek. Tato technologie umožňuje automatizované měření

na obráběcích strojích, robotech nebo jiných pohyblivých objektech. Pomocí „aktive target“ robot bude zkalibrován mnohem rychleji než u běžného laser trackeru [11].



Obrázek 6 „Aktive target“ společnosti API [11]

Smart TRACK Sensor (STS) ve spojení s Radian Laser Tracker sníží nepřesnosti a poskytne údaje o výkonu během robotické kalibrace. Tento systém umožňuje produkovat přesná měření a dobrou opakovatelnost ve výrobních úlohách [11].

### 3.3.5 Leica T-Mac

Leica T-Mac (Tracker-Machine control sensor) je zařízení nové generace navržené speciálně pro laser tracker Leica AT 901 a je senzorem, který má šest stupňů volnosti. Existuje několik různých prototypů zařízení, které bude vhodné pro speciální případy a v závislosti na technologii měření (viz *Obrázek 7*). Některé prototypy těchto sond mají více než 2 infradiody a více než 1 místo pro odraz laserového paprsku pro přesnější měření a sledování konečného efektoru v prostoru (viz *Obrázek 7*). Toto zařízení je navrženo k řešení konkrétních úkolů předem, protože je snadno přizpůsobitelné v závislosti na provedené práci. T-Mac je speciálně navržen pro pohodlné připevnění k průmyslovým robotům, strojům nebo částem struktur a díky technologii automatického snímání cíle PowerLock, kterou je laserový sledovač AT901 vybaven, lze polohu a orientaci T-Mac v prostoru přesně sledovat až 0,006 mm [12].



Obrázek 7 Leica T-Mac[13]

Jakýkoli prostorový pohyb objektu, na kterém je tento senzor namontován, je sledován a řízen sledovačem (laser trackerem), který umožňuje automatizovat rozsáhlé operace, které dříve musely být prováděny ručně. Umístění zařízení na průmyslovém robotu vypadá následujícím způsobem, kde je vidět 2 infradiody a 1 místo pro zásah laserového paprsku (viz Obrázek 8).



Obrázek 8 Zařízení T-Mac [12]

Leica T-Mac dokáže dokonale pracovat až do vzdálenosti 30 metrů a jeho rychlost měření je 1000 bodů za sekundu. Zároveň kalibrace robota může být provedena nejenom pomocí laserového sledovače, ale i pomocí speciálních infra-diod které jsou umístěné na

tomto zařízení [12]. Dvě infradiody registrují polohu zařízení, které je připevněno k efektoru robota, v prostoru. I když toto zařízení společně s laserovým sledovačem je použito pro korekci robota v průběhu obrábění, jak je to ukázáno na stránkách výrobce, existuje velká pravděpodobnost, že laserový sledovač společně se zařízením T-Mac bude mít nepřesnost kvůli vznikajícím třískám v průběhu obrábění. Kalibrace a kontrola robota se provádí pomocí speciálního softwaru RoboDyn. Tento software může vypočítat vyrovnání základny robota a posunutí středu nástroje a také přímo korigovat a kompenzovat jeho parametry. Software je vytvořen tak, že splňuje požadavky normy ISO 9283 a může garantovat přesnost a spolehlivost automatizovaných operací.

### 3.3.6 TCP jednotka

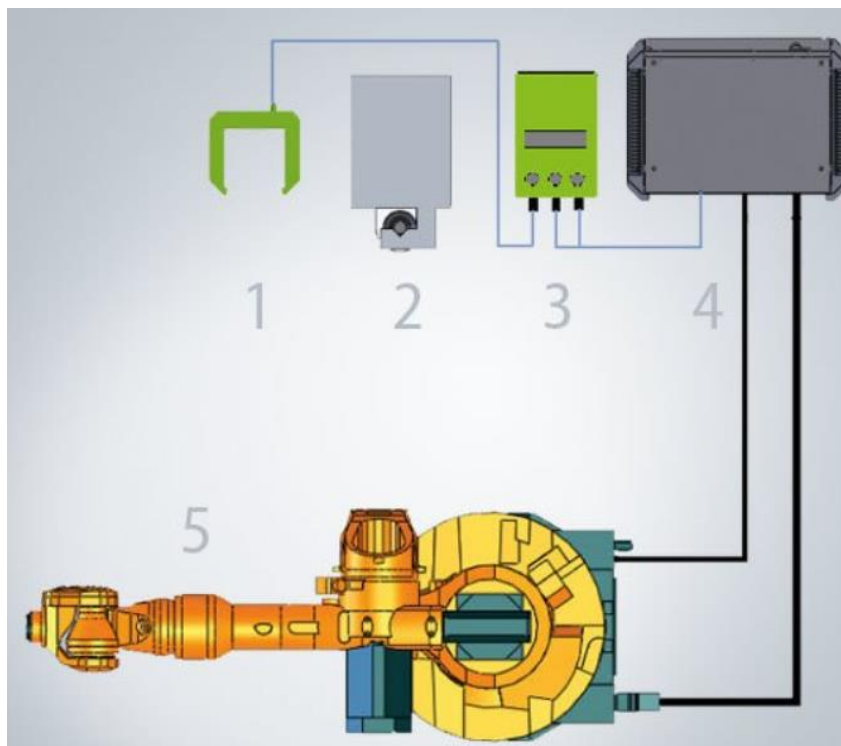
Kalibrační systém TCP (Tool Center Point) (viz *Obrázek 9*) kalibruje nástroj až do šesti rozměrů. Kalibrace konce ramene a kalibrace středu nástroje je kritickým aspektem úspěšného provedení jakékoliv činnosti robota, například pro svařovací, laserové, uchopovací a podobné aplikace, kde je vyžadována vysoká přesnost. Kalibrace nástroje, v daném případě svařovacích kleště (viz *Obrázek 11*), probíhá najížděním nástroje na speciální bod v prostoru. Tato kalibrace nástroje robota probíhala pomocí najíždění robotickým nástrojem na určitý bod v pracovním prostoru robota a probíhalo registrování různých poloh nástroje kolem těchto bodů (6-8 poloh), ze kterých pak řídicí jednotka robota vyhodnocovala odchylku v přesnosti robotického nástroje. Ukázka schematického zapojení TCP jednotky a robota, kde číslo 1 je TCP senzor, 2- čistič, 3 – TCP kontrolér, 4- kontrolér robota a 5- robot (viz *Obrázek 10*).



*Obrázek 9 TCP jednotka [15]*

Snímání na konci ramene se v rámci robotického svařování používá k detekci skutečné polohy švu na obrobku vzhledem k rámu robotického nástroje. Program robota je automaticky korigován změřenými změnami a zajišťuje, aby nástroj pracoval ve správné poloze.

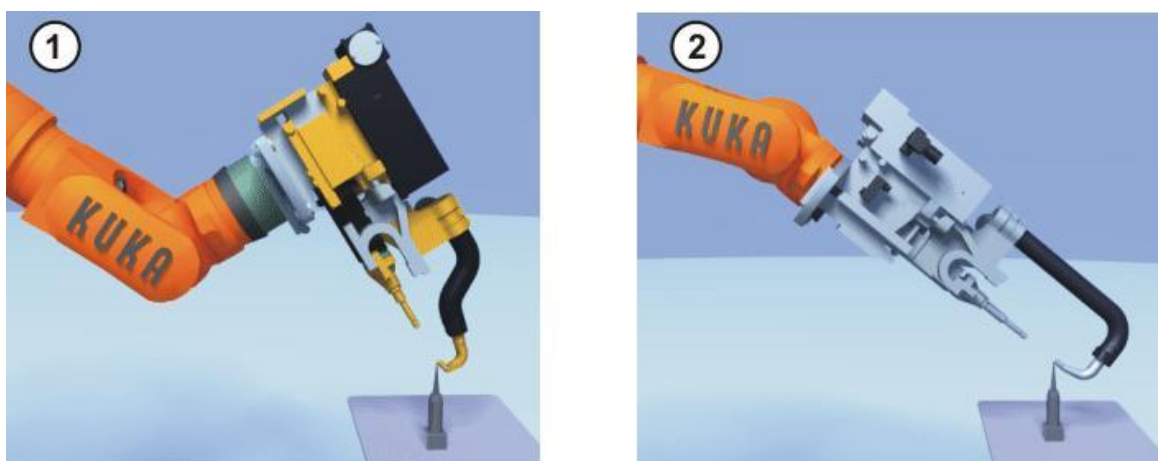




Obrázek 10 Schematická ukázka zapojení TCP jednotky [16]

TCP je přesný kalibrační systém, který lze použít pro všechny typy robotů a většinu robotických nástrojů, díky čemuž je nezávislý na konkrétních výrobcích. Existuje možnost vytvoření systému z několika TCP jednotek v pracovním prostoru robota, pomocí kterého může být provedena korekce nejen nástroje robota, ale i korekce celého robota. Další výhody použití TCP jednotek jsou:

- Automatický absolutní výpočet robotických nástrojů a přípravků.
- Automatické uvedení do provozu a snadné použití.
- Zjednodušená integrace do výrobní linky díky malým rozměrům.
- Různé velikosti senzorů.
- Systém s více senzory (možnost připojení dalších senzorů).
- Připojení kalibračního systému k řídicí jednotce robota, tj. Kalibrační procedura probíhá ve vyhodnocovací jednotce a přenáší korekční hodnoty do řídicí jednotky robota.

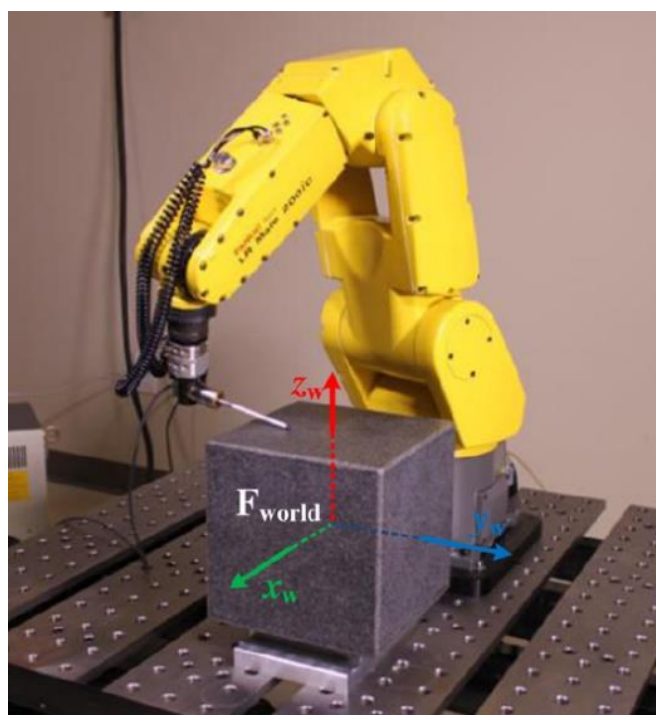


Obrázek 11 Kalibrace svařovacích kleští robota [17]

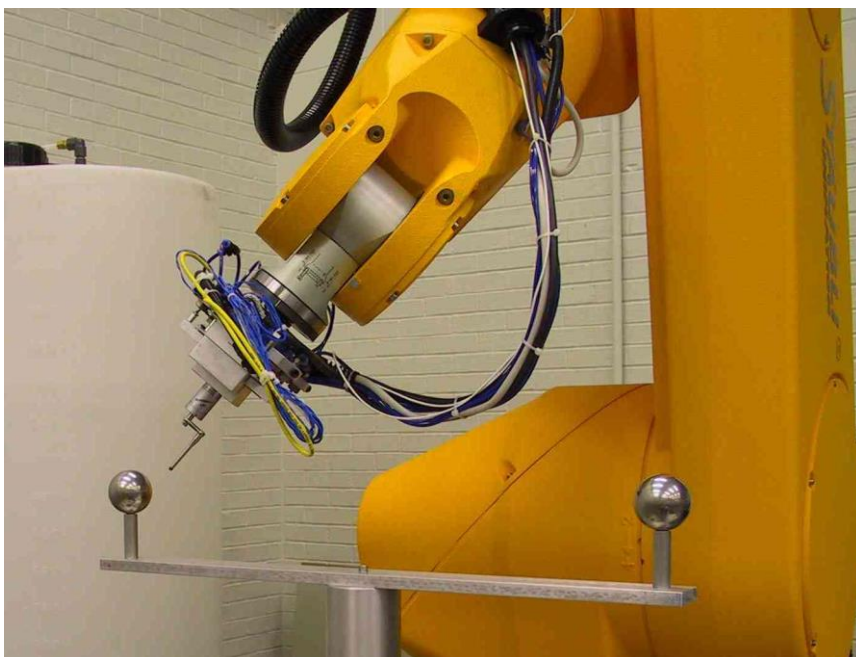
### 3.3.7 Kalibrace robotu pomoci artefaktu

Dalším způsobem kalibrace robotu je kalibrace pomoci artefaktů nebo referenčních bodů, které jsou umístěné v pracovním prostoru robota. Artefaktem nebo referenčním bodem může být granitový čtverec [18] (viz *Obrázek 12*) nebo speciální kalibrační koule [19] (viz *Obrázek 13*).

Kalibrace robotu pomoci artefaktu může probíhat buď kontaktně nebo bezkontaktně. Kontaktní kalibrace robotu pomoci artefaktů probíhá tak, že robot s umístěnou dotykovou sondou na konečném efektoru, například od společnosti Renishow, najíždí na referenční body a snímá naměřené hodnoty (viz *Obrázek 12*). Následně z naměřených hodnot může být provedena korekce přesnosti robota.



Obrázek 12 Kalibrace pomoci granitového čtverce [18]



Obrázek 13 Kalibrační koule pro kalibrace robotu [19]

Bezkontaktní způsob kalibrace robotu pomocí artefaktu může probíhat pomocí bezkontaktní IBS Trinity sondy od společnosti IBS. Tato sonda je umístěna na konečném efektoru robotu, která při najíždění na kalibrační kuličku bude vyhodnocovat pozice X, Y, Z této kuličky. IBS Trinity sonda umožňuje provádět analýzu lineárních os stroje, analýzu rotačních os stroje a inspekci pozicování (viz *Obrázek 14*). Samotná sonda a její specifikace jsou na dalším obrázku (viz *Obrázek 15*).



Obrázek 14 IBS Trinity [20]





<b>Measuring range</b>	3,50 mm
<b>Resolution</b>	0,2 $\mu$ m
<b>Sampling rate</b>	2 kHz
<b>Measuring uncertainty</b>	U1 < 1,0 $\mu$ m (within 1 mm range)
<b>Power consumption</b>	> 24 hrs mixed operation
	1,3 W (=17 hrs) when measuring
	0,52 W (=42 hrs) when in sleep mode
<b>Wireless details PSK</b>	2,4 GHz frequency, 802.11b/g/n standard, WPA2 - security
<b>Probe mounting shaft</b>	$\varnothing$ = 16 mm
<b>Dimensions</b>	<b>Length:</b> 135 mm; <b>Diameter:</b> 80 mm; <b>Weight:</b> 770 grams

Obrázek 15 IBS Trinity sonda a její specifikace [20]

### 3.3.8 Porovnání probraných metodik a technologií pro kalibrace robotu

Celkem v této diplomové práci bylo probráno 7 technologií provedení kalibrace robotů. Práce také obsahuje porovnání daných technologií a jejich hlavní výhody a nevýhody při použití (viz *Tabulka 2*). Při srovnání všech probraných technologií lze říct, že některé technologie jsou lepší ve speciálních případech použití, zatímco jiné technologie nejsou vhodné pro použití při stejných technologických podmínkách.

Závěrem se da říci, že v dnešní době je pro kalibrace nejpoužívanější aplikace s laser trackerem. Většina těchto způsobů kalibrace jsou vhodné pro konkrétní případy a závisí na požadavcích pro konkrétní úlohu. Například vzhledem k tomu, že Leica T-mac, používá pro kalibrace robotů nejen laser tracker ale i speciální infradiody, které umožňují sledování orientace konečného efektoru v prostoru, jeví se jako vhodnější než obyčejná kalibrace pomocí laser trackeru. Pomocí ZIS jednotky bude kalibrace robotů přesnější, ale na úkor nižší přesnosti kalibrace. Pomocí VX trackeru lze také kalibrovat

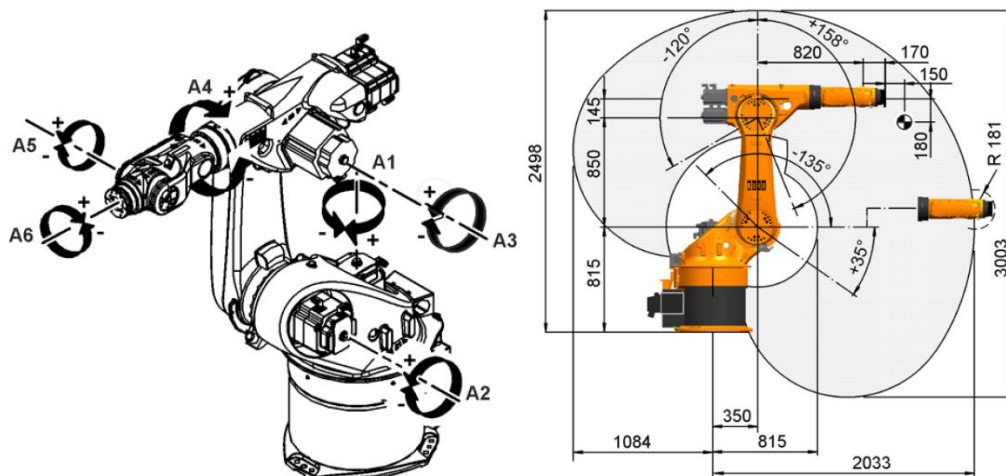
robotu a zároveň lze i sledovat pohyb robota v 3D prostoru. Použitím Aktive target může být kalibrace urychlena oproti metodě s obyčejným laser trackerem, ale také může vzniknout problém kvůli váze senzoru umístěného na konečném efektoru robota. Pomocí TCP jednotky lze kalibrovat nástroj robota (např. svařovací kleště) a i celého robota, ale je pro to potřebný větší počet senzorů. IBS Trinity dává vysokou přesnost, ale musí být použita při malé vzdálenosti od kalibračního artefaktu. V této diplomové práci bude provedena kalibrace pomocí artefaktu typu kuliček, které budou umístěné v rozích navržených palet. Pro první paletku s 8 body je uvažován laser tracker, pro paletku se 4 body IBS Trinity sonda. Detailnější popis měření pomocí kalibračních bodů je v další kapitole (viz 5. Návrh algoritmu pro zvýšení přesnosti robotu). Veškeré měření referenčních bodů a simulace bude probíhat v prostředí Matlab.

*Tabulka 2 Porovnání technologie*

<b>Technologie</b>	<b>Přesnost</b>	<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
Laser Tracker	$\pm 0.015 - 0.025$ mm	Vzdálenost	Vliv technologie
VXtracker	$\pm 0.075$ mm	Snímání pohybu	Nízká přesnost
ZIS	$< 0.1$ mm	Rychlá kalibrace	Nízká přesnost
Aktive target	$\pm 0.012$ mm	Přesný	Váha snímače
Leica T-mac	$\pm 0.006$	Orientace v prostoru	Správná technologie
TCP	0.02 mm	kalibrace nástrojů	Potřeba více senzorů
IBS Trinity	0.002 mm	Přesnost	Malý dosah až 3,50mm

## 4. Kinematický model robotů

V této diplomové práci pro provedení výpočetní a testovací části bude použit robot KUKA KR60-3 (viz *Obrázek 16*). Pomocí rozměrů a charakteristik tohoto robotu bude provedena praktická část diplomové práce. Součástí praktické části bude vytvoření dopředné a inverzní kinematiky robota, následné zavedení chyb do dopředné kinematiky robota a provedení analýzy přesnosti robota s následným napsáním algoritmu pro kompenzace chyb zavedených do robota.



Obrázek 16 Model robota KUKA KR60-3 [21]

Při řešení otevřených kinematických řetězců se rozlišují dva základní způsoby pro popis kinematiky robota: přímá úloha kinematiky a inverzní úloha kinematiky.

Roboty mají buď translační nebo rotační klouby. Translace posouvá bod po konečné vzdálenosti podél daného vektoru. Tento pohyb může být popsán pomocí následující homogenní transformační matice [22]:

$$Trans_{(x,y,z)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Homogenní transformační matice také popisuje rotační posun.

Transformační matice pro rotační pohyb kolem osy  $x$  je znázorněna v rovnici číslo 4.2, natočení je pro tuto transformační matici  $\varphi_x$ .

$$Rot_{(\varphi_x)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_x) & -\sin(\varphi_x) & 0 \\ 0 & \sin(\varphi_x) & \cos(\varphi_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Transformační matice pro rotační pohyb kolem osy  $y$  je znázorněna v rovnici číslo 4.3, natočení je pro tuto transformační matice  $\varphi_y$ .

$$Rot_{(\varphi_y)} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_y) & 0 & \sin(\varphi_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_y) & 0 & \cos(\varphi_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Transformační matice pro rotační pohyb kolem osy  $\mathbf{z}$  je znázorněna v rovnici číslo 4.4, natočení je pro tuto transformační matice  $\varphi_z$ .

$$Rot_{(\varphi_z)} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_z) & -\sin(\varphi_z) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_z) & \cos(\varphi_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Kinematická analýza robota zahrnuje hlavně dva aspekty, a to dopřednou kinematickou analýzu a inverzní kinematickou analýzu.

#### 4.1 Denavitův-Hartenbergův princip

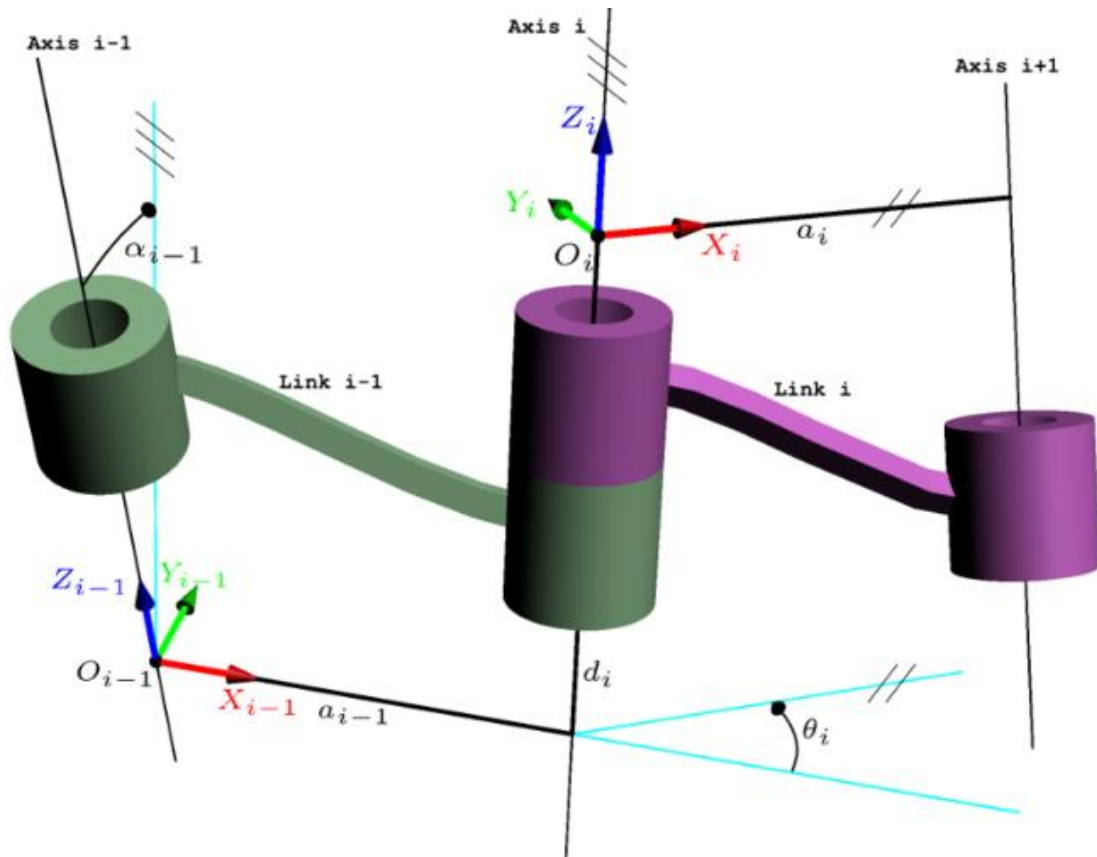
Pro popis rotačních a translačních spojení mezi sousedními spoji Denavit a Hartenberg navrhli maticovou metodu pro postupné konstruování souřadnicových systémů spojených s každým spojem v kinematickém řetězci (viz *Obrázek 17*). Cílem Denavit-Hartenbergova principu je vytvořit homogenní transformační matici mající rozměr  $4 \times 4$ , popisující polohu souřadnicového systému každé vazby vzhledem k souřadnému systému předchozí vazby. To umožňuje postupně převádět souřadnice úchopu manipulátoru z referenčního systému spojeného s posledním odkazem na základní referenční systém, což je setrvačný souřadný systém pro uvažovaný dynamický systém [23].

Následující čtyři transformační parametry jsou známy jako parametry DH:

- $d_i$  - vzdálenost mezi body  $O_i'$  a  $O_i$
- $a_i$  - vzdálenost mezi body  $O_i$  a  $O_{i+1}$
- $\alpha_i$  - úhel mezi osami  $z_i$  a  $z_{i-1}$  kolem  $x_{i-1}$
- $\theta_i$  - úhel mezi osami  $x_i$  a  $x_{i-1}$  kolem  $z_i$

Po sestavení souřadnic DH par pro všechny vazby je možné zkonstruovat homogenní transformační matice spojující systémy  $i$  a  $(i-1)$ . Tato matice je vytvořena pomocí rotace kolem osy  $z_i$  s úhlem  $\theta_i$ , s posuvem v ose  $z_i$  na vzdálenost  $d_i$ , následně posuvem v ose  $x_{i+1}$  na vzdálenost  $a_i$  a rotaci kolem osy  $x_{i+1}$  o úhel  $\alpha_i$ . Konečnou transformační matice lze vyjádřit pomocí vynásobení matic základních pohybů kolem os jako:

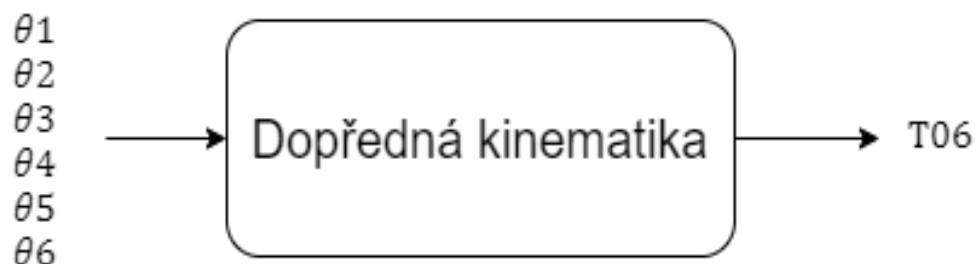
$$H_i^{i+1} = Rot_{(z,\theta_i)} \cdot Trans_{(z,d_i)} \cdot Trans_{(x,a_i)} \cdot Rot_{(x,\alpha_i)} \quad (4.5)$$



Obrázek 17 DH zavedení souřadných systémů [24]

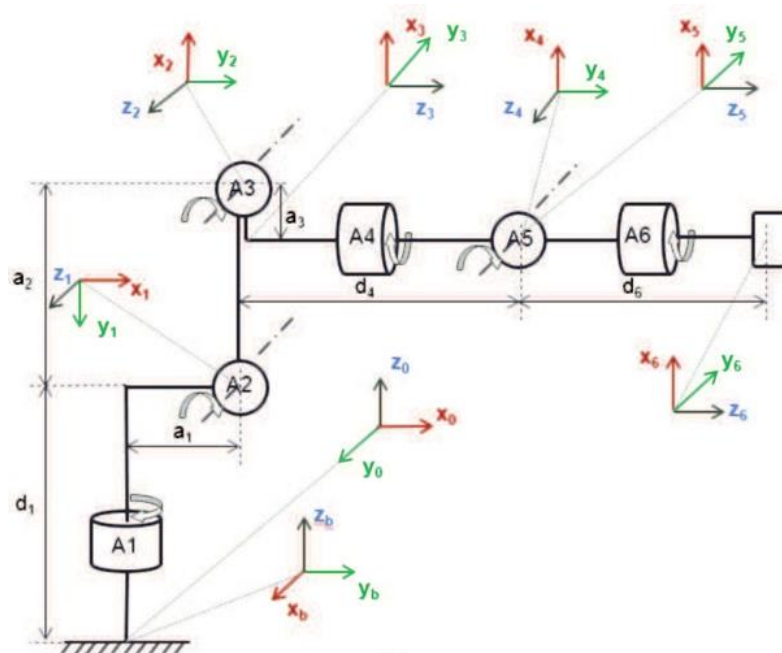
## 4.2 Dopředná kinematika

V této diplomové práci v rámci praktické části bude provedeno napsání kódů a vytvoření jednoduchého modelu robotu v softwaru Matlab pro dopřednou a inverzní kinematiku zvoleného šestiosého robotu KUKA KR60-3. Prvním krokem je rozepsání dopředné kinematiky robotu pomocí Denavit-Hartenbergova kritéria a potřebných rozměrů a parametrů (viz *Tabulka 3*), zadání těchto hodnot do prostředí Matlab a vytvoření jednoduchého modelu robotu. Pomocí dopředné kinematiky můžeme zjistit polohu a orientaci konečného efektoru robotu v prostoru (viz *Obrázek 18*) [24].



Obrázek 18 Dopředná kinematika

Obrázek 19 znázorňuje, jak vypadá kloubový diagram.



Obrázek 19. Klouby robota se souřadnicovými systémy podle DH [24]

Klouby robota jsou označeny jako A1-A6, délky spojů jako  $a_i$  a  $d_i$ . Tečkované čáry označují umístění souřadných os. Šipky označují kladný směr otáčení. Je vidět, že první tři klouby tvoří loketní manipulátor a poslední tři klouby jsou složeny do sférického zápěstí. Každému spoji je přiřazena pravostranná souřadná osa tak, že  $z_i$  vektor je rovnoběžný s osou otáčení a  $x_i$  vektor je kolmý na  $z_i$  a  $z_{i-1}$ . DH parametry jsou dány transformacemi ze souřadnicového systému  $i$  na  $i + 1$  prostřednictvím rotačních a translačních transformací (viz *Tabulka 3*) a kde jsou vidět jednotlivé rozměry ramen robota (viz *Obrázek 16*). Pomocí rovnic je postupně napsána dopředná kinematika zvoleného robota KUKA KR60-3.

Tabulka 3 DH parametry pro KUKA KR60-3

n	$\theta_i$ [rad]	$\alpha_i$ [rad]	$d_i$ [mm]	$a_i$ [mm]
1	$\theta_1$	$\pi/2$	815	350
2	$\pi/2 + \theta_2$	0	0	850
3	$\theta_3$	$\pi/2$	0	0
4	$\theta_4$	$-\pi/2$	820	0
5	$\theta_5$	$\pi/2$	0	0
6	$\theta_6$	0	170	0

$$H_i^{i+1} = Rot_{(z,q_i)} \cdot Trans_{(z,d_i)} \cdot Trans_{(x,a_i)} \cdot Rot_{(x,\alpha_i)} \quad (4.6)$$

$Rot_{(z,q_i)}$  znamená rotaci  $q_i$  kolem osy  $z$ ,  $Rot_{(x,\alpha_i)}$  znamená rotaci  $\alpha_i$  kolem osy  $x$  a  $Trans_{(z,d_i)}$  označuje přemístění  $d_i$  podél osy  $z$ ,  $Trans_{(x,a_i)}$  označuje přemístění  $a_i$

podél osy x. Pak je homogenní transformace ze základního souřadnicového systému na koncový efektor dána vynásobením transformace v pořadí:

$$\begin{aligned}
 H_0^1 &= Rot_{(z,\theta_1)} \cdot Trans_{(a_1,0,d_1)} \cdot Rot_{(x,-90)} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & a_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & a_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_1^2 &= Rot_{(z,\theta_2)} \cdot Trans_{(a_2,0,0)} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_2^3 &= Rot_{(z,\theta_3-90)} \cdot Trans_{(-a_3,0,0)} \cdot Rot_{(x,-90)} = \\
 &= \begin{bmatrix} \sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) & a_3 \sin(\theta_3) \\ -\cos(\theta_3) & 0 & \sin(\theta_3) & a_3 \cos(\theta_3) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_3^4 &= Rot_{(z,\theta_4)} \cdot Trans_{(0,0,d_4)} \cdot Rot_{(x,90)} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \cos(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & 0 & -\cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_4^5 &= Rot_{(z,\theta_5)} \cdot Rot_{(x,-90)} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & -\sin(\theta_5) & 0 \\ \sin(\theta_5) & 0 & \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_5^6 &= Rot_{(z,\theta_6)} \cdot Trans_{(0,0,d_6)} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_0^6 &= H_0^1 \cdot H_1^2 \cdot H_2^3 \cdot H_3^4 \cdot H_4^5 \cdot H_5^6 = \\
 &= \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

kde  $l$ ,  $m$ ,  $n$  jsou ortonormální vektory a představují orientaci,  $p$  je vektor, který představuje polohu.

Poloha a orientace koncového efektoru v zobrazení roll-pitch-yaw jsou následující:

$$P_0^6 = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$pitch = \text{Atan2} \left( n_x, \sqrt{n_y^2 + n_z^2} \right) \quad (4.15)$$

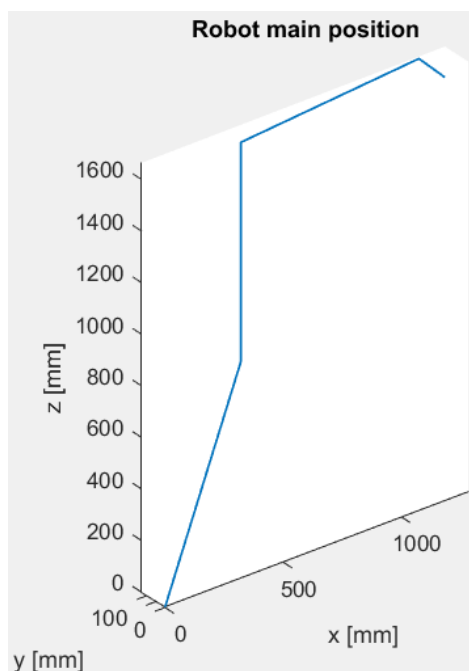
$$roll = \begin{cases} 0 & pitch = \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \\ \text{Atan2} \left( -\frac{n_y}{\cos(pitch)}, \frac{n_z}{\cos(pitch)} \right) & \text{o.w} \end{cases} \quad (4.16)$$

$$yaw = \begin{cases} \text{Atan2}(m_z, m_y) & pitch = \frac{\pi}{2} \\ -\text{Atan2}(m_z, m_y) & pitch = -\frac{\pi}{2} \\ \text{Atan2} \left( -\frac{m_x}{\cos(pitch)}, \frac{l_x}{\cos(pitch)} \right) & \text{o.w} \end{cases} \quad (4.17)$$

Použitím všech uvedených rovnic byl vytvořen matematický model zvoleného robota KUKA KR60-3. Uvedením daných nominálních rozměrů byla vytvořena dopředná kinematika robota a následně byly zavedeny chyby do kinematiky robota.

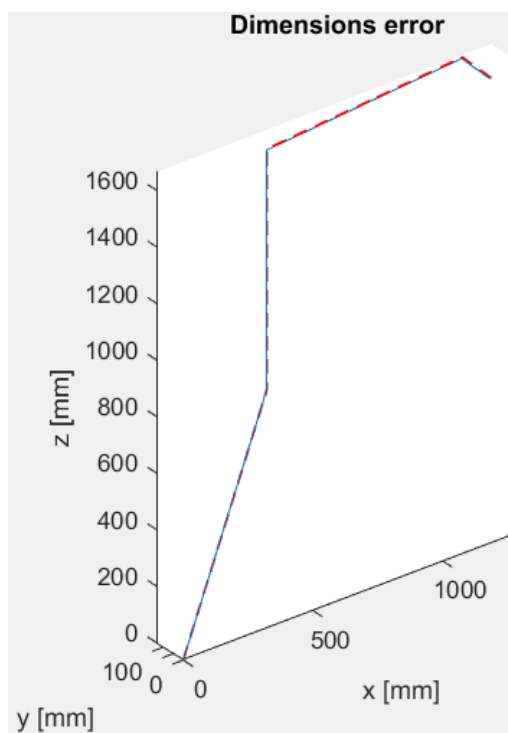
Vytvořený model robota z nominálních rozměrů robota je vidět na obrázku (viz *Obrázek 20*), které jsou k dispozici na webových stránkách výrobce [21].





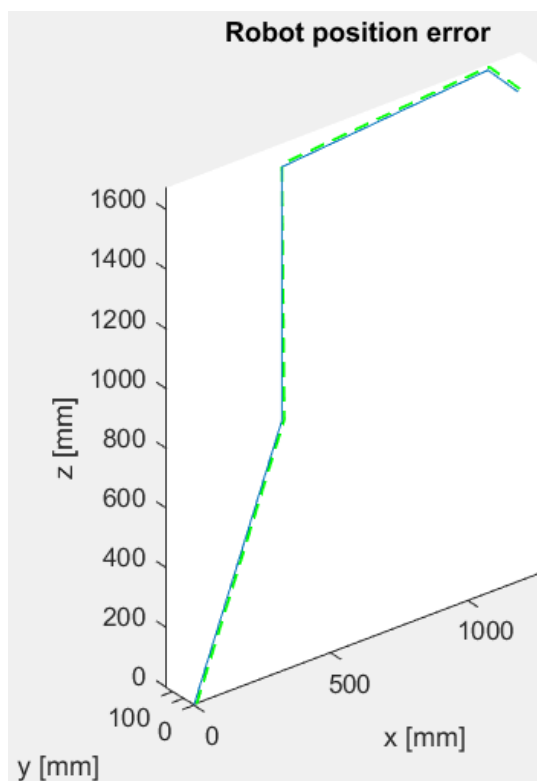
Obrázek 20 Model robotu z nominálních rozměrů

Následujícím krokem bylo zavedení chyb do dopředné kinematiky robotu. První zavedenou chybou je chyba rozměrů robotu. Na dalším obrázku je vidět model nominálního robotu (modrá barva) a model robotu s chybnými rozměry ramen robotu (červená čárkovaná čára) (viz Obrázek 21). Z tohoto obrázku je vidět že konečný efektor robotu se posunul.



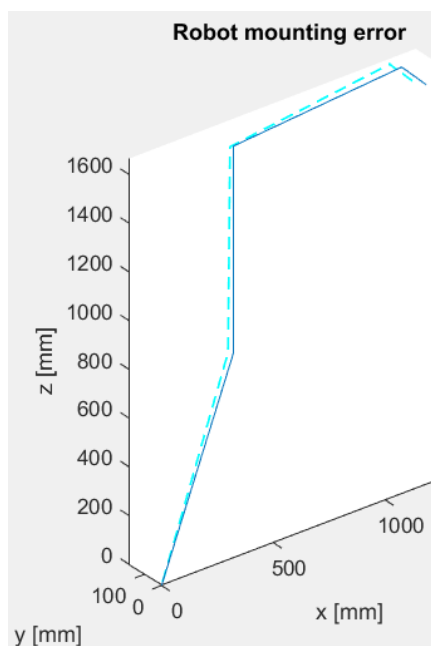
Obrázek 21 Chyba rozměrů ramen robotu

Druhou zavedenou chybou je chyba natočení kloubu robota, která vychází z předpokladu, že robot chybně natočil jednotlivé klouby svých ramen (viz *Obrázek 22*) nominální model robota je označen modrou barvou a zachybovaný robot zelenou čárkovanou čarou.



*Obrázek 22 Chyba natočení kloubu robota*

Třetí chybou je špatné umístění nebo přimontování robota v pracovním prostoru. (to může být ovlivněno špatným upevněním nebo přimontováním robota k podlaze – po prvním pohybu robot změnil svou polohu o desetinu milimetru). Tato chyba je znázorněna na obrázku (viz *Obrázek 23*), kde je zachybovaný robot vyznačen čárkovanou čarou.

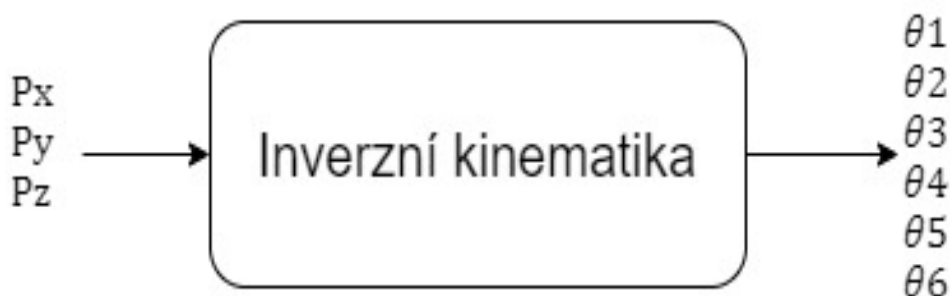


Obrázek 23 Chyba umístění robota v pracovním prostoru

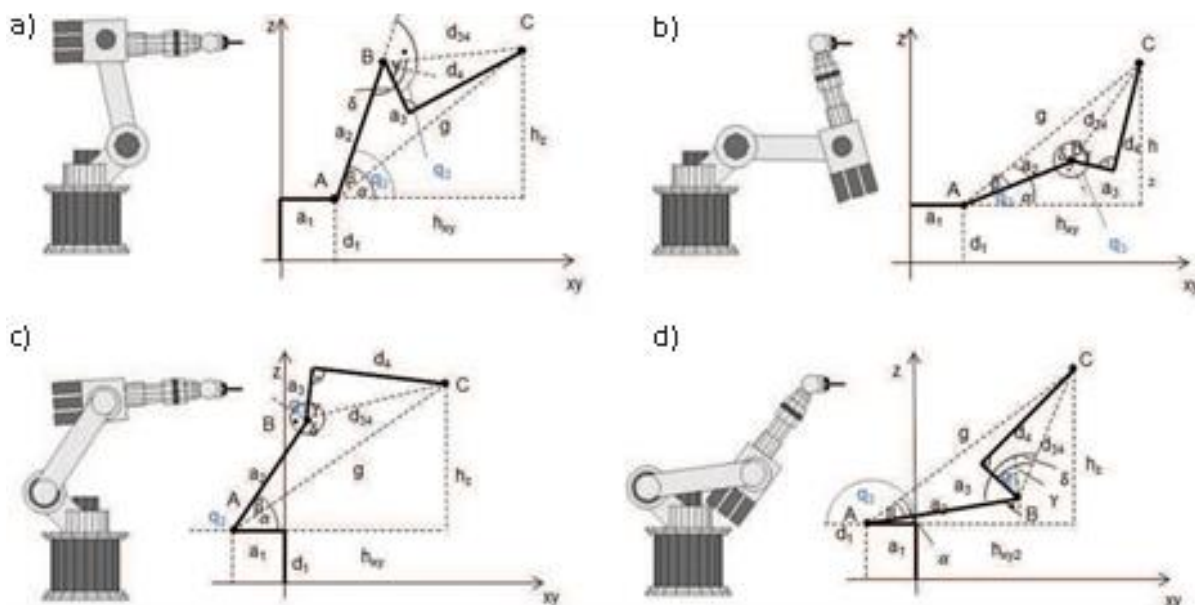
### 4.3 Inverzní kinematika

Inverzní kinematická úloha manipulátoru spočívá v nalezení společných úhlů pomocí polohy a orientace koncového efektoru robota (viz *Obrázek 24*). Inverzní kinematická úloha sériového manipulátoru je důležitější než dopředná kinematická úloha, protože je nezbytné přesunout chapadlo robota do požadované polohy s definovanou orientací, aby například mohl chytit objekt v této poloze a orientaci.

Existují dva přístupy k řešení problému inverzní kinematiky robotického manipulátoru: matematické nebo geometrické. Vyšší stupně volnosti vyžadují složitější algebraické řešení. Složitost řešení inverzní kinematiky spočívá v tom, že řešení inverzní kinematiky nebývá jednoznačné, protože robot se může dostat do požadované polohy různými způsoby. *Obrázek 25* znázorňuje příklad toho, jak se robot může dostat do požadované polohy pomocí různých konfigurací. V této kapitole jsou provedeny výpočty inverzní kinematiky pomocí geometrického přístupu.



Obrázek 24 Inverzní kinematika

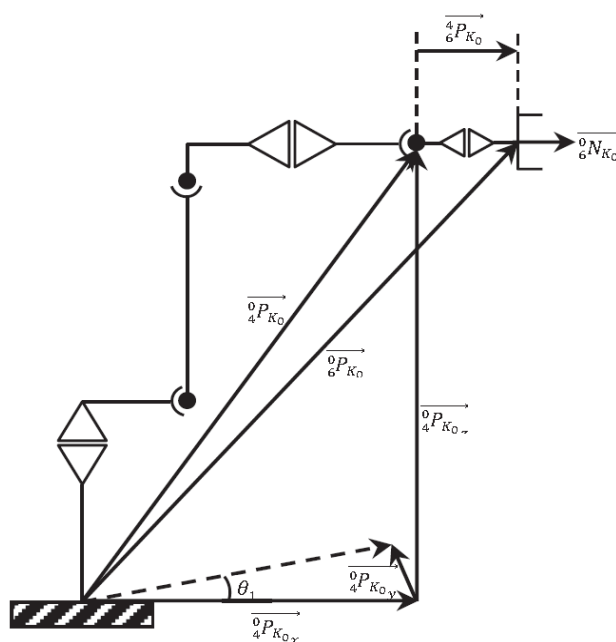


Obrázek 25 Různé konfigurace robota pro dosažení požadované polohy [24]

V rámci geometrické metody vektory popisují stav robota směřujícího k vyřešení, kterým je výpočet společných úhlů robota. Tato část je rozdělena do pěti podsekcí, které ilustrují výpočetní metodu společného úhlu.

#### Joint 1.

Výpočet prvního úhlu kloubu (viz Obrázek 26), se provádí promítáním vektoru, který pochází od počátku rámce  $K_0$  a končí v rámci  $K_4$   ${}^0P_{K_0}$  na X-Y rovině  $K_0$ .



Obrázek 26 Výpočet jointu 1 pomocí geometrie [26]

Nechť  ${}^0T$  je cílová transformační matice vzhledem k základně, která definuje cílovou polohu a orientaci.

$${}^0T = \begin{bmatrix} {}^0T_{11} & {}^0T_{12} & {}^0T_{13} & {}^0T_{14} \\ {}^0T_{21} & {}^0T_{22} & {}^0T_{23} & {}^0T_{24} \\ {}^0T_{31} & {}^0T_{32} & {}^0T_{33} & {}^0T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^0N_{K0} = \begin{bmatrix} {}^0T_{13} \\ {}^0T_{23} \\ {}^0T_{33} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

pak máme,

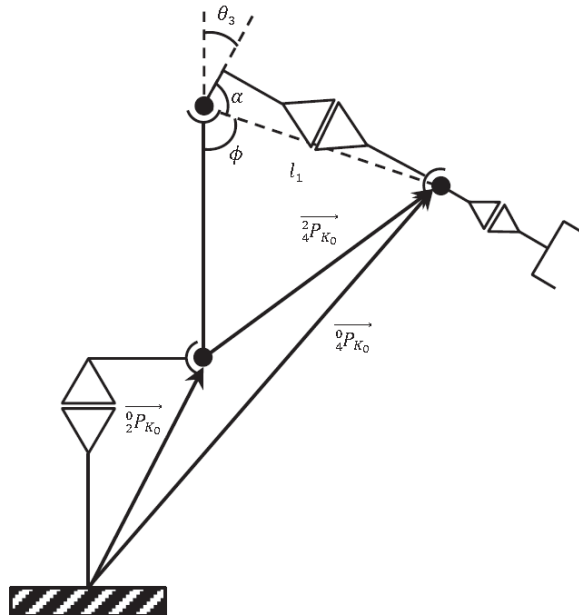
$$\begin{cases} {}^4P_{K0} = d_6 \cdot N_{K0} \\ {}^6P_{K0} = \begin{bmatrix} {}^0T_{14} \\ {}^0T_{24} \\ {}^0T_{34} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.19)$$

$${}^4P_{K0} = {}^6P_{K0} - {}^6P_{K0} = \begin{bmatrix} {}^0T_{14} - d_6 \cdot {}^0T_{13} \\ {}^0T_{24} - d_6 \cdot {}^0T_{23} \\ {}^0T_{34} - d_6 \cdot {}^0T_{33} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$\theta_1 = \begin{cases} \text{Atan2}({}^0T_{24} - d_6 \cdot {}^0T_{23}, {}^0T_{14} - d_6 \cdot {}^0T_{13}) \\ \text{Atan2}({}^0T_{24} - d_6 \cdot {}^0T_{23}, {}^0T_{14} - d_6 \cdot {}^0T_{13}) + \pi \end{cases} \quad (4.21)$$

Joint 3

Vzhledem k dalšímu obrázku (viz *Obrázek 27*), pro výpočet  $\theta_3$ , je nejprve potřeba spočítat  ${}^2P_{K0}$ . Za účelem výpočtu  ${}^2P_{K0}$ , by měl být  ${}^0P_{K0}$  předem k dispozici. V momentě, kdy je známá hodnota  ${}^4P_{K0}$  a  $l_1$ , lze dále spočítat  $\phi$  za pomoci geometrických pravidel, které složí pro řešení výpočtu úhlu mezi dvěma rohy trojúhelníku,  $\alpha$  bude kvantifikována. Necht'  $\theta_2 = 0$ ,



Obrázek 27 Výpočet jointu 3 pomoci geometrie [26]

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} {}^0_2T_{11} & {}^0_2T_{12} & {}^0_2T_{13} & {}^0_2T_{14} \\ {}^0_2T_{21} & {}^0_2T_{22} & {}^0_2T_{23} & {}^0_2T_{24} \\ {}^0_2T_{31} & {}^0_2T_{32} & {}^0_2T_{33} & {}^0_2T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^0_2P_{K0} = \begin{bmatrix} {}^0_2T_{14} \\ {}^0_2T_{24} \\ {}^0_2T_{34} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Tedy,

$${}^2_4P_{K0} = {}^0_4P_{K0} - {}^0_2P_{K0} = \begin{bmatrix} {}^2_4P_{KOx} \\ {}^2_4P_{KOy} \\ {}^2_4P_{KOz} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

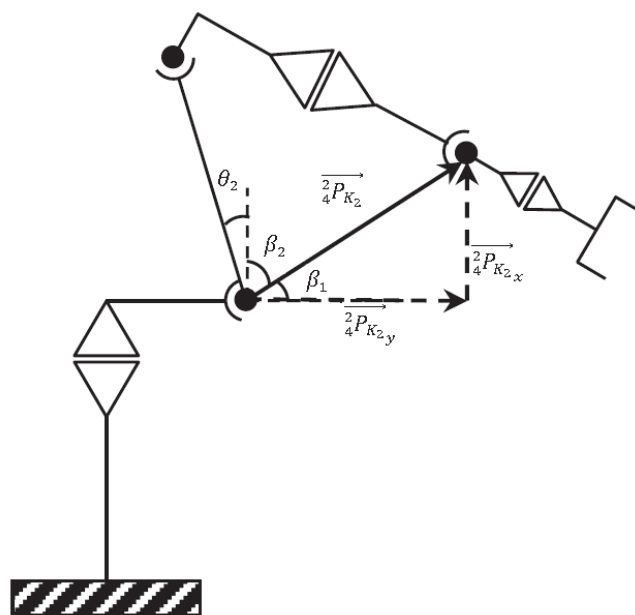
$$\begin{aligned} \phi &= \\ &= A \sin \left( \frac{(l_1^2 - a_2^2 + |{}^2_4P_{K0}|^2)}{2 \cdot |{}^2_4P_{K0}| \cdot l_1} \right) \\ &+ A \sin \left( \frac{|{}^2_4P_{K0}| - \frac{(l_1^2 - a_2^2 + |{}^2_4P_{K0}|^2)}{2 \cdot |{}^2_4P_{K0}|}}{a_2} \right) \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\alpha = A \tan 2(-d_4, a_3) \quad (4.25)$$

$$\theta_3 = \begin{cases} \pi - \phi - \alpha \\ \pi + \phi - \alpha \end{cases} \quad (4.26)$$

Joint 2

Už je známo, že  $\theta_3$  je vypočítáno z  ${}^2_4P_{K2}$ ,  $\beta_1$  a  $\beta_2$  (viz Obrázek 28).



Obrázek 28 Výpočet jointu 2 pomocí geometrie [26]

$${}^2_4P_{K2} = {}^2_0R \cdot {}^2_4P_{K0} = {}^0_2R^{-1} {}^2_4P_{K0} \quad (4.27)$$

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} {}^2_0R & {}^2_4P_{ORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^2_0R = \begin{bmatrix} {}^0_2T_{11} & {}^0_2T_{12} & {}^0_2T_{13} \\ {}^0_2T_{21} & {}^0_2T_{22} & {}^0_2T_{23} \\ {}^0_2T_{31} & {}^0_2T_{32} & {}^0_2T_{33} \end{bmatrix} = {}^0_2R^{-1} \quad (4.28)$$

$${}^2_4P_{K2} = \begin{bmatrix} {}^0_2T_{11} & {}^0_2T_{12} & {}^0_2T_{13} \\ {}^0_2T_{21} & {}^0_2T_{22} & {}^0_2T_{23} \\ {}^0_2T_{31} & {}^0_2T_{32} & {}^0_2T_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^2_4P_{Kox} \\ {}^2_4P_{Koy} \\ {}^2_4P_{Koz} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

A z toho je,

$$\beta_1 = \text{Atan2}({}^2_4P_{K2x}, {}^2_4P_{K2y}) \quad (4.30)$$

$$\beta_2 = \text{Asin} \left( \frac{(a_2^2 - |{}^2_4P_{K0}|^2 + l_1^2)}{2 \cdot l_1 \cdot a_2} \right) + \text{Asin} \left( \frac{l_1 - \frac{(a_2^2 - |{}^2_4P_{K0}|^2 + l_1^2)}{2 \cdot l_1}}{|{}^2_4P_{Kox}|} \right) \quad (4.31)$$

A následně vyjde,

$$\theta_2 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - (|\beta_1| + \beta_2) \\ \frac{\pi}{2} + (|\beta_1| - \beta_2) \end{cases} \quad (4.32)$$

#### Joint 5

Pro výpočet  $\theta_5$ , je nutné vypočítat  ${}^0_4T$  za předpokladu že  $\theta_4 = 0$ . Potom pomocí definice tečkového produktu dvou normálních vektorů (viz *Obrázek 28*), se získá  $\theta_5$ .

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} {}^0_4T_{11} & {}^0_4T_{12} & {}^0_4T_{13} & {}^0_4T_{14} \\ {}^0_4T_{21} & {}^0_4T_{22} & {}^0_4T_{23} & {}^0_4T_{24} \\ {}^0_4T_{31} & {}^0_4T_{32} & {}^0_4T_{33} & {}^0_4T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^0_4N_{K0} = \begin{bmatrix} {}^0_4T_{13} \\ {}^0_4T_{23} \\ {}^0_4T_{33} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

A z toho vyjde,

$$\theta_5 = \pi - \text{AcOS}({}^0_4N_{K0}, {}^0_6N_{K0}) \quad (4.34)$$

#### Joint 4 and 6

Pro výpočet  $\theta_4$  a  $\theta_6$  je využita rotační matice  ${}^4_6R$ .

$${}^4_6R = {}^0_4R^{-1} {}^0_6R = {}^4_0R \cdot {}^0_6R \quad (4.35)$$

Alternativní varianta řešení,

$${}^4R = Rot_z(\theta_4) \cdot Rot_y(\theta_5 + \pi) \cdot Rot_z(\theta_6) \quad (4.36)$$

V této rovnici je použita hodnota  $Rot_y(\theta_5 + \pi)$ ,  $Rot_z(\theta_6)$ , která lze rozepsat jako:

$$Rot_y(\theta_5 + \pi) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5 + \pi) & 0 & \sin(\theta_5 + \pi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_5 + \pi) & 0 & \cos(\theta_5 + \pi) \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$Rot_z(\theta_6) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 \\ \sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

následně,

$${}^4R = \begin{bmatrix} -c_4c_5c_6 - s_4s_6 & c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4s_5 \\ -s_4c_5c_6 + c_4s_6 & s_4c_5c_6 + c_4c_6 & -s_4s_5 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & -c_5 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Ve které  $c_4$  je stejné jako  $\cos(\theta_4)$ , a  $s_4$  je jako  $\sin(\theta_4)$  atd.

Po zjednodušení:

$${}^4R = \begin{bmatrix} {}^4R_{11} & {}^4R_{12} & {}^4R_{13} \\ {}^4R_{21} & {}^4R_{22} & {}^4R_{23} \\ {}^4R_{31} & {}^4R_{32} & {}^4R_{33} \end{bmatrix} \quad (6.40)$$

Následně jsou vypočteny hodnoty  $\theta_4$  a  $\theta_6$  při znalosti následujících vzorců:

$$\theta_4 = \text{Atan2}(-{}^4R_{23}, -{}^4R_{13}) \quad (4.41)$$

$$\theta_6 = \text{Atan2}(-{}^4R_{32}, -{}^4R_{31}) \quad (4.42)$$

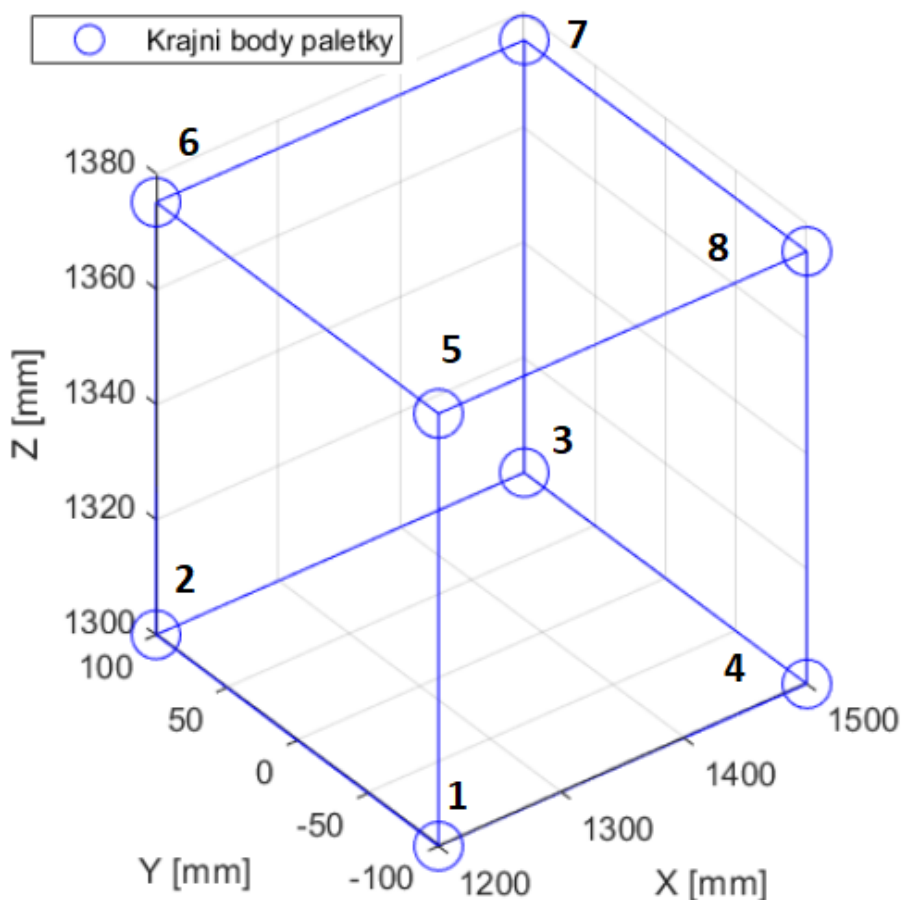


## 5. Návrh algoritmu pro zvýšení přesnosti robotu

Tato kapitola se zabývá vytvořením algoritmu pro dvě palety s různým počtem kalibračních bodů. První paleta má 8 kalibračních bodů, které jsou měřené laser trackerem. Druhá má 4 kalibrační body a je speciálním případem pracovního prostoru. Druhá paleta má pouze 4 body na základě předpokladu, že průmyslový robot má na svém koncovém efektoru IBS Trinity Sondu (viz *Obrázek 15*), kterou použije pro vyhodnocení hodnot v osách X, Y a Z.

### 5.1 Paletka s 8 body

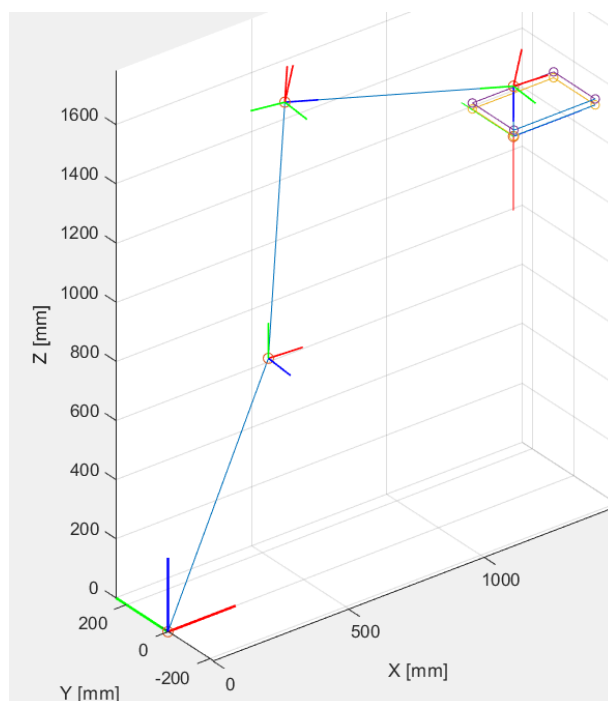
Následujícím krokem bylo provedení ověření funkčnosti napsaného kódu pro inverzní kinematickou úlohu zvoleného robotu KUKA KR60-3. Prvním testovacím způsobem bylo navržení paletky s 8 body (viz *Obrázek 29*), které byly umístěny v rozích této paletky (viz *Tabulka 4*). Prvním krokem bylo najetí s využitím zachybované inverzní kinematiky robota na body paletky v pracovním prostoru (viz *Obrázek 30*). Výstupem pohybu robota v rámci inverzní kinematiky byly hodnoty úhlů natočení jednotlivých kloubů robota. Úhly natočení kloubů jsou vidět v tabulce (viz *Tabulka 5*) pro každý bod paletky.



Obrázek 29 Paletka s 8 body

Tabulka 4 Hodnoty bodů paletky

Číslo bodu	Hodnoty bodů v osách X, Y a Z		
	Osa X[mm]	Osa Y[mm]	Osa Z[mm]
1.	1200	100	1300
2.	1200	-100	1300
3.	1500	100	1300
4.	1500	-100	1300
5.	1200	100	1375
6.	1200	-100	1375
7.	1500	100	1375
8.	1500	-100	1375



Obrázek 30 Najeti robotu na body paletky

Tabulka 5 Hodnoty natočení kloubů

Bod	Úhly natočení kloubů [rad]					
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
1.	-0.082135	-0.067394	-0.17261	0	-1.3325	-0.083141
2.	0.084607	-0.067315	-0.17261	1.463e-05	-1.3325	0.083141
3.	0.067832	-0.41483	0.26082	0	-1.419	0.066568
4.	-0.066389	-0.41488	0.26082	1.469e-05	-1.419	-0.066568
5.	-0.082964	-0.048678	-0.097477	1.469e-05	-1.4246	-0.083141
6.	0.083244	-0.048666	-0.097477	0	-1.4246	0.083141
7.	0.06683	-0.40269	0.33876	0	-1.5069	0.066568
8.	-0.66397	-0.4047	0.33876	1.469e-05	-1.5069	-0.066568

Následujícím krokem bylo dosažení výstupních úhlů natočení do dopředné kinematiky nominálního robota, který nemá zavedené chyby rozměrů a enkodérů do jeho kinematické struktury. Jakmile byla zavedena první sada hodnot chybných natočení úhlů do dopředné kinematiky, bylo možné provést výpočet odchylky hodnot najetí do nominálních poloh robota od skutečného umístění bodů dané paletky. *Obrázek 31* znázorňuje, jak vypadají hodnoty polohy konečného efektoru robota a jaký je rozdíl mezi bodem paletky v prostoru a konečným efektozem robotu (2. bod paletky s koordinátami  $X=1200\text{mm}$ ,  $Y=-100\text{mm}$  a  $Z=1300\text{mm}$ ).

```
Direct is:  -0.082135  -0.067394  -0.17261      0  -1.3325  -0.083141
Inverse is: -0.082135  -0.067394  -0.17261      0  -1.3325  -0.083141
End effector position is: 1199.3906  -98.734069  1298.1513
Different between end effector and point: -0.60944  1.2659  -1.8487
```

*Obrázek 31 Poloha efektoru a rozdíl mezi efektozem a bodem paletky*

Podobným způsobem bylo provedeno měření všech 8 bodů paletky, ze kterých byly zjištěny hodnoty odchylek mezi bodem paletky v prostoru a konečným efektozem nominálního robota. Hodnoty naměřených odchylek v bodech jsou vidět v další tabulce (viz *Tabulka 6*).

*Tabulka 6 Hodnoty naměřených odchylek v bodech*

Číslo bodu	Hodnoty odchylek v osách X, Y a Z		
	Osa X[mm]	Osa Y[mm]	Osa Z[mm]
<b>1.</b>	-1.5739	0.2282	-0.3721
<b>2.</b>	-1.5151	0.40772	-0.38233
<b>3.</b>	-1.6515	0.69577	-0.33614
<b>4.</b>	-1.8602	0.5255	-0.3592
<b>5.</b>	-1.5467	-0.0048706	-0.4175
<b>6.</b>	-1.5118	0.34235	-0.42773
<b>7.</b>	-1.9221	-0.26586	-0.3789
<b>8.</b>	-1.8731	0.38493	-0.3898

Pomocí již známých hodnot polohy bodu v prostoru a odchylek v každém bodě paletky, byl napsán kód pro provedení interpolace uvnitř omezeného prostoru (viz rovnice 5.1–5.3), kde funkce „interp3“ plní funkci interpolaci v 3D prostoru. Například funkce  $V_{qx}=\text{interp3}(X, Y, Z, V, X_q, Y_q, Z_q)$  vrací interpolované funkční hodnoty tří proměnných ve specifických bodech dotazu pomocí lineární interpolace. Výsledky vždy procházejí původním vzorkem funkce. „X“, „Y“ a „Z“ obsahují souřadnice vzorových bodů. „V“ obsahuje odpovídající funkční hodnoty v každém vzorku, v daném případě chyby v bodech paletky. „X<sub>q</sub>“, „Y<sub>q</sub>“ a „Z<sub>q</sub>“ obsahují souřadnice bodů dotazu. Výstupní veličinou „V<sub>qx</sub>“ s funkce „interp3“ pro požadované body je odpovídající hodnota chyby v těchto bodech v ose „X“. Stejným způsobem bylo provedeno zjištění výstupních veličin v ose „Y“ (V<sub>qy</sub>) a ose „Z“ (V<sub>qz</sub>). Pro výpočet interpolace může být zvolena jiná metoda

než lineární. Pokud není uvedena metoda v závorkách funkce tak je automaticky považována za lineární metodu. Další metody jsou vidět v tabulce (viz *Tabulka 7*).

*Tabulka 7 Metody interpolace*

<b>Metoda</b>	<b>Popis</b>
<b>linear</b>	Interpolovaná hodnota v bodu dotazu je založena na lineární interpolaci hodnot v sousedních uzlech mříže v každé odpovídající dimenzi. Toto je výchozí metoda interpolace.
<b>nearest</b>	Interpolovaná hodnota v bodě dotazu je hodnota v nejbližším uzlu vzorové mřížky.
<b>cubic</b>	Interpolovaná hodnota v bodu dotazu je založena na kubické interpolaci hodnot v sousedních uzlech mříže v každé odpovídající dimenzi. Interpolace je založena na krychlové konvoluci.
<b>makima</b>	Upravená kubická interpolace Akima Hermite. Interpolovaná hodnota v bodu dotazu je založena na kusové lineární funkci polynomů se stupněm maximálně tři odhadovaných použitých hodnot sousedních mřížkových uzlů v každé odpovídající dimenzi. Akimův vzorec je upraven tak, aby se zabránilo překmitům.

$$Vqx = \text{interp3}(X, Y, Z, Vx, Xq, Yq, Zq) \quad (5.1)$$

$$Vqy = \text{interp3}(X, Y, Z, Vy, Xq, Yq, Zq) \quad (5.2)$$

$$Vqz = \text{interp3}(X, Y, Z, Vz, Xq, Yq, Zq) \quad (5.3)$$

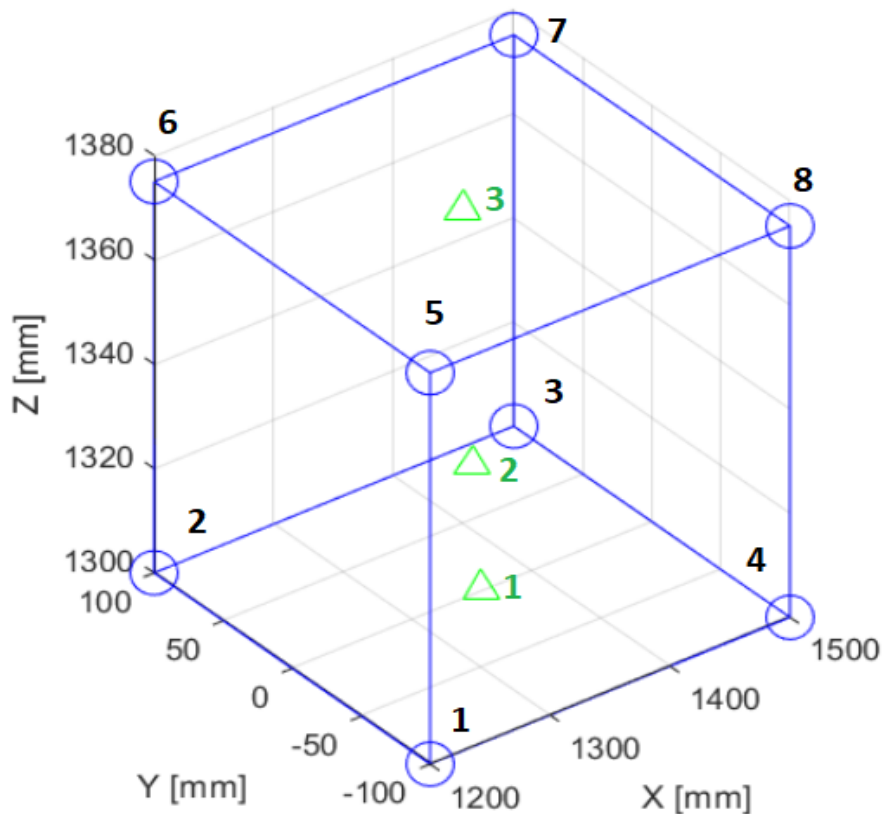
Dalším krokem bylo vložení třech bodů do vnitřní části palety (viz *Obrázek 32*) a provedení funkčních testů výše uvedené „interp3“ funkce. K vytvoření těchto bodů byla použita inverzní kinematika nominálního robota, pomocí které byly zjištěny úhly natočení každého z těchto tří bodů (viz *Tabulka 8*). Dalším krokem bylo zavedení těchto úhlů robota do dopředné zachybované kinematiky robota. Jakmile byly zadány úhly natočení do zachybované kinematiky robota, ke každému změřenému bodu byla ještě přidána náhodně vygenerovaná chyba odpovídající uvažované přesnosti laser trackeru. Soubor těchto simulačních měření je považováno za měření s laser trackerem. Body nominálního robota a podmíněného laser trackeru jsou vidět v následující tabulce (viz *Tabulka 9*).

Tabulka 8 Hodnoty natočení kloubu pro 3 vnitřní body paletky

Bod	Úhly natočení kloubů [rad]					
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
1.	-0.038443	-0.17518	-0.029899	6.2832	-1.3537	-0.038443
2.	0	-0.22955	0.048441	0	-1.3797	0
3.	0.035699	-0.28277	0.15899	0	-1.447	0.035699

Tabulka 9 Hodnoty bodu vnitřního prostoru

Číslo bodu	Nominální robot			Laser Tracker		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	1300	-50	1315	1301.7102	-49.41119	1315.4026
2	1350	0	1325	1351.7355	0.662656	1325.4055
3	1400	50	1360	1401.7644	50.981891	1360.4216



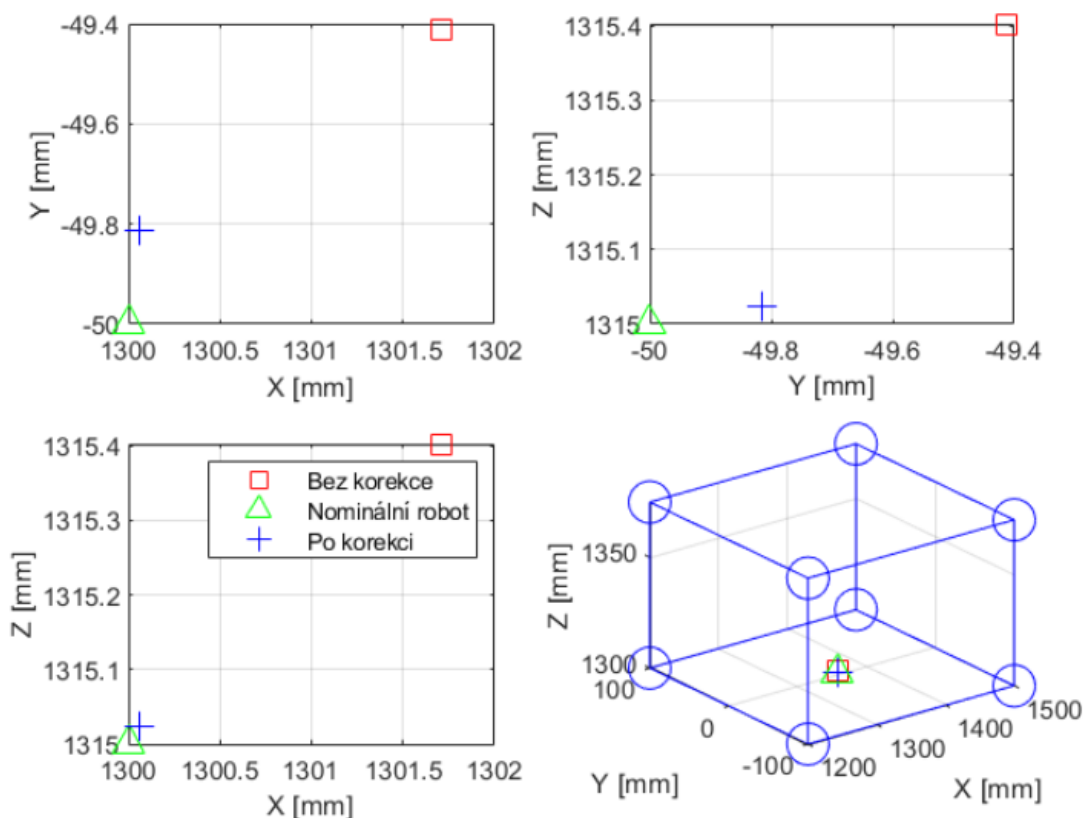
Obrázek 32 Vnitřní body paletky

Na základě dat z tabulky (viz Tabulka 9), lze zjistit jakou kompenzační hodnotu je potřeba dodat robotu, aby byla dosažena požadovaná poloha konečného efektoru robotu v omezeném prostoru paletky. V následující tabulce (viz Tabulka 10) a grafu (viz Graf 1) je vidět, jaká je potřebná kompenzační hodnota pro správné dosažení prvního bodu uvnitř pracovního prostoru paletky. Tabulka 10 znázorňuje v levém sloupci simulované

hodnoty, které vznikly měřením robotu a laser trackeru. V pravém sloupci jsou vidět hodnoty simulovaných kompenzačních hodnot, které jsou výstupem funkce „interp3“.

Tabulka 10 Potřebné kompenzační hodnoty pro dosažení správné polohy

Číslo bodu	Potřebná hodnota posunu			Simulační hodnota			Porovnání		
	Delta[mm]			Vq[mm]			%		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	1.7102	0.5888	0.4026	1.6465	0.4027	0.3793	96.27	68.39	94.21
2	1.7355	0.6626	0.4055	1.7213	0.3919	0.3761	99.18	59.14	92.74
3	1.7644	0.9818	0.4216	1.7898	0.5848	0.3859	98.56	59.56	91.53



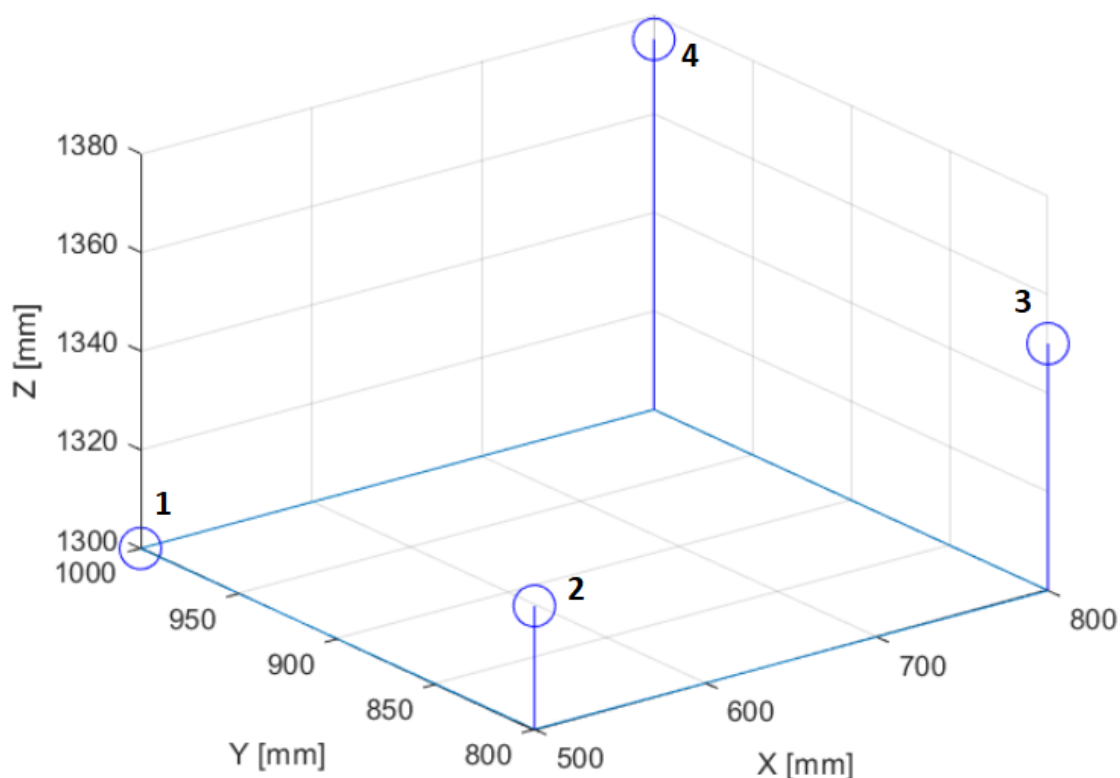
Graf 1 Průběh chyb 1. vnitřního bodů paletky

Po analýze výše uvedené tabulky a grafu lze posoudit, že funkce „interp3“ se ukázala jako funkční. Je patrné, že využitím této funkce se dospělo ke zvýšení přesnosti robota v omezeném pracovním prostoru.

## 5.2 Paletka s 4 body

Následujícím krokem praktické části diplomové práce byl návrh a optimalizace další paletky pro simulační testování. Byla zvolena paletka se 4 body v rozích (viz Obrázek 33). Tato paletka má pouze čtyři horní body, protože v případě reálného měření s reálným robotem KUKA KR60-3, který je k dispozici v CIIRC u ČVUT, by tento robot

nemohl fyzicky najet na dolní body, z důvodu použití speciální bezdrátové sonda IBS Trinity (viz *Obrázek 15*). Tato paletka byla navržena tak, aby se výška z prvního bodu postupně zvětšovala o 25 mm. Postupné zvětšování výšky bodů umožní využití většího prostoru pro pohyb uvnitř paletky.

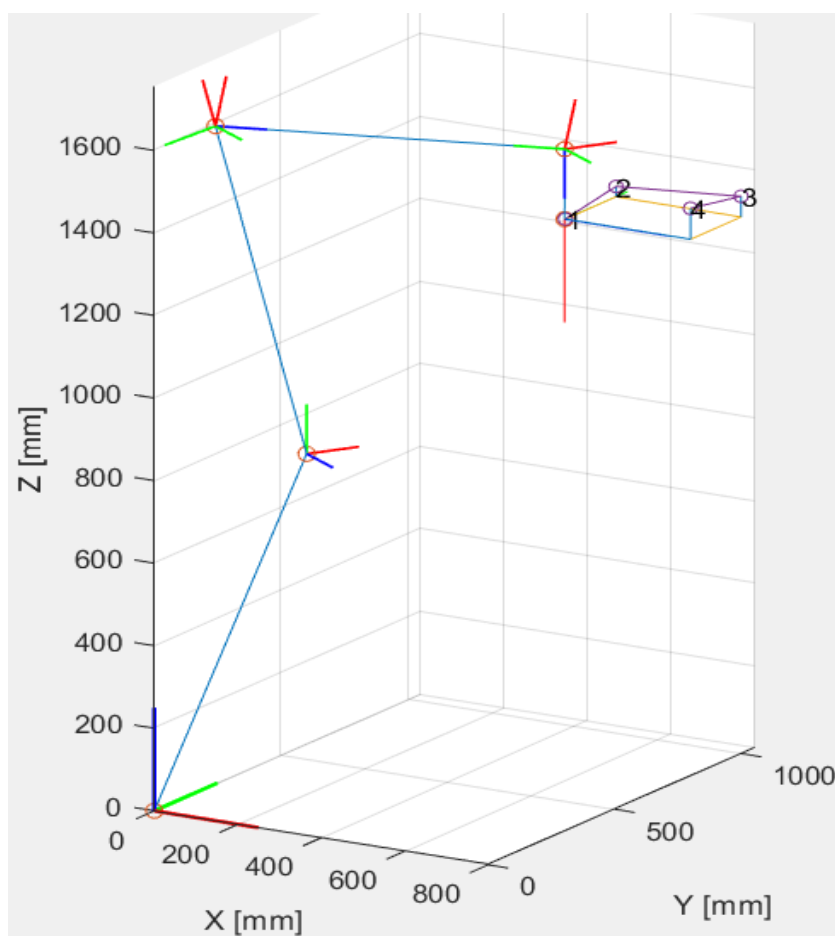


*Obrázek 33 Navřená paletka s 4 body*

Hodnoty bodů této paletky jsou vidět v tabulce (viz *Tabulka 11*). Stejným způsobem bylo provedeno najetí na body paletky pomocí zachybované inverzní kinematiky robota (viz *Obrázek 34*). Následně byly dosaženy úhly natočení kloubů do dopředné kinematiky nominálního robota. Úhly natočení v jednotlivých bodech paletky jsou vidět v další tabulce (viz *Tabulka 12*). Hodnoty odchylek, které vznikly v rámci rozdílů mezi polohou konečného efektoru nominálního robota a bodů paletky jsou vidět na dalším obrázku (viz *Obrázek 35*) a tabulce (viz *Tabulka 13*).

*Tabulka 11 Hodnoty paletky s 4 body*

Číslo bodu	Hodnoty bodů v osách X, Y a Z		
	Osa X[mm]	Osa Y[mm]	Osa Z[mm]
<b>1.</b>	500	1000	1300
<b>2.</b>	500	800	1325
<b>3.</b>	800	1000	1350
<b>4.</b>	800	800	1375



Obrázek 34 Najeti na první bod paletky

Direct is: 1.0141 0.24891 -0.45747 0 -1.3633 1.0122  
 Inverse is: 1.0141 0.24891 -0.45747 0 -1.3633 1.0122  
 End effector position is: 498.08369 800.31854 1299.0223  
 Different between end effector and point: -1.9163 0.31854 -0.9777

Obrázek 35 Rozdíl mezi konečným efektoem a bodem paletky

Tabulka 12 Hodnoty úhlů natočení kloubů

Bod	Úhly natočení kloubů [rad]					
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
1.	1.0141	0.24891	-0.45747	0	-1.3633	1.0122
2.	1.1089	0.040594	-0.25037	1.4693e-05	-1.3624	1.1071
3.	0.89632	-0.1437	-0.25415	1.4693e-05	-1.4032	0.89606
4.	0.7869	0.035444	-0.18349	1.4693e-05	-1.4241	0.7854



*Tabulka 13 Hodnoty odchylek v bodech paletky*

Číslo bodu	Hodnoty odchylek v osách X, Y a Z		
	Osa X[mm]	Osa Y[mm]	Osa Z[mm]
1.	-0.80515	-1.2271	-0.37695
2.	-0.7486	-1.0147	-0.34976
3.	-1.4112	-1.0135	-0.35314
4.	-1.3875	-0.69392	-0.39917

Interpolace funguje stejným způsobem jako u paletky s 8 body s jediným rozdílem, že namísto funkce „interp3“ byla použita funkce „interp2“, protože pro správnou funkci bylo potřeba definovat hodnoty bodů celé paletky a následně i hodnoty odchylek v těchto bodech. Například  $V_{qx} = \text{interp2}(X, Y, V, X_q, Y_q)$  vrací interpolované hodnoty funkce dvou proměnných ve specifických bodech dotazu pomocí lineární interpolace. Výsledky vždy procházejí původním vzorkem funkce. „X“ a „Y“ obsahují souřadnice vzorků. Hodnota „V“ obsahuje odpovídající funkční hodnoty v každém vzorku. „X<sub>q</sub>“ a „Y<sub>q</sub>“ obsahují souřadnice bodů dotazu. Kvůli tomu, že dolní body nebyly uvažované a zároveň nebyly definované odchylky v těchto dolních bodech, byla proto použita funkce „interp2“. A pomocí známých hodnot polohy bodů v prostoru a odchylek v každém bodě paletky, byl napsán kód pro provedení interpolace uvnitř omezeného prostoru. Funkce „interp2“ plní funkci interpolaci pouze v osách „X“ a „Y“, proto byla dále použita funkce „ScatteredInterpolant“. „ScatteredInterpolant“ (x, y, v) vytvoří interpolant, který se hodí na povrch tvar  $v = F(x, y)$ . Vektory „X“ a „Y“ určují souřadnice (X, Y) vzorových bodů. „V“ je vektor, který obsahuje vzorové hodnoty spojené s body (x, y). „X“, „Y“ a „Z“ jsou známé hodnoty paletky v prostoru, „V<sub>x</sub>“, „V<sub>y</sub>“ a „V<sub>z</sub>“ chyby v bodech paletky a „X<sub>q</sub>“, „Y<sub>q</sub>“ a „Z<sub>q</sub>“ plní funkce požadovaného bodu.

Funkce v kódu jsou vidět v dalších rovnicích (viz rovnice 5.4–5.7).

$$V_{qx} = \text{interp2}(X, Y, V_x, X_q, Y_q) \quad (5.4)$$

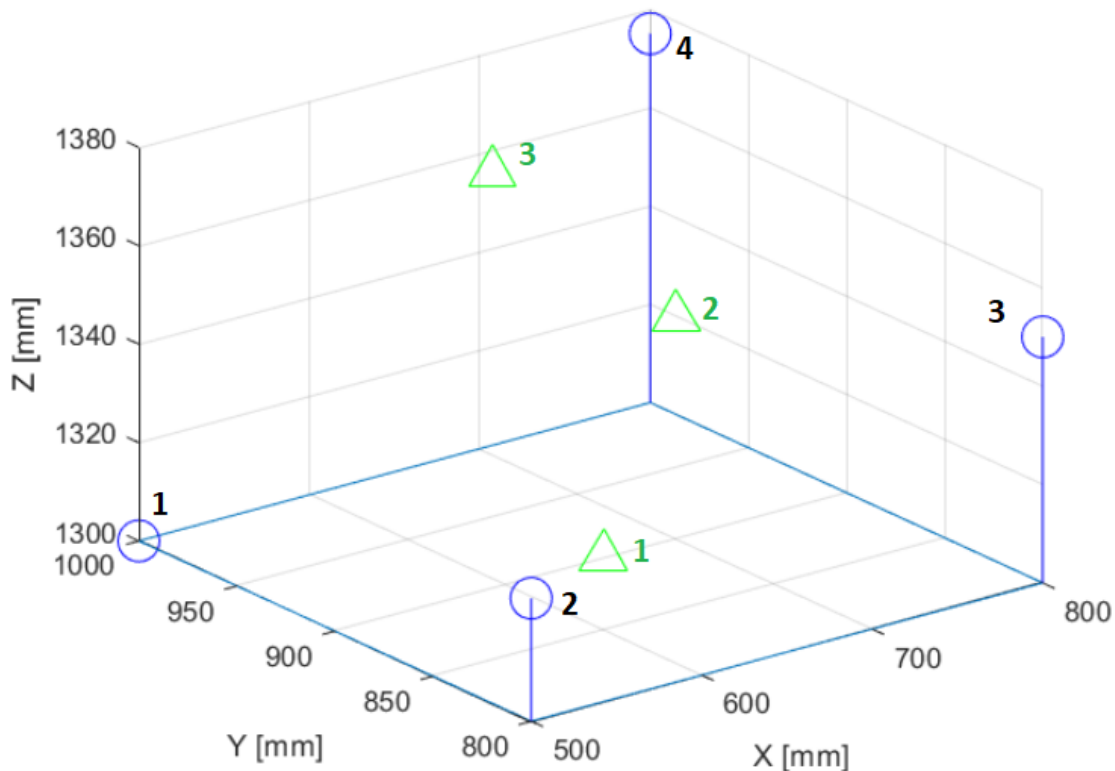
$$V_{qy} = \text{interp2}(X, Y, V_y, X_q, Y_q) \quad (5.5)$$

$$V_{qz1} = \text{scatterdInterpolant}(X(:), Y(:), V_z(:)) \quad (5.6)$$

$$V_{qz1}(X_q, Y_q) \quad (5.7)$$

Dalším krokem, stejně jako v předchozí variantě, bylo vložení několika bodů do vnitřní části palety (viz *Obrázek 36*) a provedení funkčních testů výše uvedené „interp2“ a „Scatteredinterpolant“ funkce. K vytvoření těchto bodů byla použita inverzní kinematika nominálního robota, pomocí níž byly zjištěny úhly natočení kloubů každého z těchto tří bodů (viz *Tabulka 14*). Dalším krokem bylo zavedení těchto úhlů robota do dopředné zachybované kinematiky robota. Jakmile byly zadány úhly natočení do zachybované kinematiky robota, ke každému změřenému bodu byla ještě přidána náhodně vygenerovaná chyba odpovídající přesnosti IBS Trinity sondy. Soubor těchto

simulačních měření je považován za měření s IBS Trinity sondou. Body nominálního robota a podmíněné sondy jsou vidět v následující tabulce (viz *Tabulka 15*).



Obrázek 36 Vnitřní body paletky s 4 kalibrační body

Tabulka 14 Hodnoty úhlů natočení pro 3 vnitřní body paletky

Bod	Úhly natočení kloubů [rad]					
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
1.	-0.038443	-0.17765	-0.039446	0	-1.3537	-0.038443
2.	0	-0.23289	0.033956	0	-1.3719	0
3.	0.035699	-0.29078	0.11386	6.2832	-1.3939	0.035699

Tabulka 15 Hodnoty bodů uvnitř paletky

Číslo bodu	Nominální robot			Trinity Sonda		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	600	850	1315	600.5799	851.29506	1315.3984
2	700	900	1345	700.9416	901.14632	1345.4324
3	650	950	1370	651.3003	951.6337	1370.4406

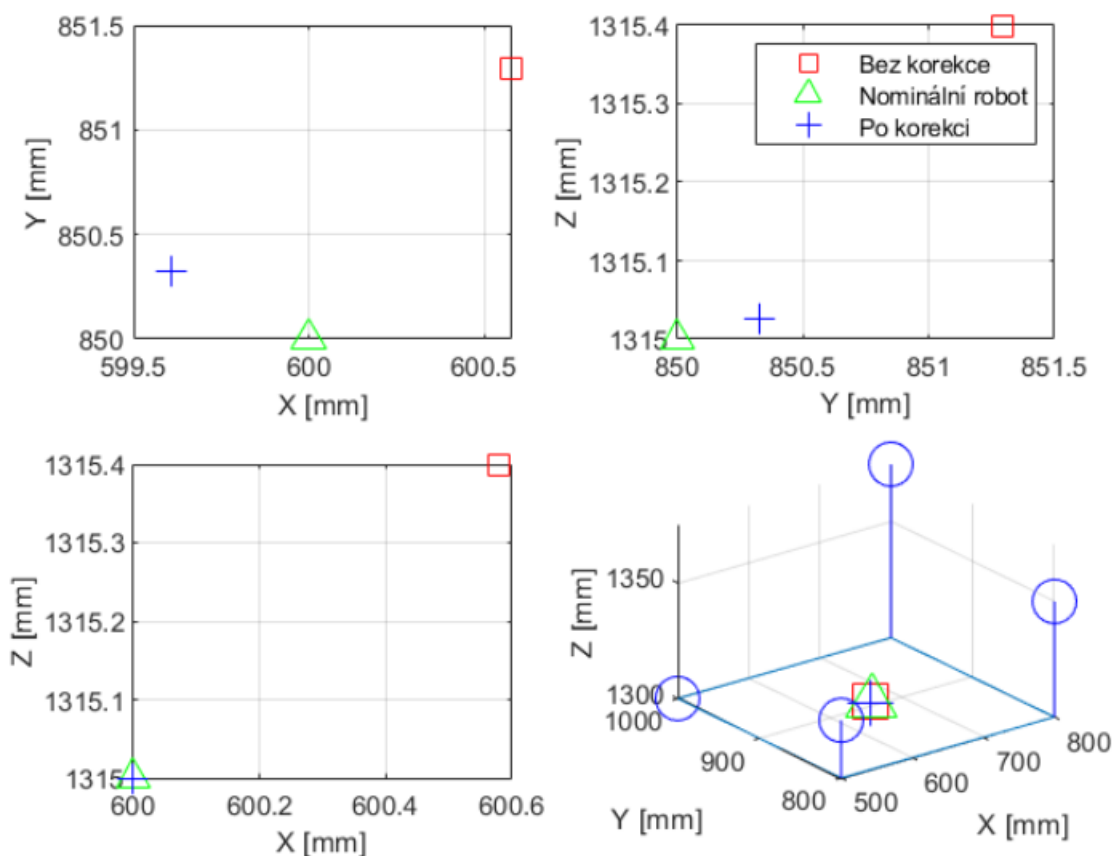
Na základě dat, která jsou v tabulce (viz *Tabulka 15*), lze zjistit, jakou kompenzační hodnotu je nutné zadat robotu, aby byla dosažena požadovaná poloha konečného efektoru robota v omezeném prostoru paletky. V následující tabulce (viz *Tabulka 16*) a grafu (viz *Graf 2*) je vidět, jaká je potřebná kompenzační hodnota pro správné dosažení prvního bodu uvnitř pracovního prostoru. *Tabulka 16* znázorňuje v levém sloupci simulované

hodnoty, které vznikly měřením robotu a Trinity sondy. V pravém sloupci jsou vidět hodnoty simulovaných kompenzačních hodnot, které jsou výstupem funkce „interp2“ a „Scatteredinterpolant“.

Tabulka 16 Hodnoty vnitřních bodu paletky

Číslo bodu	Potřebná hodnota posunu			Simulační hodnota			Porovnání		
	Delta[mm]			Vq[mm]			%		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.57991	1.2950	0.3984	0.9730	0.9698	0.3730	32.21	74.88	93.62
2	0.94166	1.4632	0.4324	1.1919	0.9428	0.3841	73.42	64.43	88.82
3	1.3003	1.6337	0.4406	1.0981	1.5387	0.3766	84.44	94.18	85.47

Po analýze výše uvedené tabulky a grafu lze usoudit, že funkce „interp2“ a „ScatteredInterpolant“ ukázaly jako funkční. Při použití této funkce je vidět zvýšení přesnosti robota v omezeném pracovním prostoru.



Graf 2 Průběh chyb 1. vnitřního bodu paletky se 4 body

## 6. Zpracování reálných hodnot měření

Tato kapitola analyzuje skutečná data. První údaje se týkaly měřených bodů s využitím průmyslového robota a laser trackeru a tato data byla použita k označení chyb, které může robot během procesu měření mít.

### 6.1 Měření pomocí robota a laser trackeru

V průběhu zpracování algoritmu pro zvýšení přesnosti robota byla dodána reálná změřená data. Měření bylo provedeno s využitím robota Stäubli TX2-90L (viz *Obrázek 37*) a laser trackeru API Radian PRO (viz *Obrázek 38*). Charakteristiky měřicího robota a laser trackeru jsou ukázané v tabulkách (viz *Tabulka 17* a *Tabulka 18*). Robot neměl žádnou zátěž, na konci efektoru robota byly umístěné pouze zrcadlové odražeče pro společné měření s laser trackerem.



*Obrázek 37 Robot Stäubli, který byl použit pro měření [27]*

*Tabulka 17 Charakteristiky robota Stäubli*

Model	Stupně volnosti [°]	Jmenovitá nosnost [kg]	Maximální nosnost [kg]	Dosah zápěstí [mm]	Opakovatelnost [mm]
TX2-90L	6	5	15	1200	±0.0035

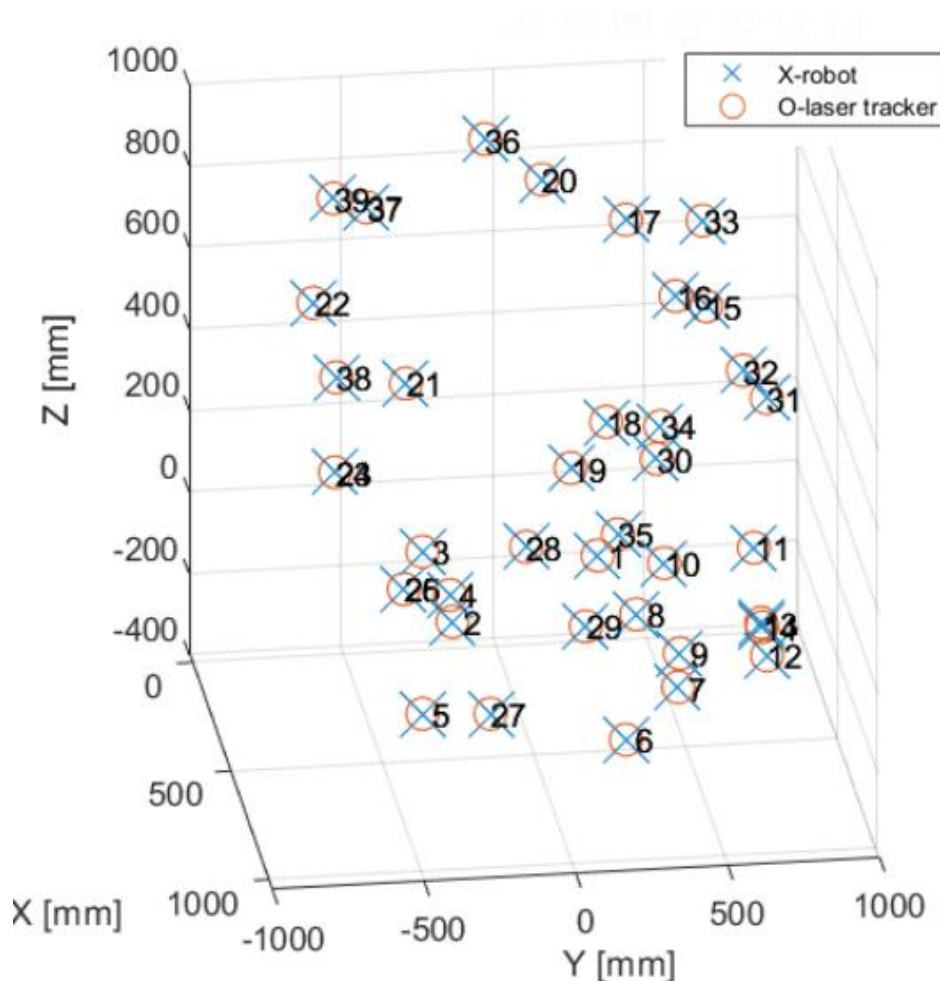


*Obrázek 38 Laser tracker, který byl použit pro měření [28]*

*Tabulka 18 Charakteristiky laser trackeru*

<b>Model Laser Trackeru</b>	<b>Měřicí vzdálenost [m]</b>	<b>Životnost baterie[hod]</b>	<b>Váha [kg]</b>	<b>Přesnost [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
API Radian Pro	80	8	9	0.7

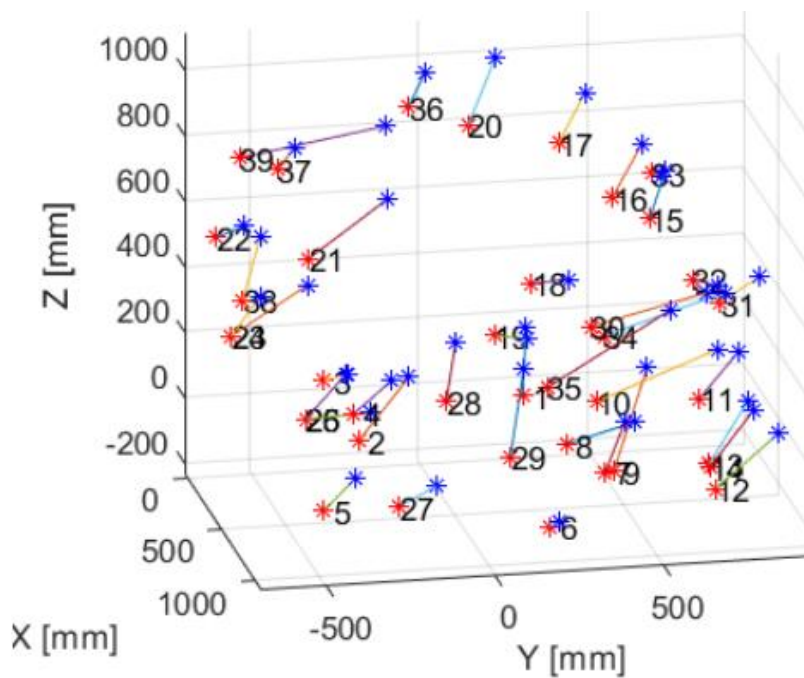
Poskytnutá data, která obsahovala hodnoty každého bodu v prostoru, byly zpracované v prostředí Matlab. V rámci měření bylo celkem změřeno 39 bodů, jak lze vidět na obrázku (viz *Obrázek 39*). V grafu jsou vidět body, které naměřil robot a body, které změřil laser tracker pomocí zrcadlového odražeče (targetu). Ze všech naměřených bodů bylo zjištěno, že robot nepolohuje přesně a mezi změřenými body robotu a laser trackeru se vyskytovala odchylka, která se pohybovala od tisícín až do desetin milimetru.



Obrázek 39 Naměřené body robotu a laser trackeru

Směr odchylek bodů mezi robotem a laser trackerem je vidět na obrázku (viz *Obrázek 40*). Lze vypořádat, jak vypadá bod naměřený robotem (modrá hvězda) a bod do kterého směřuje tato odchylka (červená hvězda). Pro znázornění, kam směřují odchylky v jednotlivých bodech, byla odchylka vynásobená stovkou.

Z celého měření bylo zjištěno, že maximální stanovená chyba ze všech 39 bodů byla 0.4320 mm. To je výrazným příkladem toho, že robot nemá tak vysokou přesnost a vždy má odchylku v měření. V některých místech tato odchylka může dosahovat značně nežádoucích hodnot, které mohou způsobit reálné škody v průmyslové výrobě. V daném měření s využitím laser trackeru bylo jasně znázorněno, jak můžeme stanovit tuto odchylku.



Obrázek 40 Směr odchylek mezi robotem a laser trackerem

Tyto výsledky měření dobře demonstrují motivace této diplomové práce. Konkrétně ukazují, že robot má vždy odchylku v přesnosti polohování a tu odchylku můžeme zmenšit pomocí různých technologií a metod pro zvýšení přesnosti robotu v jeho pracovním prostoru.



## 7. Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh algoritmu pro zvýšení přesnosti průmyslového robotu v omezeném prostoru. Rešeršní část práce byla zaměřena na technologie a metody kalibrace pro zvýšení přesnosti robotů v pracovním prostoru. Také byly probrány maticové metody dle Denavita-Hartenberga pro popsání dopředné kinematické úlohy a následně i inverzní kinematické úlohy robota. V rámci praktické části byl vytvořen simulační model zvoleného robotu KUKA KR60-3 v prostředí Matlab a následně byly zavedeny chyby do kinematické struktury tohoto modelu. Simulační model simuloval interakce robota s jednotlivými artefakty, které byly umístěny do rohů navržených paletek. Celkem byly navrženy 2 typy paletek. První typ obsahoval 8 kalibračních bodů pro simulaci měření robotem a laser trackerem. Druhá paletka sloužila k simulaci reálného měření s IBS Trinity sondou, a proto měla pouze 4 kalibrační body. Následně byl proveden návrh a vytvoření algoritmu pro výpočet korekce polohy robotu v omezeném prostoru paletek. Součástí algoritmu byla numerická simulace odchylek, která byla založena na rozdílu hodnot změřených nominálním a zachybovaným robotem. Hodnoty odchylek v každém kalibračním bodě paletky byly následně zavedeny do kalibrační tabulky. Tato kalibrační tabulka byla využita k výpočtu interpolační funkce, s jejíž pomocí byly stanoveny hodnoty korekce polohy robotu. Hodnoty korekce dovolily zvýšit přesnost polohování konečného efektoru robotu. V rámci simulačního měření s laser trackerem došlo ke zvýšení přesnosti v ose X o více jak 96 %, v ose Y o 59 % a v ose Z o více jak 91 %. Simulační měření s IBS Trinity sondou ukázalo zvýšení přesnosti v ose X v rozmezí 32–84 %, v ose Y v rozmezí 64–94 % a v ose Z o více jak 85 %. Výsledky potvrdily funkčnost daného algoritmu pro výpočet korekce polohy v omezeném prostoru. Posledním krokem bylo zpracování reálných dat naměřených s využitím robotu Stäubli TX2-90L a laser trackeru API Radian Pro. Tato data ukázala, jak velké chyby přesnosti mohou vznikat při polohování robotu v reálném provozu.



## Seznam použité literatury

- [1] An Overview of Robot Calibration. *Information Technology Journal*. 2004, 74-78. ISSN 1682 6027. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/profile/Bahram\\_Ravani/publication/224729865\\_An\\_Overview\\_of\\_Robot\\_Calibration/links/54b803df0cf28faced61c61d.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bahram_Ravani/publication/224729865_An_Overview_of_Robot_Calibration/links/54b803df0cf28faced61c61d.pdf)
- [2] NUBIOLA, Albert a Ilian A. BONEV. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2013, 29(1), 236-245 [cit. 2019-10-28]. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.06.004. ISSN 07365845. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584512000816>
- [3] NOF, Shimon Y. *Handbook of industrial robotics*. New York, 1985. ISBN 0-471-89684-5.
- [4] LIGHTCAP, Chris a Scott BANKS. Dynamic identification of a mitsubishi pa10-6ce robot using motion capture. In: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. IEEE, 2007, 2007, s. 3860-3865 [cit. 2019-10-28]. DOI: 10.1109/IROS.2007.4399425. ISBN 978-1-4244-0911-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4399425/>
- [5] Joel Martin. "Laser tracking fundamentals." *Quality Magazine*, May 2007 [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/85066-quality-101-laser-tracking-fundamentals>
- [6] Bob Bridges Ph.d. 2009. How laser Tracker Work. [online]. 2009. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.qualitydigest.com/inside/metrology-article/how-laser-trackers-work-062509.html>
- [7] MetrologyWorks. Zrcadlový odražeč, [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.metrologyworks.store>
- [8] Creaform. VX Tracker. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/3d-applications-software-platforms/dynamic-tracking-vxtrack>
- [9] RoboDK, Robot calibration steps. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://robodk.com/robot-calibration>
- [10] ZIS, Robot calibration unit. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.zis-cutting.de/en/machine-components/robot-calibration-unit>
- [11] API, Automated 6DoF sensor. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://apimetrology.com/inspection-and-measurement/laser-tracker-smr-targets/smart-track-sensor/>
- [12] Hexagon, Leica T-Mac [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/robotics-and-automation/robodyn>
- [13] Hexagon, Leica T-Mac type [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: [https://www.tbts.co.jp/e/product/p\\_detail.html?pdid=120](https://www.tbts.co.jp/e/product/p_detail.html?pdid=120)
- [14] Hexagon, Leica T-Mac type next [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/robotics-and-automation/robodyn>

- [15] Robot-Welding, 2001. Robot TCP calibration unit. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <http://www.robot-welding.com/tcp.htm>
- [16] Leoni, Leoni TCP calibration unit. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.leoni-factory-automation.com/en/products-and-services/calibration-of-robotic-tools-fixtures/integration/>
- [17] Docplayer. KUKA systém software. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://docplayer.net/60007525-Kuka-system-software-5-2-5-3-5-4.html>
- [18] 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. 2020-01-19]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.12.002. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014163591400213X>
- [19] JOUBAIR, Ahmed a Ilian A. BONEV. Kinematic calibration of a six-axis serial robot using distance and sphere constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, 77(1-4), 515-523 [cit. 2020-01-19]. DOI: 10.1007/s00170-014-6448-5. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-6448-5>
- [20] IBS, IBS Trinity sonda. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <http://www.ibspe.com/news/new-wireless-probe-system-for-machine-tool-axis-inspection-and-analysis.htm>
- [21] KUKA, Model robotu KUKA KR 60-3. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-gb/products/robotics-systems/industrial-robots/kr-60>
- [22] CRAIG, John J. *Introduction to robotics: mechanics and control*. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall, c2005. ISBN 978-0201543612.
- [23] HAYAT, Abdullah Aamir, Rajeevlochana G. CHITTAWADIGI, Arun Dayal UDAI a Subir K. SAHA. Identification of Denavit-Hartenberg Parameters of an Industrial Robot. In: *Proceedings of Conference on Advances In Robotics – AIR '13* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2013, 2013, s. 1-6 [cit. 2020-07-08]. DOI: 10.1145/2506095.2506121. ISBN 9781450323475. Dostupné z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2506095.2506121>
- [24] Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheunemann (1955). "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices". *Trans ASME J. Appl. Mech.* 23: 215–221
- [25] BARYLSKI, A. a N. PIOTROWSKI. Modelling a 6dof manipulator using Matlab software. *Czasopismo spoza wykazu ministerialnego*. 2014, 2014, 45–55. ISSN 1233-9709.
- [26] Alireza Khatamian. In: Solving kinematics problem of 6-DOF robot manipulator. [online]. Computer Science Department, The University of Georgia, Athens, GA, U.S.A Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Solving-Kinematics-Problems-of-a-6-DOF-Robot-Khatamian/188dca40fa862c5cd574f09ae68e1e4e30852fc5>

- [27] Staubli, Robot Stäubli. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/en/robotics/product-range/industrial-robots/6-axis-robots/tx2-90/>
- [28] API, API RADIANT PRO sonda. [online]. 2020. [cit.9.7.2020]. Dostupné z: <https://apimetrology.com/laser-trackers/>
- [29] ŠIKA, Zbyněk et al. Calibrability as Additional Design Criterion of Parallel Kinematic machines. *Elsevier*. 2012, (50), 48-63. ISSN 0094-114X.
- [30] STEJSKAL, Vladimír. a Michael. VALÁŠEK. *Kinematics and dynamics of machinery*. New York: M. Dekker, 1996. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 106. ISBN 08-247-9731-0.
- [31] RAGHAVAN, M. a B. ROTH. Inverse Kinematics of the General 6R Manipulator and Related Linkages. *Journal of Mechanical Design*. 1993, (115), s. 502-08. ISSN 10500472. Dostupné také z: <http://MechanicalDesign.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1443664>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Kalibrace robotu pomocí laser trackeru [5] .....	15
Obrázek 2 Zrcadlový odražeč laser trackeru [7] .....	16
Obrázek 3 VX Tracker [8] .....	17
Obrázek 4 Kalibrace robotu pomocí VXtrackeru [9] .....	17
Obrázek 5 ZIS kalibrační jednotka [10] .....	18
Obrázek 6 „Aktive target“ společnosti API [11] .....	19
Obrázek 7 Leica T-Mac[13] .....	20
Obrázek 8 Zařízení T-Mac [12] .....	20
Obrázek 9 TCP jednotka [15] .....	21
Obrázek 10 Schematická ukázka zapojení TCP jednotky [16] .....	22
Obrázek 11 Kalibrace svařovacích kleští robota [17] .....	23
Obrázek 12 Kalibrace pomocí granitového čtverce [18] .....	23
Obrázek 13 Kalibrační koule pro kalibrace robotu [19] .....	24
Obrázek 14 IBS Trinity [20] .....	24
Obrázek 15 IBS Trinity sonda a její specifikace [20] .....	25
Obrázek 16 Model robotu KUKA KR60-3 [21] .....	27
Obrázek 17 DH zavedení souřadných systémů [24] .....	29
Obrázek 18 Dopředná kinematika .....	29
Obrázek 19. Klouby robota se souřadnicovými systémy podle DH [24] .....	30
Obrázek 20 Model robotu z nominálních rozměrů .....	33
Obrázek 21 Chyba rozměrů ramen robota .....	33
Obrázek 22 Chyba natočení kloubu robota .....	34
Obrázek 23 Chyba umístění robota v pracovním prostoru .....	35
Obrázek 24 Inverzní kinematika .....	35
Obrázek 25 Různé konfigurace robota pro dosažení požadované polohy [24] .....	36
Obrázek 26 Výpočet jointu 1 pomocí geometrie [26] .....	36
Obrázek 27 Výpočet jointu 3 pomocí geometrie [26] .....	37
Obrázek 28 Výpočet jointu 2 pomocí geometrie [26] .....	38



Obrázek 29 Paletka s 8 body .....	41
Obrázek 30 Najetí robotu na body paletky .....	42
Obrázek 31 Poloha efektoru a rozvil mezi efektořem a bodem paletky .....	43
Obrázek 32 Vnitřní body paletky .....	45
Obrázek 33 Navřená paletka s 4 body.....	47
Obrázek 34 Najetí na první bod paletky .....	48
Obrázek 35 Rozdíl mezi konečným efektořem a bodem paletky.....	48
Obrázek 36 Vnitřní body paletky s 4 kalibrační body .....	50
Obrázek 37 Robot Stäubli, který byl použit pro měření [27].....	52
Obrázek 38 Laser tracker, který byl použit pro měření [28].....	53
Obrázek 39 Naměřené body robotu a laser trackeru .....	54
Obrázek 40 Směr odchylek mezi robotem a laser trackerem.....	55

## Seznam grafu

Graf 1 Průběh chyb 1. vnitřního bodů paletky .....	46
Graf 2 Průběh chyb 1. vnitřního bodu paletky se 4 body.....	51

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání laser trackeru.....	16
Tabulka 2 Porovnání technologie.....	26
Tabulka 3 DH parametry pro KUKA KR60-3 .....	30
Tabulka 4 Hodnoty bodů paletky .....	42
Tabulka 5 Hodnoty natočení kloubů .....	42
Tabulka 6 Hodnoty naměřených odchylek v bodech.....	43
Tabulka 7 Metody interpolace .....	44
Tabulka 8 Hodnoty natočení kloubu pro 3 vnitřní body paletky .....	45
Tabulka 9 Hodnoty bodu vnitřního prostoru.....	45
Tabulka 10 Potřebné kompenzační hodnoty pro dosazení správné polohy .....	46
Tabulka 11 Hodnoty paletky s 4 body .....	47
Tabulka 12 Hodnoty úhlů natočení kloubů.....	48
Tabulka 13 Hodnoty odchylek v bodech paletky.....	49
Tabulka 14 Hodnoty úhlů natočení pro 3 vnitřní body paletky .....	50
Tabulka 15 Hodnoty bodů uvnitř paletky .....	50
Tabulka 16 Hodnoty vnitřních bodu paletky .....	51
Tabulka 17 Charakteristiky robotu Stäubli .....	52
Tabulka 18 Charakteristiky laser trackeru .....	53

## Seznam použitého Software

MATLAB R2019b

Microsoft Office

Draw io

Microsoft Excel

Solid Works

## Seznam příloh

### Textové

Popis souborů zdrojového kódu

### Elektronické

#### Soubory zdrojového kódu:

denavit.m

OK\_INVERZNI\_kin\_zach\_robot\_8.m

OK\_DOPREDNI\_kin\_zach\_robot\_8.m

OK\_NOMINALNI\_robot\_8.m

OK\_INVERZNI\_kin\_nezach\_robot\_8\_body\_v\_Prostoru.m

OK\_Test\_from\_matlab8BODU.mlx

OK\_INVERZNI\_kin\_nezach\_robot\_4\_body\_v\_Prostoru.m

OK\_INVERZNI\_kin\_zach\_robot\_4.m

OK\_DOPREDNI\_kin\_zach\_robot\_4.m

OK\_NOMINALNI\_robot\_4.m

OK\_Interp2\_pro\_4body.mlx

Body2.mlx

Ax.m

Ay.m

Az.m

Aphix.m

Aphiy.m

Aphiz.m

mereni\_01\_robot.xls – hodnoty bodů změřené robotem

mereni\_01\_tracker.xls - hodnoty bodů změřené laser trackerem

mereni\_01\_spolecne\_vyrovnani.xlsx – společné body robotu a laser trackeru

Interpolace3D.mlx

### **Soubory do KOSu**

Diplomová práce ve formátu .docx

Diplomová práce ve formátu .pdf

Archiv zdrojového kódu Matlab

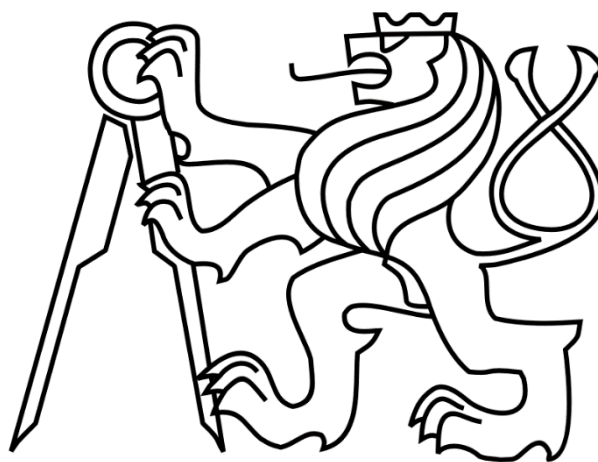
DP\_NiZarbat.docx

DP\_NiZarbat.pdf

DP\_NZT.zip

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

**Zvýšení přesnosti robotů**

Textové přílohy

2020

Ni Zarbat

## Popis souborů zdrojového kódu

- **denavit.m**

V tomto Matlab souboru se plní funkce dle Denavit-Hartenbergova metody. Tato funkce je dále vyvolána v dalším Matlab kódu pro vytvoření homogenní transformační matice pomocí zadaných hodnot rozměrů a úhlů kloubů zvoleného robotu.

- **OK\_INVERZNI\_kin\_zach\_robot\_8.m**

Řeší inverzní kinematickou úlohu zacybovaného robota pro orientaci a polohu konečného efektoru robotu v prostoru. Zadává se zde požadovaná poloha konečného efektoru robotu v prostoru, výstupem jsou hodnoty natočení jednotlivých kloubů robotu. Celkem měřeno 8 bodů navržené paletky.

- **OK\_DOPREDNI\_kin\_zach\_robot\_8.m**

Řeší polohu konečného efektoru robotu, kde hodnoty úhlu natočení kloubů po inverzní kinematické úloze se zadávají a dodává se náhodná hodnota úhlu  $\alpha$ . Celkem měřeno 8 bodů navržené paletky.

- **OK\_NOMINALNI\_robot\_8.m**

Řeší dopřednou kinematiku nominálního, nezacybovaného robota pomocí zjištěných úhlů zacybovaného robota pro konkrétní bod v prostoru. Celkem měřeno 8 bodů navržené paletky. A konečně se zjišťuje hodnota odchylek, což je měřená hodnota, kam najel nominální robot a kde je bod paletky v prostoru.

- **OK\_INVERZNI\_kin\_zach\_robot\_4.m**

Řeší inverzní kinematickou úlohu zacybovaného robota pro orientaci a polohu konečného efektoru robotu v prostoru. Zadává se zde požadovaná poloha konečného efektoru robotu v prostoru, výstupem jsou hodnoty natočení jednotlivých kloubů robotu. Celkem měřeno 4 bodů navržené paletky.

- **OK\_DOPREDNI\_kin\_zach\_robot\_4.m**

Řeší polohu konečného efektoru robotu, kde se zadávají hodnoty úhlů natočení kloubů po inverzní kinematické úloze a zadává se náhodná hodnota úhlu  $\alpha$ . Celkem měřeno 4 body navržené paletky.

- **OK\_NOMINALNI\_robot\_4.m**

Řeší dopřednou kinematiku nominálního, nezacybovaného robota pomocí zjištěných úhlů zacybovaného robota pro konkrétní bod v prostoru. Celkem měřeno 8 bodů navržené paletky. A konečně se zjišťuje hodnota odchylek, což je měřená hodnota, kam najel nominální robot a kde je bod paletky v prostoru.

- **OK\_Test\_from\_matlab8BODU.mlx**



Řeší se interpolační funkce „interp3“ pomocí zavedených bodů paletky a zjištěných hodnot odchylek v každém bodě této paletky. V daném případě pro 8 bodů paletky.

- **OK\_Interp2\_pro\_4body.mlx**

Řeší se interpolační funkce „interp2“ a „scatteredinterpolant“ pomocí zavedených bodů paletky a zjištěných hodnot odchylek v každém bodě této paletky. V daném případě pro 4 body paletky.

- **Body2.mlx**

Tento soubor byl použit pro vykreslení změřených 39 bodů, které byly změřeny pomocí robotu Stäubli a Laser trackeru. Výstupem z tohoto souboru jsou znázorněné změřené body a hodnoty odchylek v těchto bodech. Používá hodnoty ze souboru Excel (mereni\_01\_robot.xls a mereni\_01\_tracker.xls).

- **Ax.m**

Řeší funkce pro tvorbu transformační matice popisující translace v ose x.

- **Ay.m**

Řeší funkce pro tvorbu transformační matice popisující translace v ose y.

- **Az.m**

Řeší funkce pro tvorbu transformační matice popisující translace v ose z

- **Aphix.m**

Řeší funkce pro tvorbu transformační matice popisující rotace v ose x.

- **Aphiy.m**

Řeší funkce pro tvorbu transformační matice popisující translace v ose y.

- **Aphiz.m**

Řeší funkce pro tvorbu transformační matice popisující translace v ose z.

- **OK\_INVERZNI\_kin\_nezach\_robot\_4\_body\_v\_Prostoru.m**

Řeší inverzní kinematickou úlohu nezachybovaného robota pro orientaci a polohu konečného efektoru robotu v prostoru. Zadává se zde požadovaná poloha konečného efektoru robotu v prostoru, výstupem jsou hodnoty natočení jednotlivých kloubů robotu. Celkem měřeny 3 body vnitřního prostoru navržené paletky.

- **OK\_INVERZNI\_kin\_nezach\_robot\_8\_body\_v\_Prostoru.m**

Řeší inverzní kinematickou úlohu nezachybovaného robota pro orientaci a polohu konečného efektoru robotu v prostoru. Zadává se zde požadovaná poloha konečného efektoru robotu v prostoru, výstupem jsou hodnoty natočení jednotlivých kloubů robotu. Celkem měřeny 3 body vnitřního prostoru navržené paletky.

- **Interpolace3D.mlx**

V tomto souboru je zdrojový kód, který byl použit pro zobrazení obrázků a grafu všech typů paletek, které byly navrženy v celé práci.