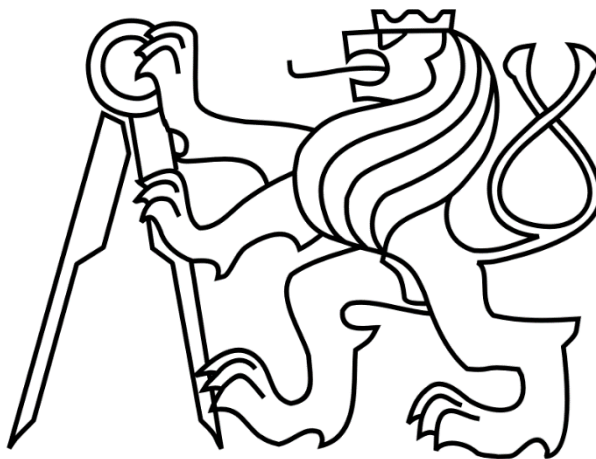


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Průmyslový robot s dotykovou sondou

Bc. Šimon Paleček

2023

1823

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Paleček** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **467332**
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:

Průmyslový robot s dotykovou sondou

Název diplomové práce anglicky:

Industrial robot with touch probe

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Práce se bude zabývat implementací dotykové sondy do průmyslového robotu určeného pro obráběcí operace a řízeného CNC řídicím systémem. Součástí práce bude posouzení přesnosti měření na průmyslovém robotu, vliv řídicího systému na přesnost a případová studie automatické identifikace poloh zásobníku nástrojů robotu. Osnova práce: Rešerše v oblasti měření dotykovými sondami; Návrh implementace do průmyslového robotu; Analýza přesnosti měření; Návrh automatické identifikace poloh zásobníku nástrojů pomocí dotykové sondy; Testování a verifikace. Rozsah grafické části: Schéma zapojení dotykové sondy; model zásobníku pro určení referenčních poloh lůžek; model pracoviště robotu s dotykovou sondou; Rozsah textové části: 60-80 stran;

Seznam doporučené literatury:

Dokumentace Siemens Sinumerik [online], Dostupné z: www.siemens.com; Dokumentace Renishaw [online], Dostupné z: www.renishaw.com; Dokumentace Kuka [online], Dostupné z: www.kuka.com

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. Michal Rytíř ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **24.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **24.09.2023**

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

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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 24.7.2023

.....

podpis

Poděkování

Velké poděkování patří mému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Švédovi Ph.D. za odborné a podnětné vedení, věcné připomínky, cenné rady, obětavou podporu a velikou trpělivost. Dále bych chtěl doktoru poděkovat za vstřícné jednání a čas, který mi věnoval při tvorbě této diplomové práce.

Mé poděkování patří i mému konzultantovi Ing. Michalu Rytířovi za odborné rady a připomínky v oblasti průmyslových robotů.

Také bych chtěl poděkovat mé rodině za velkou morální podporu během celého studia.

Anotace

Autor:	Bc. Šimon Paleček
Název DP:	Průmyslový robot s dotykovou sondou
Rozsah práce:	92 str., 95 Obr., 20 tab.
Školní rok vyhotovení:	2023
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení Ú12135
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Jiří Švéda Ph.D.
Konzultant:	Ing. Michal Rytíř
Zadavatel:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Využití:	implementace dotykové sondy do průmyslového robotu určeného pro obráběcí operace, automatická identifikace pozic zásobníku nástrojů
Klíčová slova:	Měření robotem, Průmyslový robot s dotykovou sondou, implementace dotykové sondy do průmyslového robotu
Anotace:	Diplomová práce se zabývá měřením a implementací dotykové sondy do průmyslového robotu určeného pro obráběcí operace. Byly provedeny série měření v různých pozicích a orientacích v pracovním prostoru robotu. Byl upraven postprocesor umožňující automatické uložení naměřených pozic jednotlivých lůžek nástrojů do magazine dat k jednotlivým pozicím lůžek nástrojů.

Annotation

Author:	Bc. Šimon Paleček
Title of diploma dissertation:	Industrial robot with touch probe
Extent:	92 p., 95 fig., 20 tab.
Academic year:	2023
Univerzity:	CTU – Faculty of mechanical engineering
Department:	Ú12135 - Research Centre of Manufacturing Technology
Supervisor:	Ing. Jiří Švéda Ph.D.
Consultant:	Ing. Michal Rytíř
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of mechanical engineering
Application:	implementation of a touch probe in an industrial robot intended for machining operations, automatic identification of tool magazine positions
Key words:	Measurement by robot, Industrial robot with touch probe, implementation of touch probe in industrial robot
Annotation:	This thesis focuses on the measurement and implementation of a touch probe in an industrial robot designed for machining operations. Several measurements were conducted in different positions and orientations within the robot's workspace. The postprocessor was modified to enable automatic storage of measured positions of individual tool slots into the magazine data corresponding to each tool slot position.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíl práce.....	11
3	Přehled aktuálního stavu měření dotykovými sondami u výrobních zařízení.....	12
3.1	Dotyková sonda Renishaw.....	14
3.2	Dotyková sonda Hexagon	17
3.3	Měření dotykovými sondami na obráběcích zařízeních	18
3.4	Měření v ŘS Sinumerik	19
3.5	Omezení měřicí rychlosti.....	22
3.6	Výrobní zařízení	24
3.7	Souřadné systémy robotů a manipulátorů a výrobních zařízení	25
3.8	Průmyslové roboty	27
3.9	Řídící systémy	29
3.10	Řídící systém KUKA KR C4.....	34
3.10.1	KUKA KR C4 – tvorba nástroje	35
3.10.2	KUKA KR C4 – tvorba báze	36
3.11	Řídící systém Sinumerik 840D sl	37
3.11.1	Spojení systému Sinumerik a robotu.....	37
3.11.2	Výrobní program	38
3.12	Automatická výměna nástroje.....	40
3.13	Přesnost a opakovatelnost.....	41
4	Implementace dotykové sondy do průmyslového robotu.....	42
4.1	Zapojení sondy	43
4.2	Cell soubor v KUKA KR C4	46
4.3	Nastavení parametrů – Sinumerik	47
4.4	Transformace souřadných systémů.....	50
5	Analýza přesnosti měření pomocí robotu a vliv řídicího systému	51
5.1	Měřené pozice	52

5.2	Vyhodnocení dat naměřených v jednotlivých pozicích.....	55
5.2.1	Měření v G54	56
5.2.2	Měření v G55	61
5.2.3	Měření v G56	66
5.2.4	Měření v G57	71
5.2.5	Měření v G57 s rotací kolem osy „B“ o 30°	76
5.3	Shrnutí naměřených dat.....	81
6	Automatická identifikace pozic zásobníku.....	84
6.1	Určení pracovního souřadného systému v režimu JOG.....	85
6.2	Testování a verifikace automatické identifikace.....	87
7	Závěr.....	91
	Seznamy	93

Seznam zkratk

CAD	Computer Aided Design / Počítačová podpora konstruování
CCU	Cabinet Control Unit - řídicí deska
CIIRC	Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky
CNC	Computer Aided Manufacturing / Počítačová podpora výroby
CPU	Central Processing Unit – procesor
FA	měřicí dráha
GND	zemní bod
HMI	Human Machine Interface – rozhraní mezi uživatelem a zařízením
I/O	vstupy/výstupy
JOG	jogging – pohyb v JOG režimu – manuální
KRL	KUKA Robot Language – programovací jazyk KUKA robotů
MCS	Machine Coordinate System – Strojový souřadnicový systém
MD	machine data nastavitelné parametry v ŘS Sinumrik
NC kód	Numerical control code – soubor instrukcí napsaný v formátu čitelném pro NCU
NCU	zařízení sloužící k řízení průmyslových strojů pomocí řídicích kódů
PLC	Programmable Logic Controller / Programovatelný logický automat
RA1-6	natočení jednotlivých kloubů robotu
RAM	Random Access Memory – paměť
RMR	Run my robot
ROM	Read-Only Memory – paměť
ŘS	řídicí systém
SD	setting data nastavitelné parametry v ŘS Sinumrik
TCP	Tool centr point – pracovní bod nástroje
WCS	Work Coordinate System – Pracovní souřadnicový systém

Seznam veličin

A	Rotace kolem osy „X“ na CNC	[°]
	Rotace kolem osy „Z“ v KUKA	
B	Rotace kolem osy „Y“	[°]
C	Rotace kolem osy „Z“ na CNC	[°]
	Rotace kolem osy „X“ v KUKA	
Kv	Zesílení polohového regulátoru	[(m/min)/mm]
	Odchylka od požadované hodnoty	[μm]
	Rozptyl naměřených odchylek	[μm]

1 Úvod

Průmyslové roboty se hojně využívají v průmyslové praxi nejen pro manipulaci po předem naprogramovaných drahách, ale také se dají využívat pro obrábění a další činnosti. Zlepšování pružnosti výroby sebou nese variabilnější požadavky na pohyby robotu. Časté změny požadavků na robotu zvyšuje potřebu úprav programu a používaných souřadnic. Tyto změny souřadnic a programů však vyžadují přerušení provozu robotu. Přerušení chodu robotu je nevýdělečnou operací, a proto je snaha co nejvíce zkrátit doby přerušení automatických cyklů. Časy přerušení automatických cyklů je možné zkrátit například pomocí simulací, ve kterých může být program robotu zkontrolován bez přerušení provozu stroje. Simulace pracují pouze s virtuálními daty a souřadnicemi často získanými z CAD modelů a přibližných Layoutů. Na samotných pracovištích jsou souřadnice vždy jiné vlivem výroby jednotlivých komponent a také jejich montáží. Reálné pozice jednotlivých používaných bodů je třeba před spuštěním automatických cyklů ověřit a upravit, tak aby odpovídali reálné konstelaci. Ověřování jednotlivých bodů je časově náročné a často záleží na zručnosti a úsudku programátora. Při ověřování je třeba v jednotlivých významných bodech zkontrolovat reálnou polohu robotu a rozhodnout, zda je pro daný úkon tato poloha robotu přijatelná nebo zda je třeba souřadnice upravit. Manuální kontrolování souřadnic je časově náročné a může snižovat přesnost vzájemných souřadnic. Použití měřících zařízení na robotu pomáhá určit souřadnice kontrolovaných bodů a rozhodovat čistě na základě zaznamenaných hodnot a příslušných tolerančních polí. Pomocí robotického měření je tedy možné zkrátit nepracovní časy robotických pracovišť a tím snížit náklady. Na samotné měření souřadnic má vliv celá měřící aparatura, do které patří dotyková sonda se svými komponentami a také měřené objekty, robot a řídicí systém. Cílem této práce je navrhnout způsob připojení a implementovat dotykovou sondu do průmyslového robotu KUKA určeného pro obráběcí operace, který je řízený řídicím systémem Siemens Sinumerik 840D sl. Dotyková sonda má sloužit nejen pro měření obrobků, ale také například pro automatickou identifikaci přesných pozic zásobníku dle načtených pozic z 3D modelu. To umožní zvýšení efektivity uvedení do provozu bez nutnosti ručního proměřování jednotlivých lůžek zásobníku. Zejména u zásobníků s velkým počtem pozic je konvenční způsob identifikace pozic značně časově náročný.

2 Cíl práce

Cílem této práce bylo navrhnout a implementovat dotykovou sondu do průmyslového robotu KUKA KR60 HA určeného pro obráběcí operace, řízeného CNC řídicím systémem Sinumerik 840D sl. Dále se tato práce zabývá posouzením přesnosti měření na tomto průmyslovém robotu. Tato práce se rovněž zabývá návrhem automatické identifikace poloh lůžek v zásobníku nástrojů a automatickým zápisem naměřených poloh zásobníku do parametrů magazínu nástrojů. Cíli této diplomové práce tedy bylo:

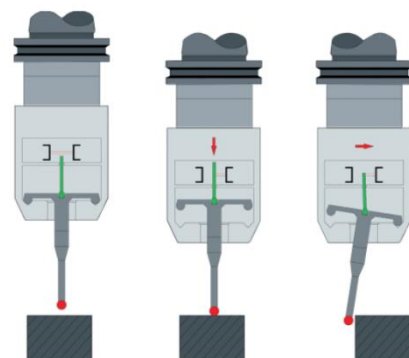
- Navrhnout způsob implementace dotykové sondy do průmyslového robotu KUKA vybaveného řídicím systémem Siemens Sinumerik
- Implementovat dotykovou sondu do průmyslového robotu KUKA vybaveného řídicím systémem Siemens Sinumerik a analyzovat dosažitelnou přesnost
- Navrhnout a verifikovat způsob automatické identifikace poloh zásobníku pomocí dotykové sondy

3 Přehled aktuálního stavu měření dotykovými sondami u výrobních zařízení

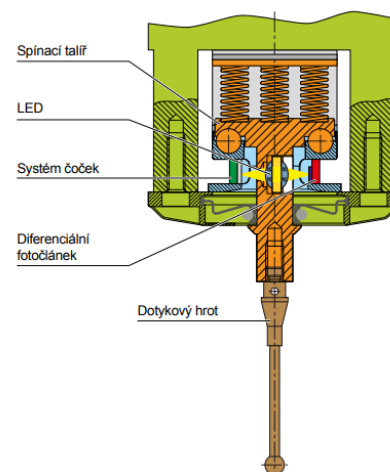
Měření dotykovými spínacími sondami je prováděno najížděním na fyzické plochy a při zaznamenání skokové změny signálu (sepnutí) jsou zaznamenány polohy jednotlivých os, které definují společně s použitými parametry nástroje a charakterem měření bod doteku.

Dotykové obrobkové sondy mohou fungovat na různých principech. Základní dělení je dle režimu zaznamenávání signálu, který může být proporční nebo binární. Proporční systémy jsou využívány například pro skenování a je možné pomocí těchto sond získávat celá mračna bodů. Společnost Renishaw nabízí pro skenování systém SPRINT se sondou OSP60. V práci dále se zabývám sondami s binárním výstupem informující binárně o uskutečnění dotyku. Mezi nejvíce používané principy získávání digitálního binárního signálu patří: sledování paprsku, měření toku elektrického proudu či měření elektrického náboje. Paprskové metody fungují buď na principu optické závory (viz Obr. 2), anebo na principu sledování paprsku na fotočlátku (viz Obr. 1). [1], [2]

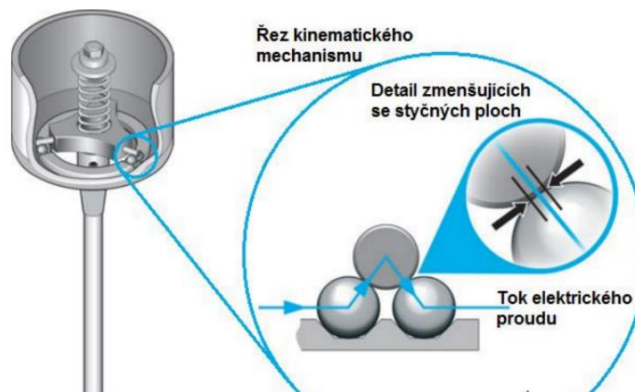
Elektrický proud může být sledován při průchodu tenzometry (viz Obr. 4) nebo při průchodu kuličkami u kterých je sledován pomocí měření odporu průřez styčné plochy (viz Obr. 3). Dotekové sondy mají společné elementy v podobě „tyčky“ složené z: upevňovací části, prodlužovací části a dotekové kuličky. Všechny tyto části jsou vyráběné z materiálů s malou teplotní roztažností a zároveň s dostatečnou tuhostí. Další výhodnou vlastností běžně používaných materiálů středních částí doteků je křehkost, která chrání prasknutím doteku vnitřní mechanismus sondy před destrukcí. [2], [3]



Obr. 1: dotyková sonda založená na principu optické závory [1]

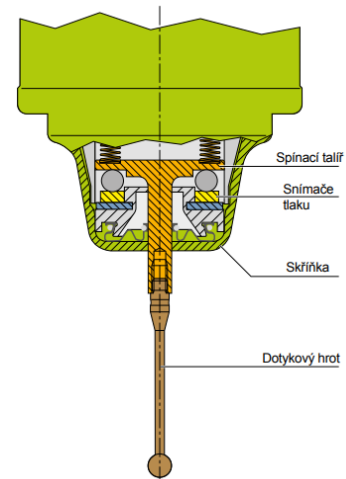


Obr. 2: dotyková sonda založená na fotočlátku [2]



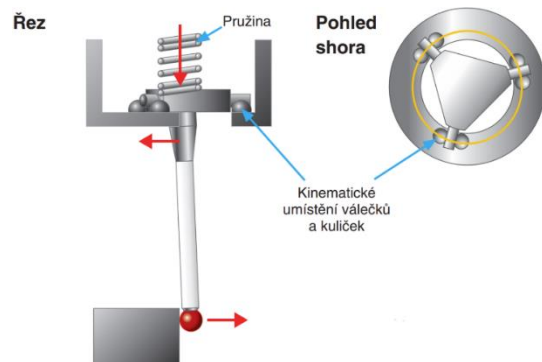
Obr. 3: dotyková sonda založená na sledování odporu závislého na průřezu styčné plochy [3]

Dotykové sondy hojně využívají šestibodový styk se třemi rovnoměrně rozmístěnými páry doteků (viz Obr. 5). Kontaktní plochy jsou na přesných a tepelně stálých kuličkách. Celý vnitřní mechanismus sondy je přitlačován do klidového stavu. Přítlačná síla a vnitřní konstrukce má výrazný vliv na výsledné vlastnosti a chyby sondy. Malá přítlačná síla zvyšuje riziko aktivace „falešného“ doteku způsobeného vibracemi či přílišnou dynamikou manipulace se sondou. Malá přítlačná síla může také způsobit chybu měření tím, že aktivuje signál při kontaktu například kontakt s emulzí, a ne až s měřeným povrchem. Síla potřebná k aktivování signálu ovlivňuje mimo jiné také vhodné délky doteků. [2], [3]



Obr. 4: dotyková sonda založená na sledování tlaku [2]

Trojúhelníková geometrická chyba, která je u běžných kinematických dotykových sond Renishaw, je odstraněna u tenzometrických dotykových sond Renishaw Rengage. Tyto sondy získávají informaci o provedení doteku pomocí vyhodnocení prahové hodnoty z tenzometrického měření. Kinematický mechanismus je využíván „pouze“ k ochraně sondy a poskytnutí času stroji na bezpečné zastavení. Díky tomuto opatření je



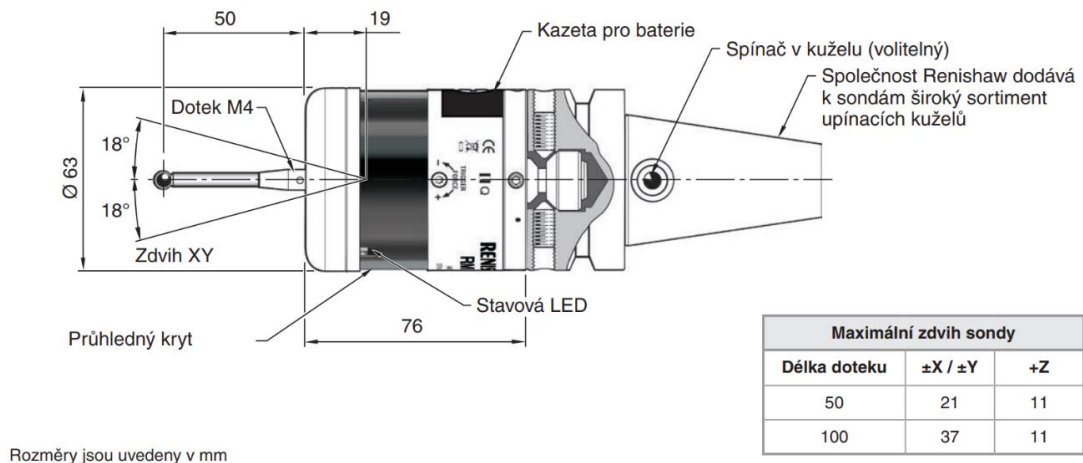
Obr. 5: šestibodový styk [3]

možné provádět měření s vysokou rychlostí a zároveň s vyšší přesností než běžné kinematické sondy Renishaw. Tenzometrické sondy mohou díky své konstrukci používat k měření delší doteky což výrazně rozšiřuje možnosti využití. Zvýšená přesnost tenzometrických sond s opakovatelností sondy $0,25 \mu\text{m } 2\sigma$ umožňuje využívat tyto sondy ke kalibraci víceosých strojů. [3]

Dotekové sondy bývají s integrovaným zdrojem energie, díky tomu mohou být bezdrátové a mohou být umístěny do vřeten pomocí výměníku nástrojů. Signál ze sondy bývá do zařízení přenášán pomocí rádiového signálu, pomocí kabelu nebo optického přenosu signálu přes příslušný přijímač, přes který probíhá komunikace mezi pracovním zařízením a samotnou sondou. Přijímač rádiového nebo optického signálu zprostředkovává komunikaci nejen o uskutečnění dotyku, ale zároveň zprostředkovává informace o případné chybě, aktivitě (probuzení) sondy a stavu baterie. Z důvodů zajištění stability provozu je nezbytné umístit interface, tak aby splňoval požadavky na překrývání pracovních oblastí, ale zároveň zajistil, aby interface a vedení k němu nebylo v blízkosti silových vodičů ani motorů. [2], [3]

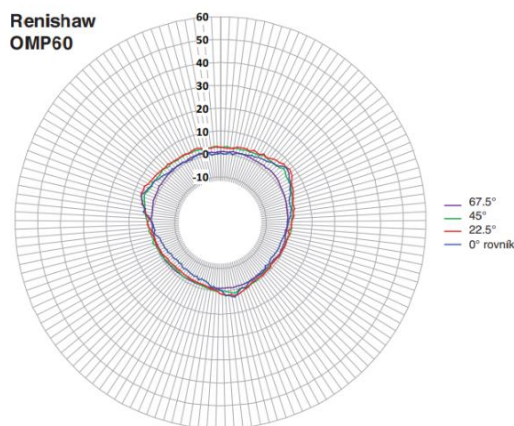
3.1 Dotyková sonda Renishaw

Dotyková radiová sonda Renishaw RMP60 je využívána s radio-interface Renishaw RMI Q. Opakovatelnost sondy RMP60 je udávána $1 \mu\text{m } 2\sigma$ při měřící rychlosti 480 mm/min s délkou doteku 50 mm. Maximální bezpečný zdvih sondy je (viz Obr. 6) v směru „+Z“ 11 mm a maximální bezpečný úhel vychýlení doteku je 18° od osy „Z“, tyto možné výchylky poskytují stroji prostor k bezpečnému zastavení. [4]

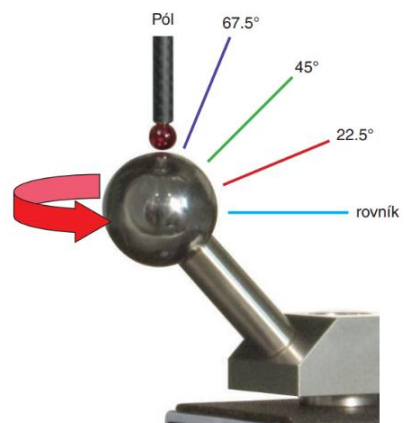


Obr. 6: dotyková radiová sonda Renishaw RMP60 [4]

Opakovatelnost dotykové sondy RMP60 je shodná s dotykovými sondami OMP60 (mechanismus dotyku sondy je totožný, sondy se liší přenosem signálu do interface) a je výrobcem udávána $1 \mu\text{m}$ při testovací rychlosti 480 mm/min s délkou doteku 50 mm. Přesnost dotykové sondy je vlivem vnitřní konstrukce mechanismu rozdílná v jednotlivých směrech (viz Obr. 8). Nejlepší přesnost a opakovatelnost sonda vykazuje ve směru „Z“. V kolmé rovině „XY“ je přesnost sondy závislá na orientaci tří párů kontaktních bodů mechanismu. Vnitřní mechanismus také způsobuje, že prahová hodnota výchylky doteku, kdy dojde k vyslání signálu o provedení dotyku dochází při působení různými silami v různých směrech (viz Obr. 7). [3]



Obr. 7: trojúhelníkové geometrické chyby naměřené sondou Renishaw OMP60 [3]



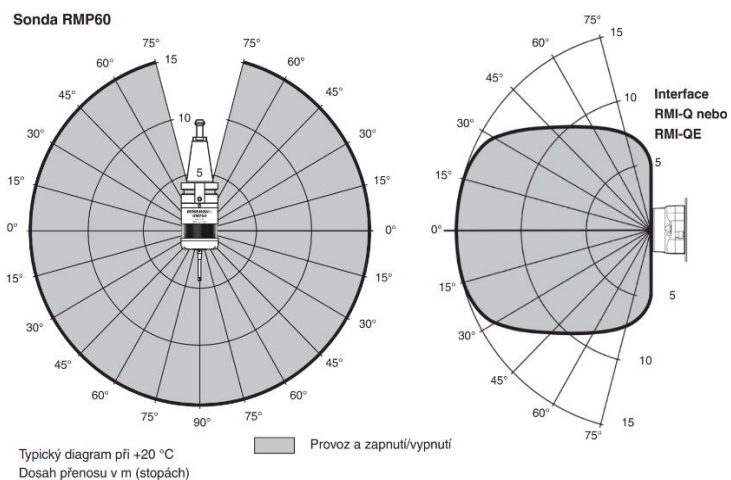
Obr. 8: kalibrační koule na které byla testována sonda OMP60 [3]

Renishaw RMI-Q je interface (Obr. 9) sloužící k obousměrné komunikaci mezi až čtyřmi sondami Renishaw a zařízením na kterém jsou použity. S touto jednotkou je možné spárovat jak obrobkové, tak nástrojové sondy společnosti Renishaw a umožňuje kombinací signálů probudit kteroukoliv spárovanou sondu. [4], [5]



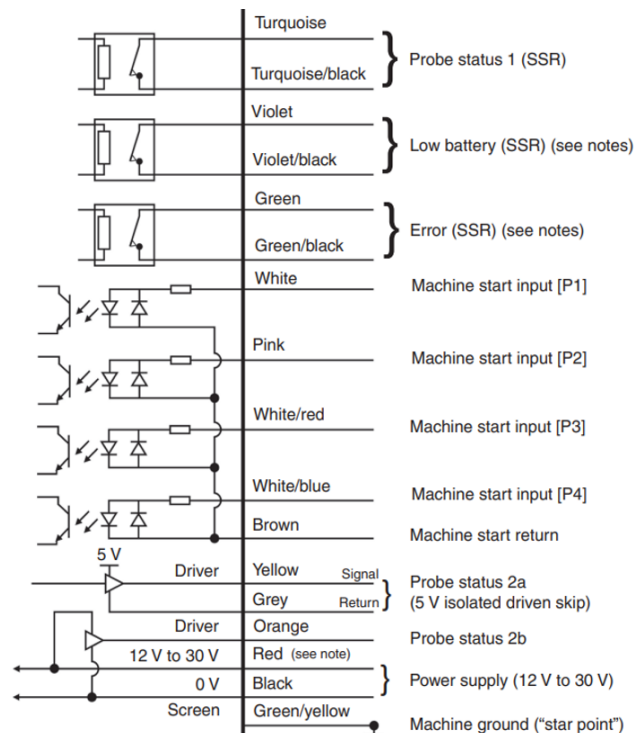
Obr. 9: Renishaw RMI-Q [4]

Díky použití radiového signálu, který může být v pořádku přijímán i po odrazu, není nezbytná přímá spojnice mezi sondou a jednotkou jako je tomu u sond s optickou komunikací. Pro úspěšnou komunikaci mezi sondami a interfacem je třeba ať se v poli působnosti sondy nachází interface a v poli působnosti interface nachází sonda (viz Obr. 10). [4], [5]



Obr. 10: pole působnosti sondy a interface [5]

Zapojení radiointerfacu RMI-QE (viz Obr.11) vyžaduje připojení zdrojového napájení, které musí být v rozmezí 12-30V. Další nezbytný okruh, který musí být zapojen je okruh sloužící pro probuzení příslušné sondy. Sledování sepnutí signálu je možné buďto na okruhu označeném na následujícím obrázku Probe status 1, dalším okruhem, na kterém je možné sledovat informaci o doteku, je okruh označený Probe status 2a fungující po připojení 5V zdroje s 5V signálem. Poslední možnost pro sledování signálu o doteku je sledování signálu na uzavření okruhu označeném Probe status 2b, který má výstupní napětí odpovídající zdrojovému napětí. [6]



Obr. 11: elektro-schéma zapojení radiointerface [6]

Mechanické uložení sondy může mít na výsledné měření sondy velký vliv, sonda je upevňována a mechanicky nastavována pomocí stavěcích šroubů (viz Obr.12). Ustavování v upínači probíhá postupným nastavováním stavěcích šroubů podle průběžného měření na úchylkoměru při rotování sondy ve vřetenu. [7]

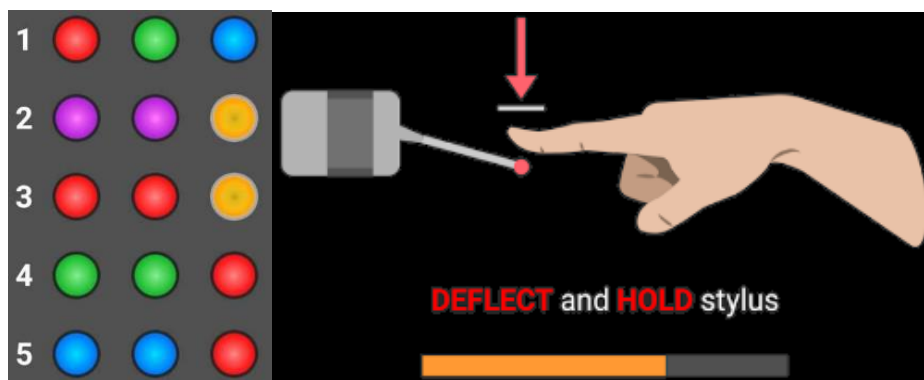
Sonda RMP-60 ve spolupráci s radiointerfacem umožňuje provoz v různých režimech a umožňuje nastavení různých vlastností od zpracovávání doteku signálu pomocí spínacího nebo rozpínacího signálu. Další nastavení umožňuje například nastavit sondu na vysílání signálu v pulzním režimu.



Obr. 12: seřízení sondy [7]

Sondu je možné zapnout pomocí sepnutí příslušného okruhu na radiointerfacu. Další možností zapnutí sondy je možné pomocí spínacího tlačítka v upínači nástrojů, anebo zapnutí sondy pomocí rotace vřetene. Vypnutí sondy je závislé na nastavení, k vypnutí může docházet opětovným sepnutím příslušného okruhu radiointerfacu. Využívanější variantou je vypnutí sondy po určitém časovém úseku. [6]

Nastavování sondy je možné provádět pomocí manuálů nebo je možné pro nastavování sondy využít aplikaci Probe Setup, která navádí operátora jednotlivými kroky nastavování složených z příslušných sekvencí spínání, držení a rozpínání doteku (viz Obr. 13). Nastavení sondy je možné sledovat pomocí sledování sekvencí barev blikajících na sondě. [8]



Obr. 13: instrukce z Probe Setup Renishaw [8]

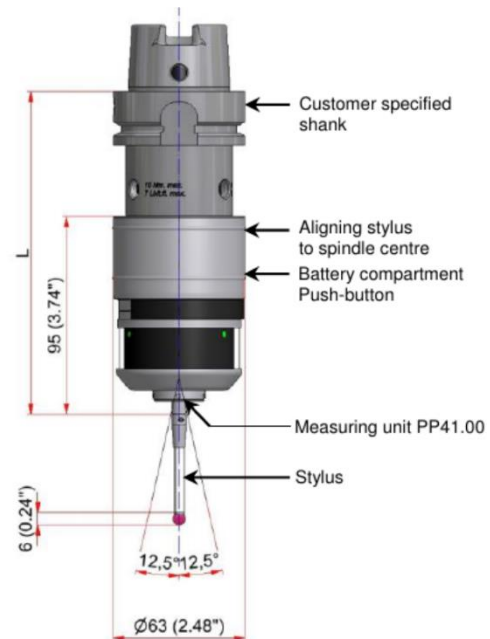
3.2 Dotyková sonda Hexagon

Dotyková obrobková radiová sonda Hexagon TP-R-400 (viz Obr. 14) umožňuje výměnu měřících jednotek s různými parametry. Obrobková radiová sonda využívá pro komunikaci přenosové frekvence 2,4 GHz. Přenášený signál se pomocí této frekvence přenáší na vzdálenost až 18 m. Různé měřící jednotky sondě propůjčují opakovatelnost měření $0,25 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m} 2\sigma$. Se zlepšující se opakovatelností však mají měřící jednotky výraznější omezení měřící rychlosti. Například měřící jednotky PP41.00 a MY21.00 dosahují opakovatelnosti až $1 \mu\text{m} 2\sigma$ a měřící rychlost výrobce udává až 2000 mm/min. Měřící jednotka HPP41.10 dosahuje opakovatelnosti až $0,25 \mu\text{m} 2\sigma$, ale maximální měřící rychlost je uváděna v rozmezí 100 až 500 mm/min. [9], [10]



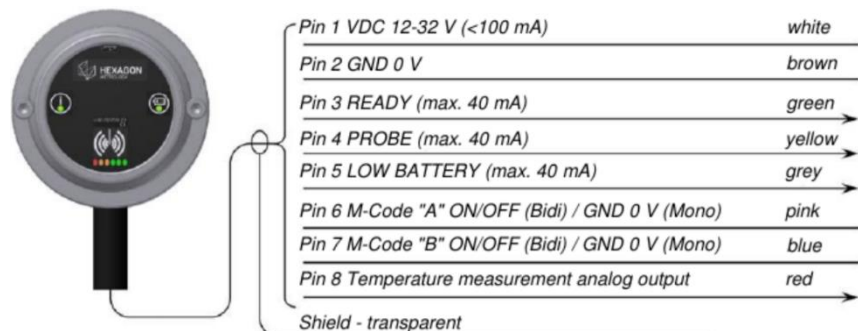
Obr. 14: Hexagon sonda [9]

Maximální možný přejezd v jednotlivých směrech vytyčuje oblasti, do kterých musí být schopný stroj zastavit (viz Obr. 15) od okamžiku kdy je zaznamenáno uskutečnění doteku. Katalogový list měřící jednotky PP41.00 udává maximální možný bezpečný přejezd ve směru „Z“ 6 mm, maximální možný úhel odklonění doteku sondy od směru osy „Z“ je udáván $12,5^\circ$. [9], [10]



Obr. 15: dotyková sonda Hexagon s měřící jednotkou PP41.00 [10]

RWR95.50 je radio-interface od společnosti Hexagon (viz Obr.16) sloužící k obousměrné komunikaci mezi dotykovou sondou a používaným zařízením. Jeden radio-interface je schopen zprostředkovávat komunikaci mezi zařízením a až třemi radio sondami Hexagon. Komunikační vzdálenost je výrobcem udávána do 15 metrů v závislosti na vzájemné poloze a orientaci sondy a interface. [9], [10]



Obr. 16: Hexagon radio-interface RWR95.50 [10]

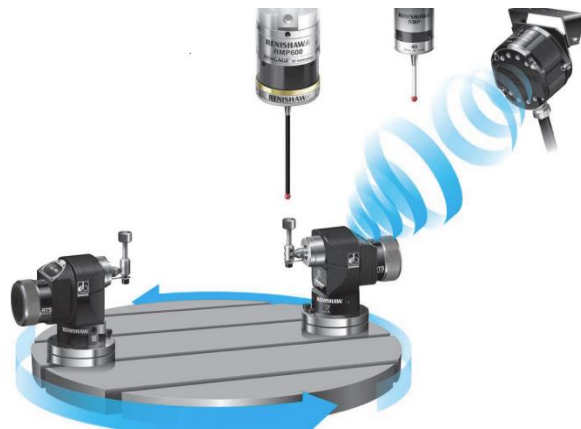
3.3 Měření dotykovými sondami na obráběcích zařízeních

Měření dotykovými spínacími sondami je prováděno najížděním na fyzické plochy a při zaznamenání skokové změny signálu (sepnutí) je provedeno měření (odečet aktuálních poloh) pro všechny naprogramované osy, naměřené hodnoty jsou zapsány do odpovídajících paměťových buněk.

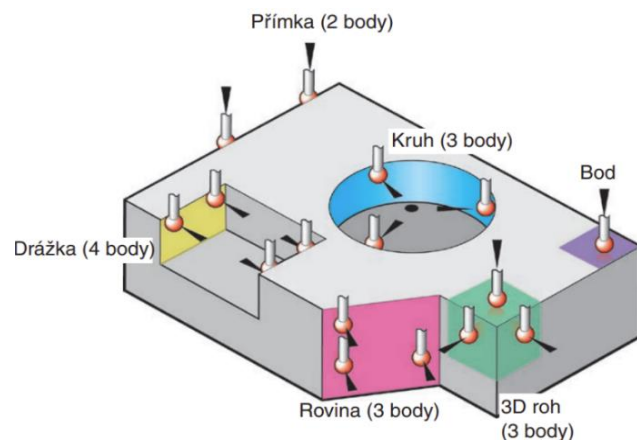
Na obráběcích zařízeních jsou běžně využívány dva typy sondy (viz Obr. 17).

Jedna sonda bývá nástrojová sloužící k naměření nástroje. Druhou běžně využívanou sondou na obráběcích zařízeních je sonda nástrojová, která bývá využívána pro naměření polotovaru, obrobků, kontrolu obrobených rozměrů a dalších prvků v pracovním prostoru. Při měření se používá spínací či rozpínací signál dotykové sondy v kombinaci s odměřováním na výrobním zařízení. Přesnost měření je tedy závislá především na odměřovací přesnosti zařízení a opakovatelnosti dotykové sondy. [4]

Měření dotykovými sondami je používáno pro jednoznačné určení polohy různých prvků (viz Obr. 18). Pro tyto jednoznačné určení je nezbytné zadání, o jaký měřený prvek se jedná. Následně je využíváno měřících cyklů, které na základě zadaných a naměřených informací pomohou určit polohu sledovaných prvků. K určení polohy různých prvků je potřeba rozdílná množství snímání různých bodů. Pro určení polohy a orientace drážky je nezbytné nasnímat minimálně 4 různé body. Jednoznačné určení roviny je možné díky naměření tří bodů. Třemi body je možné naměřit 3D roh i kružnici, kružnice však bývá častěji naměřována pomocí čtyř bodů měřených ve směru pohybových os. Dvou různých bodů je využíváno pro určení přímky, pomocí které se užívají například k naměření úhlu. Jedním bodem je naměřován pouze bod. Měření bodu je využíváno na určení polohy tělesa pomocí naměření bodu v některé z ploch. Zajištění vyšší spolehlivosti měření může být dosaženo pomocí opakovaného měření. Takto naměřená data jsou následně zpracována pomocí statistických výpočtů. [4]



Obr. 17: nástrojové a obrobkové sondy [4]

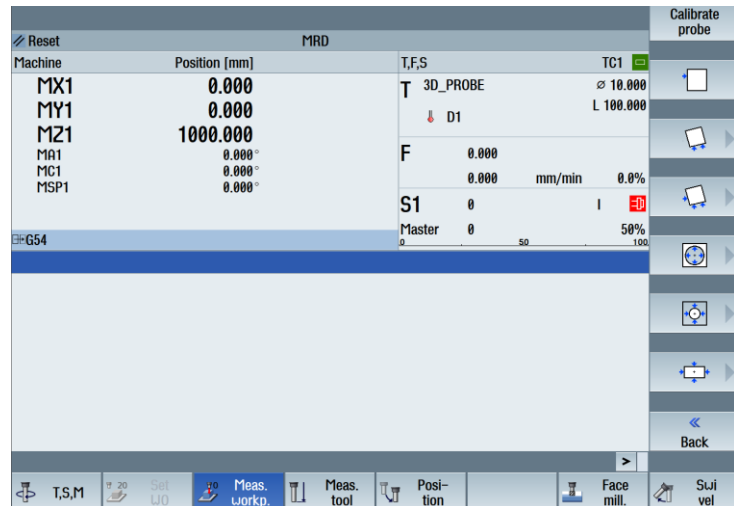


Obr. 18: minimální počty měřených bodů pro určení elementu [4]

3.4 Měření v ŘS Sinumerik

Řídicí systém Sinumerik 840D sl umožňuje zápis naměřených hodnot pomocí cyklů do protokolu, také umožňuje provádění korekcí, které může i zapisovat. Protokoly z měření jsou ukládány do adresáře kde se nachází program, který vyvolal jejich tvorbu, pokud není nastaveno jinak. Protokoly je možné přesouvat až po ukončení sestavování daného protokolu.

Měřicí cykly je možné spouštět programově, případně ručně na HMI panelu (viz Obr. 19). Pokud jsou cykly nastavovány v programu, je třeba nastavit všechny parametry v programu (viz Obr. 20). Pro spouštění měřících cyklů, které jsou spouštěny pomocí HMI panelu je třeba nastavit některá data před měřením a až následně



Obr. 19: Sinumerik 840D sl měřící softkeys

je možné provést samotné měření. Před měřením je nezbytné provést kalibraci samotné měřící sondy a následně je možné měřit. [11], [12], [13]

```

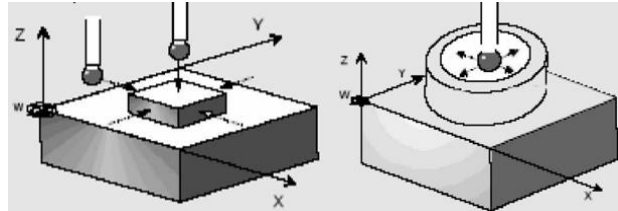
N18 T30 D1
N19 M6
N20 G54
N21 G0 X89.96 Y45.59
N22 G0 Z155
N23 G17
N24 F1000
N25 G1 Z12
N26 _TSA=1 _PRNUM=030 _VMS=0 _NMSP=1 _FA=12
N27 _MVAR=100 _SETVAL=0 _MA=3 _KNUM=9999
N28 CYCLE978
N29 G54
N30 G0 Z155
    
```

Obr. 20: volání měřícího cyklu v programu

Měřicí cykly pro frézování

- CYCLE961 – měření rohu (pravoúhlý/libovolný roh)
- CYCLE971 – kalibrace měřící sondy/korekce frézy nebo vrtáku
- CYCLE976 – Kalibrace délky a rádiusu měřící sondy
- CYCLE977 – měření čepu (pravoúhlý/kruhový a vnitřní/vnější)
- CYCLE978 – zjištění hrany
- CYCLE979 – měření vnitřního kruhového segmentu
- CYCLE995 – měření 3D úhlové odchylky vřetene
- CYCLE996 – měření 3D kinematiky
- CYCLE997 – měření 3D koule
- CYCLE998 – měření vzdálenosti hrany a vyrovnání podle hrany

Obrobková sonda bývá do zařízení zakládána do vřetene ze zásobníku nástrojů. Nezbytností pro správné měření je správné mechanické seřízení samotné sondy, propojení signálů komunikačního modulu, a správné spárování sondy s komunikačním modulem. Při prvním založení sondy je nezbytné provést správné mechanické seřízení sondy, doteku a kalibraci. Kalibrace je potřeba provést i po každé výměně doteku a jakékoliv manipulaci se sondou, která může sondu ovlivnit. Na sondě se provádí kalibrace spínacích bodů pro délku a pro průměr měřicího doteku. Běžně se kalibrace provádí na kalibračních tělesech s hladkým, čistým a často broušeným povrchem. Kalibrační tělesa jsou tepelně stálá tělesa, u kterých jsou známy rozměry s lepší nebo alespoň srovnatelnou přesností, jako je požadována přesnost měřicího aparátu. Ke kalibraci obrobkové sondy je v řídicím systému Sinumerik 840D sl používáno cyklu CYCLE976 (pro frézování) a CYCLE973 (pro soustružení) s různými parametry v závislosti na požadovaných kalibrovaných parametrech. Pomocí různých parametrů se nastavují také rozměry a tvar kalibračního tělesa (viz Obr. 21), na kterém je prováděno samotné měření. Kalibrace průměru doteku je nejčastěji prováděna na kalibračním kruhu nebo kouli se známým průměrem a pro délku sondy je používáno těleso o známé výšce. Kalibrace musí být provedena v orientaci, ve které má být následně prováděno měření. [11], [12], [13]



Obr. 21: kalibrace na hranách nebo v kalibračním kruhu [11]

Měřicí cykly probíhají v posledních aktivních rovinách (G17-G19). V závislosti na aplikaci jsou body používány v souřadném systému stroje (MCS) nebo v souřadném systému obrobku (WCS). Pro zjišťování například délky dotykové sondy je výhodné používat souřadný systém stroje. Měření prvků na obrobku je naopak výhodné provádět v rámci souřadného systému obrobku. [11], [12]

Před spuštěním cyklů je nezbytné nastavit povinné parametry a je také vhodné nastavit doplňkové parametry, které ovlivňují samotné měření. Povinné parametry je nutné přizpůsobit před každým voláním měřicího cyklu měřené úloze například varianta měření (`_MVAR`), požadovaná hodnota (`_SETVAL`), měřicí osa (`_MA`) a číslo korekce (`_MA`). Doplňkové parametry obvykle stačí na daném stroji nastavit jednou a následně platí pro další měření. Například bezpečná oblast (`_TSA`), číslo měřicí sondy (`_PRNUM`), proměnná měřicí rychlost (`_VMS`), počet měření v daném místě (`_NMSP`) a měřicí dráha (`_FA`) a další. Další nastavitelné parametry jsou typu boolean pomocí, kterých je možné měnit předpokládané chování a aktivovat či deaktivovat některá nastavení. Proměnné typu boolean jsou zapsány v poli a dělí se na centrální (`_CBIT[]`) a kanálově orientované bity (`_CHBIT[]`). Pomocí parametrů je možné přikázat, aby

zařízení vytvořilo například protokol z měření, nebo aby při měření docházelo k posunutí počátků a případně i orientaci konkrétních souřadných systémů. Naměřené reálné hodnoty jako jsou požadované hodnoty, skutečné hodnoty a jejich rozdíly a další jsou průběžně zapisovány do parametrů `_OVR[]` ve formátu reálných čísel. Parametry výsledků jsou zapisovány do parametrů `_OVI` ve formátu celých čísel. Součástí měřících cyklů je i probuzení příslušné sondy určené parametrem `_PRNUM`, zároveň je sledována komunikace sondy o jejím stavu zpět do zařízení. [11]

Číslo měřící osy určuje, která z měřících os je pro dané měření aktivována (viz Obr. 22). Měření v abscise (měření v ose x) `_MA=1`, ordinátě (měření v ose y) `_MA=2` a v aplikátě (měření v ose z) `_MA=3`.

Obrobkové sondy je nejčastěji využíváno pro ustavení obrobku a pro kontrolu rozměrů po obrábění. Pro ustavení obrobku je běžně využíváno charakteristických prvků na odměřovaném polotovaru. Charakteristickými prvky jsou rovné plochy a válcové (vnitřní a vnější) plochy. Pomocí ploch a středů či jiných charakteristických bodů je určena poloha a natočení obrobku v prostoru.

Jeden z nejčastěji využívaných měřících cyklů je `CYCLE978`, který je používán pro zjištění jednoho bodu dotyku v jedné poloose (nejčastěji využíván pro naměření čela či některé ze stěn viz Obr. 23). Počáteční pozicí měření je bod, ve kterém se nachází sonda před spuštěním samotného cyklu a od tohoto bodu je následně prováděno samotné měření, počáteční bod je vhodné umístit (najat sondou) do menší vzdálenosti, než je dvojnásobek `FA`, při nesepnutí sondy (ujetí větší vzdálenost než dvojnásobek `FA`) je nahlášena chyba. [4], [11]

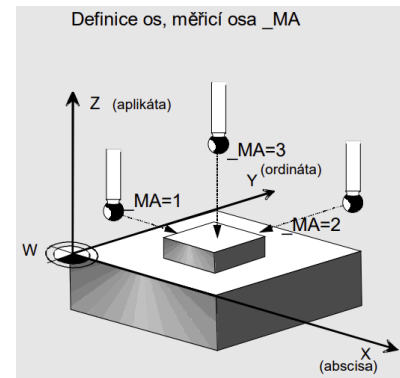
Cyklus měření bodu v ose X

Příkazový řádek:

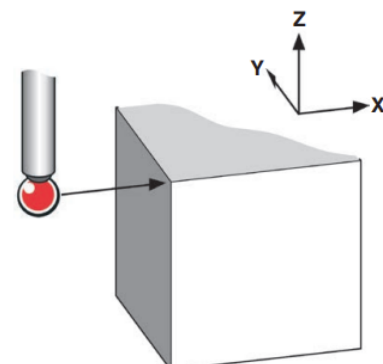
G65 P9023 X10. S54.

Vysvětlení:

- G65 = vyvolání měřícího programu
- P9023 = program jednobodového měření
- X10. = měřící pohyb v ose X
- S54. = číslo souřadného systému, který bude aktualizován (S54. značí, že bude aktualizováno G54)



Obr. 22.: definice měřících os `_MA` s aktivním příkazem `G17` [11]



Obr. 23: měření v jednom směru [4]

Dalším hojně používaným měřícím cyklem je CYCLE977, který slouží k měření čepu (viz Obr. 24). Pomocí povinných a doplňkových parametrů je určeno, zda je měření prováděno na vnitřním nebo vnějším a kruhovém či pravoúhlém čepu. Pomocí parametrů je nastavována bezpečná výška, do které sonda odjíždí. Parametry také určují, jak široká je oblast, které se sonda vyhýbá ve středu měřicí oblasti a jak dlouhá je měřicí dráha.

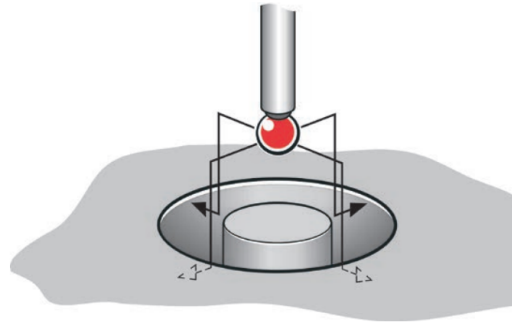
Cyklus měření otvoru/čepu

Příkazový řádek:

G65 P9814 D50. Z-10. S4.

Vysvětlení:

G65	=	vyvolání měřicího programu
P9814	=	program měření otvoru
D50.	=	hloubka měření
S4.	=	číslo souřadného systému, který bude aktualizován (S1 až S6 = G54 až G59, tedy S4 = G57)

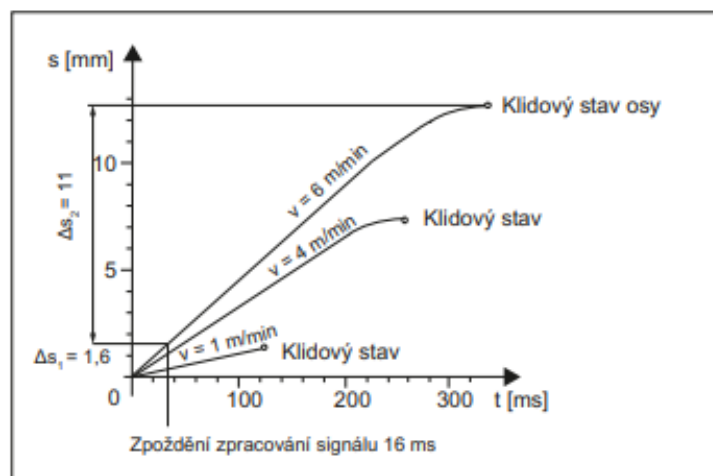


Obr. 24: měření vnitřního čepu [4]

3.5 Omezení měřicí rychlosti

Měřicí rychlost je nezbytné nastavit dostatečně malou, aby byl stroj schopen zastavit před destrukcí sondy, ale zároveň je zde snaha nastavit co nejvyšší měřicí rychlost pro co největší zkrácení nevýrobních časů. Před měřením se běžně stroj pohybuje maximálními možnými rychlostmi posuvu (většinou rychloposuvem) na polohu, kde má započít samotný měřicí cyklus. Následně se stroj začne pohybovat měřicí rychlostí v měřícím směru. Celá vzdálenost ujetá zařízením před samotným zastavením (Obr.25) je složena z dráhy ujeté před uskutečněním doteku, následně z dráhy od uskutečnění doteku před vysláním signálu. Po vyslání signálu stroj urazí další vzdálenost měřicí rychlostí až po zpracování signálu zařízením a následně stroj cestuje dráhu potřebnou k zastavení z měřicí rychlosti. [14]

Dráha potřebná k zastavení je tedy složena z vlečné chyby, chyby způsobené zpožděním signálu a samotné brzdné dráhy. Vlečná chyba [mm] je dána podílem měřicí rychlosti [m/s] ku zesílení smyčky [(m/min)/mm]. Dráha ujetá během zpoždění signálu [mm] se získá součinem měřicí rychlosti [m/s] násobené



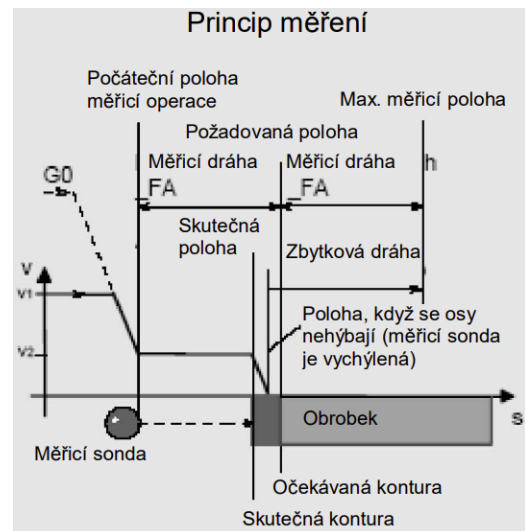
Obr. 25: brzdné dráhy [14]

dobou zpoždění signálu [s]. Brzdná dráha [mm] je podílem druhé mocniny měřicí rychlosti [m/s] ku dvojnásobnému zpoždění brždění [m/s²]. Celkovým součtem těchto tří drah je dráha nezbytná pro zastavení, tato dráha musí být menší než maximální povolená výchylka sondy. Největší vliv na dráhu potřebnou k zastavení stroje má běžně měřicí rychlost. [14]

Postup měření v řídicím systému Sinumerik je obvykle započat rychlým přiblížením sondy do měřicí oblasti. Následně je měřicí sonda přibližována měřicí rychlostí v měřicí ose k obrobku (viz Obr. 26) až dojde ke kontaktu (pokud nedojde ke kontaktu ve vzdálenosti menší 2FA je nahlášena chyba). Když dojde k doteku je při běžném nastavení měřicího cyklu obvykle zbytek dráhy odstraněn. Následně sonda odjede od obrobku. [11]

Jelikož je měření jeden z neproduktivních časů, je snaha o co nejvýraznější zkrácení času.

Vzhledem k maximálním používaným rychlostem však měřená data nemusí být dostatečně přesná. Pro zvýšení přesnosti měření je nezbytné snížit měřicí rychlost (snížením měřicí rychlosti se například zmenší vzdálenost ujetá zařízením během doby zpoždění signálu), což výrazně prodlouží čas strávený měřením. Proto se běžně krom měřicího posuvu `_VMS` používá rychlejší měřicí posuv `_SPEED[3]`. Aktivování rychlejšího měřicího posuvu je prováděno pomocí nastavení `_CHBIT[17]=1` a `_FA` měřicí dráha musí být větší než 1. Pokud jsou všechny parametry správně nastaveny je první měření prováděno pomocí vyšších rychlostí dle parametru `_SPEED[3]` a je využíváno pouze ke zkrácení neproduktivních časů a po uskutečnění prvního kontaktu, který je pouze orientační, je se sondou odjeto o 2 mm a následně je provedeno samotné měření měřicí rychlostí dle parametru `_VMS`. Samotná měřicí rychlost by měla být stejná jak pro kalibraci, tak pro následná měření, protože v rámci kalibrace například v kalibračním kruhu známého průměru, jsou zahrnuty do kalibračních dat a spínacích hodnot i zpoždění zpracování signálu, rozdílnou rychlostí použitou při kalibraci a při měření by zpoždění zpracování signálu mělo rozdílný vliv. [11]



Obr. 26: princip měření [11]

3.6 Výrobní zařízení

Výrobní zařízení jsou stroje, nástroje, přístroje a různé systémy navržené k automatizaci výrobních procesů jejichž cílem je zajišťovat výrobu. Existuje mnoho druhů výrobních zařízení používaných v různých průmyslových odvětvích. Mezi nejběžněji využívané zařízení patří CNC obráběcí zařízení, robotické systémy, lisovací stroje, svařovací zařízení a další. Každé zařízení má svoji konstrukci a svými ovládacími prvky dané různé možnosti použití. Výrobní zařízení jsou často využívána za účelem zvýšení výrobní kapacity, snížení nákladů, minimalizaci lidské chybovosti, zlepšení kvality výrobku. Některá zařízení mohou být také jednou z mála použitelných metod výroby daných dílů s požadovanými parametry. Výrobní zařízení také pomáhají zvyšovat bezpečnost pracovníků díky automatizaci kroků výroby, které jsou fyzicky namáhavé, rizikové nebo přímo zdraví škodlivé.

Efektivita, přesnost a spolehlivost výroby je závislá na mnoha faktorech. Kvalita zařízení je zásadní pro dosažení požadovaných parametrů, nekvalitní zařízení zvyšuje riziko poruch a nemusí být schopné dosahovat požadovaných přesností, rychlostí a může mít nedostatečné možnosti nastavení, polohování, orientování a další. Správné nastavení jak zařízení, tak výrobního procesu, programu a postupu je nezbytnou součástí správné výroby. Součástí výrobního procesu je kromě použitých zařízení také obsluha, která musí být pro zajištění spolehlivého chodu adekvátně proškolená a znalá výrobního procesu. Pro zajištění stabilní a bezporuchové výroby je nezbytné zajistit adekvátní pravidelnou údržbu, která pomáhá předcházet náhlým problémům a poruchám. Obecně je vhodné využívat kvalitních zdrojů (výrobní materiál, zařízení, obsluha...), díky kterým se snižuje riziko poruch, nečekaných událostí a tím pomáhá k dosahování konzistentních výsledků.

Monitorování a kontrola nejen výsledných produktů, ale také v průběhu samotných výrobních procesů pomáhá k včasnému odhalení případných nedostatků ve výrobě. Nedostatečná kontrola a sledování výrobního procesu může vést k zhoršení kvality produktů, destrukci nástrojů a v krajních případech může vést k nevratnému poškození samotných výrobních zařízení. Pro provádění rozměrové kontroly nejen pomocí automatických zařízení jsou používány různé souřadné systémy. Poloha jednotlivých prvků na vyráběných dílech je určována (jak během výroby, tak při následné kontrole) pomocí transformování souřadnic v jednotlivých souřadných systémech.

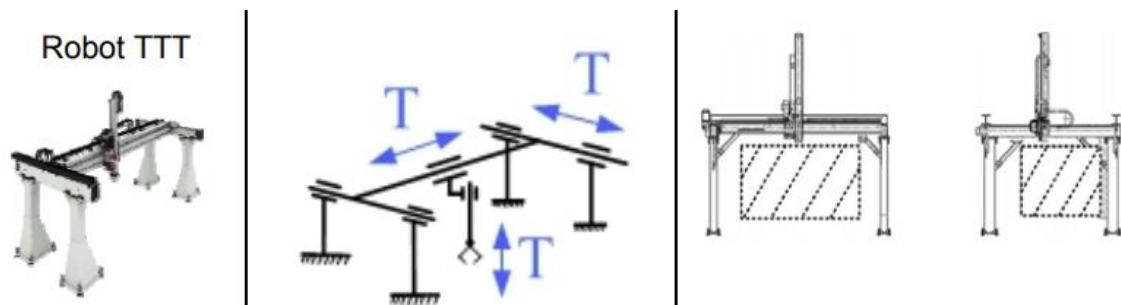
Pro práci s výrobními zařízeními jsou používány různé řídicí systémy obstarávající ovládání jednotlivých prvků výrobního zařízení. Nejčastěji používané řídicí systémy CNC obráběcích zařízení jsou HAAS, Heidenhain TNC, Mazak a řídicí systémy Sinumerik od společnosti Siemens. Výrobci průmyslových robotů nejčastěji používají své vlastní řídicí systémy. Nejvýznamnějšími výrobci jsou Fanuc, KUKA, ABB, Comau a Stäubli.

3.7 Souřadné systémy robotů a manipulátorů a výrobních zařízení

V průmyslové praxi jsou využívány různé roboty a manipulátory, které se od sebe liší mírou automatizace. Manipulátory jsou využívány pro jednoduchou manipulaci, která může spočívat například v jednoduchém přesouvání materiálu. Roboti mohou být využíváni i pro náročnější aplikace jako například řezání, balení, svařování i obrábění. Podle druhu a kinematiky robotu jsou dány vlastnosti jako je pracovní prostor, zástavbový prostor, nosnost, hmotnost, počet os, rychlost a zrychlení jednotlivých os, tuhost, přesnost, opakovatelnost, cena a další. Vlastnostmi robotu je dána jeho použitelnost v různých aplikacích.

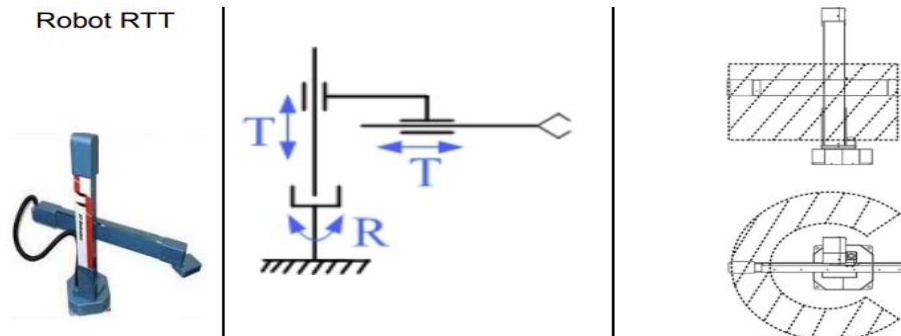
Souřadné systémy jsou používány k definování pozice a orientace v rámci daných systémů. Tyto systémy jsou používány k řízení a pohybování jednotlivých částí. Existují různé souřadné systémy, jejich využívání je závislé na kinematice zařízení a na operacích, které jsou zařízením vykonávány.

Nejpoužívanější je kartézský souřadný systém (tři vzájemně kolmé osy x , y , z viz Obr. 27). V běžné praxi a v průmyslových systémech jsou nejčastěji orientovány osy „ x “, „ y “ ve vodorovné rovině a osa „ z “ bývá používána svisle s kladnou orientací „nahoru“. Kartézský souřadný systém je často používán u obráběcích strojů právě díky své koncepci tří pravoúhlých souřadných systémů shodujících se s pohybovými osami strojů. Tři pravoúhlé souřadné osy společně definují pracovní prostor v podobě kváдру.



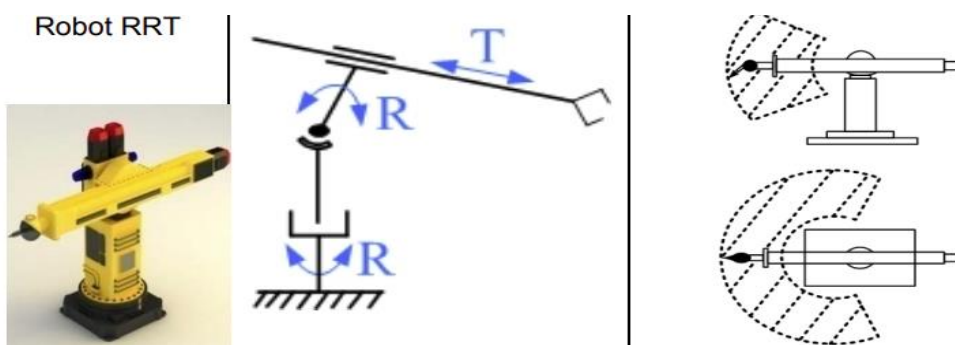
Obr. 27: systém s třemi kolnými posuvnými souřadnými systémy [15]

Kinematický mechanismus s jednou rotací a dvěma na sebe kolnými translacemi (viz Obr.28) vytváří kinematickou koncepci vhodnou k používání cylindrického souřadného systému (z, r, θ). V závislosti na rozsazích jednotlivých os je pracovní prostor část válce případně celý válec.



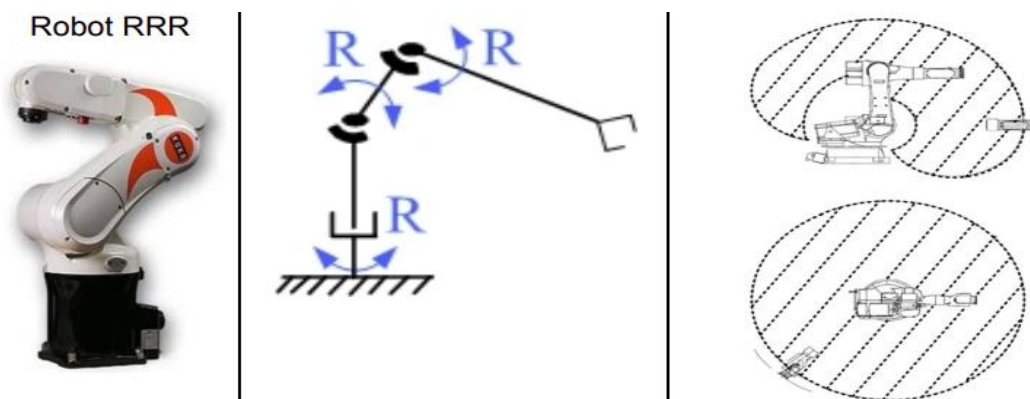
Obr. 28: systém s jednou rotační a dvěma translačními pohyby [15]

Pro sférický souřadný systém je nejvhodnější koncepce zařízení s dvěma navzájem kolnými rotacemi a jednou translační vazbou (viz Obr.29). Sférický souřadný systém (r, θ, φ) definuje v návaznosti na limity jednotlivých os kouli nebo alespoň její část.



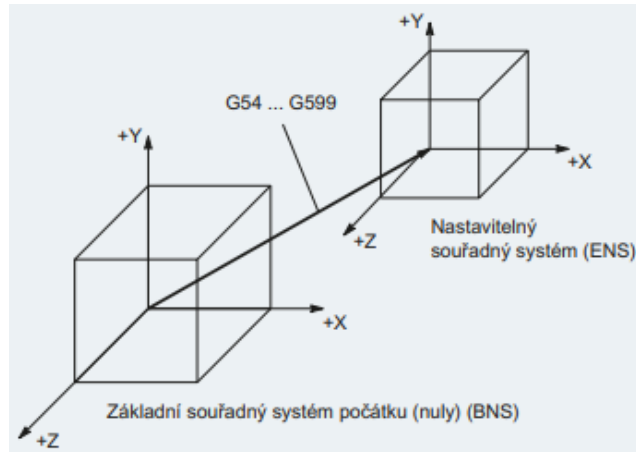
Obr. 29: systém vhodný pro sférický souřadný systém [15]

Při práci se zařízeními s třemi a více rotačními vazbami (viz Obr. 30) jsou využívány řídicí systémy s vyšším výpočetním výkonem a umožňují tak obsluze pracovat se souřadnými systémy, které vyhovují operátorovi nebo programátorovi v závislosti na použité aplikaci nehlédě na výchozí kinematiku stroje.



Obr. 30: zařízení s třemi a více rotačními vazbami [15]

Pro zjednodušení práce se používají transformace souřadnic zajišťující převod souřadných systémů mezi základním souřadným systémem zařízení a souřadným systémem, ve kterém je potřeba provádět pracovní úkony (viz Obr. 31). Příkladem běžně využívané transformace u obráběcích strojů je určení pracovního souřadného systému G54 používaného pro určení souřadného systému obráběného dílce v obráběcím zařízení. [16], [17]



Obr. 31: transformace souřadného systému [16]

Transformace jsou prováděny pomocí transformačních matic (viz Obr. 32) sloužících k translaci a rotaci souřadných systémů.

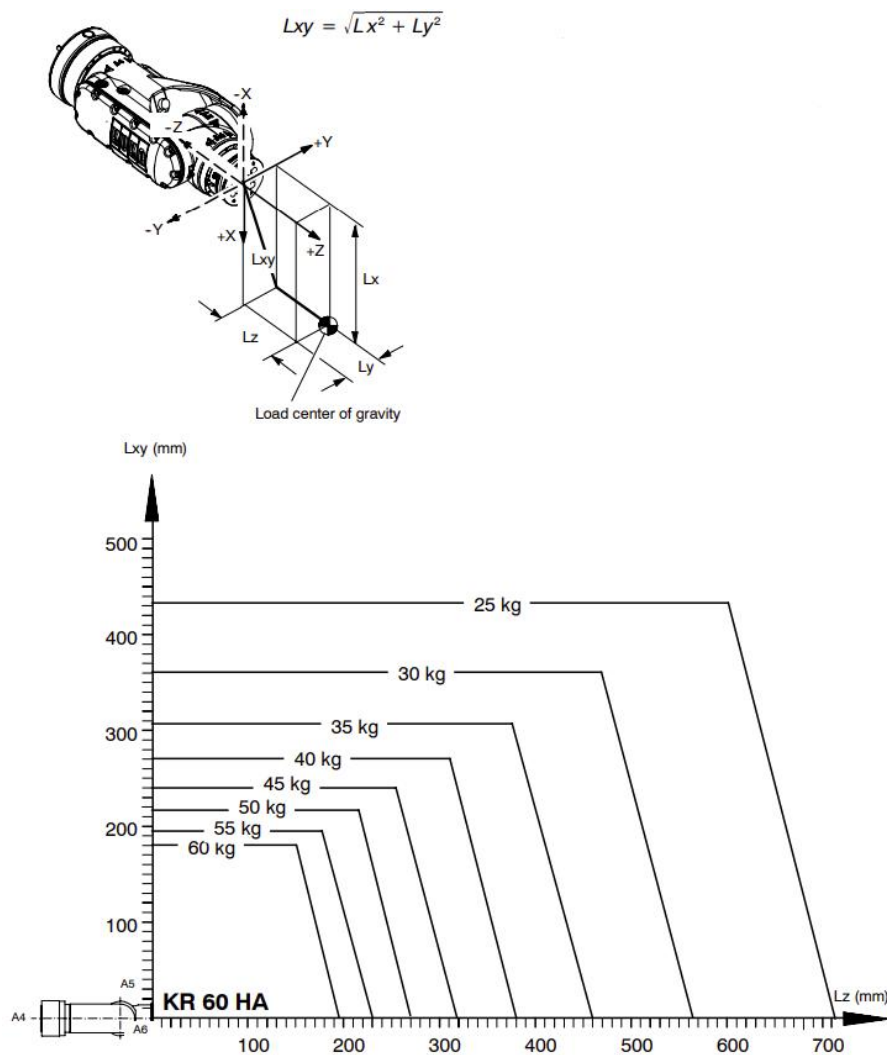
$$\begin{array}{ccc}
 \text{X-Rotation in 3D} & \text{Z-Rotation in 3D} & \text{Scale in 3D} \\
 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & (4 \times 4) * (4 \times 1) = (4 \times 1)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Y-Rotation in 3D} & \text{Translation in 3D} & \text{Matrix Multiplication} \\
 \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ q \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Obr. 32: transformační matice [17]

3.8 Průmyslové roboty

Průmyslový robot Kuka KR 60 High Accuracy může být využíván pro různé druhy aplikací. Konstrukce robotu umožňuje umístění vertikální a zavěšené. Robot je použitelný pro manipulační operace v podobě přesouvání materiálu a montáž, zároveň tento robot může být použitelný i pro operace, u kterých je vyžadována vyšší přesnost jako je třeba svařování či obrábění. Opakovatelnost robotu je uváděna výrobcem 0,05mm a užité zatížení až 60 kg (užité zatížení je závislé na poloze těžiště břemene viz Obr. 33). [18]



Obr. 33: užitečné zatížení robotu KR 60 HA [18]

Robot KR60 HA je šestiosý angulární robot s velkým akčním rádiusem, malým zástavbovým prostorem a s nízkou hmotností. Roboty jsou limitovány úhlovými, rychlostními (viz Obr. 34) a momentovými limity jednotlivých os.

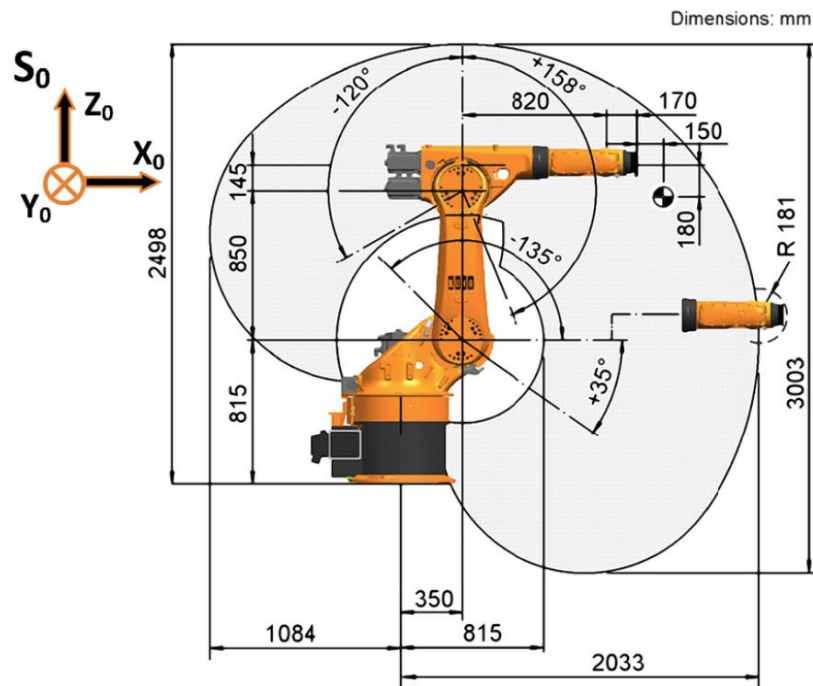
KR 60 HA

- In-line wrist, rated payload 60 kg

Axis	Range of motion, software-limited	Speed
1	±185°	128°/s
2	+35° to -135°	102°/s
3	+158° to -120°	128°/s
4	±350°	260°/s
5	±119°	245°/s
6	±350°	322°/s

Obr. 34: úhlové a rychlostní limity KR 60 HA [18]

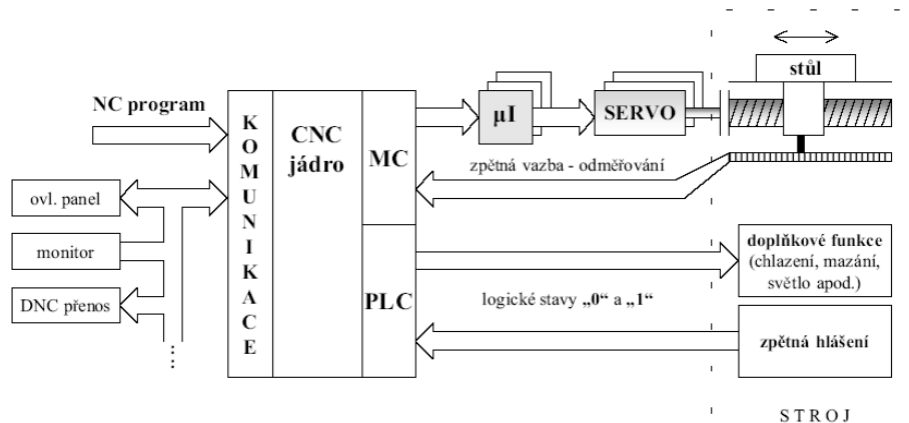
Akční rádius první osy tohoto průmyslového robotu je $\pm 185^\circ$. Na následujícím obrázku je viditelná obálka ohraničující pracovní oblast robotu.



Obr. 35: obálka pracovní oblasti robotu KR 60 [19]

3.9 Řídicí systémy

Počítačové řídicí systémy ovládající CNC (computerized numerical control) stroje, roboty a další zařízení jsou používány od roku 1966. Řídicí systémy jsou soubory softwarů a hardwarů (viz Obr. 36), které se od sebe liší dle dispozic a způsobu použití konkrétního zařízení. Hlavními účely řídicího systému jsou: řídit pohyby nástrojů a přístrojů, spravovat a kontrolovat proces, komunikovat s okolním prostředím, zpracovávat, spravovat a ukládat data, dohlížet na bezpečnostní opatření a další.



Obr. 36: struktura řídicího systému [20]

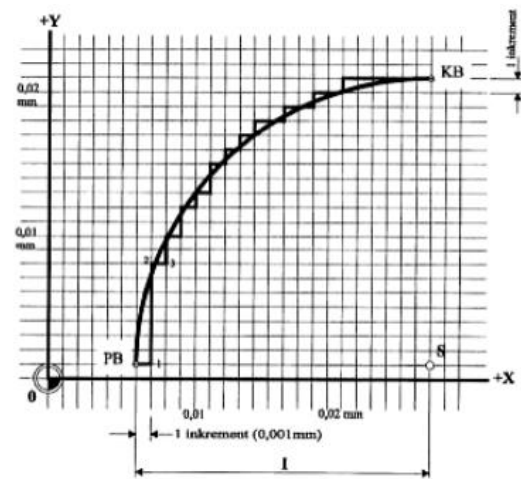
Nejvýznamnějšími výrobci řídicích systémů jsou: Japonský Fanuc, Mitsubishi a Okuma, Německý Heidenhain, Siemens a Beckhoff. Dalším často používaným řídicím systémem je Americký řídicí systém Haas, který je primárně používán na zařízeních Haas.

Řídicí systémy jsou provozovány v různých režimech. Prvním režimem je přípravný režim, který se využívá při uvádění zařízení do provozu. Druhým režimem je manuální/ruční režim, ve kterém je možné pomocí ovladače pohybovat jednotlivými mechanickými prvky zařízení. Třetím základním režimem, ve kterém bývají používány řídicí systémy je režim automatický. V automatickém režimu je odbavován program bez zásahu operátora. Program může být vygenerován automaticky nebo zadán operátorem. Automatického režimu je možné využívat nejen pro výrobní proces, ale také například pro měření měřícími cykly. Díky počítačovému řízení je strojům umožněno provádět pružné změny vykonávaných procesů. Ke změně procesu stačí nahrát změněný program. [21]

Řídicí systémy mají většinou tyto základní části:

- CPU (Central Processing Unit) je mikroprocesor, který zajišťuje výpočetní výkon pro řídicí systém a jeho přídatné periférie. CPU je zodpovědné za zpracování a přenášení dat, zároveň je klíčovou součástí řídicího systému.
- Paměťová zařízení slouží k ukládání a čtení dat k programu. Dělí se na operační paměť (RAM Random Access Memory) starající se o dočasné ukládání dat a programů. Trvalá paměť (ROM Read-Only Memory) slouží k ukládání trvalých neměnných dat například BIOS nebo firmware. Další částí je paměťový disk či úložiště sloužící k ukládání dat. Tento disk bývá buď SSD (Solid State Drive) nebo HDD (Hard Disk Drive).
- Ovládací panel HMI, umožňující manuální správu a sledování programů a stavů zařízení. U obráběcích zařízení bývá panel doplněn klávesnicí a dalšími ovládacími prvky. U robotů se často setkáváme s kombinací dotykového zařízení doplněného manuálními tlačítky.
- Periférie řídicího systému jsou například osvětlení, ovládací panely a prvky, vizualizační a signalizační zařízení. Běžně používané periférie řídicího systému jsou různé senzory například teploty, tlaku, ale i dalších veličin. Informace z periférií mohou být používány k informování o chybách (například nízká hladina emulze). Senzory teploty připojené přes periférie mohou být využívány i pro teplotní kompenzace samotného zařízení. Hojně využívanými perifériemi jsou také bezpečnostní čidla, světelné či tlakové závory, bezpečnostní dveře a oplocení.

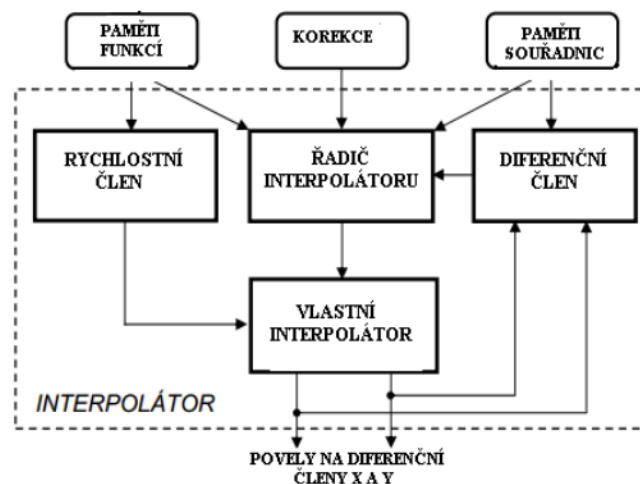
Mezi hlavní činnosti řídicího systému patří převod NC kódu s požadovanou trajektorií na žádané polohování jednotlivých os. Řídicí systém má významný vliv na výslednou přesnost polohování. Řídicí systém se také stará o respektování limitů jednotlivých os a o interpolaci více os. Nejčastěji používaná interpolace je lineární, ta nahrazuje požadovanou trajektorii lineárními úseky. Jsou však používány i interpolace vyšších řádů. Řídicí systém má na starosti bezpečnost a v neposlední řadě se stará o spouštění periférií a komunikaci s okolím. [22]



Obr. 37: interpolace [21]

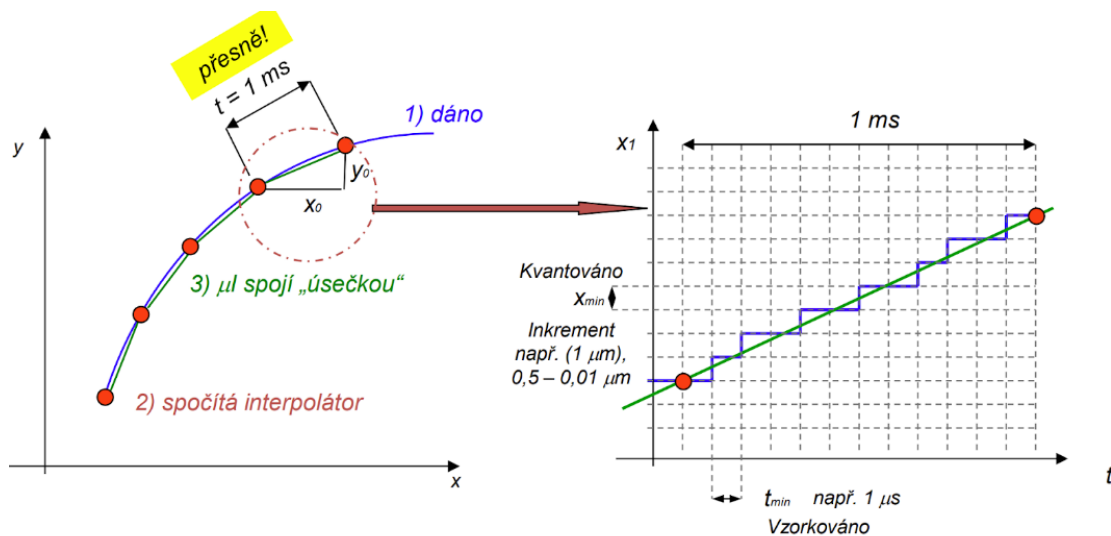
Součástí řídicího systému je interpolátor, který má na starosti průjezd naprogramovaných drah pomocí spočtených mezihodnot (inkrementů). Tyto dílčí úseky jsou následně převedeny na samotný pohyb jednotlivými osami (viz Obr. 37). Výsledný pohyb je aproximací pohybů jednotlivých os celého kinematického řetězce. Víceosá zařízení mají více možností pohybu a umožňují tak větší variabilitu pracovního procesu, zároveň však s rostoucím počtem pracovních os roste i výpočetní náročnost spojená s nezbytností řídit společně všechny zúčastněné pohybové osy najednou což je při pohybování běžným průmyslovým robotem 6 os. [21]

Řídicí povely jsou vysílány na základě požadované dráhy, naměřených souřadnic na jednotlivých osách a korekcí zařízení.



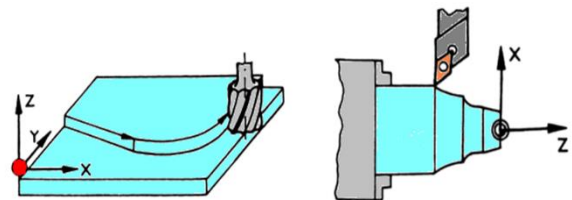
Obr. 38: interpolátor [21]

Řídicí systémy se mohou dělit podle způsobu řízení pohybu. Nejjednodušší řízení může fungovat na principu nárazek bez odměřovacích systémů. Složitějšími příklady řízení mohou být systémy využívající pouze polohování či pravoúhlého řízení.



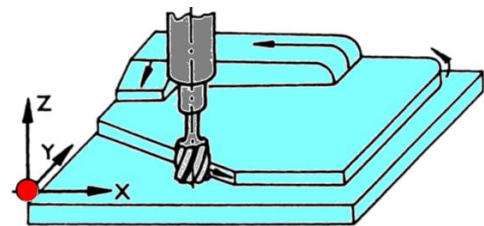
Obr. 39: křivkové dráhy pomocí pravoúhlého řízení [20]

Pro tvorbu tvarově složitých dílů je však nezbytné souvislé řízení umožňující souvislé víceosé obrábění. Souvislé řízení zajišťuje pohybování dvou a více os plynule a zároveň. Souvislé řízení je rozděleno do několika skupin podle počtu polohovatelných os najednou. Nejjednodušší souvislé řízení je 2D řízení (viz Obr. 40), které polohuje zároveň pouze dvě osy. Toto řízení je používáno v jednoduchých aplikacích například u soustruhu a jednoduchých frézek.



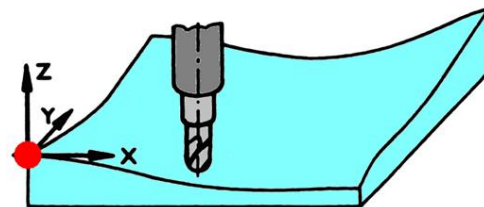
Obr. 40: 2D řízení [23]

2,5D řízení (viz Obr. 41) umožňuje plynulé ovládání dvou základních os zároveň a jedna další osa je používána k polohování. Nejčastější koncepce 2,5D obráběcích zařízení má k dispozici pravoúhlý pohyb kartézských souřadnic dvou os. Zbývající třetí osa je využívána k polohování do pracovní hladiny.



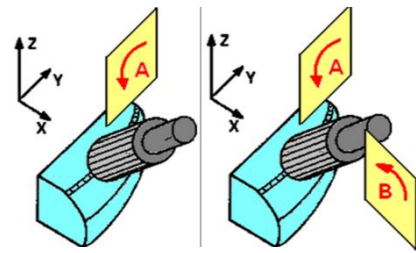
Obr. 41: 2,5D řízení [23]

Souvislé 3D obrábění (viz Obr. 42) je prováděno u tříosých obráběcích zařízení pomocí interpolování všech tří pohybových os zároveň. Díky tomuto obrábění je možné docílit téměř jakýchkoliv tvarových ploch, podmínkou pro jejich obrábění je přístupnost ploch a celkově přípustná geometrie dílce a použitých nástrojů.



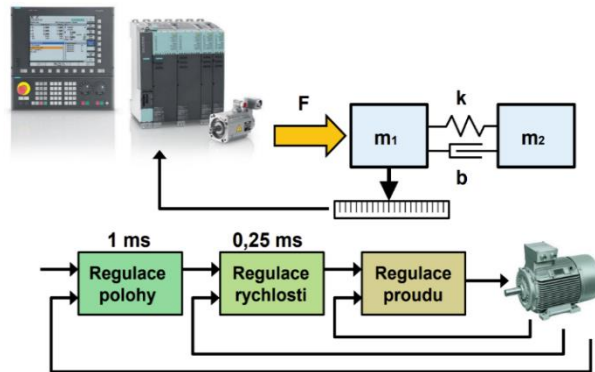
Obr. 42: 3D řízení [23]

U obráběcích zařízení je využíváno dalších přídatných například rotačních pohybových os, které umožňují nástroji neměnit pouze polohu, ale umožňují měnit i orientaci nástroje vůči souřadnému systému obrobku (viz Obr. 43). Každá vyšší úroveň řízení je však náročnější na výpočet interpolací jednotlivých os, a proto je pro zajištění plynulého souvislého řízení vyšší úrovně nezbytný vyšší výpočetní výkon. [21], [22], [23]



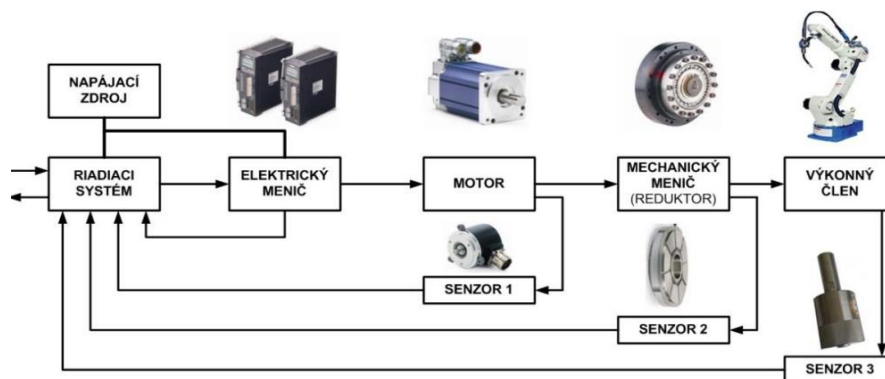
Obr. 43: 5D a6D řízení [23]

V řídicích systémech obráběcích strojů a průmyslových robotů jsou nejčastěji použity servomechanismy, které využívají kaskádní regulaci založenou na třech v sobě vnořených regulačních smyčkách (viz Obr. 44). Vnější regulační smyčka zajišťuje regulaci polohy, do této regulační smyčky je vnořena regulace rychlosti a nejvnořenější smyčkou je smyčka regulující proud. U systémů s kaskádní regulací je vždy používáno odměřování na motoru, které může být pro zpřesnění doplněno o „přímé odměřování“, které je napojeno co nejbližší k poslednímu pohybujícímu se členu kinematického řetězce. [22], [24]



Obr. 44: systém kaskádní regulace [22]

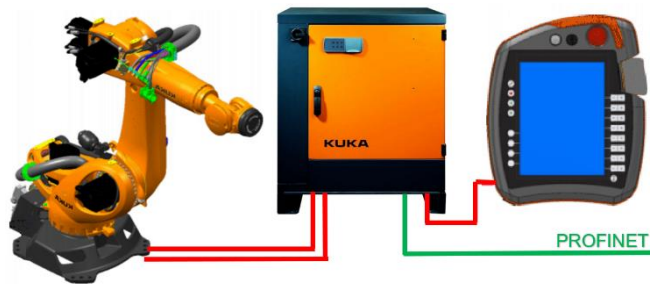
Řídicí systém se stará o postupné zpracovávání programu. Řízení je prováděno vysíláním požadavků na akční členy. V případě průmyslových robotů jsou akčními členy servomotory, které jsou ovládány pomocí měničů (viz Obr. 45). Požadavky na akční zásahy jsou dopočítávány na základě porovnávání žádaných a aktuálních hodnot neboli na základě regulačních odchylek na jednotlivých elementech. Regulační odchylky polohy jsou dopočítávány ze známých úhlů pomocí transformací. Při pohybech robotu záleží jak na poloze TCP, na orientaci souřadného systému, tak na celkové konstelaci jednotlivých částí robotu. Pro správné pohybování musí být dopočítávány všechny osy zároveň, což je náročné na výpočetní výkon.



Obr. 45: blokové schéma zapojení robotu [15]

3.10 Řídicí systém KUKA KR C4

KR C4 je řídicím systémem od společnosti KUKA používaným pro průmyslové roboty a automatizační systémy. Systém je určen pro řízení činností robotů a k nim připojených doplňkových zařízení například pomocí Profinet-u (viz Obr. 46). Pomocí řídicího systému KR C4 lze:



Obr. 46: schéma základního zapojení KR C4 [25]

- řídit osy-pohony robotu pomocí KRL (Kuka Robot Language)
- vytvářet PLC programy s kompletní správou vstupů a výstupů
- ovládat robotu v režimu CNC pomocí G-kódu a používat rameno jako obráběcí zařízení
- kontrolovat a zajišťovat bezpečnost
- provádět správu a údržbu pracoviště

Řídicí systém KR C4 je schopen s připojenými periferiemi kompletně řídit pracovní cyklus, a to včetně hlídání bezpečnosti, která může být implementována přímo do řídicího systému robotu. Řídicí systém KR C4 je schopen přímé komunikace s řídicími systémy Siemens a Rockwell. [18], [26], [27]

Kabinety od společnosti KUKA jsou nabízeny ve více variantách s různými rozměry (viz Obr. 47), hmotností, stupni krytí, ale i s rozdílnou kapacitou říditelných os. Nejmenší rozvaděč KR C4 compact má velice malé rozměry 271 x 483 x 460 mm (VxŠxH), váží pouze 33 kg a je schopen řídit 6 os a s doplněním o SMB box může ovládat ještě další 2 osy. Naopak největší rozvaděč KR C4 extend umožňuje řízení až 12 os zároveň, tento rozvaděč zaujímá prostor 1600 x 842 x 562 mm (VxŠxH) a hmotnost je 240 kg. [28]



Obr. 47: řídicí systém KR C4[28]

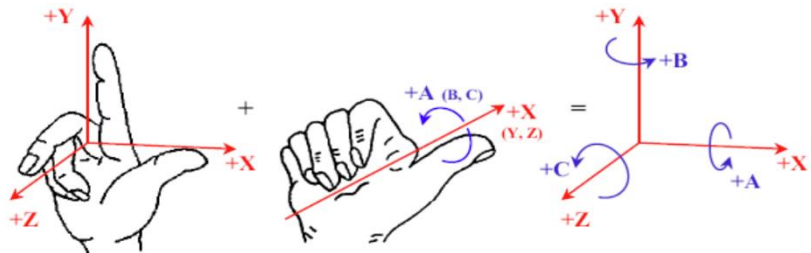
Řídicí systém KR C4 na rozdíl od řídicího systému Sinumerik 840D si neobsahuje zpracované měřicí cykly. Rozvaděče nenabízí možnost přímého připojení měřicích sond,

umožňují však připojení digitálních a analogových vstupů a výstupů buďto pomocí modulů nebo například pomocí rozhraní Ethernet, Profinet a dalších. Po mechanickém připojení vstupů a výstupů je nezbytné tyto signály namapovat. Až následně je možné tyto vstupy a výstupy používat v programu. [18]

3.10.1 KUKA KR C4 – tvorba nástroje

TCP (Tool Center Point) je bod, který je umístěn v blízkosti vrcholu nástroje nebo přídatného zařízení, které je připojeno na přírubě robotu. TCP se používá k určení polohy a orientace nástroje v prostoru a k řízení pohybu nástroje při práci. V rámci systému robotu se jedná pouze o další transformaci přiřazenou na konec kinematického řetězce.

První TCP je umístěn na středu příruby robotu a další TCP je možné vytvořit. Při vytváření dalších nástrojů je nezbytné k jednotlivým nástrojům zadat parametry souřadnic pro transformaci od TCP příruby do nového TCP. Minimální požadované informace jsou transformační hodnoty translace „x“, „y“, „z“ a parametry rotace výsledného souřadného systému „A“, „B“ a „C“. U zadávání rotačních parametrů je nezbytné dbát zvýšené opatrnosti, protože rotační parametry u robotů mají oproti běžným pěti-osým obráběcím zařízením jiné označení rotačních os (viz Obr. 48). Roboti KUKA při rotaci kolem osy „x“ používají rotační osu „C“. Rotace kolem osy „y“ je shodná u robotů i u obráběcích zařízení a používá osy „B“. Zbývající osa „A“ je používána u robotů KUKA pro rotaci kolem osy „z“.



Obr. 48: souřadné systémy CNC [21]

Při vytváření nástroje je vhodné doplnit i další data jako je hmotnost a momenty setrvačnosti „nástroje“ připojeného na robotu. Těchto dat je možné využít pro kontrolu, zda nedošlo k nějaké chybě při manipulaci.

Pro zanesení transformace nástroje do systému je možné použít:

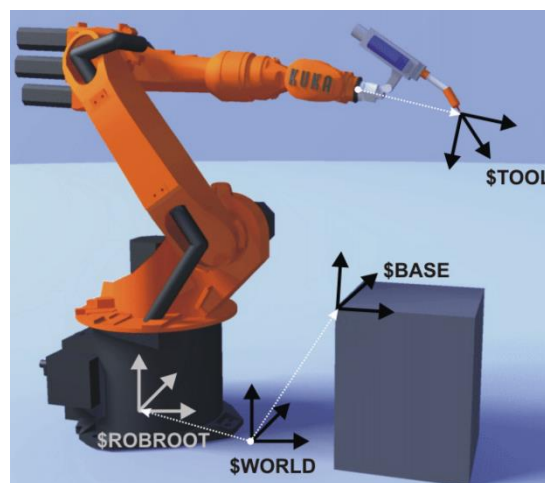
- XYZ 4-point – je metoda kdy se manuálně najede robotem čtyřikrát na stejný bod z různých směrů. Z těchto čtyř pozic je následně spočtena hodnota posunutí příslušného TCP v osách „x“, „y“ a „z“. použitím této metody nedochází ke změně orientace souřadného systému.
- XYZ reference
- ABC 2-point
- ABC world
- Numeric input - je jednoduchá metoda, kde se pro zanesení dat o nástroji používá přímého vložení hodnot, které mohou být získány například z CAD dat nástroje. Při zadávání parametrů se zadají hodnoty „x, y, z, A, B a C“ případně i další parametry jako je hmotnost či momenty setrvačnosti.

3.10.2 KUKA KR C4 – tvorba báze

Vytváření souřadných systémů na KUKA robotu je možné provádět třemi způsoby:

- 3-point, je postup, při kterém je pomocí manuálních nájezdů na tři různé body jednoznačně vytvořen kartézský souřadný systém. Při tomto postupu je manuálně pohybováno robotem. Potvrzením na ovládacím panelu je uložena pozice TCP jako počátek nového souřadného systému. Následně je TCP ručně přesunut na bod, který spojením s počátkem určí osu „x“ v kladném směru. Posledním krokem tvorby vlastního souřadného systému je najetí TCP na bod, který proložením osy „x“ a třetího bodu vytváří rovinu „xy“. Třetí bod zároveň určuje kladný směr osy „y“. Osa „z“ je normálovým vektorem roviny „xy“ procházející počátkem souřadného systému. Pro jednoduché ověření orientace souřadného systému může operátor použít pravidlo pravé ruky kdy palec ukazuje kladný směr osy „x“, ukazovák ukazuje kladný směr osy „y“ a prostředník ukazuje kladný směr osy „z“.
- Indirect, je metoda tvorby souřadného systému, která pro jednoznačné určení svého souřadného systému využívá jiných již hotových souřadných systémů.
- Numeric input, je metoda tvorby souřadného systému pomocí přímého zadání.

Průmyslové roboty KUKA mají svůj souřadný systém ROBROOT, který je umístěn v patě robotu, orientovaný tak že osa „z“ je vertikální a kladný směr osy směřuje vzhůru při vertikálním uložení robotu. Nulové natočení první rotační osy robotu určuje kladný směr osy „x“. Poloha souřadného systému robotu ROBROOT v prostoru WORLD určuje, kde se robot nachází v rámci pracoviště (viz Obr. 49).



Obr. 49: souřadné systémy robotu [25]

Při práci s robotem jsou využívány ještě nastavitelné souřadné systémy pro pracovní oblasti a pro nástroje. Souřadných systémů pro pracovní oblasti může být na jednom stroji použito více a v průběhu pracovního cyklu je možné mezi jednotlivými souřadnicovými systémy přepínat. Různých souřadných systémů je využíváno i u nástrojů. Nástrojové souřadné systémy jsou spolu s nástroji napojeny na přírubu robotu a vytvářejí tak poslední prvek kinematického mechanismu. Pracovní bod kinematického mechanismu TCP (Tool Center Point) je bod, který je umístěn v blízkosti vrcholu nástroje nebo přídavného zařízení, které je připojeno ke konci ramene robotu. TCP se používá k určení polohy a orientace nástroje v prostoru a k řízení pohybu nástroje při práci. [25], [29]

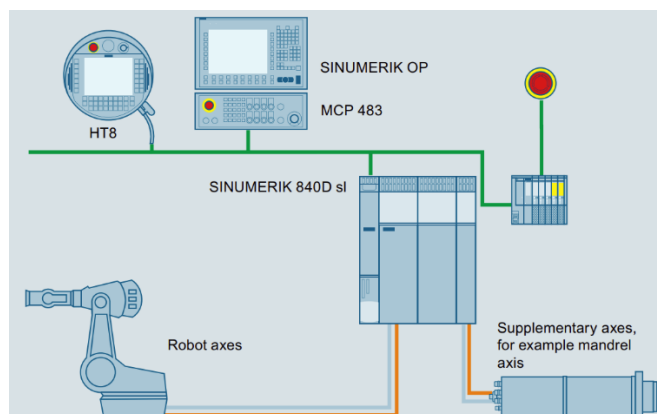
3.11 Řídicí systém Sinumerik 840D sl

Řídicí systém Sinumerik 840D sl je CNC systém (Computerized Numerical Control) od společnosti Siemens, který se používá pro řízení výrobních linek, obráběcích strojů a dalších zařízení. Sinumerik 840D sl slouží k řízení a monitorování jednotlivých prvků zařízení včetně pohybových os. Tento řídicí systém poskytuje rozhraní mezi operátorem a zařízením, umožňuje zadávání programů, ovládání a monitorování výrobních operací, nastavování parametrů nejen výrobních procesů, ale také samotného řídicího systému. Dále je pomocí tohoto řídicího systému umožněno provádět diagnostiku a údržbu zařízení. Běžně se tento řídicí systém používá pro broušení, vrtání, frézování a soustružení, je ale možné tento systém používat i pro méně běžné výrobní technologie jako je svařování, laserové řezání a 3D tisk. Řídicí systém je vybaven funkcemi pro detekci kolizí, adaptivní řízení rychlosti řezu, kompenzace nástroje a mnoho dalších. Řídicí systém je možné upravovat a měnit jeho vlastnosti na základě jednotlivých parametrů v řídicím systému a pomocí užití různých přídatných modulů. [11], [13], [22], [30], [31]

3.11.1 Spojení systému Sinumerik a robotu

Řídicí systém Sinumerik je schopen pro ovládání robotu používat různé úrovně řízení komunikující s řídicí jednotkou robotu například přes Profinet, nebo přímé ovládání robotu pomocí měničů.

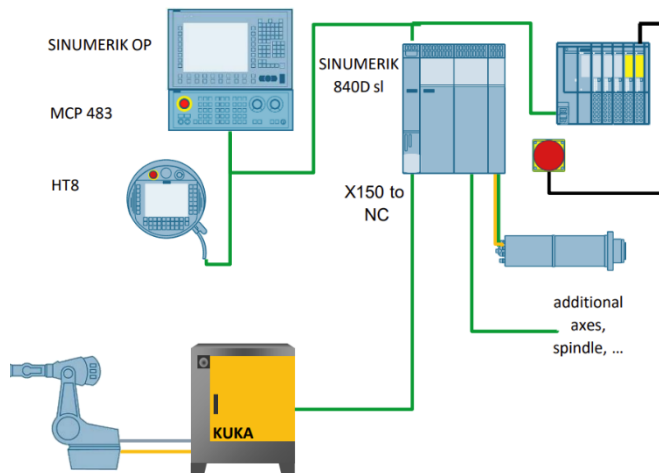
- Run MyRobot EasyConnect propojuje Sinumerik s libovolným robotem pomocí PLC a I/O samotné řízení pohybů probíhá v řídicím systému robotu
- Run MyRobot Handling umožňuje kompletní programování robotu v Siemens Sinumerik pomocí PLC a funkčních bloků. Tato metoda je používána pro ovládání KUKA robotu vybaveného KR C4 s mxAutomation. V této variantě probíhá samotné řízení v řídicí jednotce robotu, ale zadávání žádané trajektorie formou diskretních bodů je obstaráváno řídicím systémem Sinumerik.
- Run MyRobot Direct Control (viz Obr. 50) umožňuje přímé řízení kterýchkoli robotů s pohony Siemens, kde řízení je prováděno pomocí řídicího systému Sinumerik, který zpracovává kompletní příkazy pro měniče jednotlivých os (zapojení dle Obr.50).



Obr. 50: Sinumerik Run MyRobot Direct Control [30]

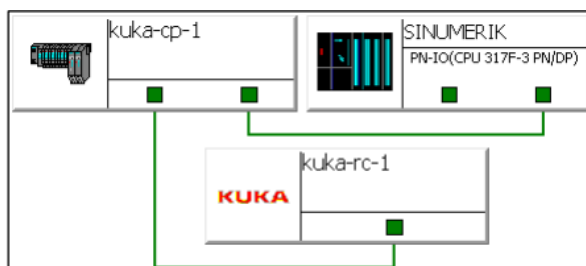
- Run MyRobot Machining (viz Obr. 51) umožňuje řízení trajektorie v Siemens Sinumerik.

Tato varianta zapojení byla použita pro robot v této práci. Toto zapojení umožňuje časovou synchronizaci více zařízení najednou a zaslání informací o žádaných rychlostech kloubů. To je však možné pouze pro některé kombinace robotů a řídicích systémů například Kuka s KR C4. Při tomto řízení je inverzní kinematika



Obr. 51: Sinumerik Run MyRobot Machining [22]

včetně polohové smyčky odbavována v NCU jednotce Sinumerik. Výhody tohoto zapojení umožňují kompletní ovládání z jednoho panelu a zároveň je umožněno využívat standardních CAM nástrojů pro automatické programování pracovních drah.



Obr. 52: zapojení kontroleru KUKA do Sinumeriku [32]

3.11.2 Výrobní program

Programování NC systémů je prováděno pomocí NC bloků. Každý blok obsahuje data pro vytvoření jednoho kroku potřebného k opracování obrobku. Jednotlivé bloky jsou složeny z příkazů (instrukcí) dle normy DIN 66025 a z prvků jazyka NC systému. Jednotlivé instrukce mohou být tvořeny ručně, to však není pro tvorbu tvarově složitějších dílů přípustné a je proto využíváno CAD/CAM systémů a postprocesoru. Jsou generovány sady příkazů, podle kterých je následně výrobní zařízení schopno zpracovávat příkazy a vytvářet tak požadovaný díl. [16], [30], [33]

Norma DIN 66025 určuje, že příkazy se skládají z adresových znaků a čísla. Adresový znak je písmeno definující význam příkazu. Adresové znaky (písmena):

- N adresa čísla bloku
- G určuje G-funkce, které určují podmínky dráhy (pohyb rychloposuvem, pohyb po přímce, pohyby po kružnici po a proti směru hodinových ručiček)



- X, Y, Z, A, B, C případně další určují informace o dráze pro jednotlivé osy
- F určuje předepsaný posuv
- S určuje otáčky vřetene
- T vybírá nástroj
- D předepisuje číslo korekčních parametrů nástroje
- M jsou doplňkové funkce běžně využívané například pro výměnu nástroje ve vřeteni, zapnutí/vypnutí chlazení a další
- H je využíváno pro pomocné funkce

Některé adresy mohou být použity v rámci jednoho bloku i několikrát. Přiřazování hodnot je možné provádět přímým zápisem hodnoty za adresu (G0 X100...) pokud se však adresa skládá z více než jednoho písmene, nebo je-li hodnota něčím jiným než přímo zapsanou konstantou (například parametr...), je třeba mezi zapisovanou hodnotou a předepsanou adresou použít znak „=“. Za účelem udržení přehlednosti a správné funkčnosti jednotlivých příkazů je dodržována posloupnost příkazů N... G... X... Y... Z... A... B... C... F... S... T... D... M... H... [16], [33]

Pracovní roviny jsou v NC programu voleny pomocí příkazů G17, G18 a G19. Pro nejčastěji používaný G17 je pracovní rovinou rovina X/Y (abscisa/ordináta) a směr přísuvu je v ose Z (aplikáta). Pro G18 je pracovní rovinou rovina Z/X (abscisa/ordináta) a směr přísuvu je v ose Y (aplikáta). Pro G19 je pracovní rovinou rovina Y/Z (abscisa/ordináta) a směr přísuvu je v ose X (aplikáta). [16]

Při práci na obráběcích zařízeních i s různými manipulátory a roboty jsou využívány různé souřadné systémy, mezi kterými se v rámci programů může přecházet. Nejčastěji využívané souřadné systémy na obráběcích zařízeních jsou volány pomocí G53 (pohybování v souřadném systému stroje). Souřadné systémy uživatelem specifikovatelné jsou G54-G59 a G505-G599.

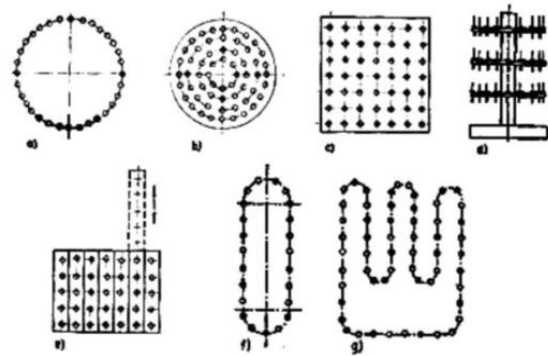
3.12 Automatická výměna nástroje

S rostoucí mírou automatizace jsou požadavky na variabilitu procesů a zkracování neproduktivních časů. Stroje musí mít možnosti rychlé výměny nástroje či rovnou celé pracovní hlavy. Na obráběcích strojích jsou umístěny zásobníky nástrojů, ve kterých je umístěno omezené množství nástrojů, kterých mohou být na jednom stroji jednotky, ale i stovky (viz Obr. 53). K nástrojům umístěným v zásobníku nástrojů jsou uloženy i parametry a nastavení jednotlivých nástrojů. S výměnou nástroje jsou aktivovány i technické parametry příslušných nástrojů.



Obr. 53: velkokapacitní zásobník nástrojů Demmeler[34]

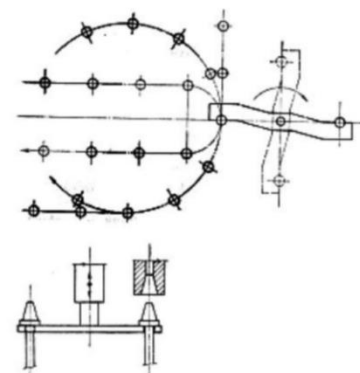
Obráběcí zařízení mohou mít zásobníky nástrojů statické s nástroji uloženými v regálu, dále mohou být nástroje umístěny v různých „bubnech“, revolverových zásobnících, anebo v řetězových dopravnících (viz Obr. 54).



Obr. 54: velkokapacitní zásobníky nástrojů [35]

Způsob výměny nástroje se odvíjí od koncepce zásobníku nástrojů a je odvozen od pohybových možností pracovního zařízení, kapacity zásobníku nástrojů a požadovaných

časů výměny. Nástroje mohou být ze zásobníku nástrojů vyndávány a zakládány zpět do zásobníku přímo pomocí vřeten. Další způsob manipulace s nástroji mezi vřetenem a zásobníkem nástrojů je často založen na výměně nástroje pomocí podavače (viz Obr. 55). Podavače využívají dvou pozic s tím, že v jedné pozici je vyzvednut a připraven potřebný nástroj pro následující operace žádané v programu. Druhá pozice je volná a připravená přijmout nástroj z vřeten. Po provedení samotné výměny podavač uloží vyjmutý nástroj do zásobníku na volnou pozici. Pro potvrzení, že manipulace probíhá se správným nástrojem může být zařízení doplněno o identifikační systémy oznamující práci s nesprávným nástrojem.



Obr. 55: podavač nástrojů [35]

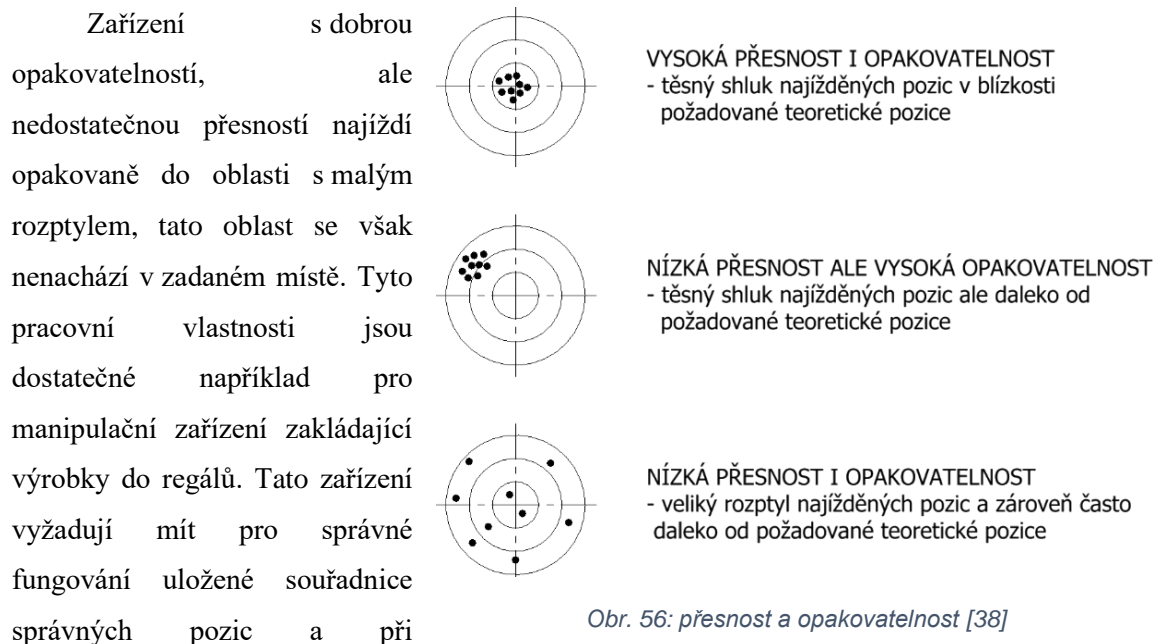
Pro úspěšnou výměnu nástroje je třeba vybrat příslušný nástroj příkazem T a číslo nástroje. Výměna nástroje jako taková je prováděna pomocí příkazu M6. Při výměně nástroje

je vhodné nahrát i korekční parametry nástroje pomocí příkazu D. U kódů tvořených postprocesorem jsou všechny tyto části generovány automaticky. [35], [36], [37]

3.13 Přesnost a opakovatelnost

Při přesné výrobě, manipulaci, montáži či jiných činnostech zařízení s pravidelným opakováním je důležitým parametrem opakovatelnost, která sleduje schopnost zařízení najíždět opakovaně na stejné místo. Dalším sledovaným parametrem výrobních zařízení je přesnost.

Zařízení s nízkou přesností a s nízkou opakovatelností mají při opakovaném nájezdu na zadanou pozici značný rozptyl všemi směry v okolí zadané polohy, což je však pro mnoho zařízení dostatečné.



Obr. 56: přesnost a opakovatelnost [38]

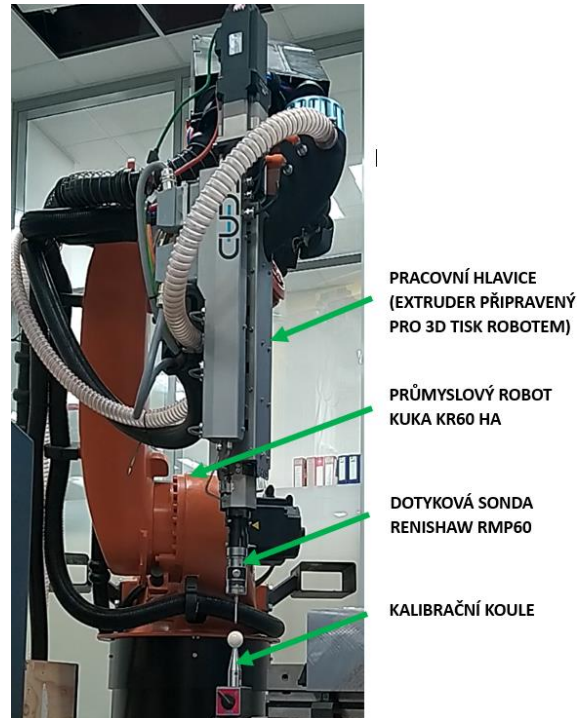
opakováním najíždění na danou polohu je pro spolehlivý chod podstatná malá odchylka od najížděné pozice. Poloha této opakovaně najížděné pozice však není pro spolehlivý chod podstatná.

Nejpříznivější stav je, když je zařízení s dobrou opakovatelností dostatečně přesné. Což je z pravidla vyžadováno u obráběcích a měřících zařízení. Dosáhnout zvýšení přesnosti je možné mechanickými zásahy do konstrukce zařízení nebo pomocí doplnění korekčních parametrů. Mechanické zásahy jsou náročné a nejčastěji je jich dosahováno během výroby nových řad zařízení. Zpřesňování pomocí korekčních map je možné na již fungujícím zařízení bez mechanických zásahů do konstrukce zařízení.

4 Implementace dotykové sondy do průmyslového robotu

Samotná dotyková sonda může být k robotu připojena pomocí nástrojového upínače běžně umístovaného do vřetenové jednotky. Další možností upevnění sondy na robot může být připevnění sondy na pevno na robot.

Robot v laboratoři v CIIRC, na kterém byla prováděna tato práce, je osazen pracovní hlavicí v podobě extruderu určeného pro velkoformátový tisk (viz Obr. 57). Na konec extruderu byla připevněna dotyková sonda. To, že je sonda umístěna na konci extruderu je ekvivalentní k umístění dotykové sondy ve vřetenové jednotce se zabrzděným vřetenem.



PRACOVNÍ HLAVICE
(EXTRUDER PŘIPRAVENÝ
PRO 3D TISK ROBOTEM)

PRŮMYSLOVÝ ROBOT
KUKA KR60 HA

DOTYKOVÁ SONDA
RENISHAW RMP60

KALIBRAČNÍ KOULE

Obr. 57: robot s pracovní hlavicí v laboratoři v CIIRC

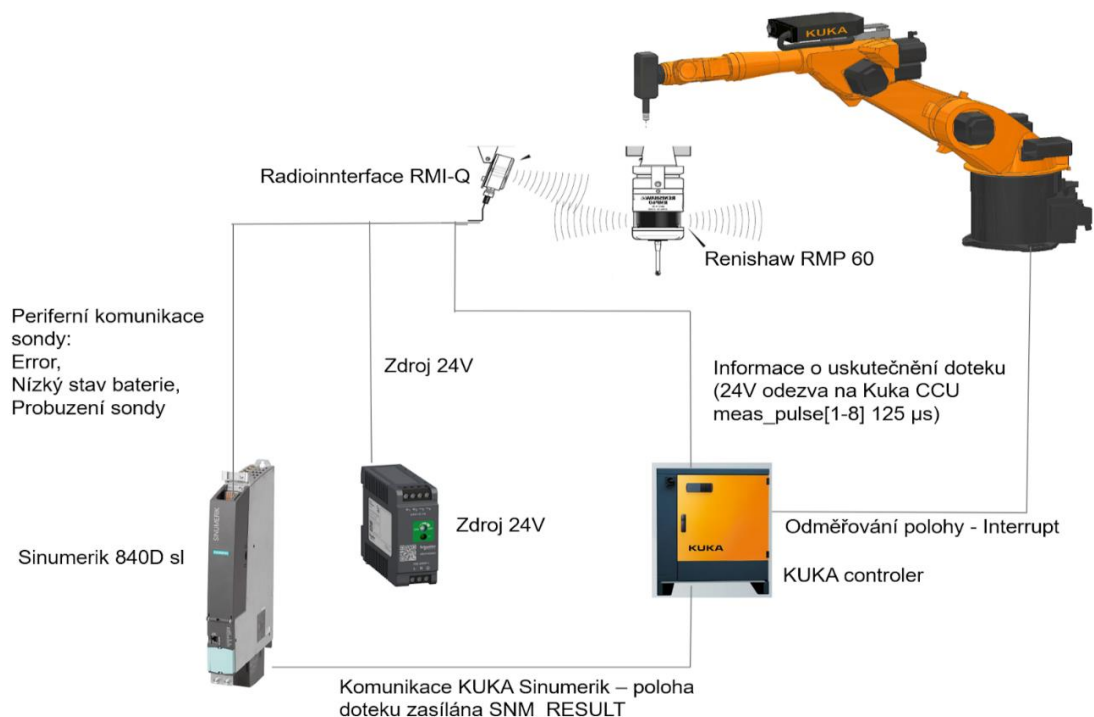
Na bezpečnostní oplocení byl umístěn radio-interface nasměrovaný směrem k pracovní oblasti robotu.

Implementace dotykové sondy je prováděna do ŘS Sinumerik 840D sl – Run MyRobot Machining s řídicí jednotkou KR C4. Dotyková sonda může být zapojena pomocí různých variant. Volba použití jednotlivých variant je závislá na očekávané přesnosti, hardwarové a softwarové dispozici. Výstup ze sestavy sondy a radio-interface je potřeba přivést na některý ze vstupů ŘS, ale obecně je snaha o co nejrychlejší synchronizace informace o dotyku s polohou pohybových os.

Pro fungování měřících operací je nezbytné, aby byl je zapojen interface ke zdroji napětí. Dále musí být spínán okruh budicího signálu příslušné sondy. Pro správné, stabilní a bezpečné měření je vhodné zapojit i digitální vstupy sloužící k periferní komunikaci od sondy k zařízení. Periferní digitální výstupy z radiointerface zobrazují stav sondy, chybu a nízký stav baterie. Zapojení výstupu o uskutečnění doteku musí být připojen na vstup, který přenáší informaci o samotném uskutečnění doteku. Rychlý vstup je vhodné využít kvůli maximálnímu možnému zkrácení odezvy na získaný signál o uskutečnění doteku. Tento signál může být přiveden i na jiné vstupy, toto zapojení však může prodloužit odezvu systému na uskutečnění dotek. [6]

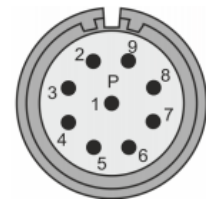
4.1 Zapojení sondy

Na to, aby byl co nejmenší rozdíl mezi hodnotami os v okamžik doteku a zaznamenanými hodnotami je nezbytné minimalizovat zpoždění signálu. Vstup s informací o uskutečnění dotyku je možné přivést buď do Sinumeriku nebo do kabinetu KUKA. Řídící jednotka Sinumerik NCU 730.3B PN/317 disponuje, stejně jako většina jednotek, běžnými vstupy, výstupy a rychlými vstupy. Běžné vstupy mají obnovovací frekvenci 50 μ s. Rychlé vstupy mající obnovovací frekvenci 5 μ s jsou například X122.13 a X132.10, do kterých běžně bývá zapojen signál nástrojové a obrobkové sondy. Toto zapojení je však vhodné pouze v případě, kdy je Sinumerik zařízením řídicím samotné motory. Ve variantě RMR-machining jsou pohybové osy ovládány pomocí KR C4 a ze Sinumeriku. Hodnota natočení jednotlivých motorů je zaznamenávána v KR C4 a následně zasílána pomocí Profinetu do ŘS Sinumerik v podobě natočení jednotlivých os. Zasílání aktuální polohy z KUKA do Sinumerik však je zatíženo dopravním zpožděním, které je výrazně delší než odezva rychlých vstupů na NCU. Z tohoto důvodu je vhodné informaci o uskutečnění doteku používat k odečtení hodnot natočení jednotlivých os již na straně ŘS KUKA (viz Obr.58). Kabinet KUKA běžně disponuje možností připojení DI/O pomocí například Profinetu, ale nedisponuje běžnými digitálními vstupy a výstupy, ale na CCU desce disponuje osmi rychlými vstupy. [31], [37]



Obr. 58: struktura zapojení sondy do robotu

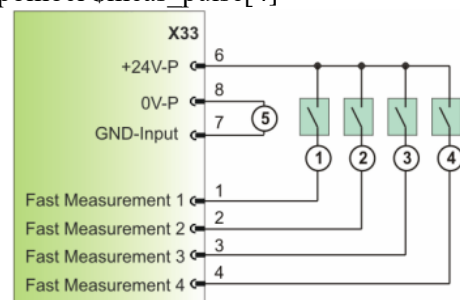
Informace o doteku je vhodné přenášet z interface do KR C4 pomocí rychlých vstupů. Rychlé vstupy se do rozvodného kabinetu KR C4 dají připojit z vnější strany, pokud je skříň vybavena konektorem X33 (viz Obr. 59) v některém z vnějších slotů. Rychlé vstupy v KUKA KR C4 vykazují zpoždění 125 μ s. [39], [40]



Obr. 59: konektor X33 [40]

Jednotlivé piny v konektoru X33 jsou zapojeny následujícím způsobem:

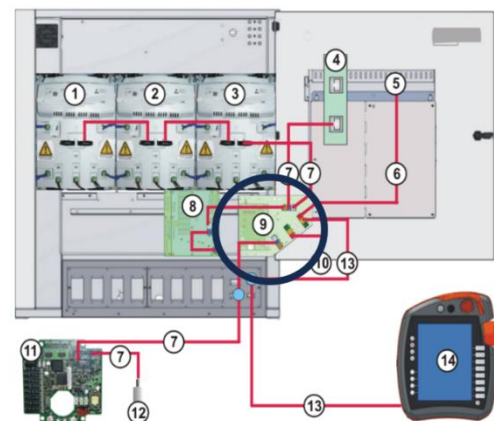
- Pin 1 – první měřicí signál - dostupný v KUKA pomocí \$meas_pulse[1]
- Pin 2 – druhý měřicí signál - dostupný v KUKA pomocí \$meas_pulse[2]
- Pin 3 – třetí měřicí signál - dostupný v KUKA pomocí \$meas_pulse[3]
- Pin 4 – čtvrtý měřicí signál - dostupný v KUKA pomocí \$meas_pulse[4]
- Pin 5 – náhradní
- Pin 6 – zdroj 24V
- Pin 7 – GND-vstup
- Pin 8 – 0V
- Pin 9 – není využit



Obr. 60: X33 zapojení [40]

Na obrázku 60 je vidět schéma zapojení pro 4 rychlé vstupy vyvedené v konektoru X33, který je následně uvnitř kabinetu zapojen na molexový konektor X23 nebo X25.

Jelikož je konektor X33 doplňkovou výbavou, montovaný pouze na vyžádání je možné využít místo zapojení konektoru X33 umístěovaného zvenku na rozvaděč, rychlých vstupů na CCU (Cabinet Control Unit) desce uvnitř rozvaděče. CCU deska je na následujícím obrázku označena číslem 9 (Obr. 61).

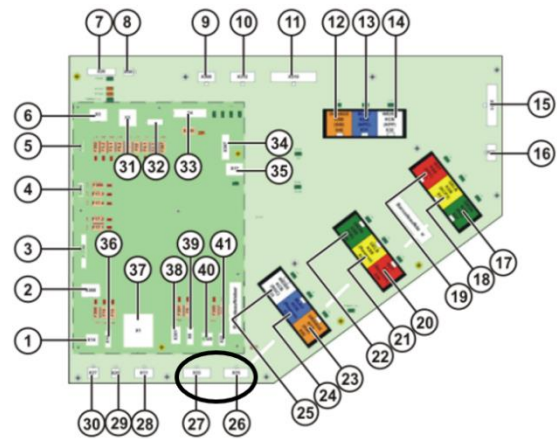


Obr. 61: rozvaděč KR C4 [29]

Rychlé vstupy je možné připojit na CCU desce na konektorech X23 a X25 na následujícím obrázku označené čísly 26 a 27.

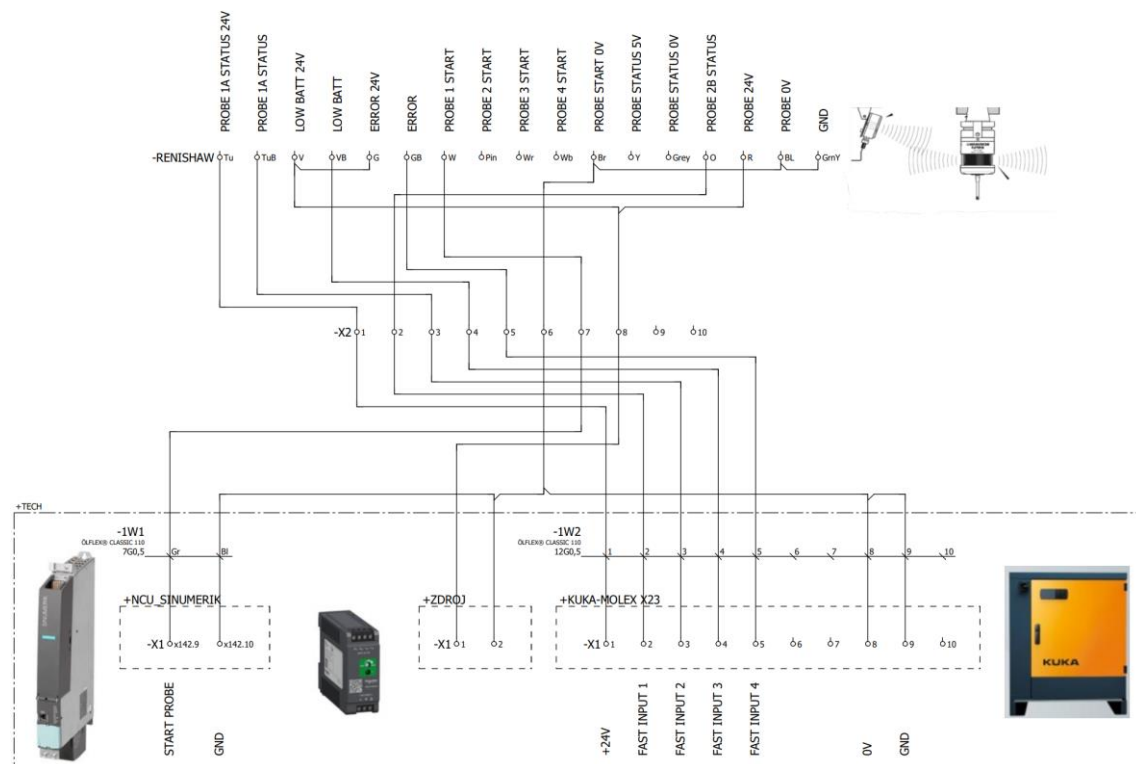
Kuka KR C4 nabízí celkově možnost zapojení až 8 binárních rychlých vstupů rozdělených mezi konektory X23 (10-ti pinový molexový konektor) a X25 (8-mi pinový molexový konektor) na základové desce CCU (viz Obr. 62). Těchto 8 vstupů může být vyvedeno konektory X33 mimo kabinet. V případě bez konektorů X33 je přiveden zdroj 24 V na první pin konektoru X23. Na pinech 2-5 jsou rychlé vstupy 1-4 dále je třeba na konektoru X23 nezbytné propojit piny 7 a 8, kde je 0 V a GND-zem. Zbylé 4 rychlé vstupy jsou na konektoru X25 tento konektor je již částečně obsazen synchronizací ŘS KUKA a Sinumerik.

Konektory pro rychlé vstupy nezávisle zda je použit konektor X33, X23 nebo X25 mohou být napájeny ze samotného konektoru. Umožňuje však bezpečně odebrat pouze 500 mA. Použitý radiointerface RMI-Q má běžný proud 300 mA, ale v piku může odběr dosáhnout až 800 mA proto byl radiointerface připojen samostatně k zdroji napětí a CCU deska je zdrojem napětí pouze pro okruh samotného signálu doteku (viz Obr. 63).



Obr. 62: rychlé vstupy (X23 a X25 označené 26 a 27) na CCD desce [29]

Ostatní signály komunikující mezi interfacem a zařízeními mohou být připojeny jak k NCU tak k kabinetu KUKA a být zpracovávány a ovládány v rámci NC kódu, nebo pomocí PLC části, či pomocí zásahů například pomocí interrupt rutiny při zapojení signálu do KUKA kabinetu. Signál v podobě krátkého pulzu ovládající probuzení sondy byl připojen na NCU na digitální výstup 2 na pinu X142.10. [6], [29], [31], [37], [39], [40]



Obr. 63: E-plan zapojení sondy

4.2 Cell soubor v KUKA KR C4

Roboty KUKA umožňují odevzdání řízení nadřazenému řídicímu systému, čehož bylo využito právě v případě řízení pomocí ŘS Sinumerik 840D sl -RMR Machining v této práci, s tímto zapojením jsou automatické programy vykonávány z pohledu robotu v režimu externího řízení. Manuálně je možné ovládat robot v režimu T1 (manuální ovládání robotu s omezenými rychlostmi TCP na 250 mm/s) z KCP (KUKA control panel) bez uzavření bezpečnostních okruhů nezbytných pro automatický nebo externí režim. Pro pohybování robotem v JOG režimu z panelu Siemens musely být uzavřeny bezpečnostní okruhy pro uvolnění pohybu.

Byl upraven cell.src soubor v robotu (hlavní program v KUKA robotech, z kterého následně bývají volány další programy). Pro zprovoznění měření je nezbytné, aby byly připraveny příkazy sloužící k zaznamenání informace v okamžik doteku a předání informace do ŘS Sinumerik.

Důležitou částí je níže uvedená interrupt funkce, která byla v tomto případě napsána tak ať zaznamená aktuální pozici všech os a díky použití rychlého vstupu k tomu dojde s minimálním dopravním zpožděním. Interrupt funkce, pokud je zapnuta, čeká na svůj spouštěcí signál, kterým může být překročení některé hranice polohy, spouštěčem může být překročení nebo dosažení požadované/prahové hodnoty, nebo může být spouštěčem například změna některého ze vstupů čehož bylo použito v této práci.

```
DEF SNM_FASTMEASURE()  
  REAL SNM_EMIREAL[16]  
  INT SNM_EMIINT[16]  
  INT SNM_RESULT  
  ;INITIALIZE VARIABLE  
  SNM_EMIINT[1] = 0  
  SNM_EMIREAL[1] = $AXIS_INT.A1  
  SNM_EMIREAL[2] = $AXIS_INT.A2  
  SNM_EMIREAL[3] = $AXIS_INT.A3  
  SNM_EMIREAL[4] = $AXIS_INT.A4  
  SNM_EMIREAL[5] = $AXIS_INT.A5  
  SNM_EMIREAL[6] = $AXIS_INT.A6  
  SNM_EMIREAL[7] = $AXIS_INT.E1  
  SNM_EMIREAL[8] = $AXIS_INT.E2  
  SNM_EMIREAL[9] = $AXIS_INT.E3  
  SNM_EMIREAL[10] = $AXIS_INT.E4  
  SNM_EMIREAL[11] = $AXIS_INT.E5  
  SNM_EMIREAL[12] = $AXIS_INT.E6  
  ; INTERRUPT POSITION AN EMI SENDEN  
  SNM_RESULT = MD_CMD ("IOMOTIONSTREAM", "SET  
  AXIS_INT", SNM_EMIINT[], SNM_EMIREAL[])  
END
```

Tato funkce byla volána pomocí změny na vstupu `$meas_pulse[SNM_MEAS_PLS_01]` z 0 na 1 pomocí následujícího příkazu:

```
INTERRUPT DECL SNM_INT_02 WHEN $MEAS_PULSE[SNM_MEAS_PLS_01] DO  
SNM_FASTMEASURE();
```

Konstanta `SNM_MEAS_PLS_01` musí mít deklarovanou hodnotu rovnající se číslu pinu, na který je přiveden měřicí signál (pro tento případ byl použit první rychlý vstup). Pomocí změny konstanty je možné využít stejné funkce a stejného volání interrupt funkce pro jiné druhy měření například pro měření pomocí nástrojové sondy. Pro měření jinými sondami je nezbytné dbát zvýšené opatrnosti ohledně logiky měřicího signálu, který například pro laserové měření nástrojů má opačnou logiku (logika světelné závory normálně uzavřeno), pro takové měření je třeba využívat upraveného volání interrupt funkce s negací hlídaného signálu.

4.3 Nastavení parametrů – Sinumerik

Řídící systém Sinumerik 840D sl byl konfigurován a přizpůsobován pomocí různých parametrů, včetně MD (Machine Data) a SD (System Data). Tyto parametry umožňují uživatelům přesně definovat chování a nastavení systému tak, aby vyhovovaly konkrétním požadavkům a procesům. Pro umožnění požadované funkcionality bylo také nezbytné zprovoznit příslušné licence. Pro automatické měření je nezbytné zapnout licenci Measuring cycles 6FC5800-0AP28-0YB0. Samotné zapnutí měřících cyklů nepostačuje, k zprovoznění měření je třeba mít nastavené tyto MD, SD a p parametry, které byly nastaveny následovně [11], [13], [16], [36], [37], [41], [42], [43], [44]:

- MD 10050 SYSCLOCK_CYCLE_TIME (0,002s) je parametr určující základní dobu cyklu, tato doba byla nastavena podle doby cyklu Profinetu. Tento parametr má společně s mnoha dalšími výrazný vliv na brzdnou dráhu zařízení po uskutečnění doteku.
- MD 10070 IPO_SYSCLOCK_TIME_RATIO nastavený na hodnotu 1 je faktor interpolátoru. Tento faktor je zadaným celočíselným násobkem parametru MD 10050.
- MD 10240 SCALING_SYSTEM_IS_METRIC byl nastaven na hodnotu 1 pro škálování přichozích signálů v jednotkách mm, mm/min, m/s², m/s³, mm/ot.
- MD 10360 FASTIO_DIG_NUM_OUTPUTS 5 pomocí tohoto parametru byl určen počet digitálních bitů NC výstupu. Tyto byty je možné ovládat pomocí NC programu nebo pomocí programu z PLC. Byty jsou potřeba minimálně 2, jeden na ovládání sondy a druhý je použit pro připojení výstupu informující NCU o uskutečnění dotyku.
- MD 13200[0], 13200[1] MEAS_PROBE_LOW_ACTIVE jsou dva parametry definující charakter spínání či rozpínání první a druhé měřicí sondy. Hodnota 0, která byla nastavena na použitém zařízení na MD 13200[0] značí spínací kontakt sondy virtuálně spojené s vstupem na pinu X122.13, hodnota 1 značí rozpínací kontakt. To, zda se jedná o spínací či rozpínací kontakt nemá vliv na programování uskutečnění dotyku. Programování kladné hrany vždy značí přechod z nevychýleného do vychýleného stavu a programování záporné hrany vždy značí přechod z vychýleného do nevychýleného stavu.

- MD 13210 MEAS_TYPE definuje, zda se jedná o centralizované nebo decentralizované měření. Centralizované měření MD13210=0 je zapojeno centrálně a informace o poloze jednotlivých os je zaznamenáno v cyklech, „změřená“ hodnota je zjištěna pomocí interpolace. Decentralizované měření MD13210=1 je prováděno odečtením aktuálních hodnot na měřicím aparátu v okamžik měřicí hrany. Jelikož z pohledu Sinumerik byly jednotlivé osy ovládány jako simulované byla nastavena hodnota parametru 0.
- MD 13230 MEAS_PROBE_SOURCE pomocí nastavení hodnoty 1-8 je možné nastavit digitální výstup pomocí kterého může být ovládána sonda. Tento parametr byl nastaven na hodnotu 0.
- MD 28082 MM_SYSTEM_FRAME_MASK připravuje masku pro systémové rámce. Pomocí nultého bitu je možné nastavit, zda má zařízení po zaznamenání hrany zastavit, zapomenout zbytek dráhy a vrátit se nebo zda má po zaznamenání hrany pokračovat a projet celou dráhu. Dalším významným bitem pro použitou aplikaci byl bit číslo 5 který ovládá systémový rámec pro cykly. Hodnota tohoto parametru byla binárně nastavena na 21H.
- MD 32200 POSCTRL_GAIN vyjadřuje zesílení polohové smyčky Kv u lineárních os v (m/min)/mm. Průmyslový robot má však běžné pohybové osy kloubové a tedy rotační. Hodnota tohoto parametru byla nastavena na 8 pro všechny pohybové osy. Hodnota v tomto parametru měla velký vliv na ujetu brzdou dráhu zařízení po uskutečnění doteku. MD 51740 MEA_FUNCTION_MASK definuje nastavení funkční masky měřicích cyklů. Pomocí nastavení jednotlivých bitů je možné ovlivnit fungování a nastavení měřicích cyklů.
 - Bit0 kontrola stavu kalibrace byla zapnuta
 - Bit1 jsou délka sondy je určena po střed (bit1=0) nebo po hranu kuličky (bit1=1) (použitá varianta byla na střed kuličky dotyku)
 - Bit2 měření s přestavováním vřetene pro orientace 0°, 90°, 180° a 270° (bit2=0) nebo bez přestavování (bit2=1)
 - Bit4 sonda je umístěna ve vřeteni (bit4=0) nebo je sonda namontována na pevno na stroji (bit4=1) (bit byl nastaven na 1)
 - Bit6 určuje, zda je měření prováděno v proporční rychlosti s aktuálním přepsáním override (bit6=0) nebo v 100% rychlosti pokud je rychlost posuvu větší než 0 (bit6=1) (bit byl nastaven na 1)
 - Bit15 určuje, zda se měřicí dráha projede plynulými dráhami (bit15=0) nebo zda se dráha projede s přesným zastavením na konci bloku (bit15=1)
- MD 52200 MCS_TECHNOLOGY určuje výrobní technologii, ke které je zařízení využíváno. Předdefinovanými technologiemi jsou soustružení (MD52200=1), frézování (MD52200=2), válcové broušení (MD52200=3) a plošné broušení (MD52200=4).
- MD 52207 AXIS_USAGE_ATTRIB nastavuje chování vřetene (rotace kolem 1. osy – bit0=1, rotace kolem 2. osy – bit1=1 a rotace kolem 3. osy – bit2=1). Umožňuje nastavit opačný kladný směr rotace (rotace proti směru hodinových ručiček bit3=0) a další vlastnosti včetně nastavení neumožnění polohování vřetene „SPOS“ (bit9=1).
- SD 54740 SNS_MEA_FUNCTION_MASK nastavuje masku pro měřicí cykly. Pomocí bitu 0 je možné nastavit reakci systému na překročení tolerance pro rozdíl rozměrů (TDIF) a rozsah spolehlivosti (TSA), hodnotou 1 je nastaveno při překročení tolerance opakované měření a až následně případně dojde k vypsání alarmu, hodnotou 0 je nastaveno zobrazení alarmu ihned po prvním neúspěšném měření kdy zároveň dojde k přerušení měření. Pomocí dalších parametrů jsou nastavované další podobné hraniční situace a následná reakce systému na dané situace při měření. Tento parametr byl nastaven na hodnotu 8.
- SD 54760 MEA_FUNCTION_MASK_PIECE umožňuje nastavování přístupu a volání 3D měřicích funkcí při tvorbě a editaci programu na zařízení pomocí prvního bitu. Pomocí ostatních bitů je možné nastavovat různé parametry související například

s použitým datovým polem kalibrace sondy a různými kompenzačními daty používanými při měření.

- SD55618 SCS_MEA_SIM_ENABLE je parametr nastavující měřící cykly v simulovaném prostředí a byl nastaven na hodnotu 9 – vnitřní.
- SD 55740 MEA_FUNCTION_MASK je další maskou pro měřící cykly. Pomocí tohoto parametru je možné nastavit například hlídání kolize při neměřících operacích. Pomocí spínání jednotlivých bitů je možné ovlivnit například:
 - Bit0 hlídání kolize pro mezipolohovací operace bylo zapnuto
 - Bit1 měření s polohováním vřetene bylo vypnuto
 - Bit3 opakované měření při nesenutí sondy bylo zapnuto
 - Bit4 měření při prvním měření pomocí rychlého měření (pokud je měřící vzdálenost delší než 2mm) a následně je provedeno měření v kalibrační rychlosti bylo zapnuto
 - Bit5 rychlé pohybování od doteku (pomocí rychlosti určené pro mezipolohování) bylo zapnuto
 - Bit8 měření s aktivovaným příkazem TRAORI bylo zapnuto
 - A další bity.
- SD 55630 MEA_FEED_MEASURE bylo nastaveno na 400. Toto číslo vyjadřuje hodnotu rychlosti použitou pro kalibraci dotykové sondy v manuálním JOG režimu a v automatickém režimu. Pomocí parametru MD 51740 bit 6=0 je možné nastavit, aby měření neprobíhalo přesně s zadanou měřící hodnotou, ale aby měření bylo proporčně ovlivněno nastavením override dle nastavených procent (ne pouze 0 a ≠0).
- SD 55632 MEA_FEED_RAPID_IN_PERCENT bylo nastaveno na 50. Toto číslo určuje přejezdovou rychlost pro mezipolohování bez sepnutí detekce kolize a rychlost je zapsána v procentech (rychlost odpovídá předepsaným procentům jednotlivých os)
- SD 55636 MEA_FEED_FEEDAX_VALUE bylo nastavené na 1500mm/min a určuje pojezdovou rychlost pro mezipolohování se zapnutou detekcí kolize. Rychlost je definována pro pohyb aktuálního TCP v [mm/min]. Pro pohybování se zapnutou detekcí kolize (SD55740 bit 0 a 16 =1) je vhodné rychlost přizpůsobit rychlosti, ze které by bylo možné zastavit před destrukcí sondy.
- P680[0] je parametr, který byl nastaven na [3] DI/DO 11 X122.13 určující používání pro vyhodnocení digitální vstup připojený na pin X122.13

Dále byly nastaveny parametry a bylo upraveno nastavení pro umožnění práce se zásobníkem nástrojů (magazínem) a s user parametry (běžně zařízení nemívají potřebu využívat user parametry k magazínu, protože běžně jsou zásobníky nástrojů vybaveny podavači a pozicováním zásobníku řízeným PLC a k předání nástroje dochází v jednom místě). Díky nastavení parametrů byl určen například formát hodnot v parametrech ukládaných k jednotlivým pozicím v zásobníku nástrojů. Parametry byly nastavovány v následujícím pořadí společně s nastaveními v tool management viz. dokumentace [36]:

- MD 19320 \$ON_TECHNO_FUNCTION_MASK bit4 byl nastaven na 1 pro zapnutí zobrazování magazínu
- MD 18080 \$MN_MM_TOOL_MANAGMENT_MASK bit 1 byl nastaven na 1
- MD 17530 \$MN_TOOL_DATA_CHANGE_COUNTER bit 0-4 byly nastaveny na 1
- MD 20310 \$MC_TOOL_MANAGEMENT_MASK bit 0-3 byly nastaveny na 1
- MD 28450 \$MC_MM_TOOL_DATA_CHG_BUFF_SIZE bylo nastaveno na 400
- MD 20320 \$MC_TOOL_TIME_MONITOR_MASK bit 0 byl nastaven na 1
- MD 28085 \$MC_MM_LINK_TOA_UNIT byl nastaven na hodnotu 1
- MD 18084 \$MN_MM_NUM_MAGAZINE byl nastaven na 4

- MD 18086 \$MN_MM_NUM_MAGAZINE_LOCATION byl nastaven na hodnotu 22
- MD 18080 \$MN_MM_TOOL_MANAGEMENT_MASK bylo nastaveno stejně jako MD 20310
- MD 18094 \$MN_MM_NUM_CC_TDA_PARAM bylo nastaveno na 3
- MD 18092 \$MN_MM_NUM_CC_MAGLOC_PARAM bylo nastaveno na 3 počet user-parametrů u každého lůžka
- MD 18093 \$MN_MM_TYPE_CC_MAGLOC_PARAM bylo nastaveno na 4 datový typ hodnot user-parametrů je reálné číslo

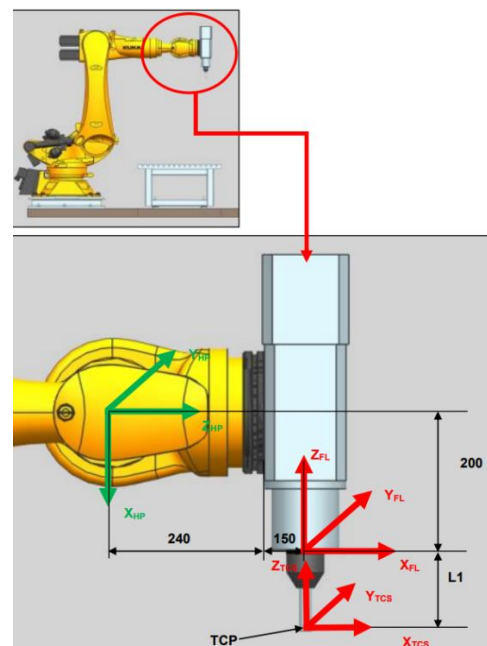
4.4 Transformace souřadných systémů

Kinematický řetězec robotu KUKA ovládaného řídicím systémem Sinumerik byl nastaven s posunutím na první ose s výškou 815 mm pomocí parametru \$MC_ROBX_TIRORO_POS[2] ostatní transformace počátku souřadného systému robotu (translace v ose x, y a rotace A, B a C) zůstaly nulové. Druhý konec kinematického řetězce robotu, kde se nachází pracovní hlavičce (viz Obr. 64), byl nastaven pomocí parametrů:

- \$MC_ROBX_TFLWP_POS[0] = 550 mm nastavující translaci souřadného systému v ose X
- \$MC_ROBX_TFLWP_POS[1] = 136 mm nastavující translaci souřadného systému v ose Y
- \$MC_ROBX_TFLWP_POS[2] = 229,5 mm nastavující translaci souřadného systému v ose Z
- \$MC_ROBX_TFLWP_RPY[0] = 0 nastavující rotaci souřadného systému A (rotace kolem osy Z)
- \$MC_ROBX_TFLWP_RPY[1] = - 90 nastavující rotaci souřadného systému B (rotace kolem osy Y)
- \$MC_ROBX_TFLWP_RPY[2] = 0 nastavující rotaci souřadného systému C (rotace kolem osy X)

Následně může být ještě vytvořeno posunutí a rotace v nástroji na konci kinematického řetězce tyto posunutí jsou však nastaveny na 0 protože korekce délky nástroje je prováděna na základě dat jednotlivých použitých nástrojů [32]:

- \$TC_DP3[1,1] (Z) length L1 (for G17) 0 mm
- \$TC_DP4[1,1] (Y) length L2 (for G17) 0 mm
- \$TC_DP5[1,1] (X) length L3 (for G17) 0 mm
- \$TC_DPC1[1,1] 1st angle (rotation by Z) 0 °
- \$TC_DPC2[1,1] 2nd angle (rotation by Y) 0 °
- \$TC_DPC3[1,1] 3rd angle (rotation by X) 0°



Obr. 64: Sinumerik - definice TCP pracovní hlavičce [32]

5 Analýza přesnosti měření pomocí robotu a vliv řídicího systému

Naměřování pomocí obrobkové dotykové sondy na průmyslovém robotu řízeného CNC řídicím systémem Sinumerik 840D sl bylo prováděno pomocí kalibrační koule umístěné do různých pozic v pracovním prostoru. Měření byla prováděna i s naklopenými souřadnými systémy (detailnější popis v kapitole 4.1 Měření pozice). Při měření byly vyhodnocovány odchylky od kalibrační koule. Samotné měření bylo ovlivněno mnoha faktory.

Měření bylo prováděno dotykovou sondou, která pouze informovala sestavu o uskutečnění dotyku. Samotné měřené hodnoty jsou určovány pomocí enkodérů na jednotlivých pohonech os postupným přepočtem. Hodnoty natočení jednotlivých os jsou přepočtené hodnoty natočení jednotlivých motorů, které svojí rotací pohání převodovky, které natáčí jednotlivé rotační osy robotu. Samotná natočení jednotlivých os následně umožňují pomocí řetězce transformačních matic určit polohu celé sériové kinematiky robotu. Sériová angulární kinematika robotů v porovnání s paralelní kinematikou, nebo kombinací sériové a paralelní kinematiky používané na obráběcích zařízeních je méně výhodná z pohledu tuhosti a přesnosti polohování.

Významný vliv může mít na mechanickou strukturu proměnlivá teplota. Snižování přesnosti a spolehlivosti je nežádoucí jev, který nejčastěji bývá řešen pomocí konstrukčního řešení, softwarové kompenzace, nebo externího odměřování. Minimalizace chyb pomocí kompenzačních modelů může být dosaženo pomocí známých kinematických modelů nahraných přímo v řídicím systému robotu, případně jemu nadřazenému ovladači. Další metodou získání kompenzačních dat je proměření zařízení a následné nahrání kompenzačních dat.

Měření je třeba provádět s kalibrovaným nástrojem. Řídicí systém je schopen kontrolovat data, zda k danému nástroji jsou poskytnuta kalibrační data pro danou orientaci a další parametry měření. Data uložená v paměti obsahující parametry v podobě spínacích bodů v jednotlivých směrech, délkové korekce a korekce průměru jsou při měření používána pro určování jednotlivých bodů. Pomocí těchto dat jsou při měření určovány polohy bodů dotyku a následně je určována poloha měřených prvků.

Sainumerik ovládá mechanickou strukturu robotu pomocí simulovaných os, reálná hodnota natočení jednotlivých os je přenášena z řídicího systému KR C4, kde je zároveň zaznamenávána hodnota natočení při doteku. Pro zvýšení přesnosti polohování je možné využít kompenzační modely pro roboty, které jsou možné do řídicího systému Sinumerik integrovat.

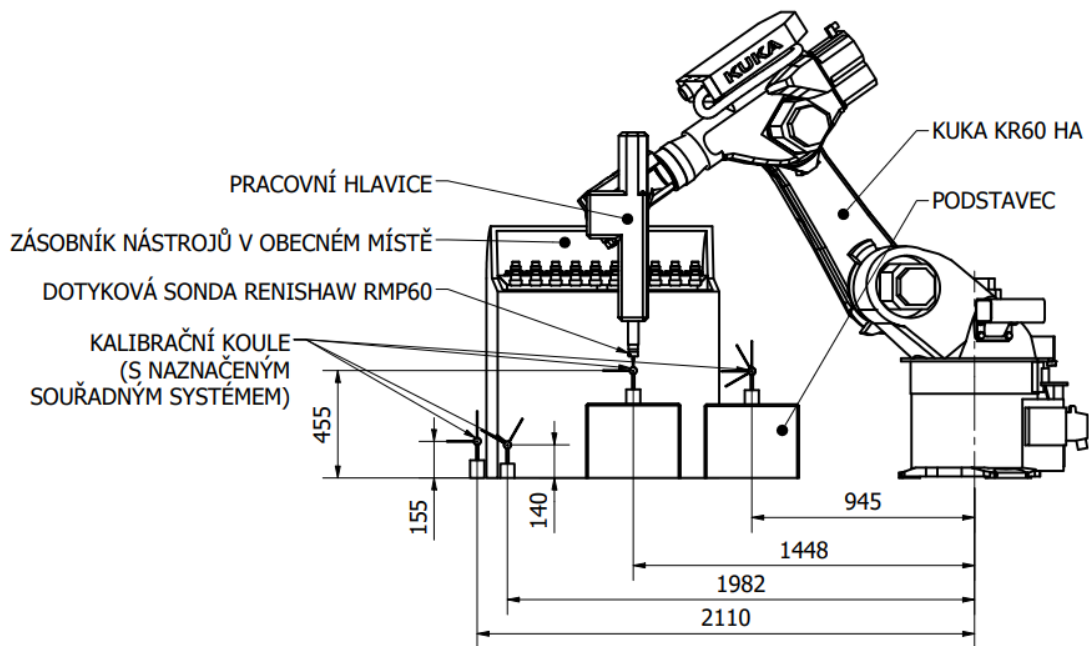
Měřicí aparatura se skládala z robotu KUKA KR 60HA s pracovní hlavicí v podobě extruderu. Na pracovní hlavici byla upevněna dotyková sonda Renishaw. Do pracovního prostoru byla umístěna kalibrační koule (viz Obr. 65) o průměru 30,000 55 mm na magnetickém stojánku.



Obr. 65: kalibrační koule [45]

5.1 Měřené pozice

Byly vybrány čtyři pozice (viz Obr. 66) umožňující kinematice robotu dosažení pozic okolo kalibrační koule s různou orientací. Přibližné pozice kalibrační koule pro jednotlivá měření v rámci pracoviště je vidět na následujícím obrázku.

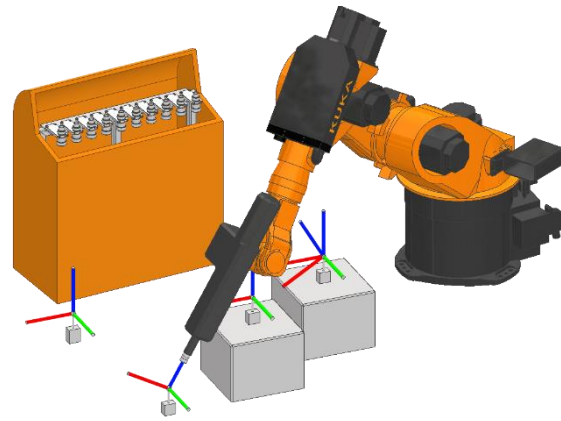


Obr. 66: přibližné rozložení pracoviště a měřených pozic

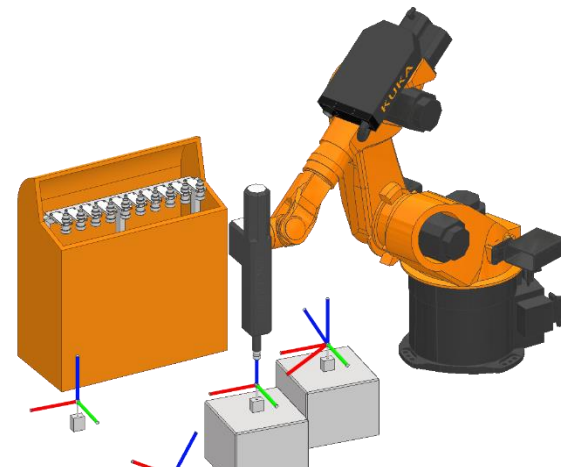
Souřadný systém G54 (viz Obr. 67) byl zvolen ve vzdálenosti, která již není dosažitelná se svislou orientací pracovní hlavičky (vzdálenost od paty robotu 2207 mm), proto byl souřadný systém transformován jak s translací ($X=1982,562$, $Y=971,761$ a $Z=455,721$ činí celkový posun přes 2200 mm od paty robotu) tak i rotací ($B=-30^\circ$) což umožnilo práci zařízení v daném bodě s naklopenou orientací i tak však zařízení pracovalo blízko limitních hodnot (kloub 2, kloub 3 a zápěstí robotu bylo téměř v jedné).

Přibližně uprostřed pracovního prostoru byla proměřena pozice, která umožňuje jednu z největších variabilit práce angulárního robotu. Transformace souřadného systému G55 (Obr. 68) od paty robotu byla provedena o 1646 mm ($X=1448,819$, $Y=781,733$ a $Z=455,721$).

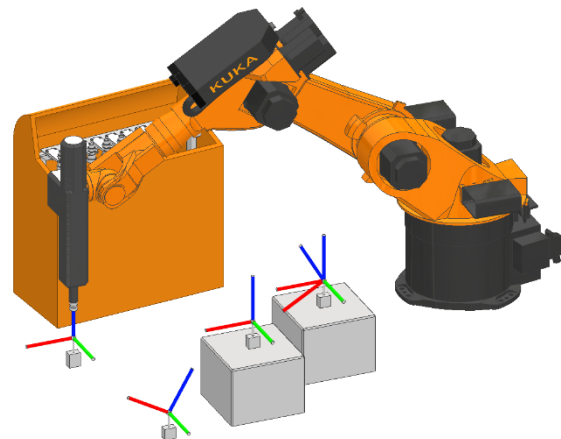
Další pozice byla volena tak, aby robot byl blízko svého maximálního možného vyložení se zachovanou svislou orientací nástroje (dotykové sondy). Byl použit souřadný systém G56 (viz Obr. 69) s posunutím počátku $X=2109,479$, $Y=55,399$ a $Z=156,928$. Touto transformací souřadného systému došlo k posunutí použitého počátku souřadného systému od paty robotu o 2110 mm. Počátek souřadného systému Tento souřadný systém byl měřen bez naklopení od svislé osy Z.



Obr. 67: robot měřící v maximálním vyložení v souřadném systému G54



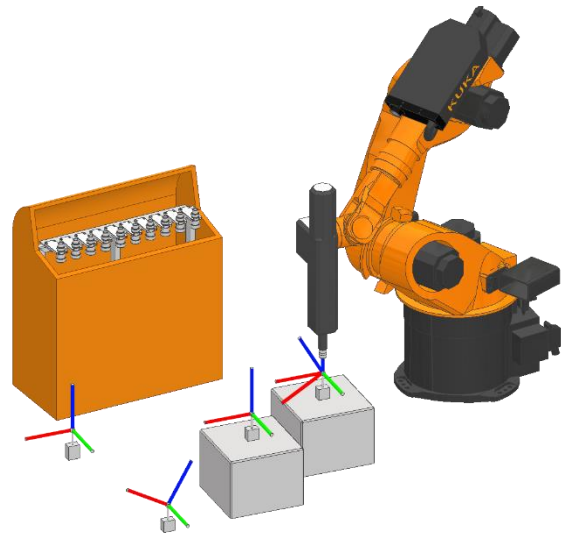
Obr. 68: posunutý souřadný systém G55



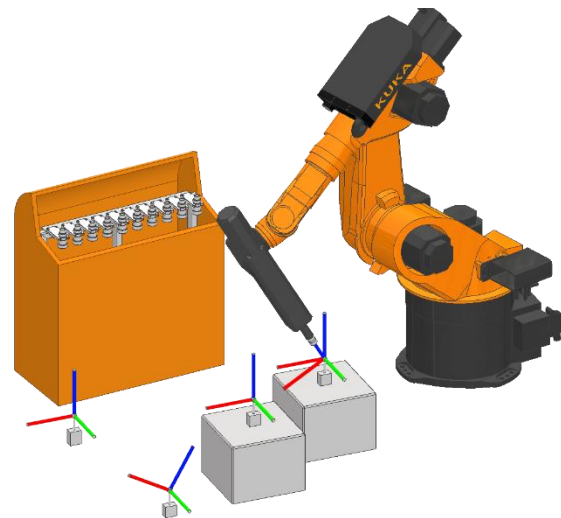
Obr. 69: měření v G56 s maximálním vyložení

Byla vybrána pozice měření blízko paty robotu se svislou orientací souřadného systému. Pro tuto pozici byl naměřen posun počátku souřadného systému G57 s offsetem $X=945,341$, $Y=502,051$ a $Z=452,605$, počátek použitého souřadného systému byl tedy posunut od počátku souřadného systému robotu 1070 mm (hodnoty posunutí počátku jsou v milimetrech). K dosažení této měřicí pozice se kinematická struktura robotu musela „složit“ (viz Obr. 70) tato pozice byla limitována energo-řetěží a softwarovými limity třetího kloubu robotu.

Pozice byla měřena i se sklopenou orientací souřadného systému o 30° (viz Obr.71). Možnost sklopení souřadného systému umožňuje variabilní dosažení požadovaných bodů. S otočeným souřadným systémem okolo osy „Y“ bylo provedeno měření se stejným počátkem souřadného systému (G57). Při použití tohoto „rotovaného“ souřadného systému by bylo možné souřadný systém posunout blíže k patě robotu tato pozice by však již nebyla dosažitelná se svislou orientací sondy.



Obr. 70: měřicí pozice u paty robotu G57

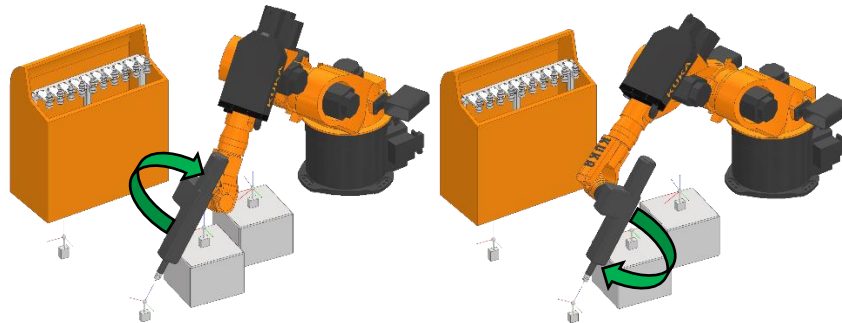


Obr. 71: měřicí pozice (G57) u paty robotu s nakloněným souřadným systémem

5.2 Vyhodnocení dat naměřených v jednotlivých pozicích

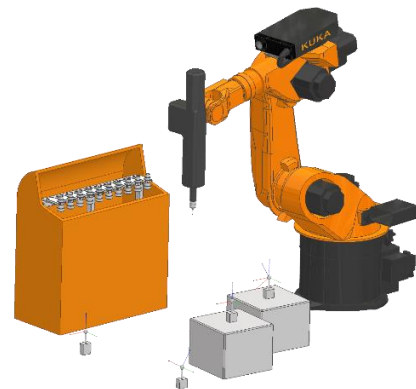
Měření, ze kterých byla vyhodnocována přesnost a opakovatelnost měření pomocí robotu byla prováděna v jednotlivých pracovních souřadných systémech. Po umístění koule vždy bylo opakovaně provedeno měření s posunutím příslušného souřadného systému a na samotné měření bylo přistoupeno až, když opakované měření a posunutí souřadného systému bylo v menších hodnotách než 0,1 mm ve všech osách (X, Y, Z) natočení souřadného systému bylo ponecháno nulové. Na všech pracovních souřadných systémech byly provedeny vždy čtyři série měření kalibrační koule pomocí cyklu CYCLE997. Naměřená data jsou následně v tabulkách označována podle měřené série „sledovaný rozměr_číslo serie“ například X_0.

- „_0“ Pouze měřicí cyklus CYCLE997 s 10-ti opakováními
- „_5“ Měření CYCLE997 a mezi každým měřením byla pracovní hlavička se sondou rotována o 90° okolo osy sondy (viz Obr. 72)



Obr. 72: měření s pracovní hlavičkou natočenou v "C" na 0° a 90°

- „_1“ Počáteční pozice (viz Obr.73) před sérií měření byla zcela mimo měření RA1=-15 RA2=-100 RA3=105 RA4=0 RA5=-5 RA6=0 a následně bylo provedeno měření s 10-ti opakováními
- „_2“ Počáteční pozice (viz Obr.73) před každým jednotlivým měřením byla zcela mimo oblast měření (RA1=-15 RA2=-100 RA3=105 RA4=0 RA5=-5 RA6=0) a po každém jednotlivém vykonání měřicího cyklu CYCLE997 byl proveden odjezd do počáteční pozice



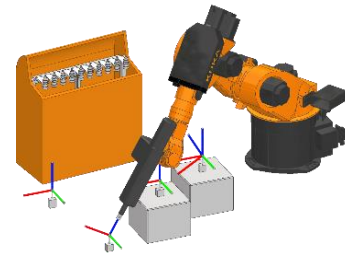
Obr. 73: odjezd robotu mimo měřicí oblast (Home pozice)

Pro vyhodnocování dat bylo využito cyklu CYCLE150 vytvářející měřicí protokol.

U grafů v následujících kapitolách byly nastaveny grafy (u kterých to bylo možné) se stejným rozptylem hodnot 180 μm pro lepší názornost.

5.2.1 Měření v G54

Souřadný systém G54 (viz Obr. 74) byl naměřen v místě tak vzdáleném, že kinematická struktura robotu dovozovala pracovat v těsné blízkosti tohoto souřadného systému jedině s nakloněným souřadným systémem. Souřadný systém byl natočen v ose „B“ o -30° . Toto maximální možné vyložení robotu má za následek značné snížení tuhosti a s tím spojené snížení přesnosti.

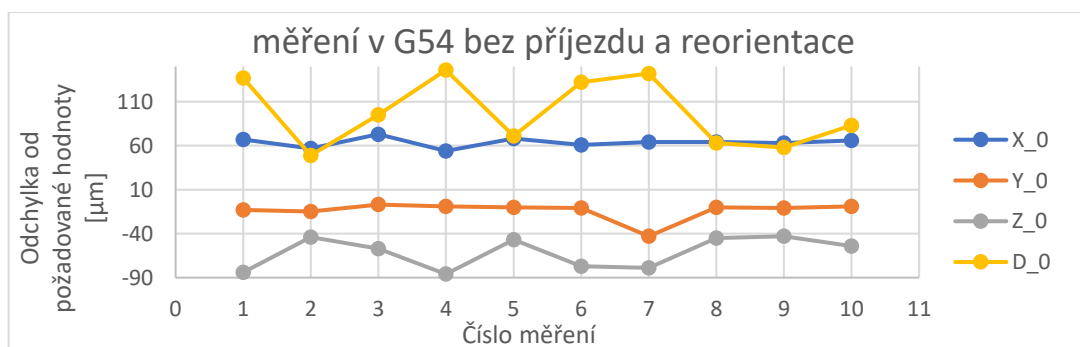


Obr. 74: měření v G54

Naměřování kalibrační koule bez reorientace a bez odjždění mimo měřicí oblast vykazovalo chybu měření průměru od $49\ \mu\text{m}$ až po $146\ \mu\text{m}$. Tyto odchylky tedy vykazovaly rozptyl hodnot až o jednu desetinu milimetru. Méně, než poloviční rozptyl odchylek byl zaznamenán na osách „Y“ a „Z“. Rozptyl hodnot v ose „X“ byl $19\ \mu\text{m}$, naměřené hodnoty se pohybovaly v rozmezí 54 až $73\ \mu\text{m}$. Odchylky v ose „Y“ se ve většině měření v této sérii pohybovaly okolo hodnot přibližně $-10\ \mu\text{m}$. Během měření této série se vyskytla jedna výchylnka u sedmého měřeného cyklu, bez této výchylnky by byl rozptyl měřených hodnot pouze $8\ \mu\text{m}$. Rozptyl hodnot v ose „Z“ se pohyboval v rozmezí -43 až $-86\ \mu\text{m}$.

Tabulka 1 měření v G54 bez odjezdů a bez reorientace

G54_0	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_0	Y_0	Z_0	D_0
1	67	-13	-84	137
2	57	-15	-44	49
3	73	-7	-57	95
4	54	-9	-86	146
5	68	-10	-47	71
6	61	-11	-77	132
7	64	-43	-79	142
8	64	-10	-45	63
9	63	-11	-43	58
10	66	-9	-54	83
rozptyl	19	36	43	97

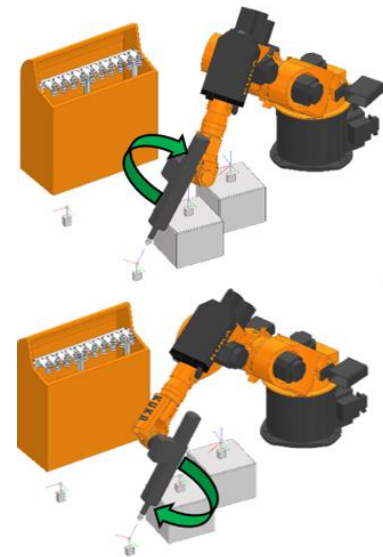


Graf 1 měření v souřadném systému G54 bez příjezdu a reorientace

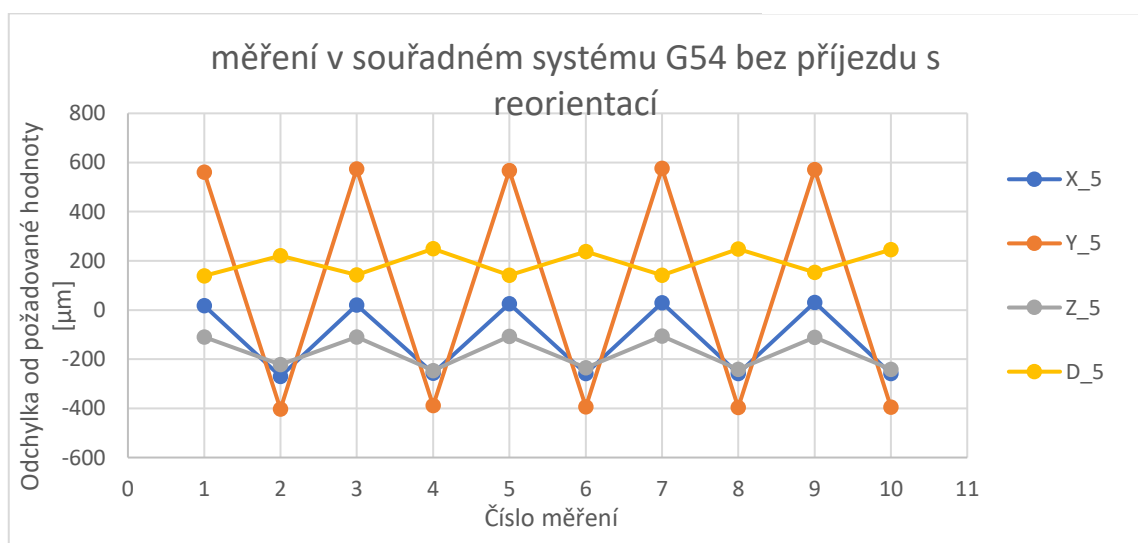
Série měření s reorientací pracovní hlavičky okolo osy „C“ (viz Obr. 75) mezi každým jednotlivým měřením vykazovala odchylky od požadované hodnoty průměru 110 μm (od 139 do 253 μm). Mezi jednotlivými reorientacemi byly odchylky v poloze středu ve směru „X“ mezi -270 μm až 31 μm (rozptyl byl 301 μm). Ve směru „Y“ byly velikosti odchylek v rozmezí -403 μm až 576 μm (rozptyl hodnot byl 979 μm). Hodnoty ve směru „Z“ byly zaznamenány v rozmezí -241 až -106 μm (rozptyl hodnot 140 μm). Z grafu níže je patrné, že naměřené hodnoty dohromady v celé sérii jsou ve dvou skupinách odpovídající měření bez reorientace a druhá skupina měřených bodů odpovídající měření s nástrojem otočeným v ose „C“ o 90°. Velký rozptyl hodnot byl způsoben nepřesností umístění TCP, který byl umístěn mimo střed měřicí kuličky.

Tabulka 2 měření v G54 s reorientací bez odjezdů

G54_5	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_5	Y_5	Z_5	D_5
1	18	561	-110	139
2	-270	-403	-222	221
3	20	574	-110	143
4	-257	-389	-246	249
5	26	567	-107	141
6	-259	-394	-235	238
7	30	576	-106	142
8	-258	-396	-241	248
9	31	571	-111	153
10	-258	-395	-241	246
rozptyl	301	979	140	110



Obr. 75: měření s reorientací

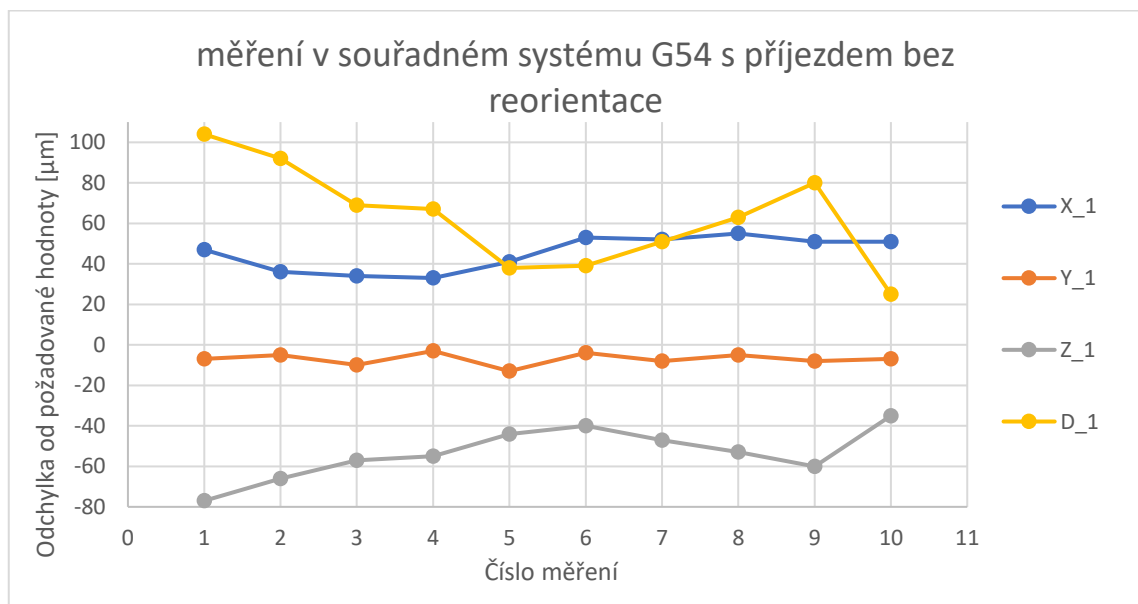


Graf 2 měření v souřadném systému G54 bez příjezdu s reorientací

Měřená série G54_1 byla provedena s odjezdem do pozice mimo pracovní oblast před sérií samotných měření a následně měření probíhala bez dalších odjezdů. Následná měření měla mírně stabilizující se charakter s nejvyššími rozdíly při prvním měření, jak je vidět na grafu níže. Odchyłka od požadovaného průměru byla v rozmezí 38 až 104 μm . Nejmenšího rozptylu a zároveň nejmenších odchylek bylo při této sérii měření dosaženo při měření posunutí středu koule v ose „Y“, kde bylo dosaženo odchylek v rozmezí -13 až -3 μm .

Tabulka 3 měření v G54 s odjezdem před prvním měřením

G54_1	odchyłka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_1	Y_1	Z_1	D_1
1	47	-7	-77	104
2	36	-5	-66	92
3	34	-10	-57	69
4	33	-3	-55	67
5	41	-13	-44	38
6	53	-4	-40	39
7	52	-8	-47	51
8	55	-5	-53	63
9	51	-8	-60	80
10	51	-7	-35	25
rozptyl	22	10	42	79

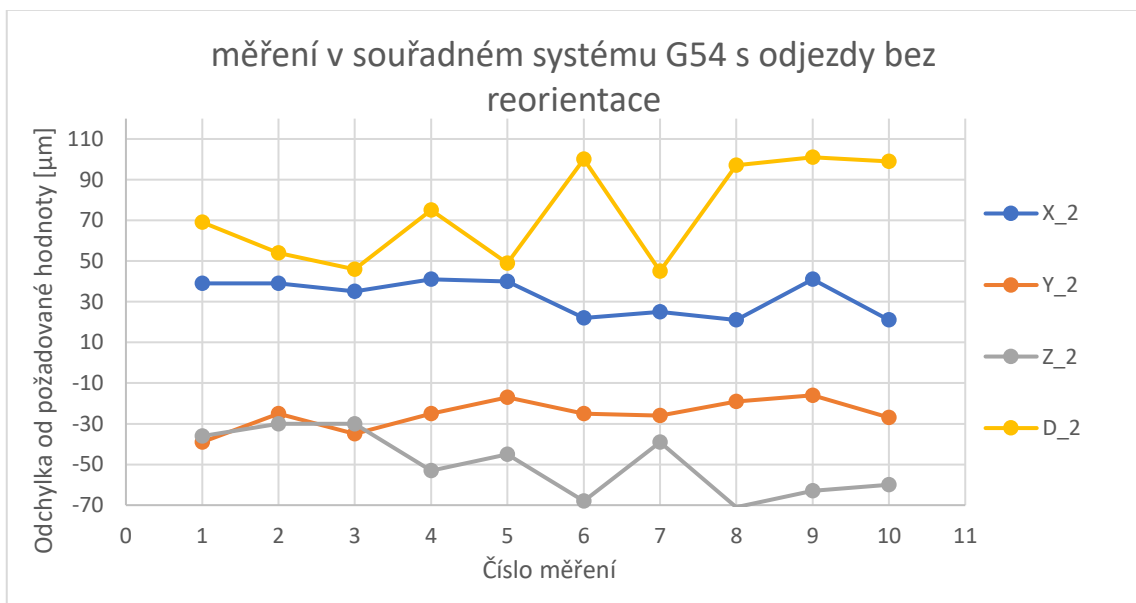


Graf 3 měření v souřadném systému G54 s příjezdem bez reorientace

Poslední sérií měření na daném souřadném systému bylo měření s odjezdem mimo pracovní oblast před každým měřením. Chyba měřená v této sérii měla při měření průměru s mírnou progresivní oscilující tendencí. Polohy středu koule byly naměřeny s odchylkou maximálně 41 μm v ose „X“, -39 μm v ose „Y“ a v ose „Z“ dosahovala odchylka hodnot -30 až -71 μm . Průměr koule byl proměřován s odchylkou 45 až 101 μm (rozptyl 56 μm).

Tabulka 4 měření v G54 s odjezdem před každým měřením

G54_2	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_2	Y_2	Z_2	D_2
1	39	-39	-36	69
2	39	-25	-30	54
3	35	-35	-30	46
4	41	-25	-53	75
5	40	-17	-45	49
6	22	-25	-68	100
7	25	-26	-39	45
8	21	-19	-71	97
9	41	-16	-63	101
10	21	-27	-60	99
rozptyl	20	23	41	56

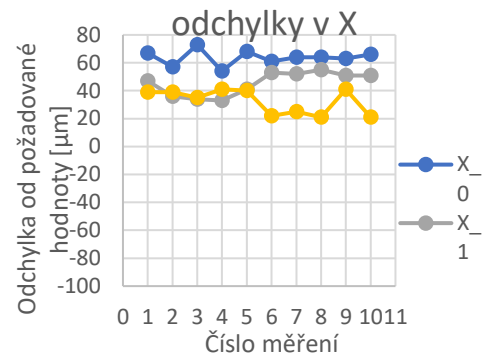


Graf 4 měření v souřadném systému G54 s odjezdy bez reorientace

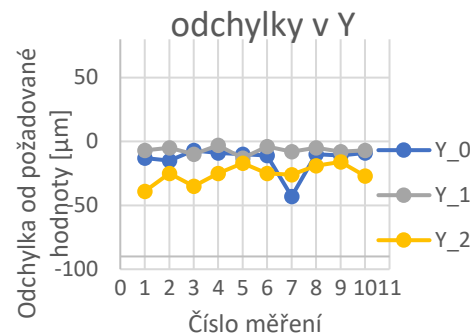
Do grafů na této stránce byla zařazena data ze sérií měření v souřadném systému G54 bez odjezdu mimo měřící oblast zobrazená modře, naměřená data ze sérií měření s odjezdem před prvním měřícím cyklem označená šedě a žlutě jsou zobrazena data se sérií měření s odjezdem mimo měřící oblast před každým jednotlivým měřícím cyklem. Nebyla zde zobrazena data ze série měření s reorientací pracovní hlavice protože data jsou zatížena velkou odchylkou způsobenou nepřesným umístěním TCP vůči středu měřící kuličky.

Z grafů na této stránce je patrné, že s ramenem robotu vyloženým do téměř maximální možné délky dochází ke značnému zhoršení kvality měření. V porovnání průběhu grafů je zřejmé, že měření v osách „X“ a „Y“ probíhalo měření stabilně v porovnání s měření v ose „Z“ kde je měření značně zakmitané. Nestabilita měření v ose „Z“ byla způsobena sériovou kinematikou, která na vyloženém rameni musela zachytávat zatížení gravitační silou a dynamickými účinky způsobenými pohybem robotu. V grafu znázorňující odchylky v ose „Y“ je viditelné, že sedmé měření bylo zatíženo lokální chybou. Touto chybou mohla být například nečistota či jiná náhodná chyba.

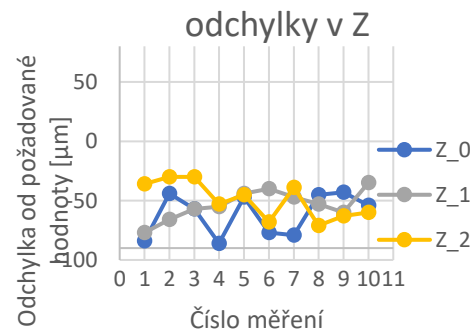
Na grafu znázorňující odchylku průměru je viditelné, že na vyloženém rameni robotu docházelo při měření ke značnému kmitání, které se podílelo na vysoké hodnotě chyby měření průměru a také na nekonzistenci naměřených dat.



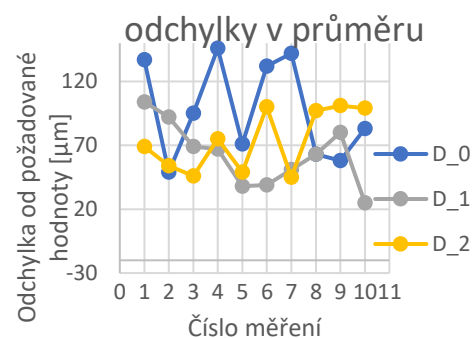
Graf 5 G54 odchylky v X



Graf 6 G54 odchylky v Y



Graf 7 G54 odchylky v Z

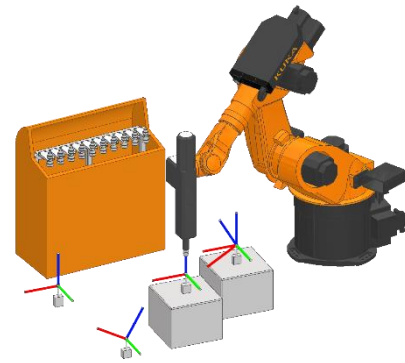


Graf 8 G54 odchylky v průměru

5.2.2 Měření v G55

Souřadný systém G55 (viz Obr. 76) byl zvolen v nejuniverzálnější oblasti pracovního prostoru robotu, přibližně uprostřed mezi pracovním souřadným systémem u paty robotu a souřadným systémem blízko maximálního vyložení robotu.

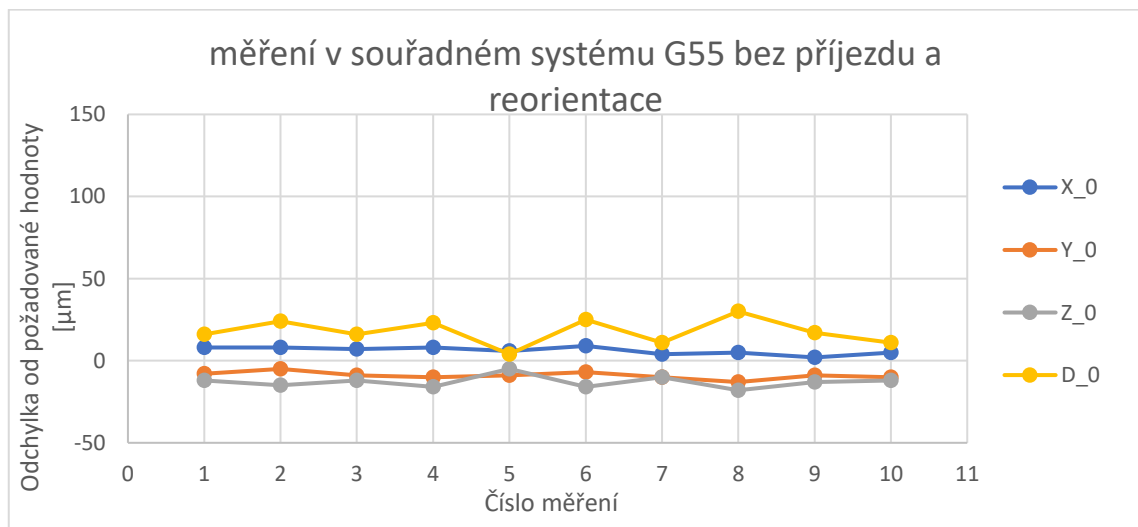
První série měření, tedy série bez reorientace vřetene a bez odjezdu mimo pracovní oblast, v souřadném systému G55 dosahovala odchylek od požadované hodnoty v ose „X“ 2 až 9 μm , v ose „Y“ -13 až -5 μm , v ose „Z“ -16 až -5 μm , odchylka od očekávané hodnoty průměru dosahovala hodnot od 4 do 30 μm pro jednotlivá měření.



Obr. 76: měření v G55

Tabulka 5 měření v G55 bez odjezdů a bez reorientace

G55_0	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_0	Y_0	Z_0	D_0
1	8	-8	-12	16
2	8	-5	-15	24
3	7	-9	-12	16
4	8	-10	-16	23
5	6	-9	-5	4
6	9	-7	-16	25
7	4	-10	-10	11
8	5	-13	-18	30
9	2	-9	-13	17
10	5	-10	-12	11
rozptyl	7	8	13	26

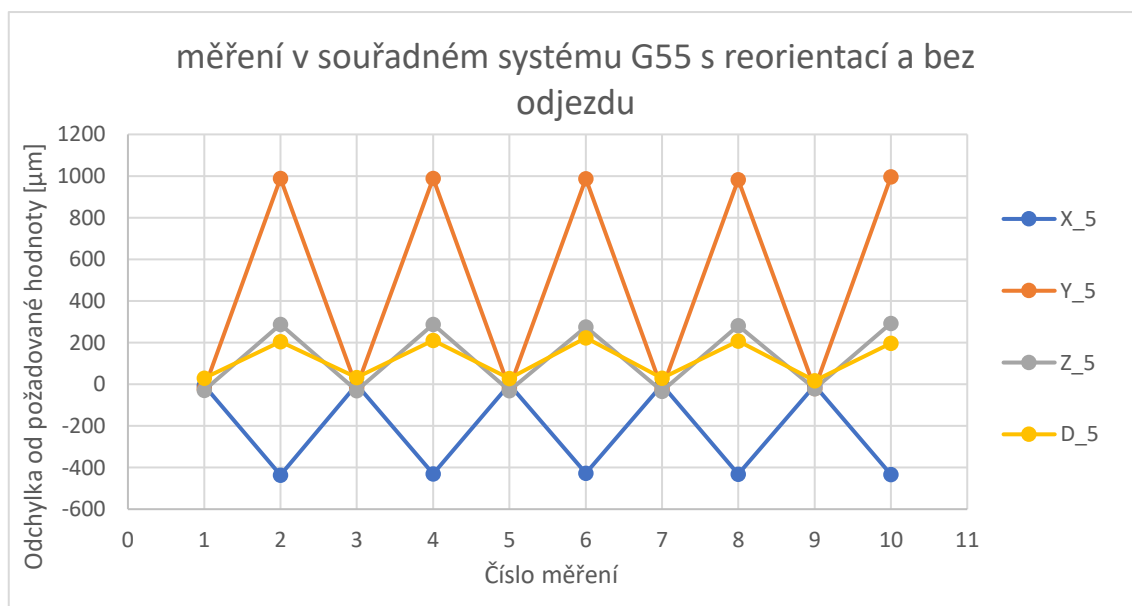


Graf 9 měření v souřadném systému G55 bez příjezdu a reorientace

Série měření v souřadném systému G55 bez odjezdu mimo měřicí oblast a s re-orientováním pracovní hlavice vykazovalo střídavě značné odchylky od požadovaných hodnot. Tato střídavá tendence vysokých odchylek byla dána nepřesností souřadných systémů pracovní hlavice. Rozptyl měřených dat v rámci celého měření přesahoval odchylku i 1 mm, při vzájemném porovnávání pouze měření stejných orientací však odchylka byla v řádu jednotek mikrometrů. Velký rozptyl hodnot byl způsoben nepřesností umístění TCP, který byl umístěn mimo střed měřicí kuličky.

Tabulka 6 měření v G55 s reorientací bez odjezdů

G55_5	odchylka jednotlivých měření [μm]			
	X_5	Y_5	Z_5	D_5
1	-6	-21	-29	30
2	-436	988	287	204
3	-2	-13	-30	33
4	-430	988	287	210
5	-1	-20	-30	28
6	-428	987	276	223
7	-3	-23	-33	30
8	-432	983	282	208
9	-6	-20	-22	17
10	-434	996	293	197
rozptyl	435	1019	326	206

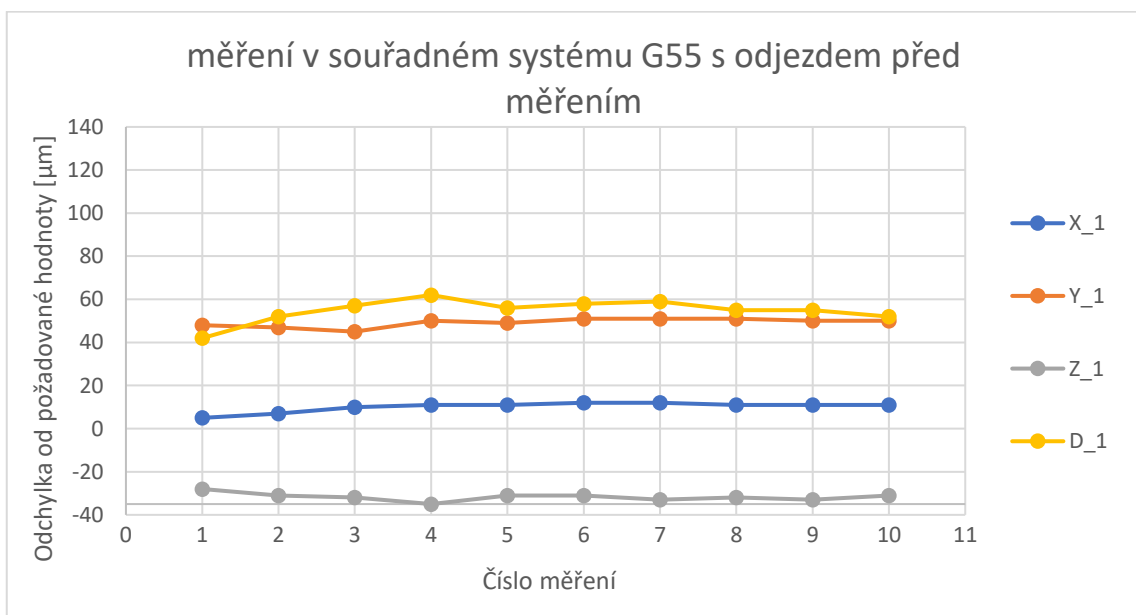


Graf 10 měření v souřadném systému G55 s reorientací a bez odjezdu

Série měření v souřadném systému G55 bez změny orientace pracovní hlavy, ale s odjezdem před prvním měřením mimo pracovní oblast, měla první měřenou hodnotu mírně odlišnou od ostatních měření. tento rozdíl se však pohyboval pouze v řádu jednotek mikrometrů a nelze tedy jednoznačně určit zda tato mírně odlišná hodnota byla způsobena předchozím odjezdem od měřicí oblasti nebo zda je tato odlišnost pouze náhodná. Rozptyl hodnot odchylek polohy středu měřené koule byl pouze do 7 μm . Rozptyl odchylky průměru od požadované hodnoty byl 20 μm v rozmezí od 42 do 62 μm . Malé rozptyly všech sledovaných parametrů poukazují na vysokou stabilitu měřicího procesu.

Tabulka 7 měření v G55 s odjezdem před prvním měřením

G55_1	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_1	Y_1	Z_1	D_1
1	5	48	-28	42
2	7	47	-31	52
3	10	45	-32	57
4	11	50	-35	62
5	11	49	-31	56
6	12	51	-31	58
7	12	51	-33	59
8	11	51	-32	55
9	11	50	-33	55
10	11	50	-31	52
rozptyl	7	6	7	20



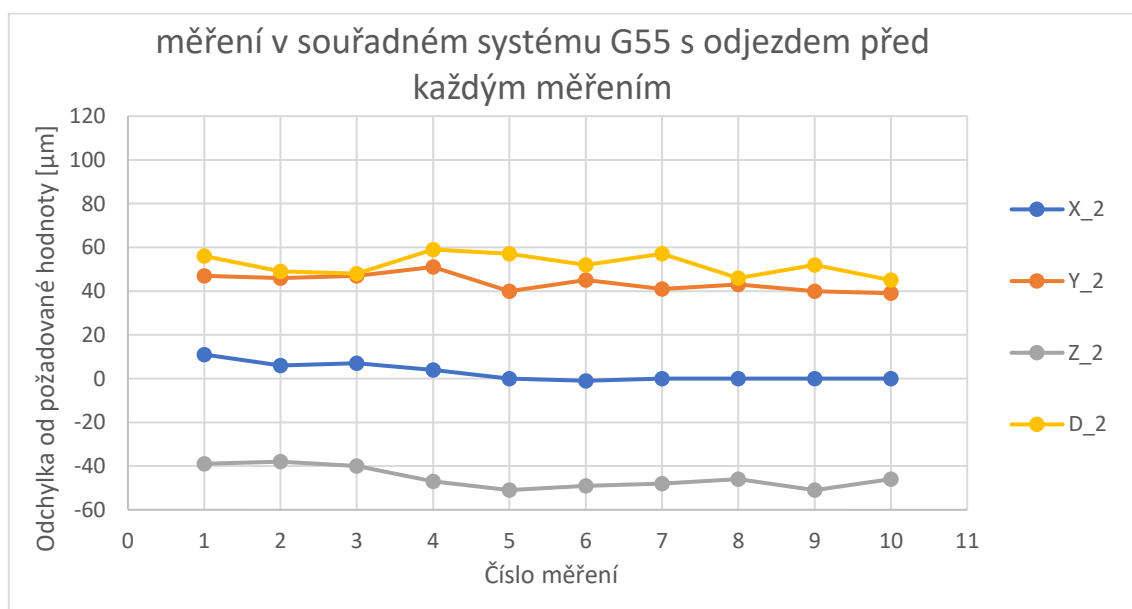
Graf 11 měření v souřadném systému G55 s odjezdem před měřením

Poslední sérií měření v souřadném systému G55 bylo měření s odjezdem mimo měřicí oblast před každým měřicím cyklem.

Rozptyl odchylek všech měřených parametrů byl do 14 μm , odchylka polohy v ose „X“ vycházela v rozmezí -1 až 11 μm , rozmezí hodnot v ose „Y“ bylo 39 až 51 μm . Naměřená data v ose „Z“ se pohybovala v rozmezí -51 až -38 μm . Dle průběhu dat v následujícím grafu je patrné, že tato série měření byla vysoce stabilní s malým rozptylem hodnot.

Tabulka 8 měření v G55 s odjezdem před každým měřením

G55_2	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_2	Y_2	Z_2	D_2
1	11	47	-39	56
2	6	46	-38	49
3	7	47	-40	48
4	4	51	-47	59
5	0	40	-51	57
6	-1	45	-49	52
7	0	41	-48	57
8	0	43	-46	46
9	0	40	-51	52
10	0	39	-46	45
rozptyl	12	12	13	14



Graf 12 měření v souřadném systému G55 s odjezdem před každým měřením

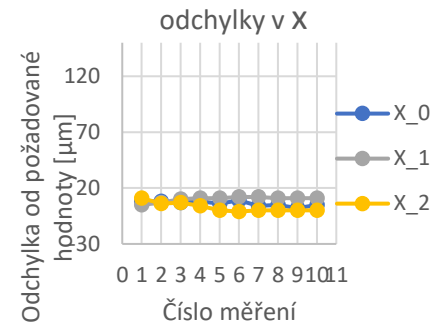
Do grafů na této stránce byla zařazena data ze sérií měření v souřadném systému G55 bez odjezdu mimo měřicí oblast zobrazená modře, naměřená data ze sérií měření s odjezdem před prvním měřicím cyklem označená šedě a žlutě jsou zobrazena data se sérií měření s odjezdem mimo měřicí oblast před každým jednotlivým měřicím cyklem. Nebyla zde zobrazena data ze série měření s reorientací pracovní hlavičky, protože data jsou zatížena velkou odchylkou způsobenou nepřesným umístěním TCP vůči středu měřicí kuličky.

Z grafů na této stránce je patrné, že měření v tomto pracovním souřadném systému G55 probíhala všechna měření s velice stabilními velikostmi odchylek.

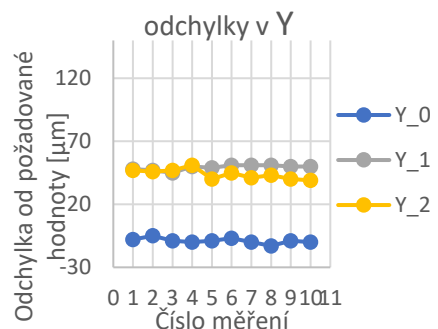
Na druhém grafu (odchylky v Y) bylo možné si všimnout, že první série měření prováděná ihned po naměření pracovního souřadného systému dosahovala v ose „Y“ malé odchylky od polohy souřadného systému po celou sérii měření. Odchylky naměřené pro sérii měření s odjezdem od měřicí oblasti na začátku měřicí série a pro sérii měření s odjezdem před každým měřicím cyklem, byly téměř totožné, a to výrazně vyšší v porovnání s první sérií měření (bez změny orientace a bez odjezdů mimo měřicí oblast).

V grafu odchylky v Z bylo možné si povšimnout, že první série měření bez odjetí mimo pracovní oblast vykazovala malou velikost odchylky od požadované hodnoty. Následná série měření s odjezdem na začátku série vykazovala vyšší odchylku a nejvyšší odchylku od požadované hodnoty v ose „Z“ vykazovala poslední série měření s odjezdem mimo pracovní oblast před každým jednotlivým měřicím cyklem.

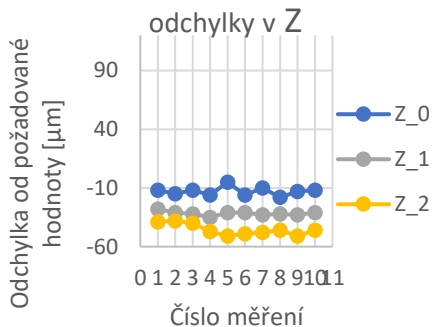
Naměřené hodnoty odchylky průměru od požadované hodnoty při první sérii měření vykazovaly nejmenší průměrné hodnoty. Průměr určovaný z dat měřených pomocí sérií s oběma druhy odjezdu před měřicím cyklem vykazoval podobné velikosti odchylky, větší než odchylky z první série měření bez odjezdů a změny orientace.



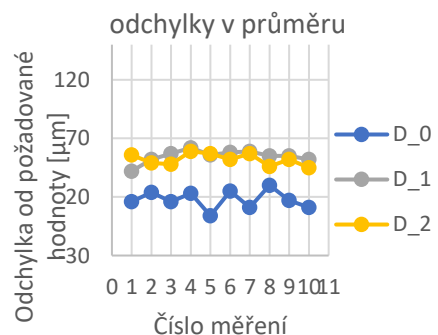
Graf 13 G55 odchylky v X



Graf 14 G55 odchylky v Y



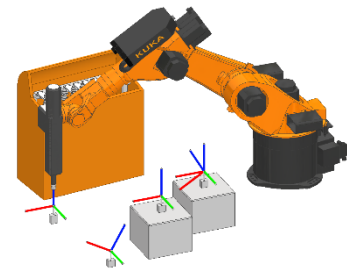
Graf 15 G55 odchylky v Z



Graf 16 G55 odchylky v průměru

5.2.3 Měření v G56

Měření v souřadném systému G56 (viz Obr. 77) bylo prováděno se svislou orientací nástroje v jedné z nejvzdálenějších pozic umožňujících práci robotu i po otočení pracovní hlavičky o 90°. V otočené pozici byl naměřen střed kalibrační koule jako počátek souřadného systému G56.



Obr. 77: měření v G56

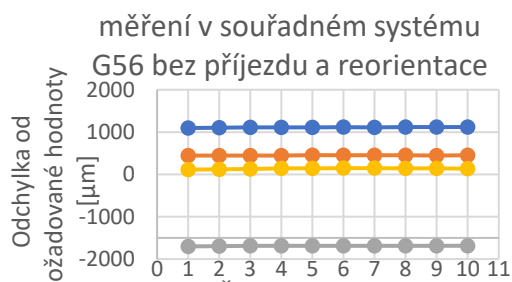
Proto jsou všechna naměřená data s nulovým natočením pracovní hlavičky v tomto souřadném systému zatížena odchylkou způsobenou offsetem na nástroji. Data všech sérií tohoto měření mají společný charakter v podobě vysoké stability (dobré opakovatelnosti) a velice špatné přesnosti.

Rozptyl naměřených hodnot odchylky polohy byl do 20 μm a rozptyl naměřených hodnot odchylky průměru byl do 33 μm . Chyba přesnosti přesahující milimetr je však nevhodná.

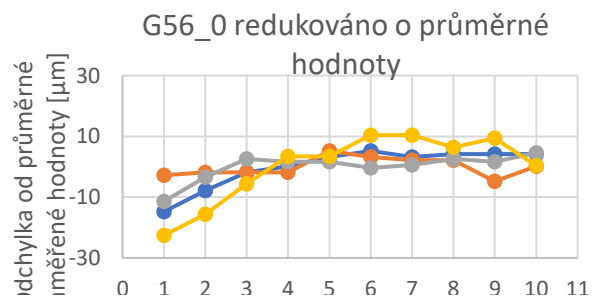
Tabulka 9 měření v G56 bez odjezdů a bez reorientace

G56_0	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_0	Y_0	Z_0	D_0
1	1096	447	-1701	114
2	1103	448	-1693	121
3	1109	448	-1687	131
4	1111	448	-1688	140
5	1114	455	-1688	140
6	1116	453	-1690	147
7	1114	452	-1689	147
8	1115	452	-1687	143
9	1115	445	-1688	146
10	1115	450	-1685	137
rozptyl	20	10	16	33

Hodnoty zobrazené v prvním grafu na této stránce byla naměřená data, ta jsou však se značnými rozdíly, a proto byl vytvořen druhý graf naměřených dat s odečtenou průměrnou hodnotou. V grafu s naměřenými hodnotami redukoványi o průměrné hodnoty odchylek je možné zaznamenat nejvýraznější rozptyl hodnot při prvním měření a následující data vykazují ustalující se tendenci v průběhu měření.



Graf 17 měření v souřadném systému G56 bez příjezdu a reorientace



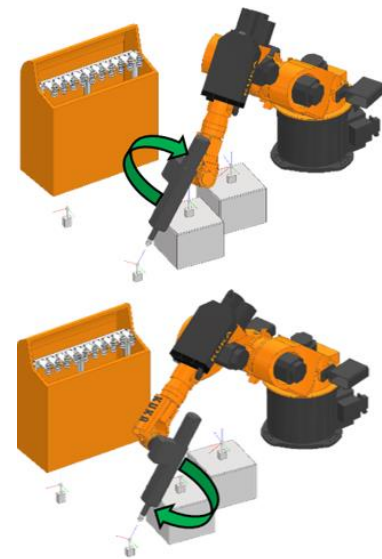
Graf 18 naměřená data ze série měření G56_0 redukována o průměrné hodnoty

Druhá série měření v G56 (viz Obr. 78) byla prováděná se změnou orientace pracovní hlavičky (viz Obr. 79) v ose dotykové sondy mezi jednotlivými měřeními. Při pohledu na grafy a na naměřená data v tabulce bylo možné pozorovat stejnou tendenci jako při měření v jiných souřadných systémech pomocí této série měření. Odchytky pro jednotlivé orientace vykazují podobné hodnoty odchylek, ale odchylky pro celou sérii měření značně oscilují. Velký rozptyl hodnot byl způsoben nepřesností umístění TCP, který byl umístěn mimo střed měřicí kuličky.

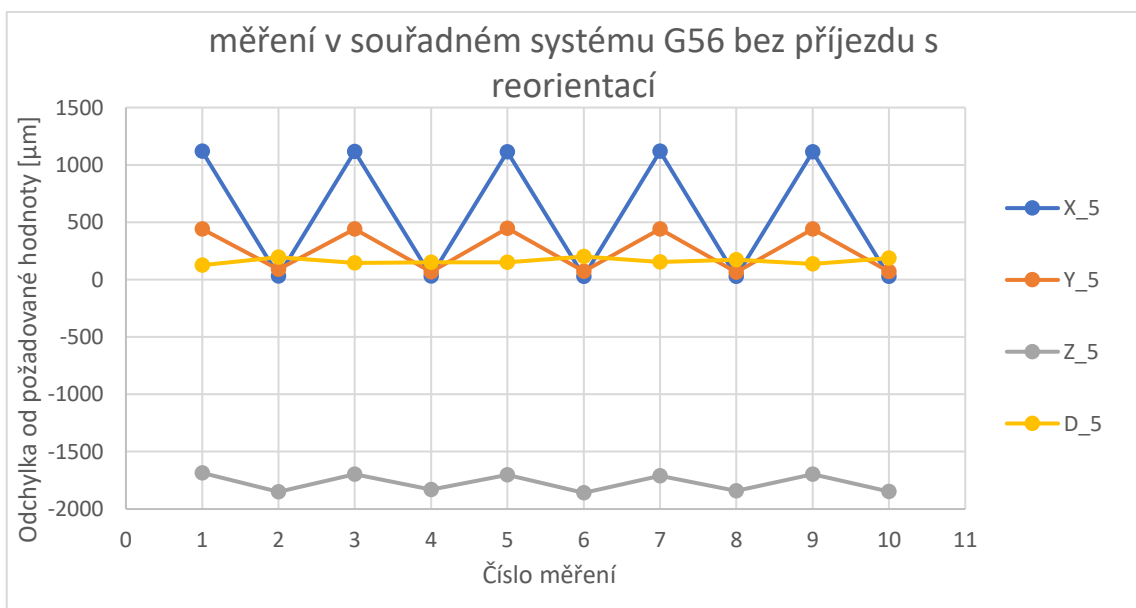

 Obr. 78: měření v G56 s "C" natočeným o -90°

Tabulka 10 měření v G56 s reorientací bez odjezdů

G56_5	odchytky jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_5	Y_5	Z_5	D_5
1	1118	442	-1685	126
2	30	90	-1849	196
3	1117	441	-1698	145
4	31	67	-1832	150
5	1113	448	-1702	151
6	29	72	-1859	201
7	1118	440	-1711	153
8	27	65	-1842	174
9	1114	441	-1696	137
10	28	71	-1848	186
rozptyl	1091	383	174	75



Obr. 79: měření s reorientací



Graf 19 měření v souřadném systému G56 bez příjezdu s reorientací

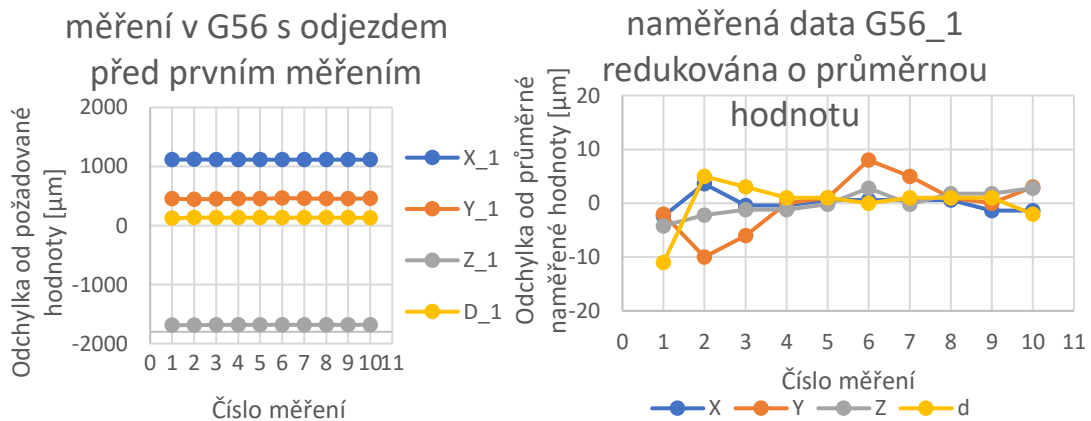
Další série měření byla prováděna s odjezdem mimo měřicí oblast a následně byla provedena celá měřicí série. Rozptyl odchylek při měření polohy středu koule byl v osách „X“ a „Z“ do 7 μm . Rozptyl hodnot v ose „Y“ a při měření průměru byl do 20 μm . Velikost naměřených odchylek v ose „X“ přesahující 1,1mm a v ose „Z“ přesahující dokonce 1,6mm je vysoká.

Tabulka 11 měření v G56 s odjezdem před prvním měřením

G56_1	odchylna jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_1	Y_1	Z_1	D_1
1	1114	453	-1688	120
2	1120	445	-1686	136
3	1116	449	-1685	134
4	1116	455	-1685	132
5	1117	456	-1684	132
6	1117	463	-1681	131
7	1117	460	-1684	132
8	1117	456	-1682	132
9	1115	455	-1682	132
10	1115	458	-1681	129
rozptyl	6	18	7	16

Naměřená data vykreslená v grafu na této stránce ukazují veliké hodnoty odchylek jednotlivých sledovaných parametrů. Pro detailnější pohled na charakter průběhu naměřených dat v sérii byl vytvořen graf s hodnotami redukovánými o průměrné hodnoty v rámci celé měřicí série.

Na grafu s redukovánými daty je viditelné, že pro většinu měřených parametrů platí postupná stabilizace měřených hodnot po prvotních měřeních. Rozptyl všech měřených hodnot byl do 20 μm a v osách „X“ a „Z“ byl rozptyl menší než 7 μm .



Graf 20 měření v souřadném systému G56 s odjezdem před prvním měřením

Graf 21 naměřená data G56_1 redukována o průměrnou hodnotu

Poslední sérií měření v souřadném systému G56 bylo měření s odjezdem před každým měřicím cyklem. Rozptyl naměřených odchylek při tomto měření byl pro většinu měřicích parametrů do 20 μm . Jediný parametr vykazující odchylky měření větší byl zaznamenán v ose „Y“ kde rozptyl odchylky dosahoval 40 μm . Odchylka od počátku pracovního souřadného systému G56 v sérii měření s pravidelným odjezdem přesahovala i hodnotu 1,6 mm.

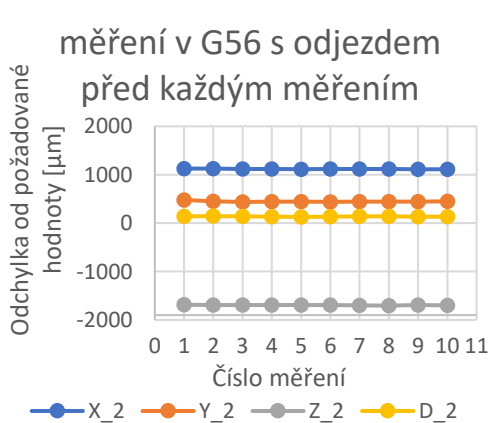
Tabulka 12 měření v G56 s odjezdem před každým měřením

G56_2	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_2	Y_2	Z_2	D_2
1	1127	479	-1684	138
2	1127	453	-1690	144
3	1122	440	-1692	137
4	1121	441	-1691	136
5	1114	441	-1691	128
6	1118	439	-1693	134
7	1118	444	-1700	139
8	1117	442	-1704	139
9	1115	445	-1694	131
10	1115	448	-1697	131
rozptyl	13	40	20	16

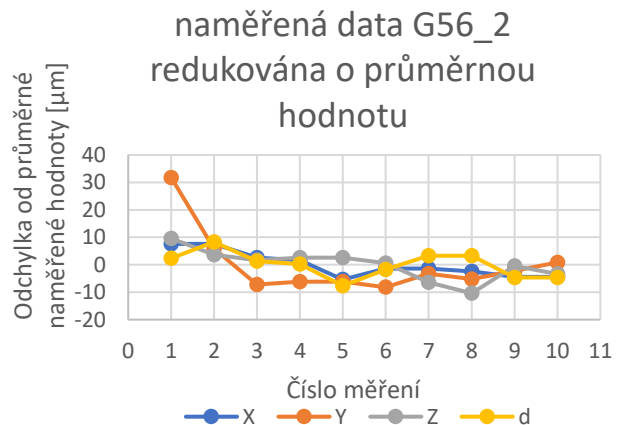
Pro vykreslení hodnot z této série měření byly vytvořeny dva grafy na této stránce. V prvním grafu jsou vykresleny naměřené hodnoty, v druhém jsou vykresleny tytéž hodnoty po odečtení průměrné hodnoty odchylky.

Při pozorování průběhu hodnot osy „Y“ v druhém grafu bylo možné si povšimnout, že naměřená data v prvním bodu byla zatížena nějakou další chybou než jen nepřesnostmi způsobenými chybou pracovní hlavice.

Všechna naměřená data v této sérii bez prvního měřicího bodu měla rozptyl do 20 μm .



Graf 23 měření v souřadném systému G56 s odjezdem před každým měřením

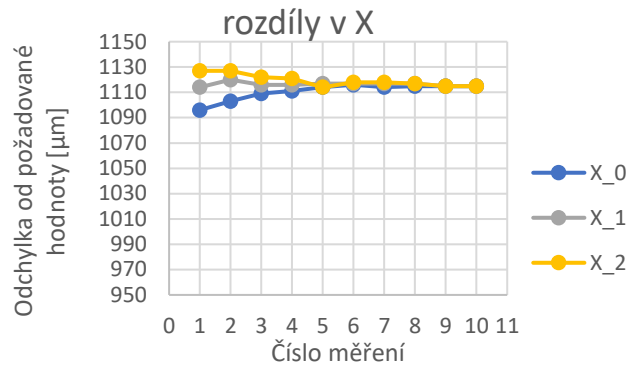


Graf 22 naměřená data G56_2 redukována o průměrnou hodnotu

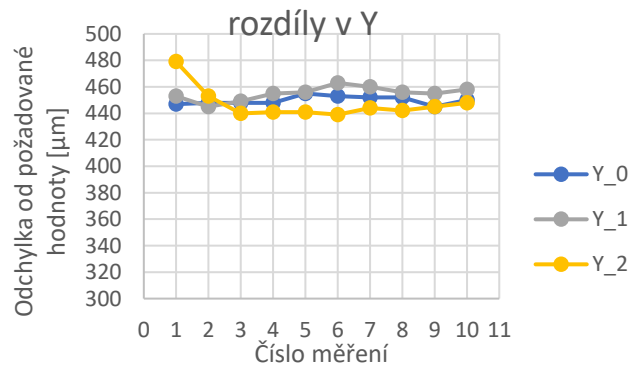
V souřadném systému G56 byly provedeny čtyři série měření po deseti jednotlivých měření. Do grafů na této stránce nebyly vykresleny hodnoty z druhé série měření, které vlivem změny orientace pracovní hlavičky oscilovali mezi jednotlivými měřeními i o více než 1 mm. V grafech na této stránce jsou modře označena data z měření bez odjezdu mimo měřicí oblast. Šedě jsou označena data ze sérií měření s odjezdem pouze před prvním měřicím cyklem a žlutě jsou označena data z měření s odjezdem před každým měřicím cyklem.

Z grafů na této stránce bylo možné pozorovat při měřeních velké hodnoty odchylky způsobené natočením pracovní hlavičky o 90° vůči orientaci hlavičky, ve které bylo určeno posunutí počátku souřadného systému. V grafech je možné si povšimnout relativně malých rozptylů naměřených hodnot v rámci jednotlivých sérií.

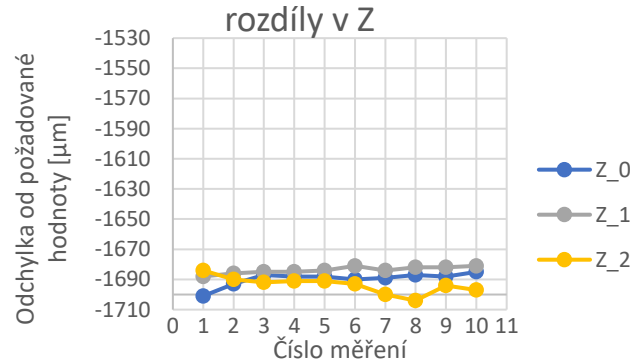
Snížení odchylek od požadované hodnoty v těchto čtyřech sériích měření by bylo možné docílit pomocí opravy transformačních údajů spojených s pracovní hlavičkou.



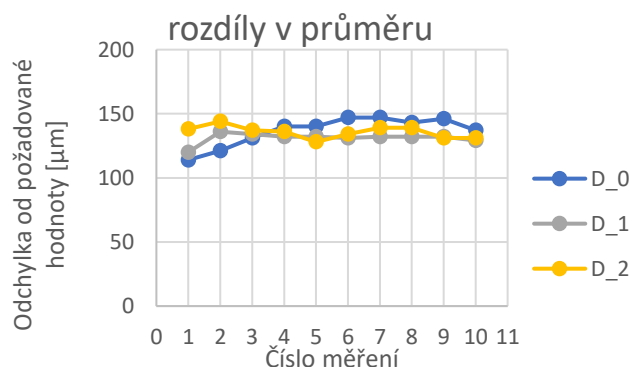
Graf 24 G56 rozdíly v X



Graf 25 G56 rozdíly v Y



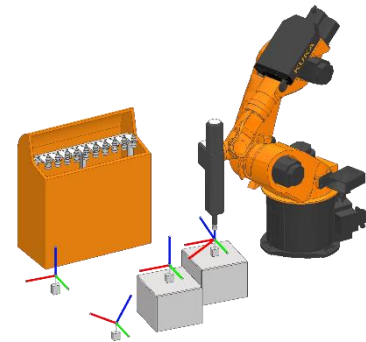
Graf 26 G56 rozdíly v Z



Graf 27 G56 rozdíly v průměru

5.2.4 Měření v G57

Jak již bylo zmíněno výše souřadný systém G57 (viz Obr. 80) byl zvolen v blízkosti paty robotu a k dosažení této pozice byl robot „složen“ (třetí osa robotu se pohybovala na hranici svého softwarového limitu).

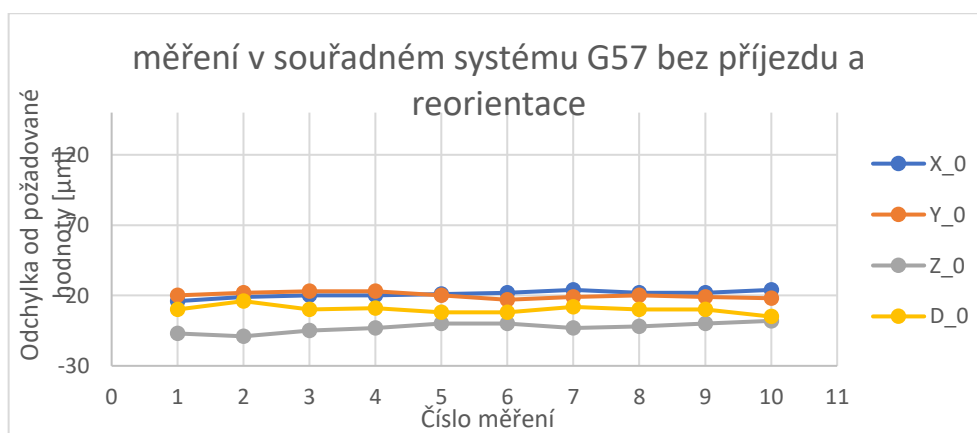


Obr. 80: měření v G57

Při naměřování kalibrační koule v pracovním souřadném systému G57 bez reorientace nástroje kolem osy „C“ a bez odjíždění mimo oblast měření, byly zaznamenány nízké hodnoty odchylek ve všech osách. Při samotném měření byly naměřeny odchylky od požadované hodnoty průměru koule v rozmezí 5-16 μm . Podobně malá hodnota odchylky ve všech sledovaných parametrech potvrzuje, že měření bylo prováděno velice stabilně, blízko rovníku a středu koule. Naměřená data jsou viditelná v následujícím grafu a tabulce.

Tabulka 13 měření v G57 bez odjezdů a bez reorientace

G57_0	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_0	Y_0	Z_0	D_0
1	16	20	-7	10
2	19	22	-9	16
3	20	23	-5	10
4	20	23	-3	11
5	21	20	0	8
6	22	17	0	8
7	24	19	-3	12
8	22	20	-2	10
9	22	19	0	10
10	24	18	2	5
rozptyl	8	6	11	11



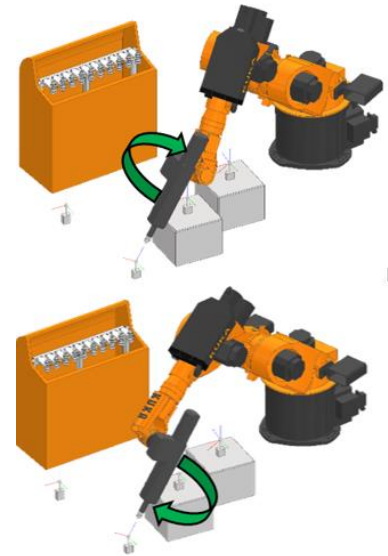
Graf 28 měření v souřadném systému G57 bez příjezdu a reorientace

Při použití druhé série měření v tomto souřadném systému byly naměřeny velké odchylky pro případy s natočením osy „C“ na 0° a 90° (viz Obr. 81), s tím, že přesnost a opakovatelnost měření jako celku dosahovala značných odchylek. Poloha středu koule byla ve směru „X“ rozdílná o $416 \mu\text{m}$, v ose „Y“ byl rozptyl naměřených poloh středu až $1249 \mu\text{m}$, v ose „Z“ $251 \mu\text{m}$ a rozptyl odchylek průměru byl $362 \mu\text{m}$. Tyto velké rozdíly jsou způsobeny velkou nepřesností pracovní hlavice mezi TCP na přírubě robotu a výsledným TCP ve středu kuličky dotykové sondy.

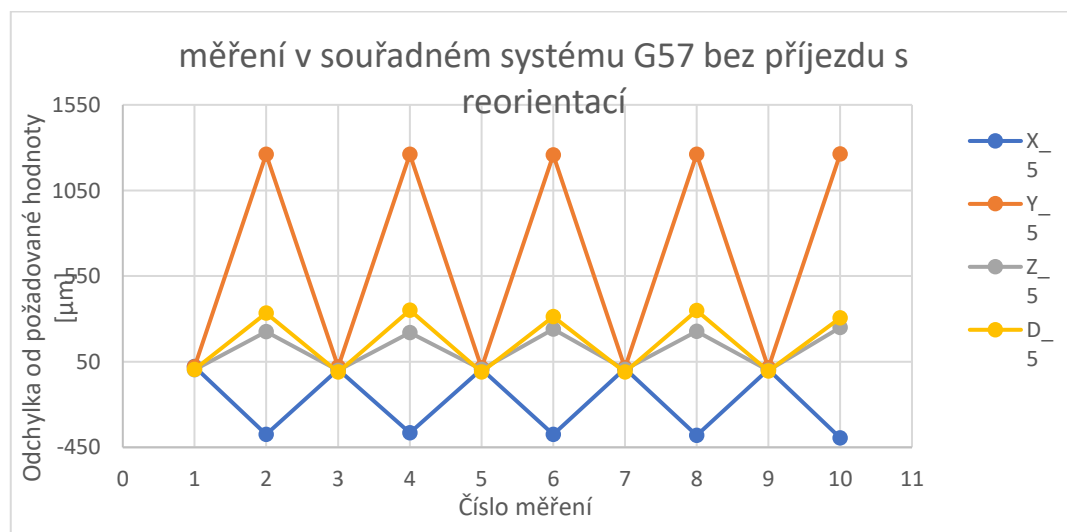
Pokud se data z této série měření rozdělí do dvou skupin je patrné, že polohování s reorientací má podobné výsledné hodnoty a polohování bez reorientace má podobný rozptyl hodnot, souhrnně jsou však naměřené odchylky hodnot vysoké. Velký rozptyl hodnot byl způsoben nepřesností umístění TCP, který byl umístěn mimo střed měřící kuličky.

Tabulka 14 měření v G57 s reorientací bez odjezdů

G57_5	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_5	Y_5	Z_5	D_5
1	21	19	3	5
2	-374	1261	225	334
3	4	19	0	-11
4	-366	1261	220	351
5	6	14	5	-11
6	-375	1258	240	313
7	11	15	5	-11
8	-381	1261	227	349
9	4	14	-1	-5
10	-395	1263	250	306
rozptyl	416	1249	251	362



Obr. 81: měření s reorientací

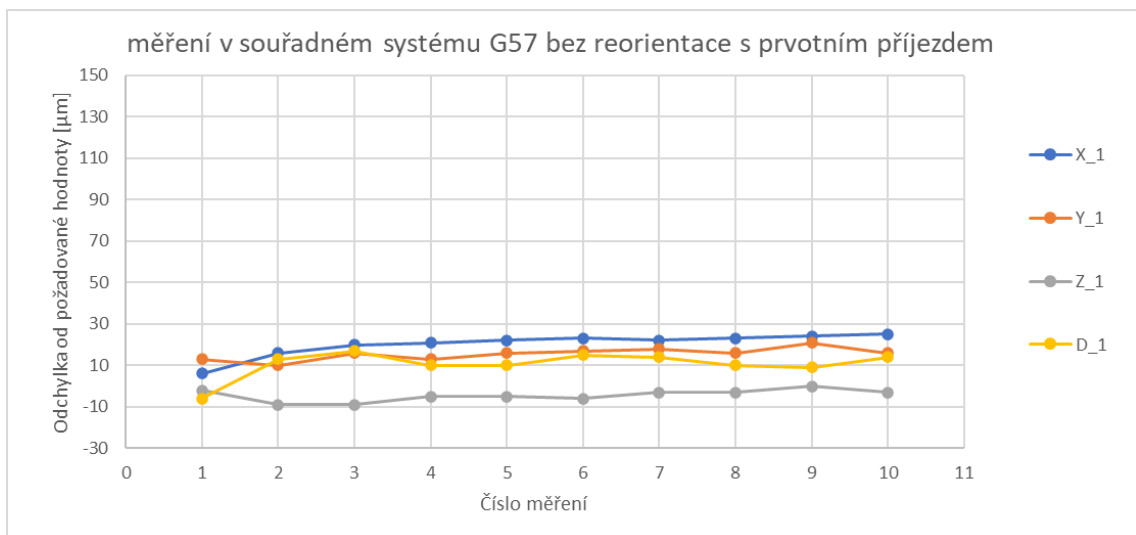


Graf 29 měření v souřadném systému G57 bez příjezdu s reorientací

Třetí série měření v tomto souřadném systému byla prováděna s odjezdem rychloposuvem „point to point“ mimo pracovní oblast a následně byl podobným pohybem proveden příjezd ke kalibrační kouli. Z naměřených dat je viditelné, že prvotní odjezd z a příjezd do měřicí oblasti má za následek mírné ovlivnění měřených dat, která se v průběhu série měření ustálí na podobných hodnotách.

Tabulka 15 měření v G57 s odjezdem před prvním měřením

G57_1	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_1	Y_1	Z_1	D_1
1	6	13	-2	-6
2	16	10	-9	13
3	20	16	-9	17
4	21	13	-5	10
5	22	16	-5	10
6	23	17	-6	15
7	22	18	-3	14
8	23	16	-3	10
9	24	21	0	9
10	25	16	-3	14
rozptyl	19	11	9	23

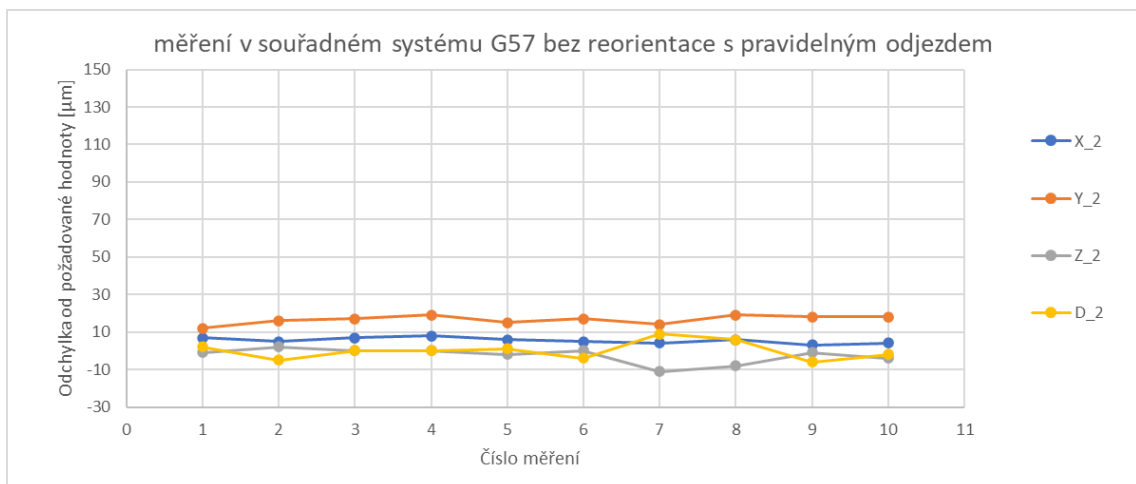


Graf 30 měření v souřadném systému G57 bez reorientace s prvotním příjezdem

Poslední série měření na tomto pracovním souřadném systému byla provedena s odjezdem rychloposuvem „point to point“ do základní pozice mimo oblast měření a příjezdem zpět do měřicí oblasti před každým měřením. Při této sérii měření byly rozptýly odchylky od skutečného průměru koule v rozmezí -6 μm až 9 μm . Poloha středu kalibrační koule byla měřena s rozptylem odchylek do 13 μm .

Tabulka 16 měření v G57 s odjezdem před každým měřením

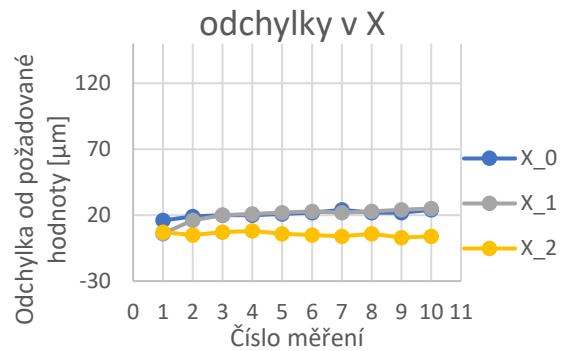
G57_2	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	X_2	Y_2	Z_2	D_2
1	7	12	-1	2
2	5	16	2	-5
3	7	17	0	0
4	8	19	0	0
5	6	15	-2	1
6	5	17	0	-4
7	4	14	-11	9
8	6	19	-8	6
9	3	18	-1	-6
10	4	18	-4	-2
rozptyl	5	7	13	15



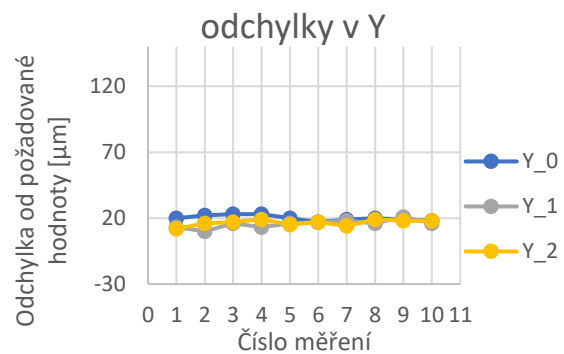
Graf 31 měření v souřadném systému G57 bez reorientace s pravidelným odjezdem

Z naměřených dat bylo patrné, že odchylka byla pro sérii měření s odjezdem před prvním měřením (znázorněné šedě) velice podobná naměřeným datům pro měření bez odjezdu (znázorněno modře). Nejvýznamnější odchylky od požadovaných hodnot při těchto sériích měření byly zaznamenány při měření s reorientací nástroje kolem osy „C“ (série označená G57_5), kdy bylo dosahováno odchylek od požadované polohy až 1,263 mm, což bylo způsobeno posunutým TCP vůči středu kuličky dotykové sondy a nerovnoběžností souřadného systému na přírubě se souřadným systémem na konci pracovní hlavice. vzhledem k velikosti odchylky a rozptylu tato data nebyla zobrazena v těchto grafech. Naopak nejlepších výsledků při měření bylo dosahováno při měření hned první série měření bez odjezdu mimo měřící oblast a bez reorientace měření. Toto měření vykazovalo odchylku od požadovaných hodnot do 24 μm s rozptylem při opakování menším než 11 μm .

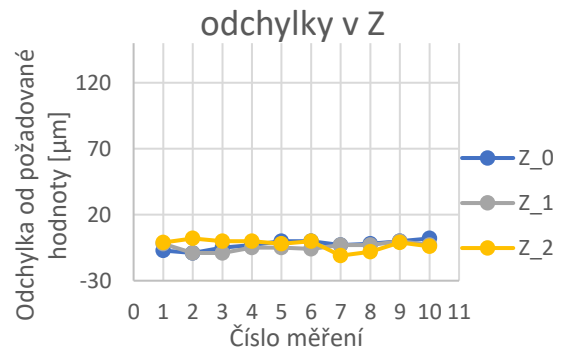
Z grafů na této stránce bylo patrné, že při měření bez odjezdu a bez reorientace, měření s odjezdem před sérií měření a měření s odjezdem před jednotlivými měřicími cykly, mezi sebou měly pouze malé odchylky.



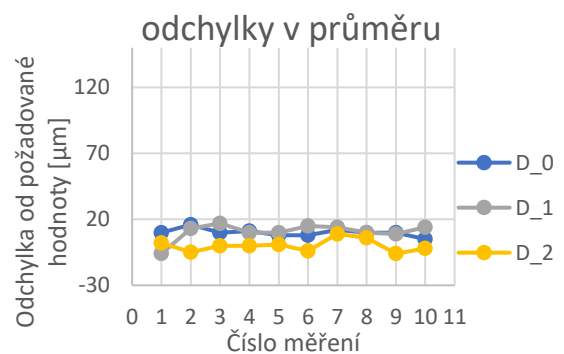
Graf 35 G57 odchylky v X



Graf 34 G57 odchylky v Y



Graf 33 G57 odchylky v Z



Graf 32 G57 odchylky v průměru

5.2.5 Měření v G57 s rotací kolem osy „B“ o 30°

Po naměření hodnot v souřadném systému G57 byl souřadný systém manuálně otočen v parametrech zařízení o 30° v ose „B“ a série měření byly provedeny znovu s novou orientací (viz Obr. 82).

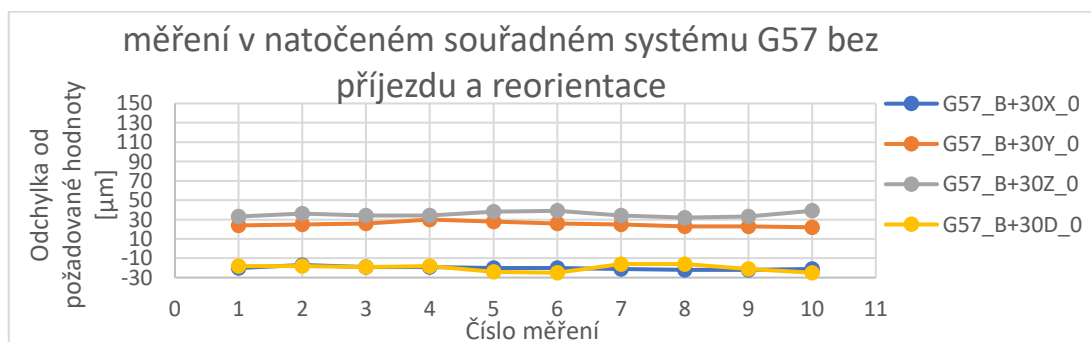
Jak je vidět v následujícím grafu a v následující tabulce, tak naměřená data ukazují odchylky v poloze středu koule ve směru „X“ do -22 μm s rozptylem naměřených hodnot do 5 μm. Pro osu „Y“ byly naměřeny hodnoty odchylky do 30 μm s rozptylem hodnot do 8 μm a pro osu „Z“ byla naměřena odchylka od požadované hodnoty 39 μm s rozptylem hodnot do 7 μm. Byly zaznamenány nízké hodnoty odchylky průměru koule (odchylka do -25 μm) a nízká hodnota rozptylu těchto hodnot 9 μm.



Obr. 82: Měření v G57 s rotací kolem osy „B“ o 30°

Tabulka 17 měření v naklopeném G57 bez odjezdů a bez reorientace

G57_0	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	G57_B+30X_0	G57_B+30Y_0	G57_B+30Z_0	G57_B+30D_0
1	-20	24	33	-18
2	-17	25	36	-18
3	-19	26	34	-19
4	-19	30	34	-18
5	-20	28	38	-24
6	-20	26	39	-25
7	-21	25	34	-16
8	-22	23	32	-16
9	-22	23	33	-21
10	-21	22	39	-25
rozptyl	5	8	7	9

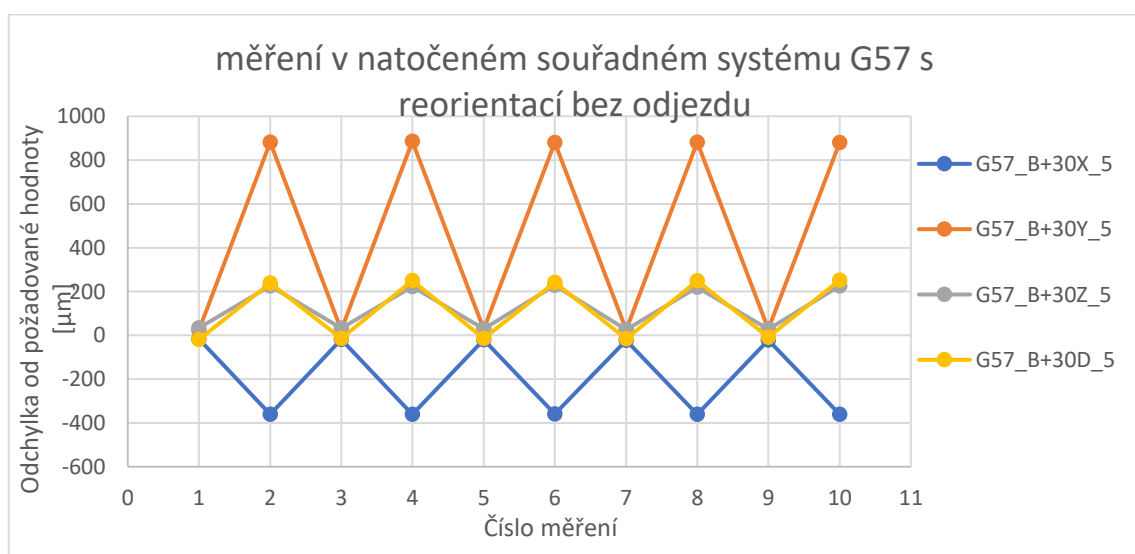


Graf 36 měření v natočeném souřadném systému G57 bez příjezdu a reorientace

Druhá série měření, série se změnou natočení v ose „C“ před každým jednotlivým měřením koule, byla provedena i v natočeném souřadném systému G57. Během tohoto měření byla opět pozorovatelná chyba v definici souřadného systému pracovní hlavice, která při změně orientace v ose „C“ vykazuje odchylky. Odchylky polohy středu od požadované hodnoty při této sérii měření přesahovaly v ose „X“ 0,3 mm, v ose „Y“ dosahovala odchylka téměř 0,9 mm a v ose „Z“ dosahovala odchylka necelých 3 desetín milimetru. Hodnoty rozptylu byly podobně velké jako hodnoty odchylek. V případě, kdy se měření rozdělí na naměřená data s orientací pracovní hlavy v ose „C“ na 0° a 90° byl rozptyl naměřených hodnot v ose „X“ 6 μm, stejně tak v ose „Y“, v ose „Z“ byl rozptyl hodnot 8 μm a rozptyl hodnot průměru byl do 14 μm. Velký rozptyl hodnot byl způsoben nepřesností umístění TCP, který byl umístěn mimo střed měřicí kuličky.

Tabulka 18 měření v naklopeném G57 s reorientací bez odjezdů

G57_B30_5	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	G57_B+30X_5	G57_B+30Y_5	G57_B+30Z_5	G57_B+30D_5
1	-17	24	34	-19
2	-360	881	226	238
3	-19	24	32	-15
4	-361	886	222	251
5	-20	28	29	-15
6	-359	880	228	241
7	-23	25	26	-16
8	-361	881	220	249
9	-22	28	28	-9
10	-360	880	225	252
rozptyl	344	862	202	271

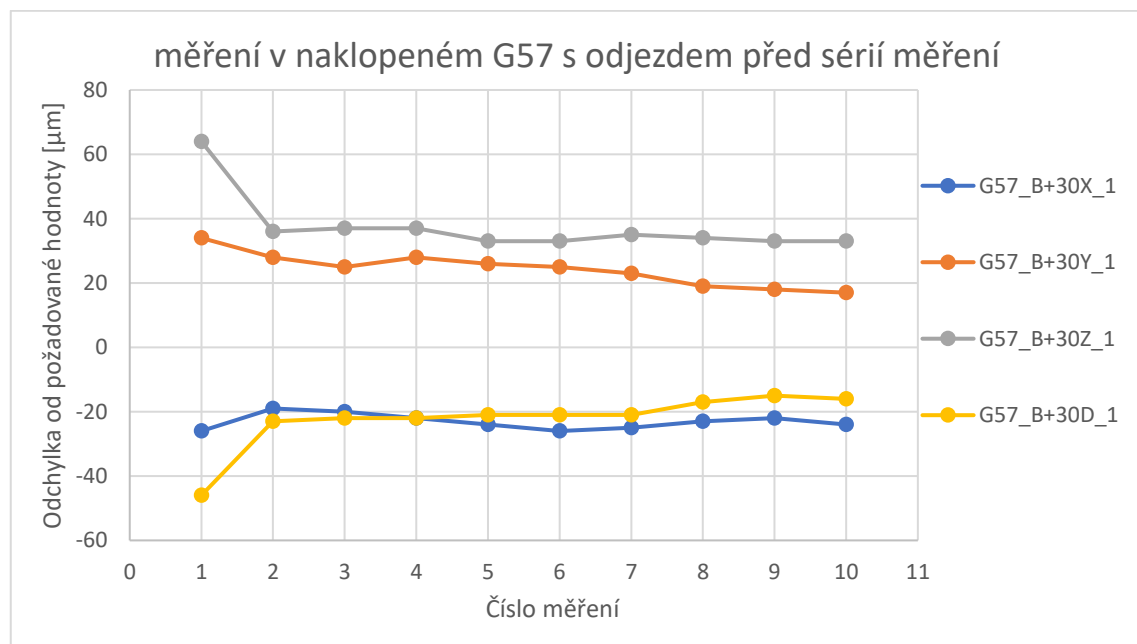


Graf 37 měření v natočeném souřadném systému G57 s reorientací bez odjezdu

V natočeném souřadném systému G57 byla provedena série měření s odjezdem mimo měřicí oblast před prvním měřením. V této sérii měření bylo možné z grafu na první pohled zaznamenat značné ovlivnění zařízení odjezdem a opětovným návratem při prvním měření série, kdy hodnota odchylky byla mezi prvním a ostatními měření v sérii i dvojnásobná. Hodnota odchylky polohy středu koule v ose „X“ v rozmezí -19 až -26 μm , v ose „Y“ 17 až 34 μm . V ose „Z“ byla odchylka od požadované polohy středu koule 33 až 64 μm (rozptyl 31 μm) pokud se však z měření odstraní hodnoty z prvního měřicího cyklu je rozptyl naměřených dat pro osu „Z“ pouhé 4 μm (naměřené hodnoty 33 až 37 μm) a rozptyl hodnot změřeného průměru klesne z 31 μm (naměřená odchylka mezi -16 až -46 μm) na 8 μm (naměřená odchylka -15 až -23 μm).

Tabulka 19 měření v naklopeném G57 s odjezdem před prvním měřením

G57_B30_1	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	G57_B+30X_1	G57_B+30Y_1	G57_B+30Z_1	G57_B+30D_1
1	-26	34	64	-46
2	-19	28	36	-23
3	-20	25	37	-22
4	-22	28	37	-22
5	-24	26	33	-21
6	-26	25	33	-21
7	-25	23	35	-21
8	-23	19	34	-17
9	-22	18	33	-15
10	-24	17	33	-16
rozptyl	7	17	31	31

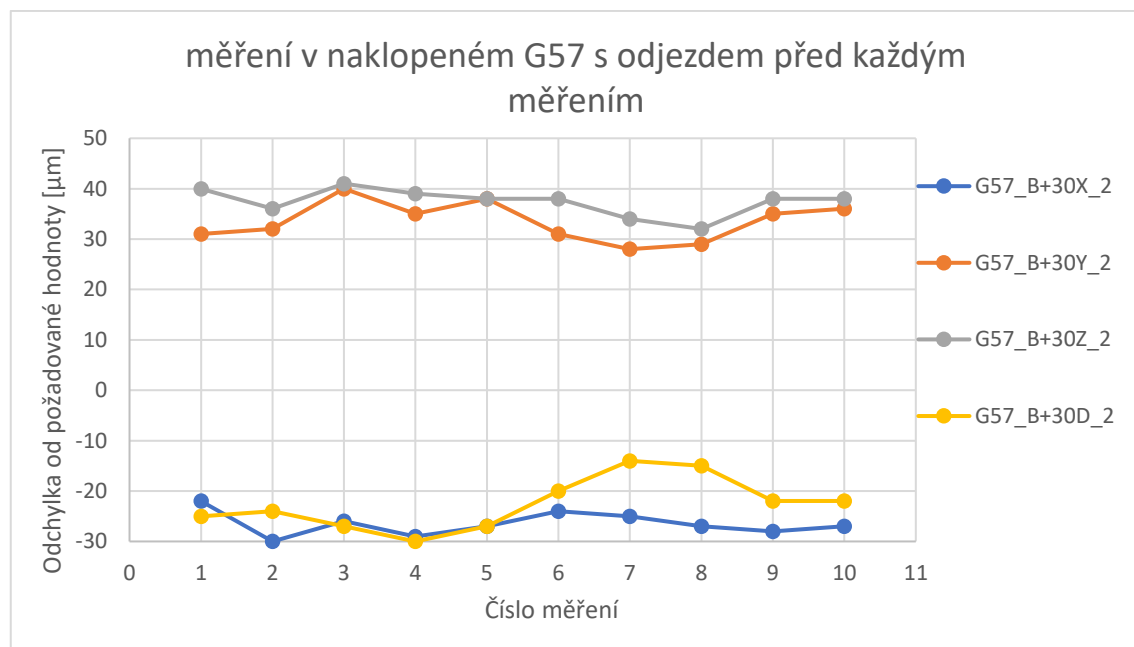


Graf 38 měření v naklopeném G57 s odjezdem před sérií měření

Poslední sérií měření v nakloněném souřadném systému bylo měření s odjezdem mimo pracovní oblast před každým měřením. Při této sérii měření se odchylka od požadované polohy středu pohybovala okolo hodnoty $-26 \mu\text{m}$ s celkovým rozptylem $8 \mu\text{m}$. Hodnota odchylky pro osu „Y“ se pohybovala v rozmezí 28 až $40 \mu\text{m}$ (rozptyl $12 \mu\text{m}$) a pro polohu v ose „Z“ se hodnota odchylky pohybovala mezi 32 až $41 \mu\text{m}$. Naměřená odchylka v hodnotě průměru se pohybovala v rozmezí -14 až $-27 \mu\text{m}$.

Tabulka 20 měření v nakloněném G57 s odjezdem před každým měřením

G57_B30_0	odchylka jednotlivých měření [μm]			
Číslo měření	G57_B+30X_2	G57_B+30Y_2	G57_B+30Z_2	G57_B+30D_2
1	-22	31	40	-25
2	-30	32	36	-24
3	-26	40	41	-27
4	-29	35	39	-30
5	-27	38	38	-27
6	-24	31	38	-20
7	-25	28	34	-14
8	-27	29	32	-15
9	-28	35	38	-22
10	-27	36	38	-22
rozptyl	8	12	9	16

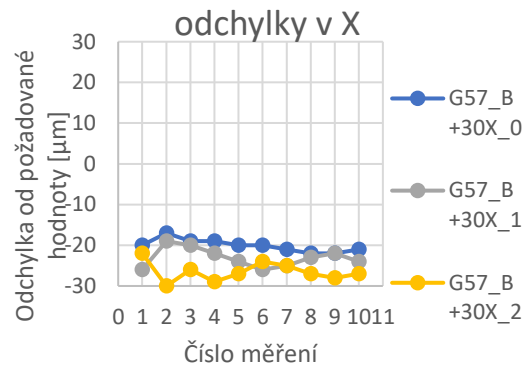


Graf 39 měření v nakloněném G57 s odjezdem před každým měřením

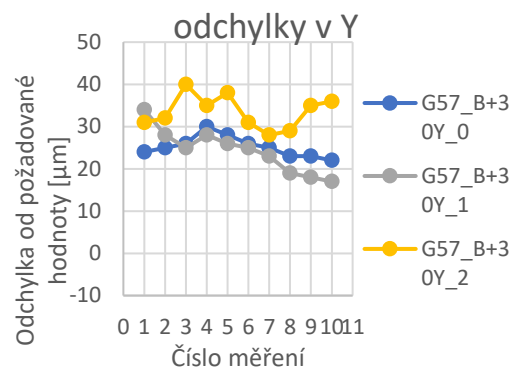
Naměřená data získaná při měření v nakloněném souřadném systému G57, tedy v pracovní pozici nejbližší z testovaných pozic společně vykazovaly malé hodnoty odchylek od požadované hodnoty a zároveň většina naměřených dat vykazovala malý rozptyl naměřených hodnot viditelný ve čtyřech grafech na této stránce. Modře byla vykreslena data měřená bez reorientace a bez odjezdu mimo měřicí oblast. Šedou barvou byla znázorněna série měření s odjezdem pouze před prvním měřicím cyklem a žlutou barvou byly vykresleny série měření s odjezdem před každým měřicím cyklem.

Pro měřicí sérii označenou G57_B+30Y_1 s odjezdem před prvním měřením zobrazovaný šedou barvou měl ve všech měřených parametrech největší rozptyl hodnot výrazně ovlivněný prvním měřeným bodem. Pro ostatní měřicí body bez odjezdu před měřením pak dochází ke stabilizaci měření.

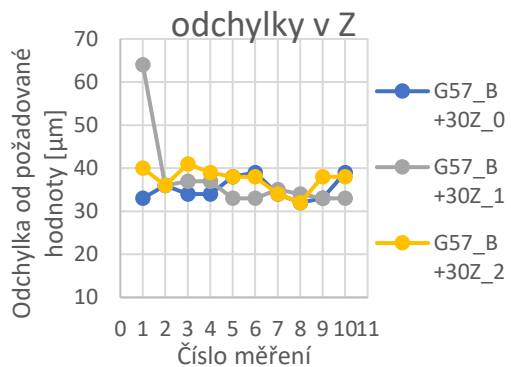
V těchto čtyřech souhrnných grafech měření v souřadném systému G57 bylo možné zaznamenat, že nejnestabilnější průběhy měření byly zaznamenány pro měření s odjezdem před každým měřicím cyklem, pominuly-li se hodnoty naměřené pro první měřicí bod ze série měření s odjezdem před prvním měřicím cyklem.



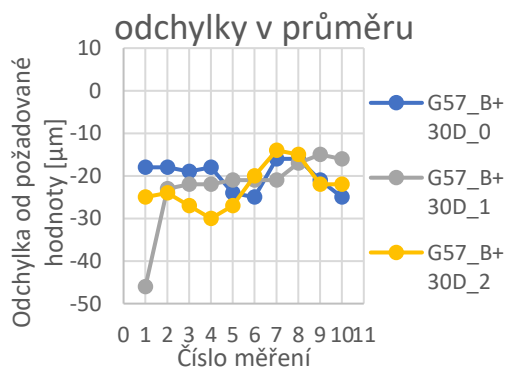
Graf 43 naklonené G57 odchylky v X



Graf 42 naklonené G57 odchylky v Y



Graf 41 naklonené G57 odchylky v Z

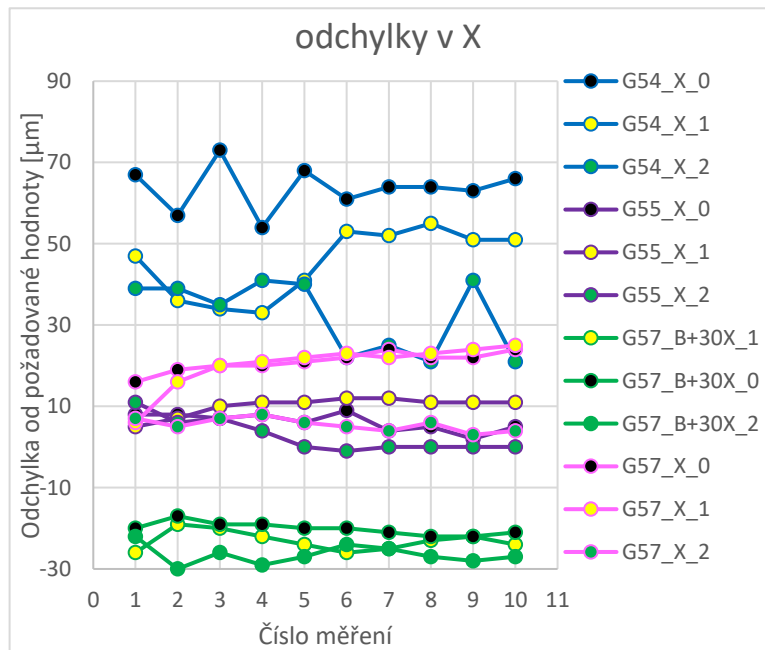


Graf 40 naklonené G57 odchylky v průměru

5.3 Shrnutí naměřených dat

V následujících čtyřech grafech jsou zobrazené naměřené odchylky zaznamenané z měření v souřadných systémech G54, G55, G57 a v naklopeném souřadném systému G57. Vykreslovány byly pouze hodnoty ze sérií měření: bez odjezdu mimo měřicí oblast, s odjezdem před prvním měřícím cyklem a s odjezdem před každým měřícím cyklem. Data naměřená pro souřadný systém G54 (systém nejdále od paty robotu) byly zobrazeny pomocí modré čáry. Data měřená v souřadném systému G55 byla vykreslena pomocí fialové čáry. Data měřená v natočeném souřadném systému G57 byla vykreslena zelenou čarou a data ze souřadného systému G57 se svislou orientací byla vykreslena růžovou čarou. Černé označení středů v grafu označovaly měření bez odjezdů mimo měřicí oblasti. Žlutě označené středy značily měření s odjezdem před prvním měřícím cyklem v sérii a zeleně byly označeny středy měřících sérií s odjezdem mimo měřicí oblast před každým měřícím cyklem.

Na prvním grafu zobrazujícím odchylky od požadované hodnoty v ose „X“ bylo možné zaznamenat největší odchylky pro měření souřadného systému G54 (souřadný systém nejdále od paty robotu). Zároveň byly pro souřadný systém G54 zaznamenány největší rozptyly naměřených hodnot. Nejnižších odchylek a zároveň nejnižšího rozptylu hodnot bylo dosaženo pro



Graf 44 odchylky v X

měření v souřadném systému G55, který se nacházel přibližně uprostřed mezi souřadnými systémy G54(nejvzdálenější) a G57 (nejbližší). Data naměřená v nejbližším a naklopeném souřadném systému G57 vykazovala ve směru „X“ zápornou odchylku od požadovaných hodnot s rozptylem 13 μm (-17 μm až -30 μm). Celková odchylka od požadovaných hodnot jednotlivých měření pro osu „X“ byla dle naměřených dat nejnepříznivější pro nejvzdálenější souřadný systém. Nejnižších odchylek 0 μm až 12 μm dosahovaly pro osu „X“ data naměřená v souřadném systému G55, který se nacházel ve střední vzdálenosti od paty robotu.

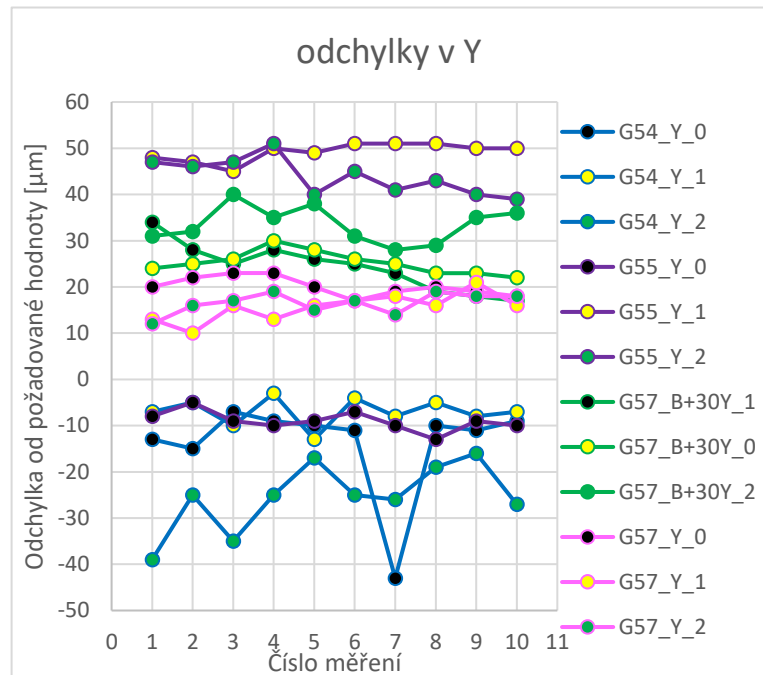
Na přesnost měření v ose „X“ tedy měla největší vliv vzdálenost od střední vzdálenosti od paty robotu.

První graf viditelný na této stránce zobrazoval odchylky od požadované hodnoty v ose „Y“.

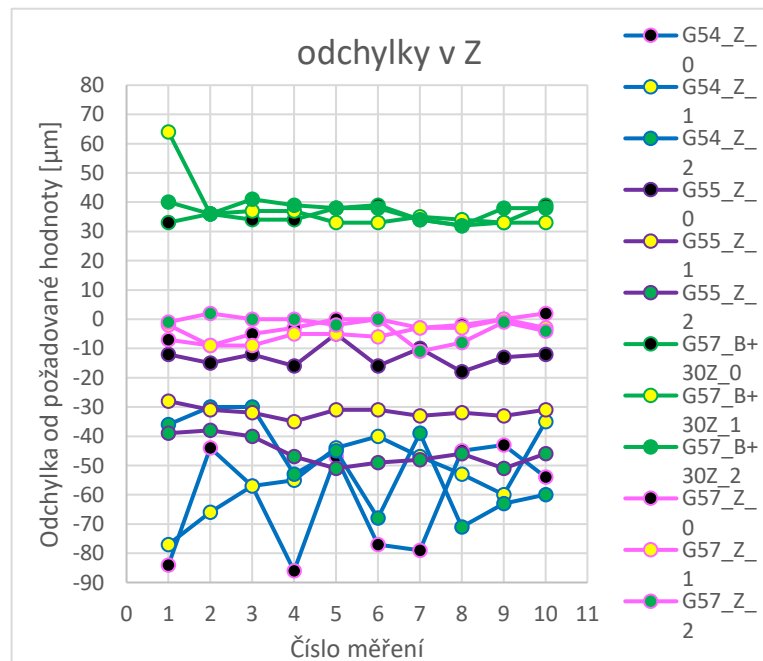
Pro tuto osu byla nevyšší odchylka naměřena pro souřadný systém G55 a zároveň v tomto souřadném systému ve směru „Y“ byl největší rozptyl naměřených hodnot (-10 μm až 51 μm). naopak nejmenší rozptyl a nejnižší průměrné hodnoty odchylky (10 až 23 μm) byly naměřeny pro svislou orientaci souřadného systému G57. Data v tomto souřadném systému byla zároveň nejstabilnější.

Druhý graf na této stránce zobrazoval odchylky od požadované hodnoty v ose „Z“. Z naměřených dat bylo možné zaznamenat jednoznačně nejnižší odchylky a nejnižší rozptyl hodnot (-11 μm až 2 μm) při měření ve svislém souřadném systému G57, který byl zvolen nejbližže patě robotu. Naopak nejvyššího rozptylu a největších odchylek (-86 μm až -30 μm) bylo dosaženo při měření souřadného systému

G54 (nejvzdálenější souřadný systém). Data měřená v souřadném systému G55 se pohybovala mezi hodnotami naměřenými v souřadném systému G54 a G57. V ose „Z“ byla viditelná vysoká stabilita a opakovatelnost (nízký rozptyl hodnot po zanedbání prvního měřeného bodu) pro data



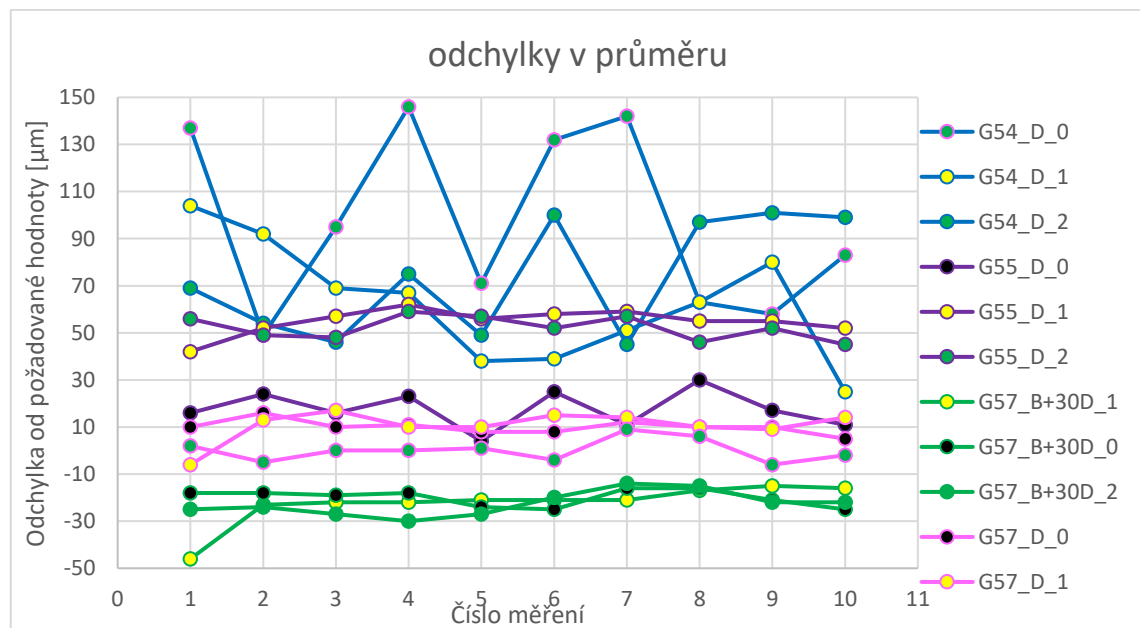
Graf 45 odchylky v Y



Graf 46 odchylky v Z

naměřená v souřadných systémech G57. Naopak s rostoucí délkou vyložení robotu stabilita měření značně klesala (roste rozptyl měřených hodnot).

Poslední shrnující graf zobrazoval odchylky od požadovaného průměru. V grafu bylo možné zaznamenat vysokou stabilitu měření (nízký rozptyl hodnot $-6 \mu\text{m}$ až $16 \mu\text{m}$) pro souřadný systém G57 a pro nakloněný souřadný systém G57 ($-30 \mu\text{m}$ až $-14 \mu\text{m}$ po zanedbání prvního měřicího cyklu), které se nacházejí nejbližší patě robotu. Nejvýraznější odchylky a nejvýraznější rozptyl hodnot byl zaznamenán při měření souřadného systému G54, který se nacházel v nejvzdálenější pozici od paty robotu.



Graf 47 odchylky v průměru

Vzhledem k angulární kinematice průmyslového robotu bylo vhodné provádět měřicí operace především v oblasti blízké patě robotu kdy je robot „složen“. Dalšími vhodnými oblastmi pro provádění stabilních měřících operací byly oblasti do střední vzdálenosti od paty robotu. Pokud byla prováděna měření v blízkosti maximálního vyložení docházelo k zvyšování rozptylu měřených hodnot a vhodnost měření na nejvzdálenějších poloměrech klesá.

V rámci tvorby práce nebylo vhodné provádět měření s jinými natočeními v ose „C“ než v kterých bylo prováděno kalibrační měření. Pro snížení odchylek od požadované hodnoty při měření by bylo vhodné získat přesná transformační data pro konec kinematického řetězce s pracovní hlavou a nástrojem. Odstranění mnohokrát zmiňované chyby v posunutém TCP vůči středu měřicí kuličky by bylo schopné téměř odstranit rozdíly pro měření se změnou natočení osy „C“. K dalšímu zpřesnění by mohlo vést proměření robotu a nahrání korekčních dat.

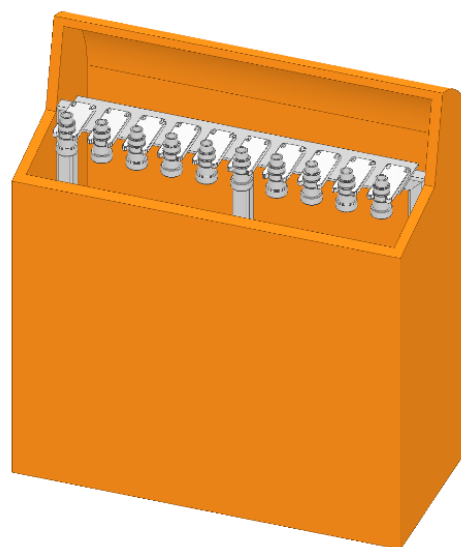
6 Automatická identifikace pozic zásobníku

Automatizovaná výměna nástrojů pomáhá zlepšovat efektivitu výroby. Variabilita procesu vyžaduje různorodé nástroje, čímž roste počet nezbytných pozic. Manuální naměřování jednotlivých pozic je neefektivní, a proto je snaha o automatizaci. Za použití CAD modelu je možné vytvořit program pro automatické naměření jednotlivých pozic.

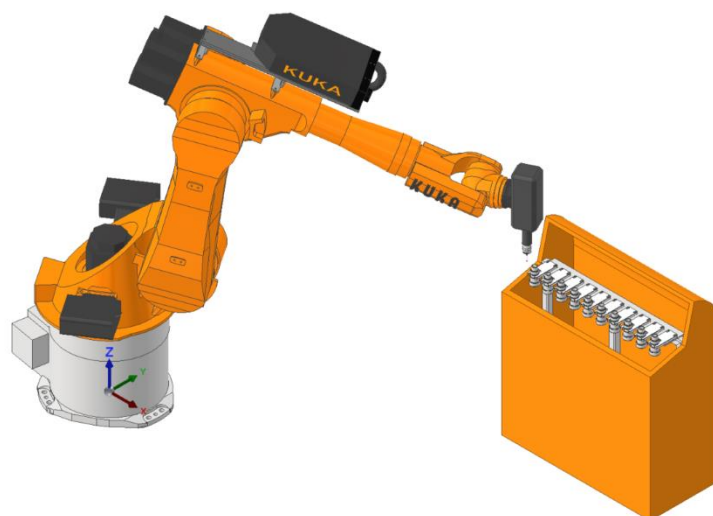
Byl vytvořen CAD model zásobníku nástrojů viditelný na Obr. 83. Pro automatickou identifikaci poloh v zásobníku byla vytvořena strategie měření používající CAD model zásobníku nástrojů se založenými držáky nástrojů.

Pro automatické naměření jednotlivých pozic v zásobníku nástrojů je nejprve nezbytné určit hrubou polohu samotného zásobníku nástrojů. Vzájemná poloha zásobníku vůči robotu může být definována:

- Souřadným systémem manuálně naměřený v režimu JOG pomocí měřících cyklů
- Souřadným systémem manuálně vložený do parametrů souřadných systémů (například z Layoutu pracoviště)
- CAD daty a poloha WCS je definována při vytváření programu v CAM počátku souřadného systému robotu (viz Obr. 84)



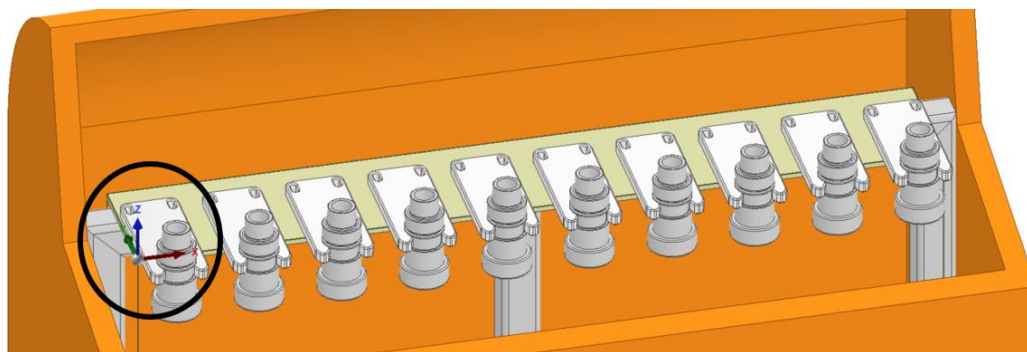
Obr. 83: skříňový zásobník nástrojů-CAD model



Obr. 84: počátek souřadného systému v patě robotu

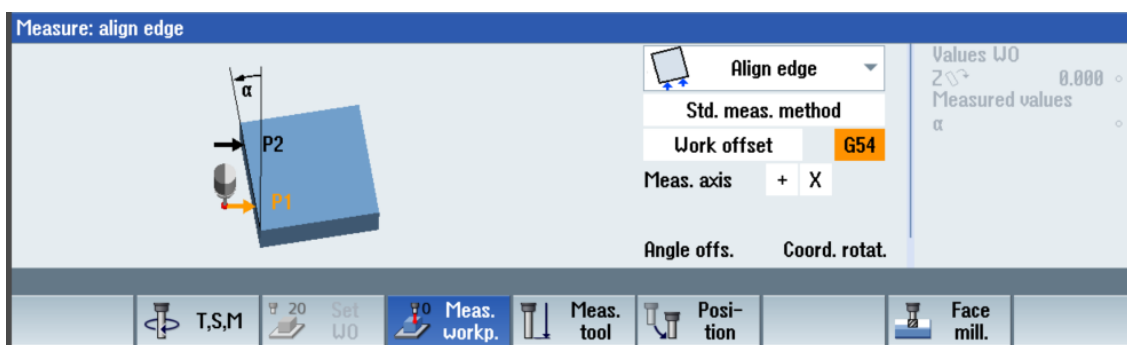
6.1 Určení pracovního souřadného systému v režimu JOG

Řešením eliminující chyby při montáži, umístění zásobníku a robotu je provést manuální naměření souřadného systému zásobníku v režimu JOG nebo jiným způsobem jednoznačně určit souřadný systém zásobníku. Použití této varianty vyžaduje od operátora manuálně naměřit souřadný systém celého zásobníku nástrojů viz. Obr. 85.



Obr. 85: počátek souřadného systému zásobníku nástrojů

Prvním krokem při manuálním naměřování je vyrovnání orientace souřadného systému požadovaným směrem. Toto vyrovnání je možné provést pomocí automatických měřících cyklů v režimu JOG sloužících k natočení souřadného systému (viz Obr. 86).



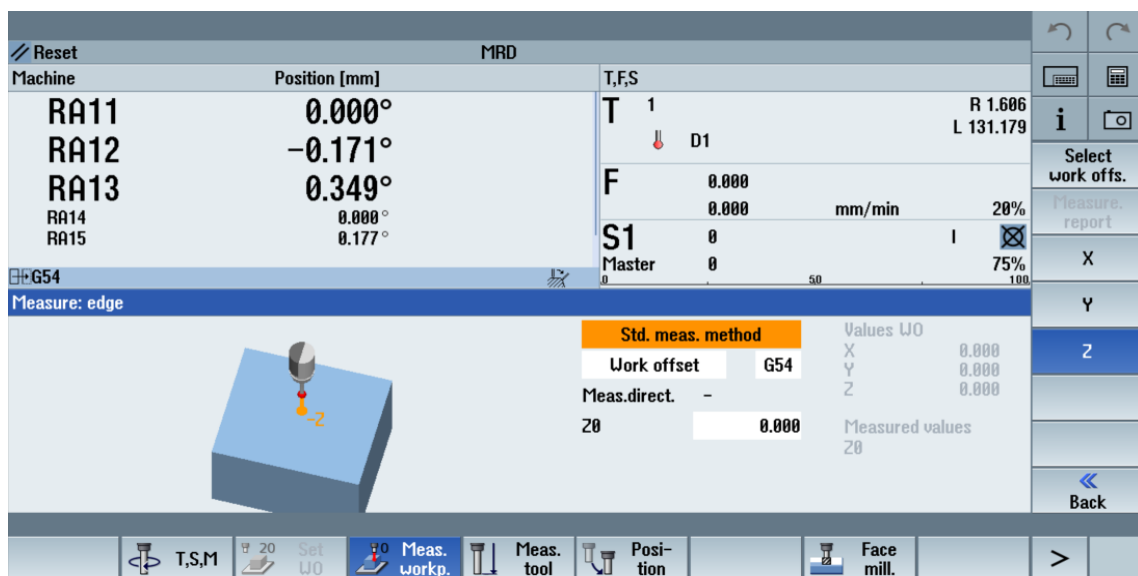
Obr. 86: natočení souřadného systému

Po provedení základního natočení souřadného systému bylo možné provést 3D natočení dorovnávající veškeré úhlové natočení (viz Obr. 87).



Obr. 87: 3D natočení souřadného systému

Po provedení dorovnání souřadného systému bylo nezbytné změřit a nastavit posun souřadného systému pomocí dalších měřících cyklů z nabídky měřících cyklů (viz Obr.88).



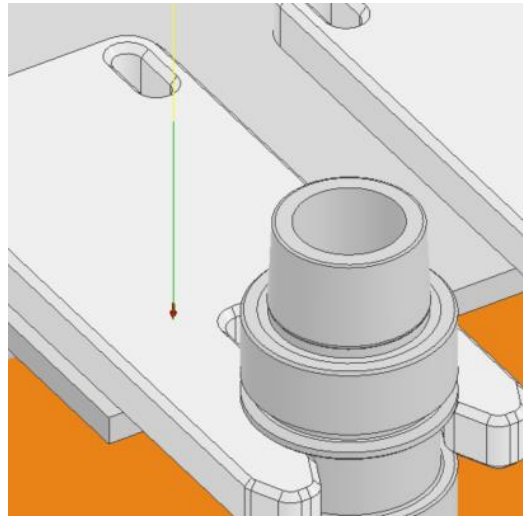
Obr. 88: posun Z pomocí měření v JOG režimu

Použitý souřadný systém zásobníku nástrojů byl zvolen tak, aby v průběhu práce na pracovišti nedocházelo ke změnám vzájemných pozic, pokud by byl souřadný systém umístěn na krytování zásobníku mohlo by vlivem poddajnosti krytování docházet k vzniku nepřesností. Souřadný systém byl také volen tak aby bylo využito dobře přístupných, tuhých a hladkých míst umožňující provádět opakovaně stabilní měření.

Při volbě variant, kdy je buďto naměřen souřadný systém, nebo když je manuálně zadána transformace souřadného systému, je možné využívat stejný program bez úprav. Tento program může být uložen v zařízení a vždy při změně vzájemné pozice zásobníku a robotu stačí pouze určit souřadný systém zásobníku a bez úprav spustit automatický program.

6.2 Testování a verifikace automatické identifikace

Pro naměřování jednotlivých pozic zásobníku nástrojů bylo využíváno automatických měřících cyklů, které jsou v řídicím systému Sinumerik dostupné. Pomocí volání CYCLE978 byla měřena náběžná hrana jednotlivých pracovních pozic (viz Obr. 89) v svislém směru (v ose „Z“). měřícím cyklem CYCLE977 byly naměřeny středy jednotlivých pozic nástrojů (viz Obr. 90). Po jednotlivých měřeních jsou vždy zaznamenány měřené souřadnice a následně mohou souřadnice být použity pro přepsání parametrů pozice nástrojů.



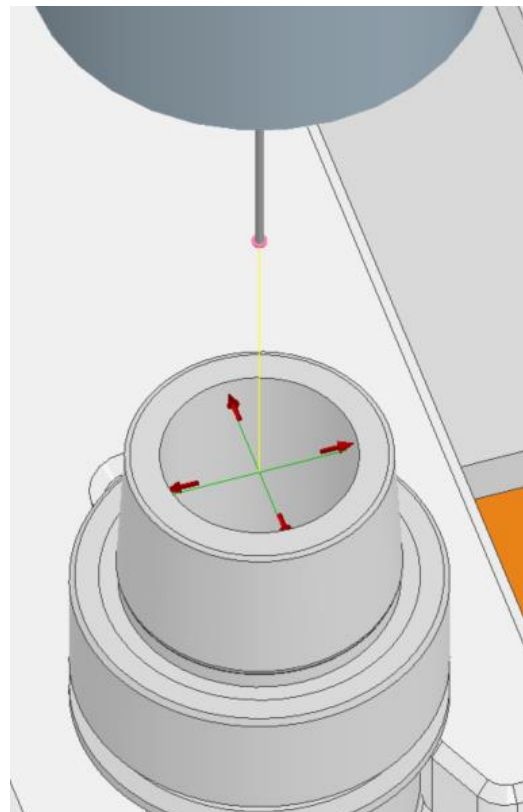
Obr. 89: naměření z jednotlivých pozic zásobníku

Použité měřící cykly dostupné v řídicím systému Sinumeri používaly pro zaznamenávání výsledků měření `_OVR[]` parametry, které jsou přepsány při použití každého měřícího cyklu. Pro uchování výsledků bylo možné využít zaznamenání naměřených dat do R-parametrů.

Použití

R-parametrů je však nebezpečné, protože mohou být jednoduše přepsány a neodpovídají příslušným nástrojům.

Proto bylo využito uložení jednotlivých naměřených hodnot v souřadném systému robotu do Magazine location user data (viz Obr. 91) `$TC_MPPC1` až `$TC_MPPC10`. Naměřené hodnoty v ose „X“ byly uloženy do parametrů `$TC_MPPC1[„M“`, „T“] s tím, že místo „T“ bylo vždy použito číslo příslušné měřící pozice a „M“ označuje příslušné číslo zásobníku nástrojů. Pro



Obr. 90: naměření středu nástrojového upínače v držáku nástroje

osu „Y“ byly hodnoty ukládány stejně do parametrů `$TC_MPPC2[1, „T“]` a pro osu „Z“ do parametrů `$TC_MPPC3[1, „T“]`. V upraveném postprocesoru s nastaveným parametrem `var SOUR_V_GXX = 1` docházelo k zápisu naměřených hodnot z příslušných `_OVR[]` parametrů do parametrů průběžně bez zásahu operátora. Vypnutí vypisování parametrů je vypnuto společně



Obr. 93: strategie měření

Bylo provedeno zkušební měření, při kterém byly zjištěny problémy s počáteční rutinou z originálního postprocesoru vykonávanou zařízením před samotnými měřicími cykly. Počáteční rutina byla upravena do stavu viz (Obr. 94), tento stav již proběhnutí všech měřících cyklů umožnil.

```

gMotionModal.reset();
writeBlock("TRAORI");
writeBlock("G91");
writeBlock(gMotionModal.format(1) ,"CP Z50 F1000");
writeBlock("G90");
writeBlock("TRAFOOF");
writeBlock(gMotionModal.format(0) ,"RA1=-15 RA2=-100 RA3=105 A=0 B=-5 C=0 ");
writeBlock("G53");
writeBlock("TRAORI");
writeBlock("G91");
writeBlock(gMotionModal.format(1) ,"CP Z10 A0 B0 C-30 S6 F1000");
writeBlock("G90");
writeBlock("R0=" + R0);
    
```

Obr. 94: zápis počáteční a konečné rutiny z postprocesoru do G-code

Možnost použití parametrů magazínu jako je \$TC_MPPC1[1, 1] bylo závislé na zprovoznění funkcí zásobníku pomocí odpovídajících parametrů. Parametry byly nastavovány dle instrukcí v dokumentaci [36].

U běžných obráběcích zařízení bývají výměny nástrojů ovládány pomocí PLC, které připraví nástroj do pozice výměny a výrobní zařízení si na daném místě vyzvedne požadovaný nástroj, tento postup je však možný pouze u zařízení kde se pozicuje zásobník nebo nějaký podavač. U skříňového zásobníku bez možnosti pozicování a bez podávacího členu však musel pro nástroje do jednotlivých pozic najet robot definovanou sekvencí pohybů a tento úkon již není vykonáván pomocí PLC, ale bývá pro tento účel vytvořen samostatný parametrický program, který je při požadavku výměny nástroje volán. Tato sekvence je parametricky závislá na čísle volaného a odkládaného nástroje. Přesná pozice v „X“ byla uložena v datech magazínu do proměnné \$TC_MPPC1[1, 1] až \$TC_MPPC1[1, 10] v závislosti na čísle pozice. Poloha v „Y“

byla uložena v \$TC_MPPC2[1, 1] a poloha v „Z“ byla uložena v \$TC_MPPC3[1, 1]. Při vykonávání programu výměny pak mohla být vytvořena sekvence pohybů ve vztahu k bodu. Běžně bývá vyvolána výměna nástroje příkazem M6 ovládající sekvenci pomocí PLC pomocí nastavení parametrů je možné nahradit příkaz M6 a vytvořit funkci, která je odbavována pomocí NC programu a ovládá sekvenci pohybových os. Polohování os je možné provádět v závislosti na parametrech a odečítání hodnot z magazine location user data např \$TC_MPPC1[1,1] kde je uložena poloha nástrojového lůžka v ose „X“.

Pro testovací programy byla sonda probouzena pomocí ovládání výstupu z NCU \$A_OUT[2]=1 a po parametricky nastavitelném čase T_ZAPNUTI_SONDY byl opět budící signál vypnut pomocí \$A_OUT[2]=0. Tato sekvence byla přidána do části postprocesoru, která vypíná chlazení pro operace s dotykovou sondou (viz Obr. 95). K probuzení nebo vyslání opětovného budícího signálu tedy začalo docházet před každým voláním měřící operace. Bezpečnější variantou vysílání budícího signálu by mohlo být nastavit v PLC části vysílání budícího signálu v pravidelném intervalu (kratším než interval uspání sondy), když je v pracovní hlavici nástroj typu sonda úprava PLC však nebyla součástí zadání práce.

```
if (isProbeOperation()) { // avoid coolant output for probing
  coolant = COOLANT_OFF;
  writeBlock("$A_OUT[2]=1");
  writeBlock("G4 F" + T_ZAPNUTI_SONDY);
  writeBlock("$A_OUT[2]=0");
}
```

Obr. 95: zapínání sondy před měřícími operacemi

7 Závěr

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo návrh implementace a implementace dotykové sondy do průmyslového robotu KUKA KR60 HA určeného pro obráběcí operace řízeného CNC řídicím systémem Sinumerik 840D sl, tak at' sonda může sloužit nejen pro automatické měření obrobků, ale také například pro automatickou identifikaci pozic zásobníku dle načtených pozic z 3D modelu.

Tato diplomová práce se v první části zabývala rešerší v oblasti měření dotykovými sondami, principů získávání signálu o uskutečnění dotyku, dotykových sond Renishaw a Hexagon, měření v řídicím systému Sinumerik 840D sl. Dále se rešerše zabývala souřadnými systémy CNC obráběcích zařízení, robotů a manipulátorů. Detailněji byl procházen řídicí systém KUKA KR C4, který podporuje úzkou spolupráci mezi řídicím systémem KUKA a řídicím systémem Sinumerik.

Průmyslový robot KUKA KR60 HA s řídicím systémem KUKA KR C4 byl ovládán pomocí řídicího systému Sinumerik 840D sl - Run MyRobot Machining. Na pracovní hlavici byla pomocí nástavce připojena bezdrátová dotyková radio-sonda Renishaw RMP60. Radio-interface RMI-Q byl připevněn na oplocení robotického pracoviště nasměrován tak, aby byl celý pracovní rozsah robotu v oblasti přijímání signálu z dotykové sondy. Radio-interface dotykové sondy byl zapojen jak do rozvaděče KUKA, tak do NCU Sinumerik. Do KUKA rozvaděče byl zapojen signál o uskutečnění dotyku sondy. Do NCU byla zapojena periferní komunikace sondy v podobě ovládání budicího signálu, také bylo zapojeno přijímání informace o stavu baterie a o chybě. Zapojení informace o doteku do KUKA rozvaděče na rychlé vstupy bylo zvoleno kvůli co nejkratšímu zpoždění mezi zaznamenáním dotyku a odečtením hodnot natočení jednotlivých pohonů. Pro zaznamenání a zaslání informace o natočení jednotlivých os z řídicího systému KUKA do řídicího systému Sinumerik byla vytvořena interrupt funkce, která je vyvolána přijetím signálu na rychlém vstupu na základní desce CCU v KUKA rozvaděči. Pro zajištění správného zpracování obdržených informací v řídicím systému Sinumerik 840D sl byly nastaveny parametry umožňující práci s měřicími cykly. Mezi nastavovanými parametry byly i parametry určující transformaci na konci kinematického řetězce odpovídající TCP na pracovní hlavici.

Zprovozněné měřicí cykly umožnili provedení sérií měření, které byly provedeny v různých polohách a v různých orientacích. První vybraná poloha se nacházela v blízkosti paty robotu a byla proměřena v orientaci se svislou orientací pracovní hlavy a v naklonené orientaci pracovní hlavy o 30°. Měření v obou orientacích vykazovaly minimální rozptyly a nejnižší měřené odchylky. Měření byla provedena i v nejvzdálenějších možných bodech kdy byl robot maximálně vyložen, naměřené hodnoty v této konstelaci měly největší odchylky od požadované

hodnoty a zároveň opakovaně naměřené sledované parametry vykazovaly největší rozptyl naměřených hodnot. Další dva měřené souřadné systémy se nacházely mezi těmito polohami. Z měřených dat bylo analyzováno, že přesnost a opakovatelnost robotu není v celém pracovním stejná, a že pro měření jsou vhodnější oblasti blízko paty robotu, kde je robot „složen“. Pozice vzdálené od paty robotu (robot je ve vyloženém stavu) jsou vlivem klesající tuhosti méně přesné a zároveň měření v těchto oblastech je méně stabilní.

V poslední části byl vytvořen CAD model zásobníku nástrojů, který byl využit pro tvorbu měřicího programu na automatickou identifikaci pozic zásobníku. Strategie měření byla vytvořena pomocí CAM v programu Autodesk Inventor. Požadovaného zápisu změřených dat do parametrů v řídicím systému bylo docíleno pomocí upraveného postprocesoru, ve kterém byly přizpůsobeny: iniciační a závěrečné rutiny, generování měřicích cyklů a jejich parametrů. Díky těmto úpravám bylo docíleno, že pro naměření a uložení jednotlivých pozic pro výměnu nástroje stačí naměřit základní souřadný systém zásobníku nástrojů stejným způsobem jako se běžně určoval souřadný systém obrobku. Následně byl spuštěn generovaný program, který již automaticky naměřil a zapsal jednotlivé pozice do příslušných magazine location user parametrů v souřadném systému robotu.

V diplomové práci byla vytvořena rešerše v oblasti měření dotykovými sondami, dále byl vytvořen návrh implementace a následně byla i implementována dotyková sonda do průmyslového robotu řízeného CNC řídicím systémem. Byla analyzována přesnost měření průmyslovým robotem s dotykovou sondou. Byla navržena a zprovozněna automatická identifikace jednotlivých pozic lůžek v zásobníku nástrojů. Splněním těchto částí byly splněny cíle práce. Do průmyslového robotu by mohla být implementována například nástrojová sonda.

Seznamy

Seznam literatury

- [1] Sondy Blum pod lupou. Infocube [online]. Brno: INFOCUBE, 2023 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://infocube.cz/cs/sondy-blum-pod-lupou/>
- [2] HEIDENHAIN. Dotykové sondy: pro obráběcí stroje [online]. Česká republika, 2014, 64 s. [cit. 2022-11-12]. ISBN 1113984-C0. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7305825-Dotykovke-sondy-pro-obrabeci-stroje.html?fbclid=IwAR3JTQEjFvsY4usk4AFIZXNryCDii4zSpdHtNlpj1JRTSsj0YFSa1KLJ1Vs>
- [3] H-2000-3544-01_RENGAGE_(CZ)_low-res HODNOTY S CHYBOU, Proč si vybrat RENGAGE™?. Česká republika, 2014. Dostupné také z: [https://www.renishaw.com/resourcecentre/download/\(344784c1870d4fd6ab3bfa49fde2da9b\)?userLanguage=cz&](https://www.renishaw.com/resourcecentre/download/(344784c1870d4fd6ab3bfa49fde2da9b)?userLanguage=cz&)
- [4] Snímací systémy pro CNC obráběcí stroje [oline] Velká Británie: Renishaw plc. 2014 [cit. 2023-07-20] Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/obrobkove-sondy-pro-obrabeci-stroje--6075>
- [5] RMP60 (QE) – rádiová sonda pro obráběcí stroje, příručka k instalaci. [Online] Velká Británie: Renishaw plc, 2022 [cit. 2023-07-8] Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/cs/details?data=126766&lang=cs>
- [6] RMI-Q radio machine interface. [online] Velká Británie: Renishaw plc. 2012 [cit. 2023-07-10] Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/1451346/Renishaw-Rmi-Q.html?page=2#manual>
- [7] RMP40 radio machine probe [online] Velká Británie: Renishaw plc. 2022 [cit. 2023-07-10] Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/rmp40-radio-transmission-probe--12000>
- [8] Probe Setup, 24. 11. 2022, Renishaw plc., Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.renishaw.idt.triggerlogic&fbclid=IwAR2CtFGs6VGCYQyJUYM2v45fs-CKvSrIDTMs5wph1wZCr9ek2T1Vg9QEptw&pli=1>, Aplikace pro mobilní telefony
- [9] M&h TP-R-400 radio probe. Hexagon AB [online]. Las Vegas: © Hexagon AB, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://hexagon.com/Products/m-h-TP-R-400-radio-probe?accordId=CA9BBDAA093641CA97B4DA3D23CE78F8>
- [10] M and h Inprocess messtechnik RWR9550G1 Touch trigger probe User Manual Inhaltsverzeichnis. Wiki Guide [online]. Německo: © 2023 UserManual.wiki, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://usermanual.wiki/m-and-h-Inprocess-messtechnik/RWR9550G1>

- [11] SINUMERIK 840D sl / 828D Frézování. Německo, 2015. Dostupné také z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/300/109476300/att_845869/v1/BHFsl_0115_cz_cs-CZ.pdf
- [12] SINUMERIK Milling with SINUMERIK: Mold making with 3- to 5-axis simultaneous milling. Německo, 2018. Dostupné také z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/409/109762409/att_968156/v1/SIN_WF5_0918_en-US.pdf
- [13] SINUMERIK 840D sl / 828D Základy. Německo, 2010. Dostupné také z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/635/28705635/att_75725/v1/PG_0310_cs_cs-CZ.pdf
- [14] SINUMERIK 840D sl / 828D Měřicí cykly. Německo, 2015. Dostupné také z: <https://az749841.vo.msecnd.net/sitescszscsou/alv1/e40d2fbb-91f4-4662-b243-89cfc732c5c7/BNMsl-1015-CZ.9ea89bee139c41994fc67627d484e0f8.pdf>
- [15] VITRALAB: Příručka. Automatizační a robotická technika.[online]. Leonardo da Vinci Programme LLP/LDV/TOI/2009/SK/93100530. [cit. 6.1.2023]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka_cz_final.pdf
- [16] SINUMERIK 840D sl / 828D Základy. Německo, 2012. Dostupné také z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/635/28705635/att_75725/v1/PG_0310_cs_cs-CZ.pdf
- [17] OGL seminář_2_Transformace. Brno, 2015. Dostupné také z: http://www.fit.vutbr.cz/~inavrati/SeminarOpenGL/SOG_02_Transformace.pdf
- [18] KR 30 HA Assembly Instructions Manual. Manualslib [online]. Německo: KUKA, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/download/1551653/Kuka-Kr-30-Ha.html>
- [19] KR 30 HA Assembly Instructions Manual. ResearchGate [online]. Německo: ResearchGate, 2022 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Working-envelope-side-view-KR60-3-KUKA-RoboticsR-2019_fig2_360213202
- [20] SKALLA, Jan a MENDŘICKÝ, Radomír. Automatické řízení výrobních strojů. [online] Liberec [cit. 2023-07-9] Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/pro-studenty/vyucovane-predmety/id:1962/automaticke-rizeni-vyrobnich-stroju>, Technická univerzita v Liberci.
- [21] POLÁŠEK, Jaromír. Číslicově řízené stroje. Kopřivnice, 2012. Dostupné také z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U31_Cislicove_rizene_stroje.pdf
- [22] ŠVÉDA, Jiří. Přednáška: Řídicí systémy obráběcích strojů NC, PLC, HMI. Praha, 2021. České vysoké učení technické v Praze. [cit. 2023-07-9]
- [23] Druhy číslicově řízených systémů Požadavky na absolvování. Výukový portál COPTel [online]. Kroměříž: Moodle, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://coptel.cz/mod/resource/view.php?id=7914>

- [24] LACHMAN, Martin a MEDŘICKÝ, Radomír. Zásady regulace - proudová, rychlostní, polohová smyčka: Elektrické pohony a servomechanismy [online]. Liberec, 2014 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:3430>. Technická univerzita v Libereci.
- [25] KUKA System Software 8.3: Operating and Programming Instructions for System Integrators. Německo, 2015. Dostupné také z: <http://www.wtech.com.tw/public/download/manual/kuka/krc4/KUKA%20KSS-8.3-Programming-Manual-for-SI.pdf>
- [26] KUKA.CNC Sinumerik [online]. Zdiby: Kuka, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-hu/products/robotics-systems/software/application-software/kuka-cnc-sinumerik>
- [27] KUKA System Software 8.3: Operating and Programming Instructions for System Integrators. Německo, 2015. Dostupné také z: <http://www.wtech.com.tw/public/download/manual/kuka/krc4/KUKA%20KR%20C4%20Operating%20Instructions.pdf>
- [28] KUKA KR C4: The Power of Control. KUKA [online]. Česká republika: KUKA, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/%C5%99%C3%ADdic%C3%AD-syst%C3%A9my-robot%C5%AF/kr%C2%A0c4>
- [29] Controller KR C4; KR C4 CK. Německo, 2015. Dostupné také z: <http://www.wtech.com.tw/public/download/manual/kuka/krc4/KUKA%20KR%20C4%20Operating%20Instructions.pdf>
- [30] SINUMERIK 840D sl, SINUMERIK Run MyRobot /Direct, Control, Commissioning Manual. [online] Německo: Siemens. 2018. [cit. 2023-07-7] Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/245/109763245/att_971150/v1/840Dsl_Run_MyRobot_commiss_man_en-US.pdf
- [31] SINUMERIK 840D sl NCU 7x0.3B PN. Německo, 2020. Dostupné také z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/635/28705635/att_75725/v1/PG_0310_cs_cs-CZ.pdf
- [32] SINUMERIK Run MyRobot /Machining. Siemens [online]. Německo: Siemens, 2019 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: 109478857-Run_MyRobot_Machining_V2.0_for_Kuka_Robots_Step7_Classic_en.pdf
- [33] SINUMERIK Run MyRobot /Direct Control - PLC. Siemens [online]. 2023: Siemens, 2023 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109758486/sinumerik-run-myrobot-direct-control-plc?dti=0&lc=en-CZ>
- [34] Demmeler tool changeover systems stand for power, efficiency and dynamics. Demmeler [online]. Německo, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.demmeler.com/products-shop/automation-technology/tool-arena>

- [35] Systémy automatické výměny nástrojů Požadavky na absolvování. Výukový portál COPTel [online]. Kroměříž: Moodle, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://coptel.cz/mod/resource/view.php?id=7772>
- [36] SINUMERIK 828D/840 sl, Operating and Programming, Turning. [online] Německo: Siemens. 2016 [cit. 2023-07-13] Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/626/109741626/att_895766/v1/828D_840Dsl_turning_training_0216_en-US.pdf
- [37] SINUMERIK 840D sl, Dokumentace pro uvádění do provozu. [online] Německo: Siemens, 2014 [cit. 2023-07-13] Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/242/109763242/att_971139/v1/840Dsl_job_planning_progr_man_1218_en-US.pdf
- [38] Přesnost a opakovatelnost CNC obráběcího stroje. Profika.cz obráběcí stroje [online]. Benátky nad Jizerou: © 2023 PROFIKA, 2023 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://www.profika.cz/presnost-opakovatelnost>
- [39] KUKA.WorkVisual, V4.0, KUKA Dostupné z: https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/software/syst%C3%A9mov%C3%BD-software/kuka_systemsoftware/kuka_work-visual, Aplikace pro počítač.
- [40] Optional Interfaces For KR C4 Robot Controllers Assembly and Operating Instruction, Kuka. [Online] Německo, 2016. [cit. 2023-07-6] Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/427452009/KRC4-Optional-Interfaces-En>
- [41] SINUMERIK 840D/840Di/810D/FM-NC Cykly měření. 06.00. Německo, 2000. Dostupné také z: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109434032/BMN_0600_cz.pdf
- [42] SINUMERIK 840D sl / 828D, Měřicí cykly. Programovací příručka. [online] Německo: Siemens, 2018. [cit. 2023-07-13] Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/803/109760803/att_962442/v1/840Dsl_828D_meas_cycles_progr_man_0818_cs-CZ.pdf
- [43] SINUMERIK 840D sl / 828D, Měřicí cykly. Programovací příručka. [online] Německo: Siemens, 2015. [cit. 2023-07-13.] Dostupné z: <https://az749841.vo.msecnd.net/sitescszcsou/alv1/e40d2fbb-91f4-4662-b243-89cfc732c5c7/BNMsl-1015-CZ.9ea89bee139c41994fc67627d484e0f8.pdf>
- [44] SINUMERIK 840D/840Di/810D/FM-NC, Cykly měření, Uživatelská příručka. Siemens [online] Německo: Siemens. 6 vydání. [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/032/109434032/att_829632/v1/BMN_0600_cz.pdf
- [45] Calibration Ball Set. Hexagon [online]. Las Vegas: Hexagon, 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: https://shop.hexagonmi.com/emea/cs_CZ/EUR/Katalog/Obr%C3%A1b%C4%9B%C3%AD-stroje/Kalibrace/Kalibra%C4%8Dn%C3%AD-sety/Calibration-Ball-Set-2/p/3D-FI%20EICHKUGEL%20SET2

- [46] SINUMERIK 840D sl, Commissioning Documentation. Německo: Siemens, 2016.
[cit. 2023-07-21]

Seznam obrázků

Obr. 1: dotyková sonda založená na principu optické závory [1].....	12
Obr. 2: dotyková sonda založená na fotočlátku [2]	12
Obr. 3: dotyková sonda založená na sledování odporu závislého na průřezu styčné plochy [3].....	12
Obr. 4: dotyková sonda založená na sledování tlaku [2].....	13
Obr. 5: šestibodový styk [3]	13
Obr. 6: dotyková radiová sonda Renishaw RMP60 [4].....	14
Obr. 7: trojúhelníkovgeometrické chyby naměřené sondou Renishaw OMP60 [3].....	14
Obr. 8: kalibrační koule na které byla testována sonda OMP60 [3].....	14
Obr. 9: Renishaw RMI-Q [4]	15
Obr. 10: pole působnosti sondy a interface [5].....	15
Obr. 11: elektro-schéma zapojení radiointerface [6]	15
Obr. 12: seřízení sondy [7]	16
Obr. 13: instrukce z Probe Setup Renishaw [8]	16
Obr. 14: Hexagon sonda [9]	17
Obr. 15: dotyková sonda Hexagon s měřící jednotkou PP41.00 [10]	17
Obr. 16: Hexagon radio-interface RWR95.50 [10]	17
Obr. 17: nástrojové a obrobkové sondy [4]	18
Obr. 18: minimální počty měřených bodů pro určení elementu [4].....	18
Obr. 19: Sinumerik 840D sl měřící softkeys.....	19
Obr. 20: volání měřícího cyklu v programu	19
Obr. 21: kalibrace na hranách nebo v kalibračním kruhu [11].....	20
Obr. 22:: definice měřících os _MA s aktivním příkazem G17 [11].....	21
Obr. 23: měření v jednom směru [4]	21
Obr. 24: měření vnitřního čepu [4].....	22
Obr. 25: brzdné dráhy [14].....	22
Obr. 26: princip měření [11].....	23
Obr. 27: systém s třemi kolnými posuvnými souřadnými systémy [15].....	25
Obr. 28: systém s jednou rotační a dvěma translačními pohyby [15]	26
Obr. 29: systém vhodný pro sférický souřadný systém [15]	26
Obr. 30: zařízení s třemi a více rotačními vazbami [15]	26
Obr. 31: transformace souřadného systému [16].....	27

Obr. 32: transformační matice [17]	27
Obr. 33: užitečné zatížení robotu KR 60 HA [18]	28
Obr. 34: úhlové a rychlostní limity KR 60 HA [18]	28
Obr. 35: obálka pracovní oblasti robotu KR 60 [19]	29
Obr. 36: struktura řídicího systému [20].....	29
Obr. 37: interpolace [21]	31
Obr. 38: interpolátor [21]	31
Obr. 39: křivkové dráhy pomocí pravoúhlého řízení [20].....	32
Obr. 40: 2D řízení [23].....	32
Obr. 41: 2,5D řízení [23]	32
Obr. 42: 3D řízení [23].....	32
Obr. 43: 5D a6D řízení [23]	33
Obr. 44: systém kaskádní regulace [22]	33
Obr. 45: blokové schéma zapojení robotu [15]	33
Obr. 46: schéma základního zapojení KR C4 [25]	34
Obr. 47: řídicí systém KR C4[28].....	34
Obr. 48: souřadné systémy CNC [21].....	35
Obr. 49: souřadné systémy robotu [25].....	36
Obr. 50: Sinumerik Run MyRobot Direct Control [30]	37
Obr. 51: Sinumerik Run MyRobot Machining [22]	38
Obr. 52: zapojení kontroleru KUKA do Sinumeriku [32]	38
Obr. 53: velkokapacitní zásobník nástrojů Demmeler[34]	40
Obr. 54: velkokapacitní zásobníky nástrojů [35]	40
Obr. 55: podavač nástrojů [35]	40
Obr. 56: přesnost a opakovatelnost [38]	41
Obr. 57: robot s pracovní hlavicí v laboratoři v CIIRC	42
Obr. 58: struktura zapojení sondy do robotu.....	43
Obr. 59: konektor X33 [40]	44
Obr. 60: X33 zapojení [40].....	44
Obr. 61: rozvaděč KR C4 [29]	44
Obr. 62: rychlé vstupy (X23 a X25 označené 26 a 27) na CCD desce [29]	45
Obr. 63: E-plan zapojení sondy	45
Obr. 64: Sinumerik - definice TCP pracovní hlavice [32].....	50
Obr. 65: kalibrační koule [45].....	52
Obr. 66: přibližné rozložení pracoviště a měřených pozic	52

Obr. 67: robot měřící v maximálním vyložení v souřadném systému G54	53
Obr. 68: posunutý souřadný systém G55	53
Obr. 69: měření v G56 s maximálním vyložení	53
Obr. 70: měřící pozice u paty robotu G57	54
Obr. 71: měřící pozice (G57) u paty robotu s naklopeným souřadným systémem	54
Obr. 72: měření s pracovní hlavicí natočenou v "C" na 0° a 90°	55
Obr. 73: odjezd robotu mimo měřící oblast (Home pozice)	55
Obr. 74: měření v G54.....	56
Obr. 75: měření s reorientací.....	57
Obr. 76: měření v G55.....	61
Obr. 77: měření v G56.....	66
Obr. 78: měření v G56 s "C" natočeným o -90°	67
Obr. 79: měření s reorientací.....	67
Obr. 80: měření v G57.....	71
Obr. 81: měření s reorientací.....	72
Obr. 82: Měření v G57 s rotací kolem osy „B“ o 30°	76
Obr. 83: skříňový zásobník nástrojů-CAD model	84
Obr. 84: počátek souřadného systému v patě robotu	84
Obr. 85: počátek souřadného systému zásobníku nástrojů	85
Obr. 86: natočení souřadného systému.....	85
Obr. 87: 3D natočení souřadného systému	86
Obr. 88: posun Z pomocí měření v JOG režimu	86
Obr. 89: naměření z jednotlivých pozic zásobníku.....	87
Obr. 90: naměření středu nástrojového upínače v držáku nástroje.....	87
Obr. 91: skladba dat v systému nástrojového hospodářství [46].....	88
Obr. 92: postprocesor s doplněním měřícího souřadného systému a zápisem naměřených hodnot.....	88
Obr. 93: strategie měření.....	89
Obr. 94: zápis počáteční a konečné rutiny z postprocesoru do G-code	89
Obr. 95: zapínání sondy před měřícími operacemi	90

Seznam tabulek

Tabulka 1 měření v G54 bez odjezdů a bez reorientace.....	56
Tabulka 2 měření v G54 s reorientací bez odjezdů.....	57
Tabulka 3 měření v G54 s odjezdem před prvním měřením	58
Tabulka 4 měření v G54 s odjezdem před každým měřením.....	59



Tabulka 5 měření v G55 bez odjezdů a bez reorientace.....	61
Tabulka 6 měření v G55 s reorientací bez odjezdů.....	62
Tabulka 7 měření v G55 s odjezdem před prvním měřením	63
Tabulka 8 měření v G55 s odjezdem před každým měřením.....	64
Tabulka 9 měření v G56 bez odjezdů a bez reorientace.....	66
Tabulka 10 měření v G56 s reorientací bez odjezdů.....	67
Tabulka 11 měření v G56 s odjezdem před prvním měřením	68
Tabulka 12 měření v G56 s odjezdem před každým měřením.....	69
Tabulka 13 měření v G57 bez odjezdů a bez reorientace.....	71
Tabulka 14 měření v G57 s reorientací bez odjezdů.....	72
Tabulka 15 měření v G57 s odjezdem před prvním měřením	73
Tabulka 16 měření v G57 s odjezdem před každým měřením.....	74
Tabulka 17 měření v naklopeném G57 bez odjezdů a bez reorientace.....	76
Tabulka 18 měření v naklopeném G57 s reorientací bez odjezdů	77
Tabulka 19 měření v naklopeném G57 s odjezdem před prvním měřením	78
Tabulka 20 měření v naklopeném G57 s odjezdem před každým měřením.....	79

Seznam grafů

Graf 1 měření v souřadném systému G54 bez příjezdu a reorientace	56
Graf 2 měření v souřadném systému G54 bez příjezdu s reorientací	57
Graf 3 měření v souřadném systému G54 s příjezdem bez reorientace	58
Graf 4 měření v souřadném systému G54 s odjezdy bez reorientace.....	59
Graf 5 G54 odchylky v X	60
Graf 6 G54 odchylky v Y	60
Graf 7 G54 odchylky v Z.....	60
Graf 8 G54 odchylky v průměru.....	60
Graf 9 měření v souřadném systému G55 bez příjezdu a reorientace	61
Graf 10 měření v souřadném systému G55 s reorientací a bez odjezdu.....	62
Graf 11 měření v souřadném systému G55 s odjezdem před měřením	63
Graf 12 měření v souřadném systému G55 s odjezdem před každým měřením.....	64
Graf 15 G55 odchylky v X.....	65
Graf 14 G55 odchylky v Y.....	65
Graf 13 G55 odchylky v Z.....	65
Graf 16 G55 odchylky v průměru.....	65
Graf 17 měření v souřadném systému G56 bez příjezdu a reorientace	66
Graf 18 naměřená data ze série měření G56_0 redukována o průměrné hodnoty	66

Graf 19 měření v souřadném systému G56 bez příjezdu s reorientací	67
Graf 20 měření v souřadném systému G56 s odjezdem před prvním měřením	68
Graf 21 naměřená data G56_1 redukována o průměrnou hodnotu.....	68
Graf 22 naměřená data G56_2 redukována o průměrnou hodnotu.....	69
Graf 23 měření v souřadném systému G56 s odjezdem před každým měřením	69
Graf 24 G56 rozdíly v X.....	70
Graf 25 G56 rozdíly v Y	70
Graf 26 G56 rozdíly v Z	70
Graf 27 G56 rozdíly v průměru	70
Graf 28 měření v souřadném systému G57 bez příjezdu a reorientace	71
Graf 29 měření v souřadném systému G57 bez příjezdu s reorientací	72
Graf 30 měření v souřadném systému G57 bez reorientace s prvotním příjezdem.....	73
Graf 31 měření v souřadném systému G57 bez reorientace s pravidelným odjezdem ...	74
Graf 32 G57 odchylky v průměru.....	75
Graf 33 G57 odchylky v Z.....	75
Graf 34 G57 odchylky v Y.....	75
Graf 35 G57 odchylky v X.....	75
Graf 36 měření v natočeném souřadném systému G57 bez příjezdu a reorientace.....	76
Graf 37 měření v natočeném souřadném systému G57 s reorientací bez odjezdu	77
Graf 38 měření v naklopeném G57 s odjezdem před sérií měření.....	78
Graf 39 měření v naklopeném G57 s odjezdem před každým měřením	79
Graf 40 naklopené G57 odchylky v průměru	80
Graf 41 naklopené G57 odchylky v Z	80
Graf 42 naklopené G57 odchylky v Y	80
Graf 43 naklopené G57 odchylky v X	80
Graf 44 odchylky v X	81
Graf 45 odchylky v Y	82
Graf 46 odchylky v Z	82
Graf 47 odchylky v průměru	83

Seznam použitého software

- Autodesk Inventor 2020
- Autodesk HSM Edit
- WorkVisual 5.0
- SinuTrain

Seznam příloh

- ZASOBNÍK_NÁSTROJŮ_PALEČEK.stp
- pracoviště KUKA Paleček.stp
- UPRAVENÝ POSTPROCESSOR z autodesk inventor siemens-840d_MERENI_DO_MPPC
- Schéma zapojení.pdf
- G57_5.MPF
- ZASOBNIK_NASTROJU_PALECEK.mpf