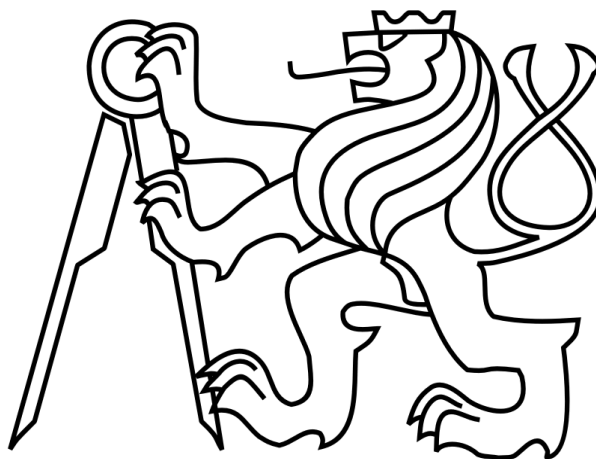


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Návrh systému přídavného odměřování pro zvýšení přesnosti měření
obráběcím strojem

2022

Bc. Tomáš Zavadil

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zavadil** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **466644**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Průmysl 4.0**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh systému přídavného odměřování pro zvýšení přesnosti měření obráběcím strojem

Název diplomové práce anglicky:

Design of an additional measuring system to increase the accuracy for on machine measurement

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Přídavný měřicí systém pro obráběcí stroje má za cíl zvýšit přesnost strojů v měřicím režimu. Měření na výrobním stroji nabývá na významu, protože snižuje vedlejší časy pro přepravu a zarovnání obrobku na souřadnicovém měřicím stroji (SMS). Výrobní stroje dosahují nižší přesnosti než SMS, proto je motivací zvýšení přesnosti měření na základě přídavného měřicího systému. Systém bude sestávat z průmyslového robotu nesoucího laserové měřicí zařízení a nadřazeného IPC/PLC. Je nezbytné zajištění komunikace mezi robotem, obráběcím strojem a laserovým systémem. Robot bude řízen v režimu externí automatiky pro polohování do optimální polohy pro měření. Cílem diplomové práce je koncept přídavného systému, návrh komunikace a metoda výpočtu optimální polohy robotu pro měření; Osnova práce: rešerše přídavných měřicích zařízení, způsobů měření na stroji a řízení průmyslových robotů, algoritmus pro výpočet žádané polohy robotu z aktuálních parametrů, tvorba programu pro polohování robotu, návrh komunikace mezi komponenty systému; Rozsah grafické části: bez výkresu; Rozsah textové části: 60-80 stran;

Seznam doporučené literatury:

Gao, W., Haitjema, H., Fang, F.Z., Leach, R.K., Cheung, C.F., Savio, E., Linares, J.M.: On-Machine and in-Process Surface 484, Metrology for Precision Manufacturing. CIRP Annals 2019, 68, 843–866, doi:10.1016/j.cirp.2019.05.005; Kuo, C.-H., Chen, P.-C.: On-Machine Measurement and Error Compensation for 6061 Aluminum Alloy Hexagonal Punch 492 Using a Turn-Milling Machine. Machines 2021, 9, 180, doi:10.3390/machines9090180

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

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

Datum zadání diplomové práce: **08.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **25.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

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

Ing. Matěj Sulitka, 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. 2022

.....

podpis

Poděkování

Děkuji panu Ing. Štěpánu Chládkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Dále děkuji i mé rodině a nejbližším za podporu při studiu.

Anotace

Autor:	Bc. Tomáš Zavadil
Název diplomové práce:	Návrh systému přídavného odměřování pro zvýšení přesnosti měření obráběcím strojem
Rozsah práce:	85 stran
Akademický rok:	2022
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí:	Ing. Štěpán Chládek, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT – FS
Klíčová slova:	Robot, laserový měřicí systém, obráběcí stroj, volumetrická chyba, kompenzace, měření na stroji, inprocesní měření, přídavná měřicí zařízení
Anotace:	Diplomová práce se zabývá konceptem systému přídavného odměřování za účelem zvýšení přesnosti měření na obráběcích strojích. Koncept se skládá z návrhu uchycení přídavného měřicího zařízení a zajištění komunikace mezi jednotlivými komponenty. V rámci řešení bylo navrženo uživatelské rozhraní systému, výpočet optimální polohy robotu pro měření a výpočet kompenzačních dat pro stroj.

Annotation

Author:	Bc. Tomáš Zavadil
Title of diploma thesis:	Design of an additional measuring system to increase the accuracy for on-machine measurement
Extent:	85 pages
Academic year:	2022
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Štěpán Chládek, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Submitter of the theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Key words:	Robot, laser measurement system, machine tool, volumetric error, compensation, on-machine measurement, in-process measurement, additional measuring systems
Annotation:	This thesis is focused on conceptual design of an additional measuring system to increase the accuracy of on-machine measurement. In design was focused on mounting additional measuring system and communication between all components. Within the solution was created human machine interface, calculation of optimal position of robot for measurement and calculation of compensation data for machine tool.

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Stav řešené problematiky.....	13
2.1	Měření na obráběcím stroji	13
2.2	Měření dotykovou sondou.....	15
2.3	Volumetrická přesnost	19
2.4	Souřadnicové měřicí stroje.....	20
2.5	Přídavná měřicí zařízení.....	21
2.6	Průmyslové roboty	23
2.7	Řízení robotů.....	28
2.8	Programování robotů.....	33
2.9	Zhodnocení.....	34
3	Cíle diplomové práce	35
4	Návrh přídavného zařízení.....	36
4.1	Koncept systému	36
4.2	Výběr komponent.....	37
4.2.1	Laserní měřicí zařízení	37
4.2.2	Roboty.....	42
4.2.3	Průmyslový počítač.....	45
4.2.4	Zhodnocení	47
4.3	Návrh uchycení laserového systému.....	47
4.4	Návrh komunikace	51
4.4.1	Uživatelské rozhraní navrženého systému.....	52
4.4.2	Komunikace Heidenhain TNC640 – IPC	54

4.4.3	Komunikace -Renishaw – IPC.....	56
4.4.4	Komunikace Robot – IPC.....	57
4.5	Výpočet optimální polohy robotu	58
4.6	Měření dotykovou sondou.....	64
4.7	Výpočet kompenzačních dat	66
4.8	Návrh uživatelského rozhraní	67
5	Experiment.....	70
5.1	Měření přesnosti robotu	70
5.2	Ověření navržené komunikace	75
6	Závěr	76
	Seznam použité literatury	77
	Seznam obrázků.....	82
	Seznam tabulek	84
	Seznam použitého softwaru	85
	Seznam příloh	85

Seznam použitých zkratk

ASCII	American standard code for information interchange – kódová tabulka definující znaky anglické abecedy
CAD	Computer-aided design – počítačem podporované projektování
CAM	Computer-aided manufacturing – počítačem podporovaná výroba
CNC	Computer numerical control – číslicové řízení
COM	Component object model – objektový model komponent
CSV	Comma-separated values – hodnoty oddělené čárkami
DC	Direct current – stejnosměrný proud
DDR	Double data rate – typ RAM paměti
DNC	Direct numerical controll – síť pro propojení CNC strojů
ERP	Enterprise resource planning – plánování podnikových zdrojů
GND	Ground - uzemnění
HDMI	High-definition multimedia interface – nekomprimovaný obrazový signál v digitálním formátu
HMI	Human machine interface – uživatelské rozhraní
IPC	Industrial personal computer – průmyslový osobní počítač
LCD	Liquid crystal display – displej z tekutých krystalů
LED	Light-emitting diode – elektroluminiscenční dioda
MDA	Master data analyzer – systémy track and trace
MES	Manufacturing execution systems – výrobní informační systém
MPEE	Maximum permissible error – maximální dovolená chyba indikace
OS	Operační systém
PDA	Personal digital assistant – malý osobní počítač

PLC	Programmable logic controller – programovatelný logický kontroler
PSD	Position sensitive detector – fotocitlivá dioda
RAM	Random acces memory – polovodičová paměť s přímým přístupem pro čtení a zápis
SMS	Souřadnicový měřicí stroj
SS	Souřadnicový systém
SSD	Solid-state drive – polovodičový disk
TCP	Tool center point – střed nástroje
UPS	Uninterruptible power supply – Zdroj nepřerušovaného napětí
USB	Universal serial bus – univerzální sériová sběrnice

Seznam použitých veličin a jednotek

a_1, a_2	Vzdálenost mezi bodem 1 a efektoem robotu	[mm]
b	Spojnice bodu 1 a druhé osy robotu	[mm]
c	Dosah robotu	[mm]
δ_z	Změna polohy efektoru robotu v ose Z	[μm]
ε_L	Chyba přesnosti polohování robotu	[μm]
ε_R	Chyba úhlové přesnosti robotu	[μrad]
L_1	Vzdálenost bodu 1 od robotu	[mm]
L_{10}	Maximální vzdálenost měření	[μm]
L_{12}	Vzdálenost mezi body definující přímkou pro měření	[mm]
L_2	Vzdálenost bodu 2 od robotu	[mm]

Le	Vzdálenost bezpečného bodu pro měření od robotu	[mm]
Offset	Bezpečná vzdálenost od vřetena pro měření robotem	[mm]
Rx, Ry, Rz	Natočení kolem os X, Y a Z TCP efektoru	[μ rad]
Value	Žádaná hodnota na povrchu obrobku	[mm]
X, Y, Z	Poloha efektoru robotu	[mm]
X1, Y1, Z1	Poloha prvního měřeného bodu v SS stroje	[mm]
X2, Y2, Z2	Poloha posledního měřeného bodu v SS stroje	[mm]
Xb3, Yb3, Zb3	Poloha bodu pro nejbližší možné zapolohování robotu	[mm]
Xe, Ye, Ze	Poloha bodu pro měření v bezpečné vzdálenosti od stroje	[mm]
Xkb1, Ykb1, Zkb1	Poloha prvního bodu měření v SS robotu	[mm]
Xkb2, Ykb2, Zkb2	Poloha posledního bodu měření v SS robotu	[mm]
Xsb1, Ysb1, Zsb1	Poloha prvního bodu měření v SS stroje	[mm]
Xsb2, Ysb2, Zsb2	Poloha posledního bodu měření v SS stroje	[mm]
Zkomp	Hodnota kompenzace Z-tové osy	[mm]
Zlaser	Hodnota naměřené odchylky laserem	[mm]
Zskut	Hodnota skutečné odchylky od požadovaného rozměru	[mm]
Zsonda	Hodnota naměřené Z-tové souřadnice dotykovou sondou	[mm]
Zvolum	Hodnota volumetrické chyby v místě měření	[mm]
α, β, γ	Natočení přímky v prostoru po které probíhá měření	[$^{\circ}$]

1 Úvod

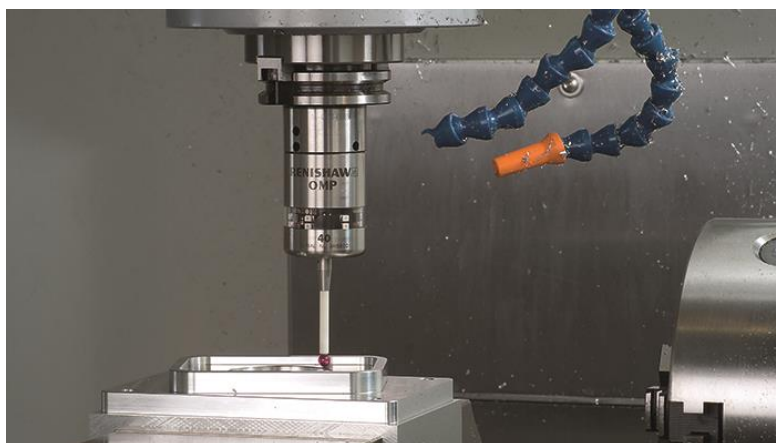
U obrábění rozměrných obrobků na CNC frézovacích centrech, kde požadujeme vysokou přesnost obrobku, dochází k růstu nákladů na obrobek vlivem náročnosti měření. Při vysokých požadavcích na přesnost obrobku jsme nuceni obrobek před dokončovací operací proměřit. Běžný způsob měření spočívá v upnutí obrobku na souřadnicový měřicí stroj, proměření jednotlivých obráběných ploch a opětovné upnutí do stroje. Pro rozměrné obrobky je tento proces manipulačně a tedy i časově náročný. Vlivem dlouhého manipulačního času rostou neproduktivní časy a tedy i náklady na obrobek. Pro tento problém se nabízí měření obrobku přímo na stroji obrobkovou sondou. Tento způsob měření je v současné době využíván ve strojírenské praxi. Takto provedené měření má ovšem nevýhodu v nižší přesnosti při měření v porovnání se souřadnicovými měřicími stroji. Do měření totiž zasahují geometrické nepřesnosti pohybových os stroje. Přesnosti polohování pohybových os obráběcích strojů na pravítkách se pohybují v řádech setin milimetru, avšak konečná přesnost TCP polohování obráběcích strojů dosahuje až řádů desetín milimetru. Pro zpřesnění měření se nabízí možnost využití přídavného měřicího zařízení, které bude měření na stroji zpřesňovat. Systém přídavného odměřování se bude skládat z robotu nesoucího vysílač laserového paprsku a přijímače laserového paprsku upevněného na vřetenu stroje. Koncept měřicího zařízení je obsahem této diplomové práce.

2 Stav řešené problematiky

Pokud chceme měřit obrobky přímo na stroji a zpřesňovat toto měření pomocí přídavného měřicího zařízení, je potřeba předem definovat, jak se měří obrobky přímo na strojích, jak se vyhodnocuje volumetrická chyba, jakým způsobem se měří na souřadnicových měřicích strojích a jaká je přesnost tohoto měření. Dále je nutné definovat, jaká měřicí zařízení jsou pro řešení vhodná a na základě jakých principů pracují. Dále bude řešena vhodná kinematická struktura a způsob řízení manipulátoru pro polohování měřicího systému.

2.1 Měření na obráběcím stroji

Měření na stroji (angl. *On-machine measurement*) je termín pro vykonávání kontroly rozměrů obrobku, ihned po dokončení obráběcí operace (obrázek 1). Stroje s automatickou výměnou nástrojů vymění řezný nástroj za dotykovou sondu. Stroj následně pohybuje jednotlivými osami stejně jako u obrábění tak, aby se dostala dotyková sonda do kontaktu s plochami, které je požadováno proměřit. Ve chvíli, kdy se dotyková sonda dotkne zvoleného místa, je zaznamenána aktuální souřadnice. Měření tedy probíhá stejně jako při měření na souřadnicovém měřicím stroji. Problém tohoto měření spočívá v nepřesnostech jednotlivých os. Toto řešení se používá především pro stanovení korekcí nástrojů, či k definování souřadného systému obrobku [21].



Obrázek 1: Měření na stroji dotykovou sondou [21].

Příklad obráběcího stroje BRAY BRAL

Příkladem obráběcího stroje, pro který se nabízí využití systému přídavného odměřování, je stroj BRAY BRAL. Jedná se o pětiosé obráběcí centrum určené pro tvarové a plošné frézování a vrtání (obrázek 2). Díky velkému rozměru pracovní plochy se uplatní především při obrábění dílců pro potřeby dopravní techniky, a výrobě profilů pro konstrukce budov. Stroj dokáže pracovat s dotykovou sondou, která může být použita pro automatické ustavení obrobku, nastavení počátku a nulového bodu, změření nástroje a konečné měření obrobku. Používá se především k obrábění obrobků z hliníku, kompozitu nebo plastu [22].



Obrázek 2: Pětiosé portálové obráběcí centrum BRAY BRAL [22].

V následující tabulce 1 jsou zobrazeny parametry obráběcího stroje BRAY BRAL. Jednotlivé hodnoty jsou rozděleny na parametry jednotlivých os. Tabulka je zaměřena na rozměry, rychlosti a přesnosti jednotlivých lineárních os obráběcího stroje.

Tabulka 1: Parametry obráběcího centra BRAY BRAL [22].

Rozměry [mm]			Maximální rychlost [m/min]			Přesnost polohování [mm/m]	Opakovaný nájezd [mm/m]
Osa X	Osa Y	Osa Z	Osa X	Osa Y	Osa Z		
3000 - 30000	1500, 2200, 2500	700, 1100, 1500	60	30	30	±0,02	±0,01

2.2 Měření dotykovou sondou

Moderní řídicí systémy jsou vybaveny pokročilými funkcemi pro měření dotykovou sondou. Tato kapitola je zaměřena na možnosti řídicího systému Heidenhain TNC 640. Srovnatelnou funkcionalitou disponují i řídicí systémy jiných významných výrobců jako například Siemens Sinumerik 840D sl. K měření dotykovou sondou na stroji je řídicí systém Heidenhain TNC640 vybaven cyklem 4 pro 3D měření a 444 pro 3D snímání zejména tvarových ploch. Pro měření je nutné zadat daný měřicí bod jeho souřadnicemi a příslušným normálovým vektorem. Před měřením lze provést kalibraci dotykové sondy pro získání přesnějších výsledků měření. Na základě kalibrace poté systém kompenzuje pohyb sondy při měření. Tato kompenzace vyžaduje opci 92. Pro měření dotykovou sondou je řídicí systém vybaven řadou měřících cyklů. Pomocí těchto cyklů lze: rozpoznat obrobek a vyvolat příslušný obráběcí program, zkontrolovat správnost obrobení dané plochy, zjistit přísuv obrobení načisto, kompenzovat opotřebení nástroje, kontrolovat geometrii obrobku, třídít díly, vyhotovovat protokoly a vypisovat chybová hlášení [47].

Měření 3D cyklus 4

Cyklus 4 pro dotykové sondy je určen k měření libovolné bodu na obrobku ve směru snímání definovaném pomocí vektoru. Cyklus umožňuje zadat přímo dráhu a rychlost posuvu snímání sondy. Vzdálenost návratu sondy po odečtení snímané hodnoty lze definovat ve vstupních hodnotách tohoto cyklu[47].

Postup

Sonda vyjede z aktuální pozice zadaným posuvem do definovaného směru snímání. Směr snímání je určen pomocí vektoru daného hodnotami delta v X, Y, Z v cyklu 4. Po sepnutí sondy se snímací pohyb zastaví. Do řídicího systému se uloží souřadnice polohy dotyku X, Y, Z do tří po sobě následujících Q-parametrů. Při použití sondy Heidenhain TS 460 se výsledek měření koriguje o hodnotu kalibrace přesazení středu. Dále provede řídicí systém polohování sondy proti směru snímání. Vzdálenost pohybu je definována parametrem MB, přičemž maximální možná délka dráhy je k startovní pozici [47].

Parametry cyklu

- Číslo parametru Q, do kterého řídicí systém stroje přiřadí zjištěnou souřadnici.
- Vektoru pohybu [X, Y, Z] pro dráhu dotykové sondy.
- Maximální délka dráhy z počátečního bodu měření.
- Rychlost posuvu měření.
- Maximální vzdálenost odjetí od snímaného bodu v proti směru snímání.
- Vztažný souřadný systém [47].

Snímání 3D cyklus 444

Cyklus 444 je obdobným cyklem pro měření dotykovou sondou, jako je předešlý cyklus 4. Tento cyklus je určen pro kontrolu tvarových ploch dílce. Cyklus vyhodnocuje, zda bod na povrchu dílce leží v tolerančním poli a na základě toho lze provést další obrobení obrobku. Cyklus 444 tedy nevrací hodnotu polohy dotykové sondy, ale hodnotu odchylky od požadované souřadnice. Lze nastavit, aby například při nevyhovující odchylce došlo k zastavení programu. Po měření řídicí systém vytvoří protokol a měřené odchylky jsou uloženy do systémových parametrů. Systémové parametry poté definují status obrobku jako nedefinovaný, dobrý, dodělávka, vadný kus [47].

Parametry cyklu

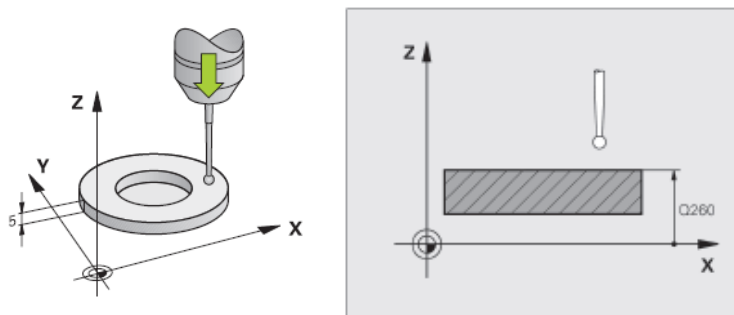
- Souřadnice prvního měřeného bodu v hlavní ose.
- Souřadnice prvního měřeného bodu ve vedlejší ose.
- Souřadnice prvního měřeného bodu v ose dotykové sondy.
- Normála k ploše ve směru hlavní osy.
- Normála k ploše ve směru vedlejší osy.
- Normála k ploše ve směru nástrojové osy.
- Bezpečnostní vzdálenost.
- Bezpečná výška.
- Rozsah tolerance, kterou chceme cyklem monitorovat.
- Reakce na chybu tolerance (přerušit/ nepřerušit vykonávaný program) [47].

Kalibrace spínací dotykové sondy

Pro přesný a spolehlivý průběh měření dotykovou sondou je zapotřebí sondu kalibrovat. Při kalibrování řídicí systém stroje zjišťuje efektivní délku dotykového hrotu a efektivní rádius snímací kuličky. Efektivní délku dotykové sondy řídicí systém ukládá do proměnných CAL_OF1 pro hlavní osu a CAL_OF2 pro vedlejší osu. Dotykový systém kalibrujeme zejména, při uvedení do provozu stroje, zlomení dotykového hrotu, výměně dotykového hrotu, změně posuvu snímání, nebo například kvůli nepravidelnostem způsobených zahříváním stroje. Řídicí systém Heidenhain TNC 640 obsahuje řadu funkcí pro kalibrování délky spínací dotykové sondy, rádiusu kuličky a jejího středového přesazení [47].

Kalibrování délky – cyklus 461

Před spuštěním cyklu je nutné nastavit vztažný bod v ose vřetena tak, aby nula stroje v Z souřadnici byla na stole stroje. Následně je nutné polohovat sondu nad kalibrační kroužek. Během následné kalibrace se vytvoří kalibrační protokol [47]. Schéma kalibrace je zobrazeno na obrázku 3.

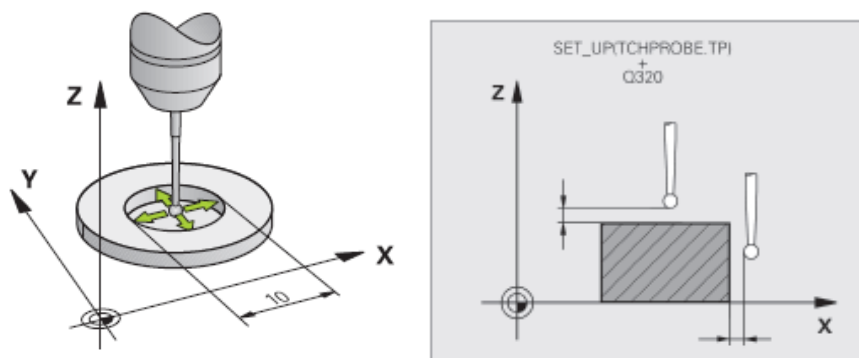


Obrázek 3: Kalibrace délky dotykové sondy [47]

Kalibrace vnitřního poloměru – cyklus 462

Před kalibrací vnitřního poloměru je nutné dotykovou sondou polohovat do středu kalibračního kroužku do požadované výšky měření. Poté při samotné kalibraci provádí řídicí systém automatickou snímací rutinu. Při prvním měření zjistí řídicí systém střed kalibračního prstence a následně polohuje dotykovou sondu do středu prstence. Následně proběhne během vlastní kalibrace velmi jemné měření a je vypočten rádius snímací kuličky.

Pokud lze dotykovou sondu pootočit pro měření, provede se také měření přesazení středu snímací kuličky [47]. Postup kalibrace vnitřního poloměru je zobrazen na obrázku 4.



Obrázek 4: Kalibrace vnitřního poloměru kuličky dotykové sondy [47]

Heidenhain TS 460

Dotykové sondy Heidenhain jsou určeny zejména pro použití na obráběcích strojích a to zejména pro frézky a obráběcí centra. Pomocí těchto sond lze zlepšit rozměrovou přesnost stroje, snížit časy upnutí obrobku a zvýšit dobu používání stroje. Měření lze provádět manuálně, nebo také ve spojení s CNC řízením pomocí programu. Dotyková sonda Heidenhain TS460 je zobrazena na obrázku 5.



Obrázek 5: Dotyková sonda Heidenhain TS 460 [31]

V následující tabulce 2 jsou uvedeny parametry dotykové sondy Heidenhain TS 460 určené k měření na obráběcích strojích. Jsou zde uvedené parametry a prostředí při jakém je schopna pracovat.

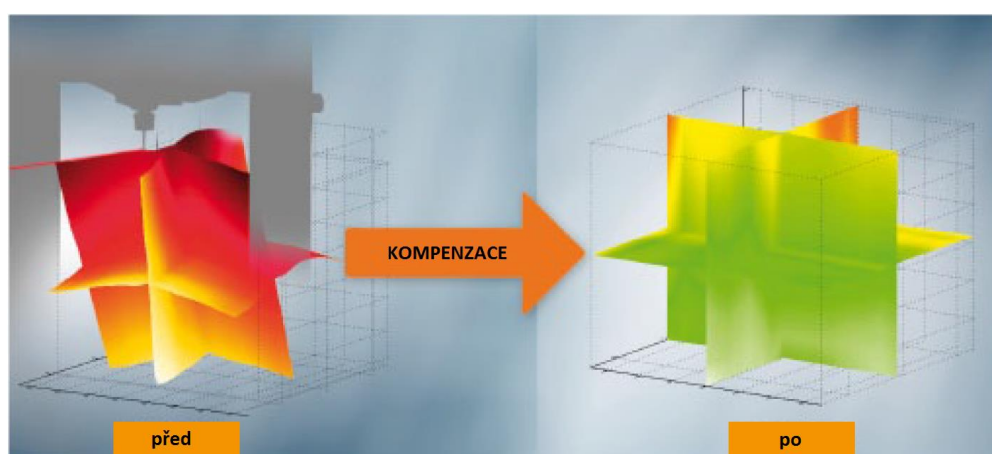
Tabulka 2: Parametry dotykové sondy Heidenhain TS 460 [32]

Přesnost sondy	$\leq \pm 5 \mu\text{m}$
Opakovatelnost sondy	$2 \text{ s} \leq 1 \mu\text{m}$ při snímací rychlosti 1 m/min
Opakované snímání z jednoho směru	$2 \text{ s} \leq 1 \mu\text{m}$ při snímací rychlosti 3 m/min $2 \text{ s} \leq 4 \mu\text{m}$ při snímací rychlosti 5 m/min
Vychýlení při kontaktu	$\leq 5 \text{ mm}$ ve všech směrech
Vychylující síla	Axialní: 8 N Radialní: 1 N
Snímací rychlost	$\leq 5 \text{ m/min}$
Provozní teplota	10 °C do 40 °C
Hmotnost bez kuželové stopky	0.2 kg
Upnutí	<ul style="list-style-type: none"> • Kuželovou stopkou • S M12x0.5 vnějším závitem
Přenos signálu	Radiový a infračervený v 360°
Vyzařovací úhel infračerveného signálu	0°
Zapnutí/ vypnutí	Radiový nebo infračervený signál
Zdroj	1V až 4V (1/2 AA nebo LR2)
Provozní doba	90 h s alkalickými bateriemi 400 h s lithiovými bateriemi
Vysílač	<ul style="list-style-type: none"> • SE 661/SE 660 pro radiový a infračervený přenos • SE 642 pro infračervený přenos • SE 540 pro infračervený přenos; pro integraci do vřetenové hlavy
Rozhraní	HTL, EnDat 2.2

2.3 Volumetrická přesnost

Volumetrickou přesností označujeme celkovou odchylku mezi požadovanou (teoretickou) a skutečnou polohou nástroje vůči obrobku ve velkém množství bodů v celém pracovním prostoru obráběcího stroje. Vlivem této nepřesnosti promítáme chybu na obrobek jako odchylku od požadovaného tvaru. Pro eliminaci této chyby je nutné tuto odchylku správně identifikovat pro následnou kompenzaci stroje. Volumetrická přesnost je tedy reprezentována jako vektorová mapa chybových odchylek v pracovním prostoru stroje (obrázek 6). Na základě měření se kompenzační data zpracují a integrují do řídicího systému obráběcího stroje. Měření této přesnosti je definováno normou ČSN ISO 230-1. Měření volumetrické přesnosti v celém pracovním prostoru obráběcího stroje je z principu zdlouhavý proces a konvenční metody měření jako použití úchylkoměrů a etalonů je pro důkladné proměření velkého počtu bodů nevhodné.

Pro urychlení tohoto měření byl vyvinut tzv. Laser Tracer, který pomocí optického měření laserem automaticky polohuje laserový paprsek tak, aby dopadal na koutový odražeč umístěný v prostoru. Díky tomu lze provést měření celého stroje v rámci hodin místo dnů a tím urychlit a zpřesnit celý proces. Laser Tracer ale není stále dostatečně přesný jako jiné měřicí metody. Z toho důvodu jsou vyvíjeny stále další metody pro měření volumetrické přesnosti [26].



Obrázek 6: Volumetrická kompenzace obráběcího stroje [26]

2.4 Souřadnicové měřicí stroje

Jedná se o stroje určené pro velmi přesné měření (obrázek 7), které jsou pro dosažení maximální přesnosti měření umístěny v klimatizovaných místnostech. Měření je založeno na získávání souřadnic měřených bodů na základě dotyku povrchu součásti dotykovou sondou. Stroje jsou běžně vybaveny vzduchovým tlumením s funkcí automatického vyrovnávání, díky němuž je možné eliminovat vibrace stroje. Používá se portálová konstrukce, která je velmi tuhá a používají se velmi přesné komponenty, které eliminují nepřesnosti stroje, jako například vzduchová ložiska. Pracovní desky měřicích strojů bývají zejména z granitu. Pro přesné odměřování stroje je využíváno pravítek z krystalického skla s velmi nízkým koeficientem teplotní roztažnosti. Přesnost souřadnicových měřicích strojů se pohybuje běžně kolem 1 μm . Přesnost je udávána podle normy ISO 10360 ve tvaru $\text{MPEE} = (A+L/K)$, kde A je kladná konstanta stanovená výrobcem, L je měřený rozměr v a K je bezrozměrná kladná konstanta poskytnutá výrobcem [23], [24].



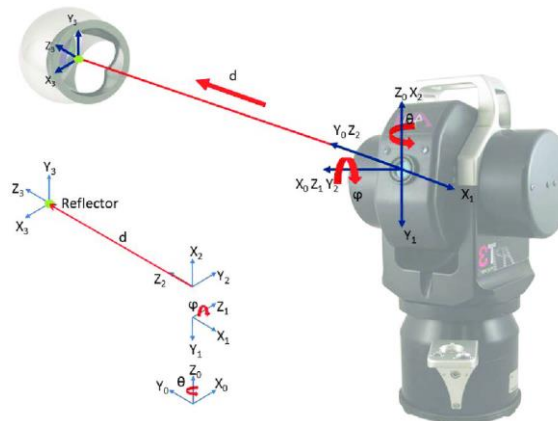
Obrázek 7: Souřadnicový měřicí stroj HEXAGON [24].

2.5 Přídavná měřicí zařízení

Přídavná měřicí zařízení se v průmyslu používají zejména k měření a diagnostice obráběcích strojů. Většina měřících zařízení používají k měření laserový paprsek. Jak bylo zmíněno na konci kapitoly 2.3, běžně používané měřicí zařízení pro určování polohy bodu v prostoru je v dnešní době laser tracer. Pro měření změny polohy se používají tzv. interferometry příkladem je zařízení Renishaw XL-80. Existují také zařízení, která jsou schopna měřit změnu polohy tělesa v prostoru, tedy všech šest stupňů volnosti tělesa, jako například měřicí systém Renishaw XM-60. Z hlediska umístění lze přídavná měřicí zařízení rozdělit na zařízení pro integraci do stroje a pro externí měření.

Zařízení pro externí měření

Laser Tracer je zařízení k měření optickou metodou. Funkcionalita laser traceru byla popsána v kapitole 2.3 a je znázorněna na obrázku 8. Na základě toho je určena vzdálenost odražeče od traceru. Běžná přesnost laser tracerů se pohybuje $15+3\mu\text{m}/1\text{m}$. Laser tracery se běžně používají během montáže, zarovnání a ustavení obráběcích strojů. Dále nachází velké uplatnění v leteckém průmyslu například pro vyrovnání křídel. Měření probíhá tak, že vysílač traceru se ustaví volně do prostoru před měřený objekt tak, aby před ním nic nebránilo výhledu. Technik přenesse koutový odražeč z traceru na měřený objekt tak, aby jej tracer mohl během pohybu k objektu snadno sledovat. Technik umístí odražeč na objekt a spustí měření. Odražeč pak přemísťuje do měřených bodů daného objektu, nebo je odražeč automaticky polohován obráběcím strojem [48].



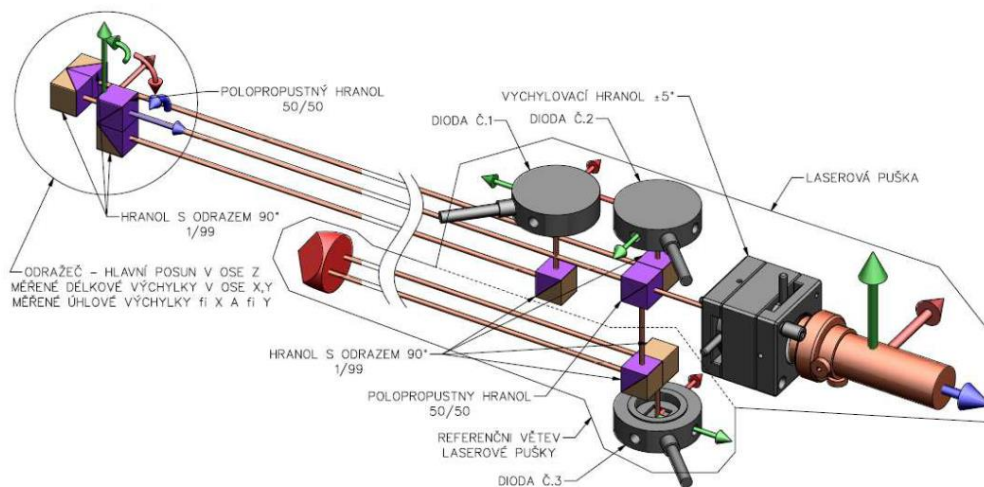
Obrázek 8: Princip fungování laser traceru [27]

Zařízení pro integraci do stroje

Měřicí zařízení pro integraci do stroje se zpravidla vyznačují unikátní konstrukcí respektující požadavky na montáž a žádanou funkcionalitu. Příkladem přídavného odměřovacího systému je zařízení sloužící pro měření deformace volného konce smykadla při obrábění, nebo měření. Účel tohoto zařízení je sledování a predikování jak aktuálního, tak dlouhodobého chování struktury obráběcího stroje. Zařízení je znázorněno na níže uvedeném obrázku 9 a skládá se z pasivních optických prvků, jako jsou optické hranoly a koutové odražeče a aktivních optických prvků, jako jsou zdroj laserového paprsku a PSD prvku. Systém se skládá z primárního dílu, který se upevní mimo smykadlo a obsahuje zdroj laserového paprsku a PSD prvek a sekundárního dílu, který je uložen na smykadle a obsahuje pasivní optické prvky. Schéma zařízení je zobrazeno na obrázku 10 [51].



Obrázek 9: Přídavný odměřovací systém deformace volného konce smykadla [51]



Obrázek 10: Schéma zařízení pro optické měření deformace smykadla [51]

2.6 Průmyslové roboty

Pro navržené řešení hledáme kinematickou strukturu robotu, která bude schopna polohovat s laserovým vysílačem v osách x , y , z a bude schopna natáčet vysílač kolem těchto os.

Paralelní kinematická struktura

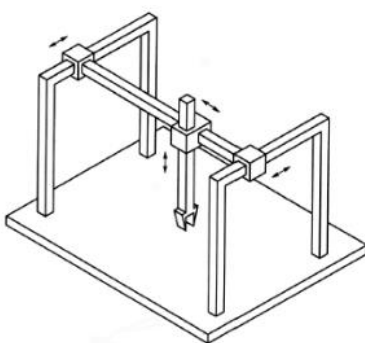
Pro tuto kinematickou strukturu jsou jednotlivé kinematické dvojice řazeny paralelně. Toho lze konstrukčně dosáhnout tří vzpěrnou strukturou, tedy tzv. tripod, nebo až šesti vzpěrnou strukturou tzv. hexapod. Díky této konstrukci může výsledný robot dosahovat vyšší tuhosti a lepší přesnosti polohování než u robotů se sériovou kinematickou strukturou. Nevýhodou je možnost vzniku kolizí vzpěr a tedy i vysoký nárok na řídicí systém [7].

Sériová kinematická struktura

Tato kinematická struktura obsahuje za sebou sériově řazené rotační a translační dvojice. Výhodou této struktury jsou manipulační schopnosti robotu. Naopak nevýhodou je nízká tuhost konstrukce, nižší přesnost polohování, tuhost robotu je závislá na aktuální poloze, problémy se statickým a dynamickým kmitáním [7]. U sériových kinematických struktur rozlišujeme následující typy:

Kartézská pohybová struktura

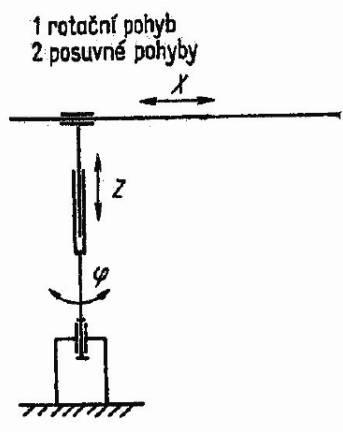
Tato kinematická struktura se nejčastěji používá pro podavače a obsluhu výrobních strojů. Jedná se o tzv. portálový robot, kde pracovním prostorem je hranol. Schématické znázornění pohybové struktury je vidět na obrázku 11. Při manipulaci nedochází ke změně orientace objektu. Avšak vhodnou kombinací kinematických struktur lze docílit možnosti změny orientace. Tato struktura patří mezi méně používané zejména kvůli velikosti zastavěné plochy a je vhodná pro těžší objekty [7].



Obrázek 11: Kartézská kinematická struktura [7]

Cylindrická pohybová struktura

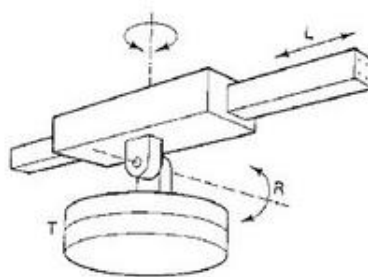
U této kinematické struktury, která je znázorněna na obrázku 12, již dochází ke změně orientace objektu. Pracovním prostorem je válcový prstenec. K manipulaci s objekty je zapotřebí velký manévrovací prostor. Tyto roboty se využívají zejména pro obsluhu vstřikovacích lisů, strojů pro tlakové lití. Z této kinematické struktury vzešly roboty typu SCARA, které se využívají zejména pro montáž [7].



Obrázek 12: Cylindrická kinematická struktura [20].

Sférická pohybová struktura

U této kinematické struktury znázorněné na obrázku 13 je využíváno polohování ve sférických souřadnicích, jelikož pracovním prostorem je kulový vrchlík. Při manipulaci lze velmi dobře měnit orientaci objektu, proto se tyto roboty používají zejména pro svařování [7].

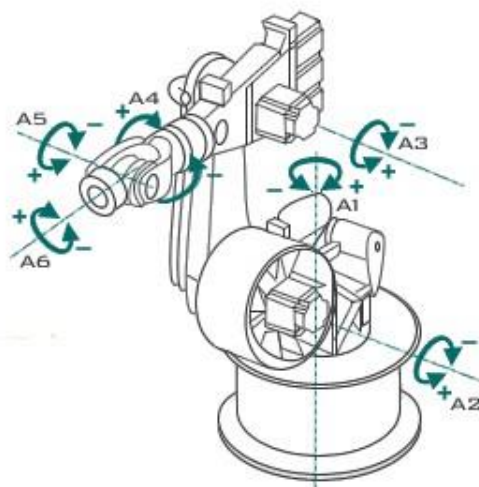


Obrázek 13: Sférická kinematická struktura [20].

Angulární pohybová struktura

Jedná se o nejčastěji používanou pohybovou strukturu (obrázek 14). Počet stupňů volnosti se rovná počtu nezávislých pohybů, které může struktura vykonat. Každý nezávislý pohyb je realizován příslušným pohonem. Počet pohonů odpovídá počtu stupňů volnosti a tedy i počtu nezávislých souřadnic. Celý kinematický řetězec se skládá z jednotlivých ústrojí: polohovací ústrojí, orientační ústrojí, efektor, pojezd [20].

- Polohovací ústrojí – umožňuje přemísťování a polohování objektu, většinou tvořeno rotačními popřípadě translačními jednotkami.
- Orientační ústrojí – mění orientaci objektu vůči souřadnému systému.
- Efektor – slouží k uchopení objektů, popřípadě možné použití technologických hlavic, které jsou vybaveny pracovními nástroji a slouží k realizaci technologických funkcí.
- Pojezd – slouží zejména ke zvětšení pracovního prostoru. Pojezdové ústrojí je oddělená translační jednotka od robotu.

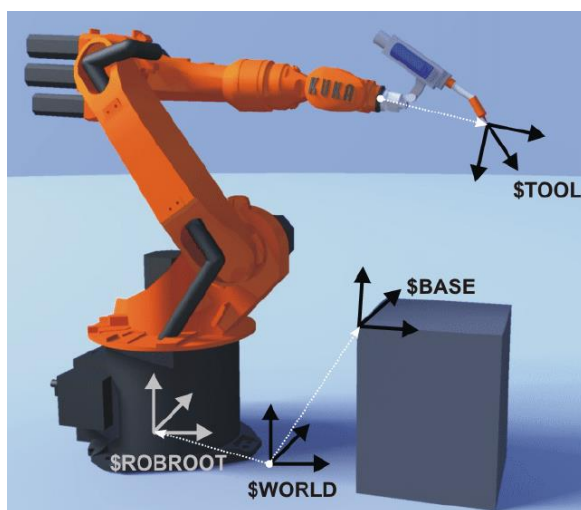


Obrázek 14: Angulární robot [14].

S vyšším počtem stupňů volnosti klesá tuhost koncového členu a přesnost polohování. Běžně používané průmyslové roboty mají 4-6 stupňů volnosti. Při volbě kinematické struktury a počet stupňů volnosti u robotu musíme především myslet na manipulační prostor, přesnost polohování, orientaci objektu, vazbu na jiná zařízení a manipulátory. V současné době se díky velkému pracovnímu prostoru, schopnosti vyhýbat se překážkám a univerzálnosti používá u robotů nejvíce angulární kinematická struktura, která má tři polohovací ústrojí a tři orientační ústrojí. Angulární robot lze kromě manipulace také použít pro technologické operace jako frézování, vrtání. Disponuje také nižší cenou ve srovnání s robot s paralelní kinematikou. Dokáže dosáhnout vysokých rychlostí, zabírá minimální plochu, pracovní prostor lze rozšířit pojezdem [20].

Souřadnicové systémy robotu

Pro programování a řízení robotů se používá několik souřadných systémů, které usnadňují programování robotu v daném pracovním prostoru. Jednotlivé souřadné systémy jsou na sebe vázány (obrázek 15). Při programování robotu je nutné tyto souřadné systémy definovat.



Obrázek 15: Souřadné systémy robotu [12].

WORLD

Jedná se o pevně definovaný souřadnicový systém robotu. V základním nastavení je tento souřadnicový systém umístěn v patě robotu. Je základním systémem, od kterého se odvíjí souřadnicový systém BASE a ROBROOT [12].

ROBROOT

Jedná se o souřadnicový systém, který je vždy umístěn v patě robotu. Určuje pozici robotu vztahenou k souřadnicovému systému WORLD. Souřadnicové systémy WORLD a ROBROOT si mohou být rovny [12].

BASE

Souřadnicový systém BASE definuje pozici dílu. Je vztahen k souřadnicovému systému WORLD. V základním nastavení je souřadnicový systém BASE nastaven stejně jako systém WORLD a posléze je nastaven jako ofset dílu [12].

TOOL

Tento souřadnicový systém se nachází na středovém bodu nástroje. V základním nastavení je umístěn ve středu upínací části nástrojů na robotu na tzv. flange. Pracovníkem je nastaven ofset středového bodu nástroje od flange. Pozice souřadnicového systému je tedy dána rozměry nástroje [12].

2.7 Řízení robotů

Řídicí systém robotů za pomoci uloženého programu zajišťuje ovládání pohonů a dalších mechanismů. Řídicí systém dále zajišťuje komunikaci s řídicími systémy ostatních strojů a dopravníků. Příklad řídicího systému Kuka KR je zobrazen na obrázku 16. Řídicí systém lze propojit dále s PLC infrastrukturou a také u moderních systémů s cloudovým prostředím. Při řízení lze také využít CNC řízení. To umožňuje přímé programování a provoz robotů pomocí G-kódů. Takovýto systém dokáže zpracovat i komplexnější programy vytvořené v CAD/CAM systémech. Do řídicího systému lze také integrovat bezpečnostní řešení. Bezpečnostní funkce a komunikace je realizována prostřednictvím protokolů na bázi ethernetu [12].



Obrázek 16: Řídicí systém robotů kuka [12].

Teachpendant

Teachpendant (obrázek 17) je zařízení, které umožňuje ruční ovládání robotu pomocí polohování jednotlivých os. Je nezbytný pro údržbu, programování a ovládání robotů. Výhodou použití teachpendantu je vybavení emergency stop tlačítkem, možností zobrazení a editace příkazů. Mnoho pendantů je vybaveno 6d myší pro rychlejší ovládání. Pendants mohou být buď to bezdrátové, nebo s drátovým připojením [13].



Obrázek 17: Teachpendant od firmy KUKA [12].

Řízení robotů externí automatikou

Při řízení robotů za pomoci PLC jednotek je možné ovládat roboty v rámci běžného programovacího prostředí PLC. Jednotliví výrobci vyvíjejí vlastní software pro ovládání za pomoci PLC například Kuka – mxAutomation, Staubli – UniVal. Jedná se o programovací rozhraní zjednodušující programování a integraci robotů do strojní sestavy. Ovládání robotů probíhá na úrovni elementárních pohybových příkazů. Tato řešení umožňují vysokou flexibilitu řešení a integraci do řídicích systémů strojů. Výhodou je, že řízení pohybu je v režii robotu, který z PLC pouze přijímá příkazy [15]. Funkční bloky využívané pro programování robotu jsou zobrazeny níže.

Funkční blok MC_MoveDirectAbsolute

Pomocí tohoto funkčního bloku PLC řídí interpolovaný pohyb z aktuální polohy robotu do zadané absolutní polohy v zadaném souřadnicovém systému. Rychlost robotu je vypočtena na základě parametrů souvisejícími s osami robotu, jako jsou parametry rychlost, zrychlení a zpomalení. Dále na základě parametru souvisejícím se středovým bodem nástroje. Výsledná rychlost pohybu robotu je dána nejvíce omezujícím parametrem. Pokud není rychlost robotu omezena nesoucím předmětem parametr středového bodu nástroje lze nechat ve výchozích hodnotách. Rychlost robotu v závislosti na poloze v trajektorii může být měněna. Pokud je požadována konstantní rychlost pro středový bod nástroje, musí být nastavena pomocí parametru CartesianVel [46]. Vstupy a výstupy funkčního bloku jsou popsány v tabulkách 3, 4, 5.

Tabulka 3: Vstupy FB_MC_MoveDirectAbsolute [46]

Název	Typ proměnné	Popis
Execute	BOOL	Spouštění funkce náběžnou hranou.
Position	T_CartesianPos	Absolutní pozice koncové polohy robotu zadané jednotlivými souřadnicemi pro zadaný souřadnicový systém.
Velocity	REAL	Rychlost os robotu. Zadává se procento nominální rychlosti robotu. Rozsah (0,01-500).
Acceleration	REAL	Zrychlení os robotu. Procento nominální hodnoty zrychlení robotu. Rozsah (0,01-500)
Deceleration	REAL	Zpomalení os robotu. Procento nominální hodnoty zpomalení robotu. Rozsah (0,01-500)
CartesianVel	REAL	Volitelný parametr. Maximální kartézská rychlost středového bodu nástroje v mm/s.
RotationVel	REAL	Volitelný parametr. Maximální rychlost otáčení středového bodu nástroje v °/s.
CoordSystem	UINT	Číslo souřadnicového systému (uloženého v databázi robotu), do kterého se zadává koncová poloha pohybu robotu.
ToolNumber	UINT	Index středového bodu nástroje (uloženého v databázi robotu), který bude použit pro pohyb.
BufferMode	eMC_BUFFER_MODE	0 = aborting / 1 = buffered / 6-7 = blending
TransitionMode	UINT	Definuje profil trajektorie robotu v blízkosti nastavených bodů. 0 = žádné / 3 = vzdálenost rohů / 10 = vzdálenost zaoblení.
TransitionParam	MC_TransitionParameter	

Tabulka 4: Výstupy FB MC_MoveDirectAbsolute [46]

Název	Typ proměnné	Popis
Busy	BOOL	True pokud je prováděn funkční blok. False pokud je funkční blok vykonán, nebo při chybě.
Done	BOOL	True pokud došlo k úspěšnému dokončení funkčního bloku.
Active	BOOL	True pokud je příkazovaný pohyb robotu momentálně vykonáván.
CommandTransferred	BOOL	True pokud je zadaný pohyb úspěšně uložen v řídicím systému robotu.
CommandAborted	BOOL	True pokud je příkaz přerušen jiným příkazem.
Error	BOOL	True pokud je funkční blok ukončen s chybou.
ErrorID	UDINT	Kód chyby.
MovementID	INT	Identifikátor pro příkazovaný pohyb.

Tabulka 5: InOut FB MC_MoveDirectAbsolute [46]

Název	Typ proměnné	Popis
AxesGroup	T_StaubliRobot	Data blok pro robot.

Funkční blok MC_GroupReadActualPosition

Tento funkční blok slouží ke čtení aktuální polohy zvoleného středového bodu nástroje. Při čtení aktuální polohy se může hodnota aktuální pozice krátce měnit, což může mít vliv na chod programu při nepřetržitém čtení aktuální hodnoty. Je třeba na základě tohoto jevu číst aktuální hodnotu efektivně [46]. Jednotlivé vstupy a výstupy funkčního bloku jsou popsány v tabulkách 6, 7, 8.

Tabulka 6: Vstupy FB MC_GroupReadActualPosition [46]

Název	Typ proměnné	Popis
Enable	BOOL	Pokud je TRUE povolí provedení funkčního bloku.
Tool	UINT	Číslo nástroje, pro který je čtena aktuální pozice.
CoordSystem	UINT	Číslo uživatelského rámce, pro který je čtena aktuální pozice středového bodu nástroje.

Tabulka 7: Výstupy FB MC_GroupReadActualPosition [46]

Název	Typ proměnné	Popis
Valid	BOOL	TRUE pokud jsou k dispozici platné hodnoty aktuální pozice.
Busy	BOOL	TRUE pokud probíhá instance funkčního bloku.
Error	BOOL	TRUE pokud je funkční blok ukončen s chybou.
ErrorID	UDINT	Kód chyby.
Position	T_CartesianPos	Aktuální hodnota pozice středového bodu nástroje.

Tabulka 8: InOut FB MC_GroupReadActualPosition [46]

Název	Typ proměnné	Popis
AxesGroup	T_StaubliRobot	Data blok pro robot.

Funkční blok MC_GroupPower

Tento funkční blok řídí zapnutí a vypnutí pohonů robotu. Zapnutí a vypnutí pohonů robotu je možné pouze v případě, že je zvolen vzdálený automatický provozní režim. Provozní režim je vybírán pomocí pole Working Mode Selector. Zapnutí nebo vypnutí pohonů jednotlivých os robotu může trvat až 1 sekundu. Během této doby mají výstupní veličiny stavu různé hodnoty. Pokud dojde k chybě, je nutné, aby vstupní proměnná Enable znovu přešla do False a následně do True, aby se funkční blok znovu provedl. Nevyřízení chyby musí být potvrzeny pomocí funkčního bloku MC_GroupReset. Pokud je pro práci s robotem použit Teachpendant, tento funkční blok umožňuje vypnutí a zapnutí os v libovolném operačním módu [46].

Funkční bloky MC_GroupReset, MC_GroupStop, MC_GroupInterrupt, MC_GroupContinue

Tyto funkční bloky se spouštějí pomocí jedné proměnné typu BOOL. Funkční blok Reset umožňuje resetovat všechny čekající chyby na straně robotu. Telegramy přenášené mezi PLC a řídicí jednotkou robotu mohou skončit uvíznutím. Funkčním blokem lze restartovat výměnu dat. Funkční blok resetuje komunikační protokol a telegramy mohou být znovu vyměněny. Funkční blok Stop slouží ke kontrolovanému zastavení robotu. Funkční blok Interrupt slouží k pozastavení pohybu robotu a následně je možné pokračovat v pohybu použitím funkčního bloku Continue [46].

2.8 Programování robotů

Online programování

Online programování probíhá přímo u robotu za pomoci teachpendantu. Operátor za pomoci ručního řízení navádí robot do jednotlivých poloh. Tyto polohy jsou ukládány do řídicího systému. V dalším kroku operátor nastaví ovládání efektoru a jednotlivé rychlosti pohybů jednotlivých drah. Výhodou online programování je možnost testování programu za chodu a odladění chyb přímo v pracovním prostředí. Nevýhodou může být dlouhá doba programování, ale především zastavení výroby v pracovní jednotce [13].

Play back programování

V případech, kdy není potřeba vysoká přesnost polohování robotu, je možné použít play back programování. Při tomto typu programování je robot ručně veden operátorem, celý pohyb se v daném intervalu zapisuje do paměti a při přehrání programu robot přehraje zaznamenanou činnost. Výhodou této metody je rychlost vytvoření programu. Nevýhodami mohou být složitá ruční manipulace ve ztížených prostorech a dále nepřesnost vzniklá kvůli odlišnému zatížení robotu při manuálním vedení a samotném programu [15].

Offline programování

Offline programování je realizováno za pomoci digitálního dvojčete robotu na počítači mimo pracoviště robotu. Pro tyto účely jsou používány CAD/CAM systémy a robot studia. Pro každý konkrétní případ je nutno vymodelovat nové pracoviště a objekty.

Výhodami této metody jsou použití bez nutnosti zastavení výrobní buňky a možnost lepšího odladění polohování a celého procesu, snazší programování složitých trajektorií, například při programování svařovacího nebo obráběcího procesu. Nevýhodou je nutnost dalších investic mimo robot. Mezi nepoužívanější robot studia patří KukaSim, RobCad, RobotStudio, Stäubli Robotics Suite a další. Dále je možné použít CAD/CAM systémy jako například Siemens NX [14].

2.9 Zhodnocení

Z výše uvedené rešerše je patrné, že při měření obrobků na stroji nejsme schopni zdaleka dosahovat takové přesnosti, jako při měření na souřadnicových měřicích strojích. Přesnost vzorového obráběcího stroje Bray Bral je $\pm 0,02$ mm, jedná se ovšem pouze o přesnost, kterou lze dosáhnout na odměřování stroje. Volumetrická přesnost TCP na tomto stroji bude daleko nižší a bude mít nepříznivý vliv na celkovou přesnost stroje. Souřadnicové měřicí stroje určené pro přesné měření dílců dosahují vlivem konstrukce, vedení stroje, používaných rychlostí vysokých přesností až 1 μ m. Jak u obráběcích, tak u SMS strojů je přesnost závislá na měřené délce. Pro zpřesňování měření na stroji se nabízí použití přídavného měřicího zařízení, připevněném na angulárním robotu, který slouží jako polohovací zařízení. Angulární roboty díky své kinematice splňují všechny podmínky pro polohování měřicího zařízení, tedy jak změnu polohy, tak změnu orientace. Laserová měřicí zařízení dosahují vysoké přesnosti až $\pm 1 \mu$ m v rovině kolmé na laserový paprsek. Jelikož předpokládáme využití přídavného měřicího zařízení pro měření přímosti, přesnost polohování robotu do měření příliš nezasáhne. Důležitá je v tomto ohledu úhlová přesnost robotu, která musí být v rámci konceptu zařízení ověřena.

3 Cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce je návrh přídavného měřicího zařízení pro inprocesní měření využitelného ke zpřesňování měření na obráběcím stroji pro měření dílců nosníkového typu. Systém se bude skládat z průmyslového robotu nesoucího vhodné laserové měřicí zařízení a nadřazeného IPC/PLC. Je nezbytné zajištění komunikace mezi robotem, obráběcím strojem a laserovým systémem. Robot bude řízen v režimu externí automatiky pro polohování do optimální polohy pro měření. Měření dotykovou sondou na stroji bude probíhat mezi dvěma body určující přímkou pro polohování robotu. Robot bude v této pozici zabrzděn a na základě odchylky od přímosti na laserovém měřicím zařízení bude zpřesněna poloha obráběcího stroje. Na základě zadané konfigurace bude vybráno vhodné laserové měřicí zařízení pro vzdálenost měření 10 metrů. Robot s dosahem 1500 mm a vhodný model průmyslového počítače pro řízení celého systému. Pro řešení je určen řídicí systém stroje Heidenhain TNC 640.

Pro dosažení cíle diplomové práce byly definovány níže uvedené dílčí úkoly, které vedou ke splnění hlavního cíle.

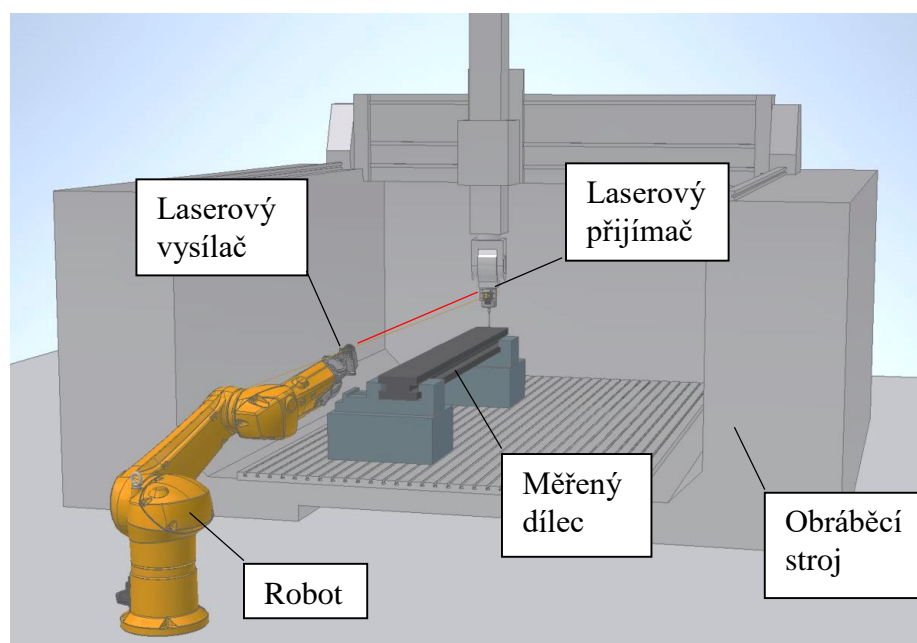
- Koncept systému a výběr komponent
- Architektura komunikace mezi komponenty
- Výpočet polohy a řízení robotu
- Ověření dosažitelné přesnosti

4 Návrh přídavného zařízení

Praktická část diplomové práce je zaměřena na výběr komponent, koncept systému inprocesního měření, upevnění přídavného zařízení, návrh komunikace mezi robotem, řídicím systémem stroje, měřicím systémem a IPC/PLC, výpočet optimální polohy robotu pro měření, tvorbu kompenzačních dat a návrh uživatelského rozhraní (HMI). Koncept systému je zaměřen na pozici robotu vůči obráběcímu stroji, návrh upevnění měřícího zařízení na robot a vřeteno CNC frézky. Návrh řešení komunikace mezi komponenty obsahuje potřebný hardware a software pro realizaci a druhy komunikací použité mezi jednotlivými komponenty. Pro výpočet optimální polohy robotu pro měření bylo zvoleno prostředí Matlab. Na závěr bude provedeno ekonomické zhodnocení navrženého systému a porovnání s alternativami.

4.1 Koncept systému

Koncept přídavného systému pro měření obsahuje rozmístění robotu, stroje a upevnění měřícího systému a je znázorněn na obrázku 18. Robot je umístěn co nejbližší ke stroji, jak to dovoluje rozvržení pracoviště. Robot je vůči stroji ustaven tak aby mířil na střed pracovního prostoru. Na robotu je umístěna příruba, ke které je upevněn vysílač laserového paprsku pro měření. Příruba je navržena tak, aby k ní bylo možné bezpečně upevnit vysílač. Příjímač laserového paprsku je upevněn na obráběcí hlavě CNC stroje.



Obrázek 18: Koncept systému přídavného odměřování

4.2 Výběr komponent

Pro výše uvedený koncept systému je nutné zvolit vhodná zařízení, která budou splňovat požadavky a předpoklady systému. Je nutné vybrat vhodné laserové měřicí zařízení, vhodný typ a velikost robotu a průmyslový počítač pro ovládání celého řešení.

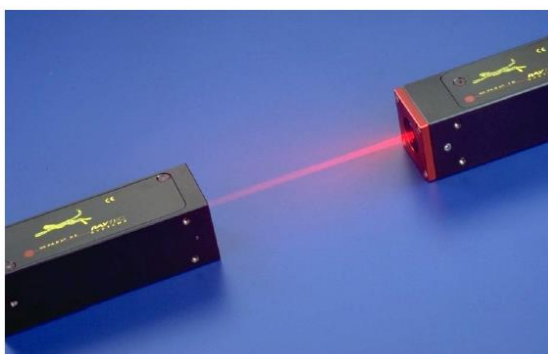
4.2.1 Laserová měřicí zařízení

Gepard 5bt

Laserové měřicí zařízení od firmy RAYTEC typu Gepard 5bt je zařízení určené k měření:

- Přímosti
- Kolmosti
- Úhlového natočení
- Rovinnosti
- Rovnoběžnosti
- Souososti

Zařízení Gepard 5bt (obrázek 19) pracuje s laserovým paprskem jako s referenčním etalonem přímosti. Manipulace s přijímačem a vysílačem je díky vlastním napájecím bateriím snadná. Přenos dat mezi přijímačem a vyhodnocovací jednotkou (počítačem) probíhá přes sériové standardní rozhraní (COM port) a na straně počítače pomocí USB. Přenos dat je možné realizovat buď bezdrátově za pomoci Bluetooth, nebo pomocí dvoupólového optického kabelu a přechodu na USB [52].



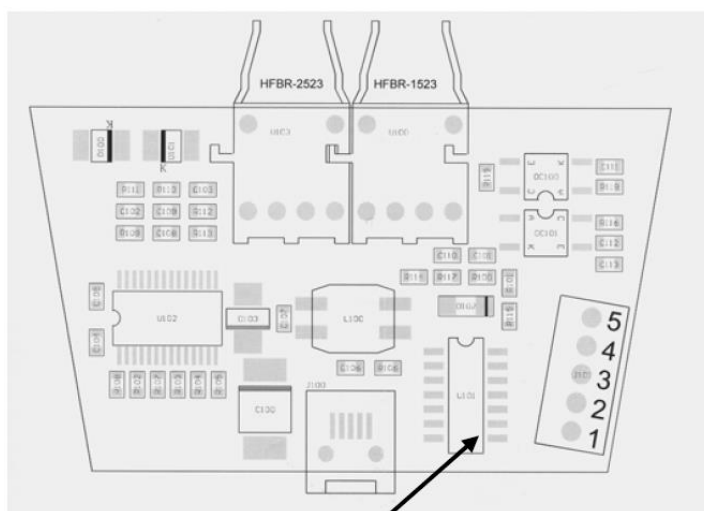
Obrázek 19: Laserové měřicí zařízení Gepard 5bt [53].

Výsledky měření mohou být zobrazeny číselně či graficky v softwaru Gepard. Zde lze využít zobrazení tolerančních polí, statistických funkcí a dalších režimů. Potřebné parametry měření lze uložit a využít je při dalším měření.

Naměřená data jsou ukládána pro další zpracování ve formátu ASCII. Měřicí zařízení zaznamenává jednotlivé hodnoty odchylek přímosti a jednotlivé body v grafu spojuje v křivku. Jednotlivé body křivky tedy značí jednotlivé body měření [52].

Externí spouštění měření

Zařízení umožňuje také externí spuštění měření (obrázek 20). Pro tento účel je na převodníku USB k dispozici speciální vstupní port. Tento port dokáže přiřadit řídicímu systému stroje M funkci. Díky tomu lze například při spojení s řídicím systémem CNC spustit řízení stroje. Připojení je realizováno za pomoci jednotlivých pinů na převodníku, které jsou vidět na následujícím obrázku schéma převodníku. Jednotlivé piny 1 a 2 jsou používány pro spouštění měření a piny 3, 4, 5 jsou používány jako zpětná vazba pro stroj [52].



Obrázek 20: Schéma USB převodníku [52].

SPS trigger (spouštění naměřené hodnoty)

Pin 1 : +VDC spouštění externí naměřené hodnoty (+ 5 V DC až + 24 V DC)

Pin 2 : GND pro spouštění externího měření

Zpětná vazba (zaznamenaná naměřená hodnota)

Pin 3 : +VDC „naměřená hodnota je v pořádku“ (+ 5 V DC až + 24 V DC)

Pin 4 : výstupní signál „naměřená hodnota je v pořádku“

Pin 5 : GND „naměřená hodnota v pořádku“

Technické parametry

V následujících tabulkách jsou technické parametry laserového měřicího zařízení Gepard 5bt, které je schopno splňovat dané parametry pro měřicí vzdálenost 15 metrů a rozsah provozní teploty 10 – 45 °C. V tabulce 9 jsou zobrazeny parametry vysílače a v tabulce 10 jsou vypsány parametry přijímače.

Tabulka 9: Technické parametry vysílače měřicího zařízení Gepard 5bt [53].

Vysílač	GEPARD 5bt
Výkonu laseru	1 mW
Třída laseru	2
Vlnová délka laseru	Cca 650 nm
Profil laserového paprsku	kruhový
Ø laseru v 20 m	Cca 6 mm
Zdroj	Li-Ion battery 7,2 V
Rozměry L x W x H	142 x 50 x 50 mm
Hmotnost	730 g vč. baterie

Tabulka 10: Technické parametry přijímače měřicího zařízení Gepard 5bt [53].

Přijímač	GEPARD 5bt
Měřicí rozsah (X/Y)	5 x 5 mm
Rozlišení rozsahu	0,1 μm
Linearita	0,4 ‰
Opakovatelnost	± 0,25 μm
Zdroj	7,2 V
Rozměry L x W x H	155 x 50 x 50 mm
Hmotnost	640 g vč. baterie

Renishaw XK10

Laserové měřicí zařízení od firmy Renishaw typu XK10 je zařízení určené k měření:

- Přímosti
- Kolmosti
- Úhlového natočení
- Rovinnosti
- Rovnoběžnosti
- Souososti

Měřicí systém je tvořen laserovým vysílačem, statickou a pohyblivou jednotkou a jednotkou displeje (viz obrázek 21). Laserový vysílač je primárním zdrojem paprsku s dosahem až 30 metrů. Statická a pohyblivá jednotka obsahují jak vysílač, tak přijímač. Ty mohou být nastaveny v různých konfiguracích dle zvoleného měření. Statická a pohyblivá jednotka komunikuje s displejem bezdrátovým připojením. Tyto jednotky mohou být používány v kombinaci. Každá jednotka obsahuje vlastní baterii [5].



Obrázek 21: Vysílač laserového měřicího zařízení Renishaw XK10 (vlevo), displejová jednotka (vpravo) [6].

V následujících tabulkách jsou parametry měřicího zařízení při měření v rozsahu vzdálenosti až 30 metrů a teplotního rozsahu 10 – 40 °C. V tabulce 11 jsou parametry vysílače laserového měřicího zařízení a v tabulce 12 jsou parametry přijímače.

Tabulka 11: Technické parametry vysílače měřicího zařízení Renishaw XK10 [6].

Vysílač	Renishaw XK10
Třída laseru	2
Zdroj	1x Baterie R14(C)
Rozměry L x W x H	139x169x139mm
Hmotnost	2,65 kg

Tabulka 12: Technické parametry přijímače měřicího zařízení Renishaw XK10 [6].

Přijímač	Renishaw XK10
Měřicí rozsah (X/Y)	± 5 mm
Zdroj	Baterie Li-Ion (2,4Wh)
Rozměry L x W x H	60x60x42mm
Hmotnost	200 g

Jednotka displeje slouží k zobrazování a zaznamenávání hodnot z měření. Displejová jednotka je vybavena softwarem XK10. Software lze nastavit pro jednotlivé měřicí úlohy pomocí málo nezbytných parametrů. Systém je vytvořen tak, aby byl schopen zaznamenávat data v reálném čase zejména pro využití při seřizování mechaniky stroje do specifikovaných tolerancí. Hodnoty z měření lze exportovat ve formátu dat PDF nebo XML. Data jsou exportována buď to za pomoci USB kabelu, nebo na flash disk [6].

Porovnání měřících zařízení

V následující tabulce 13 jsou porovnávány parametry měřících zařízení Renishaw XK10 a Gepard 5bt. Hodnoty jsou barevně odlišeny na základě toho, které zařízení daný parametr splňuje lépe. Zelenou barvou je vždy zobrazen parametr u toho zařízení, které je ve srovnání parametru lepší. Červenou barvou je naopak zvýrazněna horší hodnota parametru. Při rovnosti parametrů jsou hodnoty zvýrazněny žlutou barvou.

Tabulka 13: Porovnání měřících zařízení Renishaw XK10 a Gepard 5bt [2], [6].

	Renishaw XK10	GEPARD 5bt
Třída laseru	2	2
Rozměry vysílač	139x169x139mm	142 x 50 x 50 mm
Rozměry přijímač	60x60x42mm	155 x 50 x 50 mm
Hmotnost vysílač	2,65 kg	730 g
Hmotnost přijímač	200 g	640 g
Měřicí vzdálenost	0–30 m	0–15 m
Rozsah teplot	10–40°C	10–45°C
Měřicí rozsah	+ - 5 mm	+ - 5 mm
Výdrž baterie vysílače	24 hod	30 hod
Výdrž baterie přijímače	5 hod	5 hod
Čas zahřátí	30 min	20-30min
Přesnost	± 1 μm	± 0,25 μm
Rozlišení rozsahu	0,1 μm	0,1 μm

4.2.2 Roboty

Na základě kinematických požadavků, určené dosahu robotu 1,5 metru a hmotnosti laserového vysílače musí být vybrán vhodný průmyslový robotu pro polohování vysílače laserového paprsku.

Kuka - KR Cybertech nano

Společnost Kuka je německý mezinárodní koncern působící v oboru automatizace. Do portfolia společnosti patří především výroba robotů a plně automatizovaných zařízení zejména pro Automotive, elektronický průmysl, výrobu z kovů a plastu, zdravotnictví. Roboty kuka řady KR cybertech (obrázek 22) jsou výkonné malé průmyslové roboty používané pro manipulaci s malými díly, dále se využívá pro lepení, svařování, měření a paletování. Nosnost robotů je 8 kg a dosah robotu v pracovním prostoru je 1620 mm. Roboty vynikají přesností opakování až 0,04 mm. Díky štíhlé konstrukci těchto robotů je lze namontovat na podlahu, stěnu, strop nebo pod jakýmkoliv úhlem [8].



Obrázek 22: Robot KUKA KR Cybertech nano [8].

ABB - IRB 1660ID

Společnost ABB je švédsko - švýcarská nadnárodní společnost zabývající se čtyřmi oblastmi elektrotechnikou, procesní automatizací, pohony, robotikou a automatizací. Portfolio robotů obsahuje víceúčelové roboty, kolaborativní roboty, lakovací roboty, delta roboty a SCARA roboty. Roboty řady IRB 1660 (obrázek 23) nalézají využití především pro obsluhu strojů, manipulaci s materiálem a obloukové svařování. Roboty mají dosah až 1550 mm a možnost zatížení robotu až 6 kg.

Možnosti montáže jsou na podlaze, pod úhlem a také v obrácené poloze. Díky své konstrukci a ukrytí kabelových svazků jsou roboty schopny vykonávat rychlé a přesné pohyby [9].



Obrázek 23: Robot – ABB IRB 1660ID [9].

Fanuc - M-10

Společnost Fanuc je japonská firma poskytující produkty v oblasti automatizace, robotizace a řídicích systémů. Portfolio robotů Fanuc čítá devět řad průmyslových kloubových robotů a dále také kolaborativní roboty a roboty pro aplikaci lakování, svařování, paletizaci a svrchní montáž. Produktová řada robotů fanuc M-10 nabízí roboty s dosahem v pracovním prostoru až do 1636 mm s možností zatížení robotu do 10 kg. Příklad robotu je zobrazen na obrázku 24. Konstrukčně disponuje štíhlou kostrou s integrovanými kabely vevnitř struktury. Robot lze namontovat na podlahu, ale také pod úhlem a ke stropu. Přesnost opakování robotu je 0,03 mm [10].



Obrázek 24: Robot Fanuc M10 [10].

Stäubli - TX2-160

Stäubli je mezinárodní firmou zabývající se mechatronikou vyrábějící roboty, rychlospojky, upínací systémy a stroje pro textilní průmysl. V oblasti robotiky se zaměřují především na výrobu SCARA robotů a šestiosých průmyslových robotů. Dále vytvářejí řídicí systémy a software pro robotiku. Roboty řady TX2-160 (obrázek 25) díky své robustní a tuhé konstrukci jsou schopny přenášet objekty s hmotností až do 40 kg s maximálním možným dosahem 1710 mm. Díky krytování je možné tyto roboty využít v jakémkoliv prostředí. Konstrukce disponuje zakrytovanými pohony včetně převodovek a kabelovými svazky. Tyto roboty mají díky vlastní výrobě a výzkumu převodovek velmi dobrou účinnost. Přesnost opakování těchto robotů je 0,05 mm [11].



Obrázek 25: Robot Stäubli TX2-160 [11].

Porovnání robotů

V následující tabulce 14 jsou porovnány výše popsané roboty splňující požadavek dosahu robotu 1,5 metru a dostatečnou možnost zatížení robotu v závislosti na použitém měřicím zařízení. V tabulce parametrů jsou zobrazeny jednotlivé dosahy robotů v milimetrech, možnost jejich zatížení a přesnost opakování robotu. Hodnoty parametrů jsou barevně odlišeny. Zelenou barvou jsou označeny nejlepší hodnoty parametrů. Červenou barvou jsou označeny nejhorší hodnoty parametrů. Oranžovou barvou jsou poté zvýrazněny hodnoty parametrů nacházející se mezi nejlepšími a nejhoršími.

Tabulka 14: Porovnání robotů od různých výrobců [8], [9], [10], [11].

	Kuka KR Cybertech nano	ABB IRB 1660ID	Fanuc M-10	Stäubli TX2-160
Dosah	1620 mm	1550 mm	1636 mm	1710 mm
Nosnost	8 kg	6 kg	10 kg	40 kg
Opakovatelnost	0,04 mm	0,05 mm	0,03 mm	0,05 mm

4.2.3 Průmyslový počítač

IPC je označení pro průmyslový osobní počítač. Oproti standardním počítačům se liší vyšší odolností k okolnímu prostředí a spolehlivostí. Průmyslové počítače jsou obecně dražší než běžné počítače. Průmyslové počítače jsou navrženy tak, aby odolaly náročnému prostředí jako vyšší teploty, výskyt prachu, vlhkosti a vibrací. Ve většině IPC je využíván disk bez pohyblivých částí SSD. Napájení IPC je chráněno proti přepjetí a šumům. Často je pojištěno záložním napájecím zdrojem UPS. IPC je často vybaveno rozšířenými operačními systémy Windows nebo Linux a dále je v něm integrován tzv. soft real-time jádro. To zajišťuje upřednostnění procesů v rámci běhu řídicí aplikace [19].

IPC Beckhoff C6017

Průmyslový počítač Beckhoff C6017 (obrázek 26) má využití v řadě odvětví jako je ovládání strojů, procesů, logistických systémů, sběr dat, zpracování obrazu apod. IPC Beckhoff má procesor Intel Atom 1,3 GHz, možnost paměti RAM 4 – 8 GB DDR4. Využívá operační systém Windows 10 IoT Enterprise. Napájení je na 24 V DC. Má dvě USB rozhraní a dvě ethernetová rozhraní [19].


Obrázek 26: Průmyslový počítač Beckhoff C6017 [19].

Technická data

V následující tabulce 15 jsou podrobné parametry průmyslového počítače Beckhoff C6017, určeného k řízení menších průmyslových aplikací.

Tabulka 15: Parametry průmyslového počítače Beckhoff C6017 [19].

Třída ochrany	IP 20
Provozní teplota	0...50 °C
Rozměry (W x H x D)	82 x 82 x 66 mm (3.2" x 3.2" x 2.6"), bez montážního plechu
Procesor	Intel Atom x5-E3930, 1.3 GHz, 2 jádra (TC3: 40)
Paměť RAM	4 GB DDR4 RAM
Grafický adaptér	Integrovaný v procesoru
Ethernet	2 x 100/1000BASE-T on-board
Hard disk/flash	40 GB M.2 SSD
Rozhraní	2 x USB 3.0, 1 x DisplayPort
Zdroj	24 V DC
Operační systém	Windows 10 IoT Enterprise

Siemens Simatic IPC627E

Průmyslový počítač siemens řady IPC627E (obrázek 27) je vhodný pro měření, ovládání procesů a řízení robotů. Umožňuje vizualizace úkonů, sběr dat a ovládání pohybů. IPC obsahuje dvě gigabitová ethernetová rozhraní, dva grafické porty, šest USB portů, 4 LED diody jednu pro zdroj a ostatní tři pro aplikaci. Zdroj IPC je na 100/240 V AC (50/60 Hz), nebo 24 V DC průmyslový zdroj. Operačním systémem je Windows 10 Enterprise [18].



Obrázek 27: Průmyslový počítač Siemens simatic IPC627E [18].

Technická data

V následující tabulce 16 jsou podrobné parametry průmyslového počítače Siemens Simatic, určeného k řízení menších průmyslových aplikací.

Tabulka 16: Parametry průmyslového počítače Siemens simatic IPC627E [18].

Třída ochrany	IP 20
Provozní teplota	5 – 50°C
Rozměry (W x H x D)	314 x 93 x 301 mm
Procesor	Intel core i3 (4 jádra), Intel core i7 (6 jader), Intel Celeron (2 jádra)
Paměť RAM	4 – 64 GB DDR4
Grafický adaptér	2x display port, 1x DVI-D
Ethernet	3x Ethernet (RJ45)
Hard disk/flash	2.5“ SATA>320GB / SSD 512 GB
Rozhraní	3x Ethernet. 6x USB 3.1, 1x COM
Zdroj	100/240 V AC, 24 V DC
Operační systém	Windows 10 Enterprise

4.2.4 Zhodnocení

Na základě vytypovaných komponent byl zvolen laserový měřicí systém Renishaw XK10, zejména pro snadnější komunikaci s průmyslovým počítačem, který musí být vybaven operačním systémem Windows. Robot pro polohování přídavného zařízení byl zvolen robot Stäubli TX2 – 160. Průmyslový počítač pro ovládání systému byl zvolen počítač Beckhoff C6017.

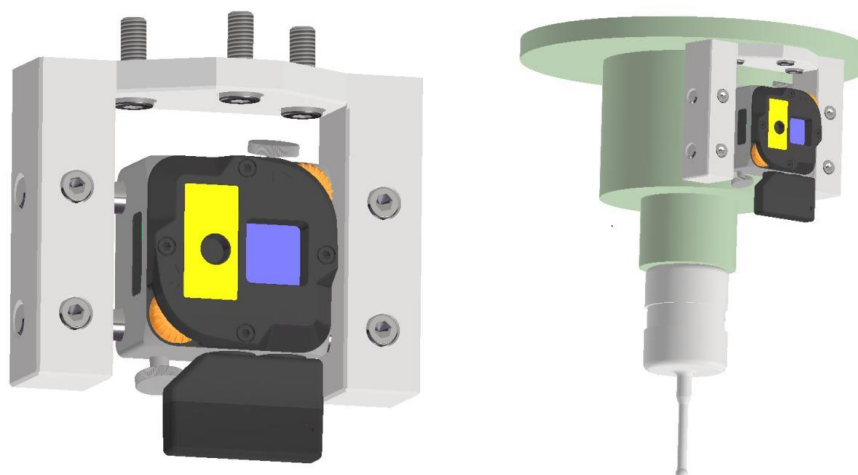
4.3 Návrh uchycení laserového systému

Vysílač laseru systému Renishaw XK 10 musí být upevněn k přírubě robotu a přijímač laserového paprsku na vřeteno obráběcího stroje. Pro dosažení maximální přesnosti je vhodná poloha v blízkosti dotykové sondy. Uchycení přijímače bylo navrženo ve dvou variantách, první je založena na šroubovém spojení, druhá na magnetickém.

Uchycení přijímače šrouby

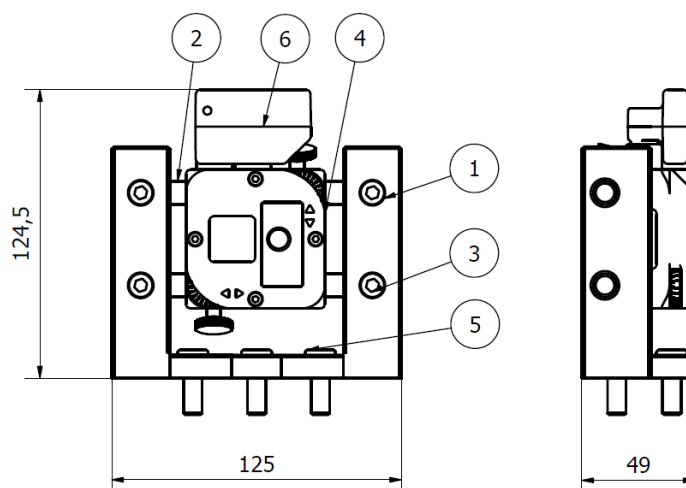
Uchycení přijímače laserového paprsku je realizováno třemi šrouby M8 s válcovou hlavou a délkou 20 mm. Pro uchycení konzole na obráběcí hlavu je nutné do plechu na konstrukci hlavy vyvrtat závity pro upevnění. Přijímač je ke konzoli uchycen pomocí dvou hladkých tyčí, pro které má ve své konstrukci vytvořen díry se šrouby pro upevnění.

Tyto hladké tyče jsou uchyceny v konzoli pomocí šroubů M6 s válcovou hlavou o délce 10 mm. Samotná konzole a také uchycení ke vřetenu je zobrazeno na obrázku 28.



Obrázek 28: Upevnění přijímače Renishaw XK10 na vřeteno stroje šrouby

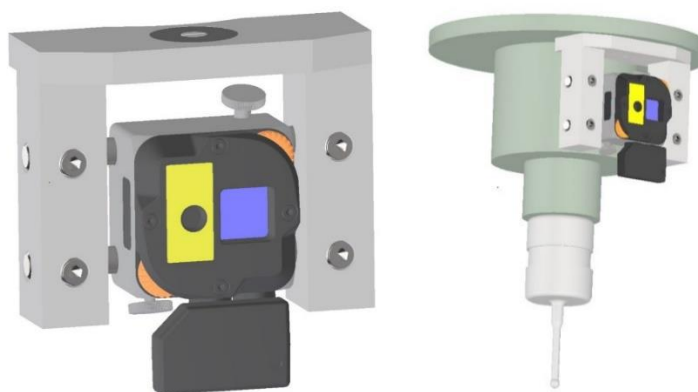
V níže uvedeném obrázku 29 lze vidět sestavu konzole. Konzole (pozice 1) je upevněna k vřetenu stroje pomocí třech šroubů s válcovou hlavou M8 (pozice 5). Přijímač (pozice 4) je upevněn ke konzoli pomocí hladkých tyčí (pozice 2), které jsou upevněny na konzoli pomocí čtyř šroubů s válcovou hlavou M6 (pozice 3). K přijímači je upevněn bezdrátový modul (pozice 6).



Obrázek 29: Výkres sestavy konzole pro uchycení přijímače šrouby

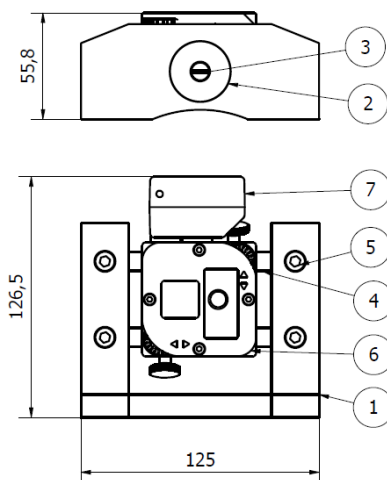
Uchycení přijímače magnetem

Pro uchycení přijímače laserové paprsku pomocí magnetu je navržena konzole s dírou pro magnet. Je použit neodymový magnet s dírou pro šroub M5 s kuželovou hlavou o délce 12 mm. Samotný přijímač je upevněn ke konzoli stejně jako u předchozího řešení pomocí hladkých tyčí a šroubů M6 s válcovou hlavou. Neodymový magnet o průměru 32 mm má nosnost až 30 kg. Návrh upevnění je znázorněn na obrázku 30.



Obrázek 30: Upevnění přijímače Renishaw XK10 na vřeteno stroje magnetem

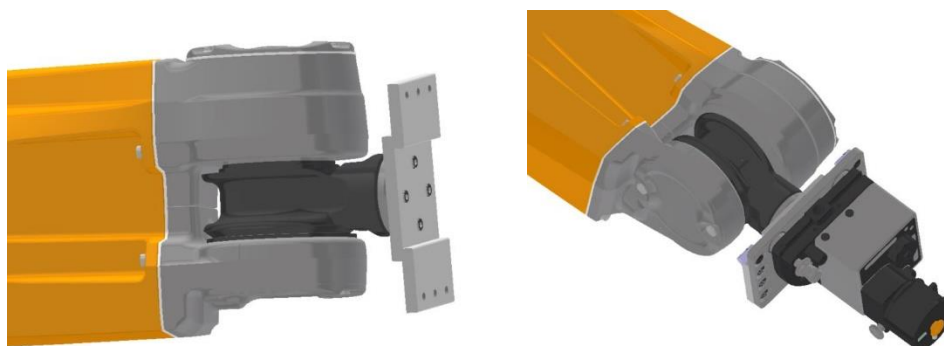
Na níže uvedeném výkresu sestavy (obrázek 31) se nachází samotná konzole (pozice 1). Neodymový magnet (pozice 2) je upevněn šroubem s kuželovou hlavou M5 (pozice 3). Přijímač (pozice 6) je ke konzoli připevněn pomocí hladkých tyčí (pozice 4). Pro uchycení hladkých tyčí jsou použity čtyři šrouby s válcovou hlavou M6 (pozice 5). K přijímači je taktéž připevněn modul pro bezdrátovou komunikaci (pozice 7).



Obrázek 31: Výkres sestavy konzole pro uchycení přijímače magnetem

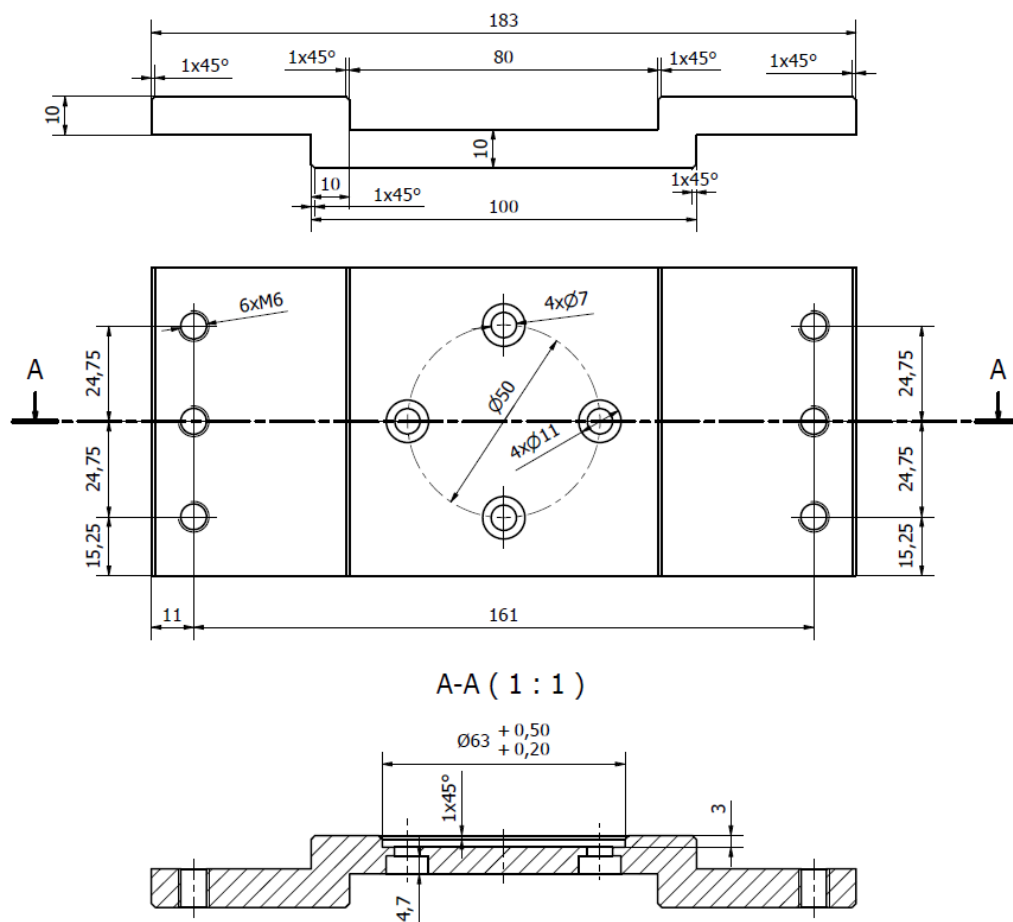
Uchycení vysílače k robotu

Pro uchycení vysílače laserového měřicího zařízení, byla navržena příruba, která má podobu jednoduchého plátu, který obsahuje díry pro šrouby, které jsou rozmístěny dle upevňovacího rozhraní na robotu a vysílači (obrázek 32). Upevnění příruby k robotu je realizováno pomocí čtyř šroubů M6 s válcovou hlavou o délce 16 mm. Upevnění vysílače k přírubě je provedeno s využitím uchycovací podložky od firmy Renishaw. Tato uchycovací platforma je připevněna k přírubě pomocí šroubů M8 s kulatou hlavou o délce 16 mm.



Obrázek 32: Upevnění vysílače Renishaw XK10 k robotu

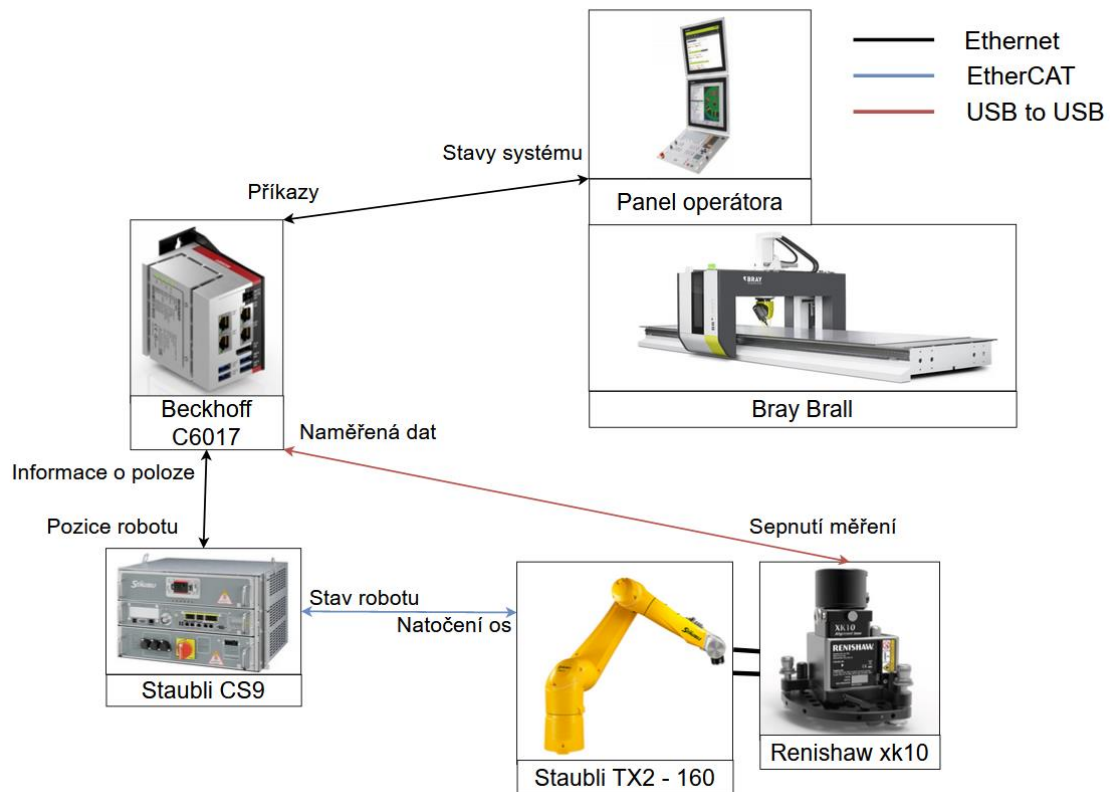
Na obrázku 33 je znázorněn výkres příruby pro upevnění laseru k robotu. Pro upevnění laserového vysílače k přírubě je do příruby vyvrtáno šest závitů pro šrouby M6. Pro upevnění příruby a tedy i vysílače k robotu jsou na přírubě vyvrtány díry pro šrouby M6 s válcovou hlavou. Tyto díry jsou vyvrtány na průměru 50 mm dle dispozic upevňovacího rozhraní na robotu. Do příruby je vyfrézována díra o průměru 63 mm, která je určena pro lepší usazení k robotu.



Obrázek 33: Výkres upevňovací příruby vysílače Renishaw XK10

4.4 Návrh komunikace

Při návrhu komunikace je nutné vyřešit fyzické připojení všech zařízení (robot, obráběcí stroj, laserové měřící zařízení) k IPC/PLC. Dále bylo nutné vyřešit typ komunikační sběrnice/protokolu a určit jaká data budou přijímána a odesílána. Na základě typů komponent a komunikací mezi nimi byla určena vývojová prostředí pro realizaci celého projektu. Návrh komunikace mezi jednotlivými komponenty je zobrazen na obrázku 34.



Obrázek 34: Návrh komunikace mezi komponenty systému

4.4.1 Uživatelské rozhraní navrženého systému

Pro ovládání celého řešení se nabízejí dvě varianty uživatelského rozhraní. První možností je připojení LCD panelu k průmyslovému počítači a ovládání celé aplikace z něj. Toto řešení však není zcela ideální, kvůli nutnosti práce operátora na dvou panelech (panel řídicího systému stroje a ovládací panel celého řešení) a přecházení mezi nimi. Jako ideálnější variantou se jeví připojení průmyslového počítače k řídicímu systému stroje a zobrazení aplikace na panelu stroje. Připojení LCD panelu k průmyslovému počítači lze realizovat pomocí USB nebo HDMI kabelu a používat průmyslový počítač jako běžný počítač s Windows. Pro zobrazení obrazovky na panelu stroje je nutno využít opci Remote Desktop Manager od Heidenhain. Pro vzdálené připojení se používá připojení přes ethernet.

Remote desktop manager

Opce 133 Remote desktop manager umožňuje manuální přístup z ovládacího panelu Heidenhain ke všem aplikacím Windows, které jsou připojeny k síti. Typické aplikace používané touto opcí jsou zobrazování technických výkresů, NC programů, nástrojových dat, výrobních postupů, informací o dostupných zásobách, zobrazení systémů MES a ERP. Remote desktop manager umožňuje bez prodlení prohlížet, zpracovávat a sdílet jakákoliv data a informace, které vznikají na stroji během výroby a které jsou vyžadovány jinde v procesním řetězci. Pomocí správce vzdálené plochy lze na ovládacím panelu stroje přepínat mezi ovládací obrazovkou a obrazovkou počítače se systémem Windows. Může se jednat o běžný počítač připojený v místní síti, nebo o průmyslový počítač v elektrické skříni jiného stroje. Pro přepínání zobrazení lze zvolit libovolnou kombinaci kláves na řídicím panelu stroje pro změnu zobrazení obrazovky. Na ovládacím panelu lze zobrazovat i výpočetně náročné CAD/CAM úlohy a další aplikace, které nijak neovlivní výkon řídicího systému a chod stroje [36].

Extended Workspace

Jedná se o řešení, které umožňuje paralelní práci na stroji a správu dalších aplikací. K řídicímu systému stroje je přes ethernet připojena druhá obrazovka (obrázek 35) s integrovaným počítačem. V řídicím systému je tato obrazovka konfigurována jako přídatný displej. To umožňuje práci na jiných aplikacích na druhé obrazovce, přičemž operátor neztrácí přehled o důležitých informacích stroje. Jelikož je obrazovka vybavena počítačem, tak tento počítač ulehčuje výkon hlavního počítače řídicího systému. Na druhé obrazovce lze tedy spustit mnoho různých aplikací, jako správu zakázek, Remote desktop manager, monitorování pracovního prostoru, obsluhu více strojů najednou, zobrazení přehledu stroje v programu StateMonitor. Extended workspace dostává od řídicího systému všechny potřebné informace a data stroje, které lze během procesů zpracovávat a zobrazovat [37].



Obrázek 35: Extended workspace pro řídicí systém Heidenhain TNC640 [49]

4.4.2 Komunikace Heidenhain TNC640 – IPC

Pro komunikace mezi průmyslovým počítačem a řídicím systémem stroje Heidenhain TNC 640 byla zvolena komunikace DNC (direct numerical control). Tato komunikace se používá také pro propojení řídicích systémů CNC strojů s firemní sítí. V řídicím systému musí být aktivována opce 18 DNC. Většina řídicích systémů obráběcích strojů nemá příliš velkou paměť na to, aby obsahovaly všechny NC programy. Pro takovýto případ je program uložen na samostatném počítači a odesílán z něj přímo do stroje. Lze také počítač připojit k více strojům a distribuovat programy do různých strojů podle potřeby. Obvykle každý výrobce řídicích systémů pro CNC stroje poskytuje vlastní software pro DNC. Komunikace DNC je vhodná pro automatizační řešení a s ním spojené ovládání CNC strojů na základě výroby [33], [34].

RemoTools SDK

Software RemoTools SDK je vývojový balík firmy Heidenhain pro interakci s TNC řídicími systémy. Komunikace probíhá pomocí TCP/IP protokolu. Díky tomu lze externími aplikacemi ve Windows číst a zapisovat data řídicího systému TNC. Hlavní součástí RemoTools SDK je komponenta Heidenhain DNC. Ta je založena na COM (Component Object Model) standardu společnosti Microsoft. To umožňuje možnost využití jakéhokoli programovacího jazyku. COM komponenta je integrována do vývojového prostředí což umožňuje snadný vývoj vlastních aplikací.

Lze použít jazyky jako C++, C#, VB.NET a další pro vlastní vývoj aplikace. COM komponenta je nezávislá na verzi COM, to eliminuje potřebu aktualizace stávající aplikace s každou verzí [35].

Oblasti použití RemoTools SDK jsou:

- Sběr strojních a provozních dat (MDA/PDA)
- Připojení k ERP/MES systémům vyšší úrovně
- Plánování preventivní údržby na základě skutečného stavu stroje
- Systémy hlášení chyb
- Přehled plánů se zobrazením aktuálních stavů stroje
- Sběr dat za účelem statistické analýzy

Funkcionality COM komponenty

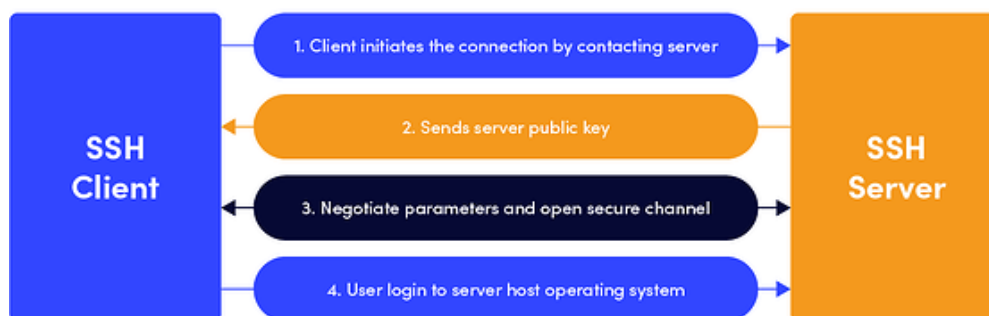
- Obecné funkce komunikace (konfigurace, zobrazení a stav připojení, zpřístupnění připojení)
- Zobrazení verzí (zobrazení verze NC sw, PLC programu, COM komponenty)
- Informace o procesu (zobrazení operačního času)
- Ovládání obrábění (změny nástrojů, vybrání a spuštění programu, přerušení programu, stav NC programu, změna override)
- Přístup k datům (přístup, změna dat, čtení dat)
- Práce se soubory (Vytváření, přejmenování a mazání složek a adresářů, přejmenovávání programů, přenos programů)
- Čtení chyb (čtení a vytváření kódů chyb, report errorů)
- PLC komunikace (posílání příkazů do PLC, čtení stavů z PLC)
- Přímý přístup k paměti PLC (přístup k vstupním a výstupním proměnným)
- Virtuální TNC (čtení aktuálních hodnot polohy os)

4.4.3 Komunikace -Renishaw – IPC

Propojení laserového měřicího systému a průmyslového počítače je realizováno pomocí USB to USB NMC kabelu. Pro komunikaci a čtení hodnot je použito Putty ssh klientu. Pro grafické znázornění výsledků měření je možné použít software Carto od firmy Renishaw určený pro vyhodnocování a tvorbu protokolů z měření, ale komunikace z externí aplikace s tímto softwarem není v tuto chvíli standardně podporována.

SSH Client Putty Log

SSH (Secure Shell) je označení pro zabezpečený komunikační protokol v počítačových sítích, které používají TCP/IP. Jedná se o bezpečnou alternativu k nechráněným přihlašovacím protokolům jako je Telnet nebo rlogin, a nezabezpečeným metodám přenosu souborů jako je například FTP. Tento protokol se obvykle používá v podnikových sítích pro poskytování bezpečného přístupu pro uživatele a automatizované procesy, interaktivní a automatizované přenosy souborů, vydávání dálkových příkazů, správu síťové infrastruktury a dalších důležitých systémových komponent. Protokol funguje v modelu klient – server, což znamená, že spojení je navázáno připojením SSH klienta k SSH serveru. Klient SSH řídí proces nastavení, připojení a používá kryptografii veřejného klíče k ověření identity serveru SSH. Po této fázi nastavení používá protokol SSH silné symetrické šifrování a hashovací algoritmy k zajištění soukromí a integrity dat, která jsou vyměňována mezi klientem a serverem [39]. Funkcionalita přenosu je znázorněna na obrázku 36.



Obrázek 36: Funkcionalita SSH klienta a serveru [39]

PuTTY je všestranný terminálový program, který je bezplatný pro Windows, Mac a Linux. Pomocí Putty lze ukládat informace o serverech a nastavení, vybírat protokol SSH a šifrovací klíč.

Putty log používá protokoly jako SSH, Telnet, Rlogin a SUPDUP ke spuštění vzdálené relace přes síť. V praxi funguje komunikace tak, že se spustí putty na počítači s Windows a připojí se k jinému zařízení. Poté cokoliv, co je zadáno do příkazového okna, je odesláno do zařízení, a co zařízení pošle zpět, je zobrazeno v příkazovém okně. Programování probíhá v jazyce C, nebo C++ [38]. Tímto způsobem je možné vyřešit komunikaci mezi Renishaw XK10 a řídicí aplikací.

4.4.4 Komunikace Robot – IPC

Komunikaci mezi IPC a řídicí jednotkou robotu Stäubli umožňuje knihovna TwinCAT 3 Robotics uniVAL PLC. Komunikace probíhá přes EtherCAT přičemž TwinCAT a řídicí jednotka robotu si vyměňují data jako master slave. Použitím této komunikace odpadá nutnost řešení problému vzájemné synchronizace všech systémů zapojených do automatizace a také odpadá nutná znalost různých programovacích jazyků, protože lze celé řešení programovat na jednom IPC. Na jednom IPC tak může běžet vlastní řídicí program a může zde probíhat současně sběr a vizualizace dat. Spolu s TwinCAT 3 může na IPC v prostředí Windows běžet úloha mimo reálný čas a komunikaci mezi aplikačními programy zde zajišťuje komunikační vrstva ADS. Díky této komunikaci lze programovat pohyby robotu přímo v PLC a porovnávat je se skutečnými hodnotami v reálném čase. Prostřednictvím tohoto rozhraní lze také aktivovat na základě aktuálních hodnot další pohybové programy, které se nacházejí v databázi řídicí jednotky robotu. Pro programování tedy není nutné znát žádný speciální jazyk a vše lze programovat v PLC. Při použití nástroje uniVAL PLC se zpracovává kinematická úloha na straně řídicí jednotky robotu. V prostředí TwinCAT 3 pomocí funkčních bloků lze přistupovat k databázi uložených bodů trajektorie robotu. Balík uniVAL obsahuje řadu funkcí pro řízení polohy a pohybu. Trajektorie lze zadávat pomocí funkčních bloků, nebo pomocí G kódu, který je zpracováván vestavěným interpretem. UniVAL obsahuje také balíček kinematických transformací jak pro sériové, tak i pro paralelní kinematické struktury. Při řízení je možné dosáhnout odezvy řídicí smyčky kratší než 500 μ s. UniVAL podporuje celou řadu kinematik, jako například 3D delta roboty, SCARA roboty, hexapody, či klasické šestiosé roboty [45].

EtherCAT

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) je systémová sběrnice založená na ethernetu vyvinutá společností Beckhoff. Protokol je standardizován v IEC 61158 a je vhodný pro výpočty v reálném čase v automatizační technice. Cíle při vývoji bylo použití ethernetu pro automatizační aplikace s nízkou dobou taktu. EtherCAT není standardní ethernetový paket. Podřízená zařízení etherCAT čtou data, která jim jsou adresována, zatímco telegram prochází zařízením a zpracovává data [42].

TwinCAT 3

TwinCAT 3 je vývojové prostředí od firmy Beckhoff pro konfiguraci řízení, řízení pohonů, ovládání vstupů a výstupů. Programování PLC lze taktéž provádět v prostředí Visual Studio. Programy lze sledovat a ladit online. Vstupy a výstupy PLC lze připojit s vstupy a výstupy I/O. Pro programování modulů v C++ je používáno rozhraní visual studia pomocí průvodce. TwinCAT 3 lze připojit k systémům správy zdrojového kódu. Vývojové prostředí podporuje programovací jazyky IEC 61131-3 jako FB function block diagram, LD ladder diagram, ST structure text a další jako IL instruction list, SFC sequential function chart. Obsahuje také kompilátor zdrojového kódu, integrovaný správce systému pro konfiguraci cílového systému. Lze taktéž integrovat uživatelské rozhraní pro parametrizaci modulů generovaných v MATLAB/Simulink. Je možné instalovat projekty v .NET, například pro HMI. [43]

4.5 Výpočet optimální polohy robotu

Pro vývoj výpočtu optimální pozice robotu pro měření byl použit software Matlab. V něm byl vytvořen algoritmus a také následná vizualizace výsledku pro ověření výpočtu. Při výpočtu optimální pozice se vycházelo z třech možných stavů. Prvním stavem je polohování robotu do nejbližší možné pozice od prvního bodu měření. Tento stav nastává v případě, kdy se první bod měření (bližší bod z dvou bodů určující přímku po které probíhá měření) nachází mimo dosah robotu a není ani možné polohovat robot do předem definované vzdálenosti (například 100 mm od bodu). Druhý stav, který může nastat, je, pokud se robot nachází dostatečně blízko k prvnímu bodu měření a může měřit v definované bezpečné vzdálenosti 100 mm od bodu. Třetím stavem je případ, kdy není možné polohovat robot tak, aby robot dokázal nasměrovat laser na střed přijímače laserového paprsku.

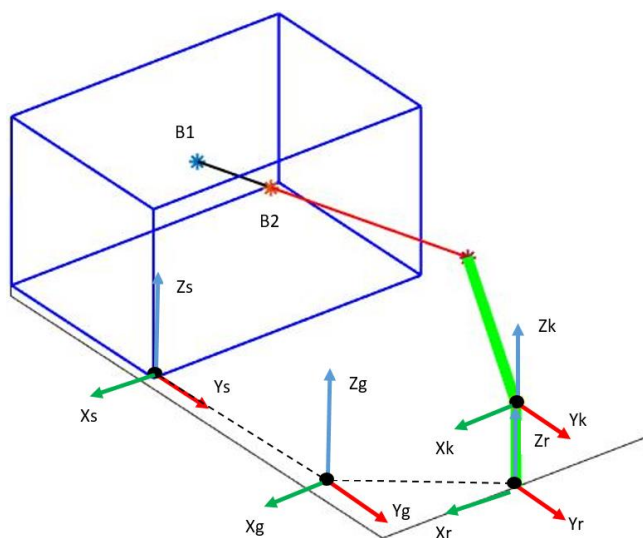
Transformace souřadnic

Přepočet souřadných systémů probíhá přes transformační matice (obrázek 37). Pro výpočet je použit souřadný systém robotu (T_r), globální souřadný systém (T_g), a souřadný systém stroje (T_s). Dále je do transformačních matic zavedena transformace přes druhou osu robotu, od které je počítán dosah robotu pro výpočet.

$$T_{kb1} = T_{kr} \cdot T_{rg} \cdot T_{gs} \cdot T_{sb1} \quad (1)$$

$$T_{kb2} = T_{kr} \cdot T_{rg} \cdot T_{gs} \cdot T_{sb2} \quad (2)$$

$$T_{kb1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{kb1} \\ 0 & 1 & 0 & y_{kb1} \\ 0 & 0 & 1 & z_{kb1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{kb2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{kb2} \\ 0 & 1 & 0 & y_{kb2} \\ 0 & 0 & 1 & z_{kb2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$



Obrázek 37: Transformace souřadných systémů

Výpočet vzdálenosti bodů od robotu

Na základě vzdálenosti bodů od robotu jsou krajní body indexovány tak, že vzdálenější bod má index 1 a bližší bod má index 2.

Vzdálenost bodu 1 od robotu

$$L_1 = \sqrt{(X_{kb1}^2 + y_{kb1}^2 + z_{kb1}^2)} \quad (4)$$

Vzdálenost bodu 2 od robotu

$$L_2 = \sqrt{(X_{kb2}^2 + y_{kb2}^2 + z_{kb2}^2)} \quad (5)$$

Vzdálenost bodu 1 od bodu 2

$$L_{12} = \sqrt{((x_2 + x_1)^2 + (y_2 + y_1)^2 + (z_2 + z_1)^2)} \quad (6)$$

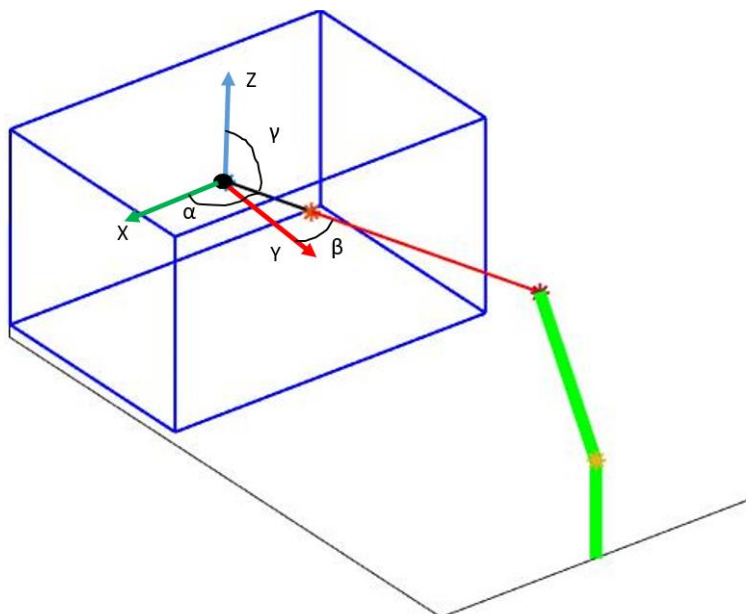
Výpočet úhlů natočení přímky v prostoru

Natočení přímky v prostoru kolem jednotlivých os je znázorněno na obrázku 38.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{x_2 - x_1}{L_{12}} \right) \quad (7)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{L_{12}} \right) \quad (8)$$

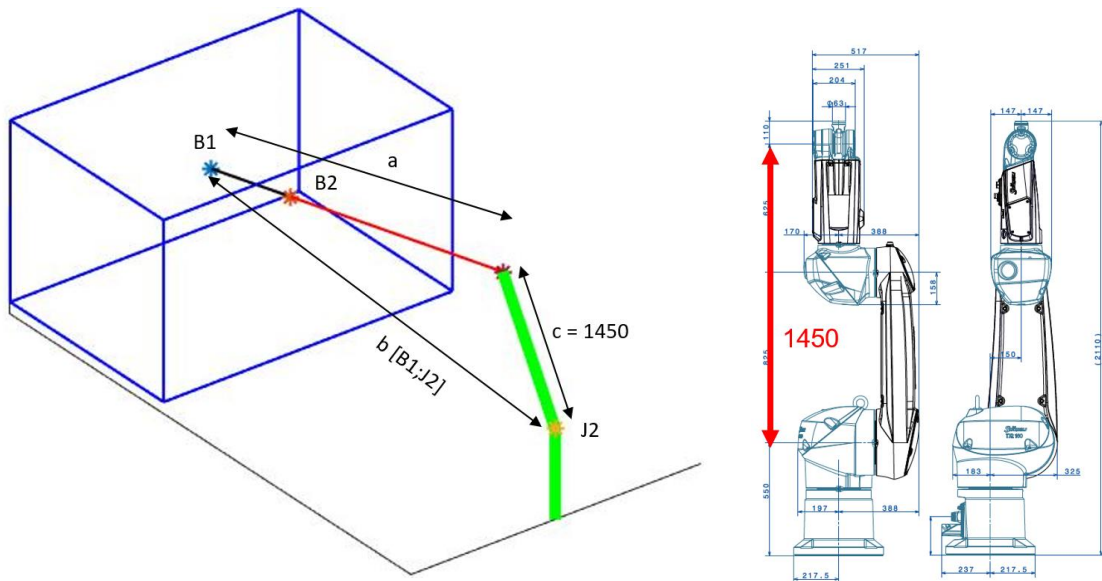
$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{z_2 - z_1}{L_{12}} \right) \quad (9)$$



Obrázek 38: Úhly natočení přímky v prostoru

Výpočet úhlu mezi přímkou pro měření a spojnicí mezi druhou osou robotu a prvním bodem měření

Přímky jsou dány dvěma vektory. Přímka pro měření je dána vektorem daným dvěma body, mezi kterými probíhá měření (obrázek 39 vlevo). Spojnice bodu 1 a druhé osy robotu je dána hodnotami X,Y a Z z transformační matice mezi druhou osou a bodem 1. Vzdálenost druhé osy robotu od páté je zobrazena na obrázku 39 vpravo.



Obrázek 39: Výpočet nejbližšího bodu pro zaploňování robotu (vlevo) vyznačená vzdálenost mezi osou 2 a 5 (vpravo) použitá pro výpočet

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} -Tkb1_X \\ -Tkb1_Y \\ -Tkb1_Z \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\cos \alpha_m = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|} = \frac{u_1 v_1 + u_2 v_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \quad (12)$$

$$\alpha_m = \cos^{-1} \left(\frac{u_1 v_1 + u_2 v_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \right) \quad (13)$$

Výpočet bodu pro optimální polohování

Optimální pozicí je myšlena minimalizace vzdálenosti pro dosažení maximální přesnosti měření. Pomocí kosinovy věty je vypočtena hodnota a , tedy poloha bodu pro zapolohování robotu v souřadném systému stroje. Proměnná c zde představuje dosah robotu a proměnná b představuje vzdálenost bodu jedna od druhé osy robotu. Výsledkem jsou dvě hodnoty bodu a , přičemž pro další výpočet je použita menší hodnota z nich. Tedy hodnota, při které je robot polohován blíže ke stroji. Pokud hodnota pod odmocninou je menší než nula, znamená to, že robot nelze do bodu polohovat a přímka pro měření se tedy nachází mimo dosah robotu. Tento případ byl v programu vyřešen stavem $a_1=a_2=0$.

$$a_1 = c \cdot \cos(\alpha_m) - \sqrt{b^2 + c^2 \cdot \cos(\alpha_m)^2 - c^2} \quad (14)$$

$$a_2 = c \cdot \cos(\alpha_m) + \sqrt{b^2 + c^2 \cdot \cos(\alpha_m)^2 - c^2} \quad (15)$$

Výpočet bodu pro nejbližší možné zapolohování robotu

$$X_{b3} = X_1 + a \cdot \cos(\alpha) \quad (16)$$

$$Y_{b3} = Y_1 + a \cdot \cos(\beta) \quad (17)$$

$$Z_{b3} = Z_1 + a \cdot \cos(\gamma) \quad (18)$$

$$T_{sb3} = T_x(X_{b3}) \cdot T_y(Y_{b3}) \cdot T_z(Z_{b3}) \quad (19)$$

$$T_{kb3} = T_{kr} \cdot T_{rg} \cdot T_{gs} \cdot T_{sb3} \quad (20)$$

Výpočet bodu pro polohu robotu 100 mm od přijímače

$$X_e = X_2 + offset \cdot \cos(\alpha) \quad (21)$$

$$Y_e = Y_2 + offset \cdot \cos(\beta) \quad (22)$$

$$Z_e = Z_2 + offset \cdot \cos(\gamma) \quad (23)$$

$$T_{sbe} = T_x(X_e) \cdot T_y(Y_e) \cdot T_z(Z_e) \quad (24)$$

$$T_{kbe} = T_{kr} \cdot T_{rg} \cdot T_{gs} \cdot T_{sbe} \quad (25)$$

Vzdálenost bodu 100 mm od přijímače od kloubu robotu

$$L_e = \sqrt{(X_{ke}^2 + y_{ke}^2 + z_{ke}^2)} \quad (26)$$

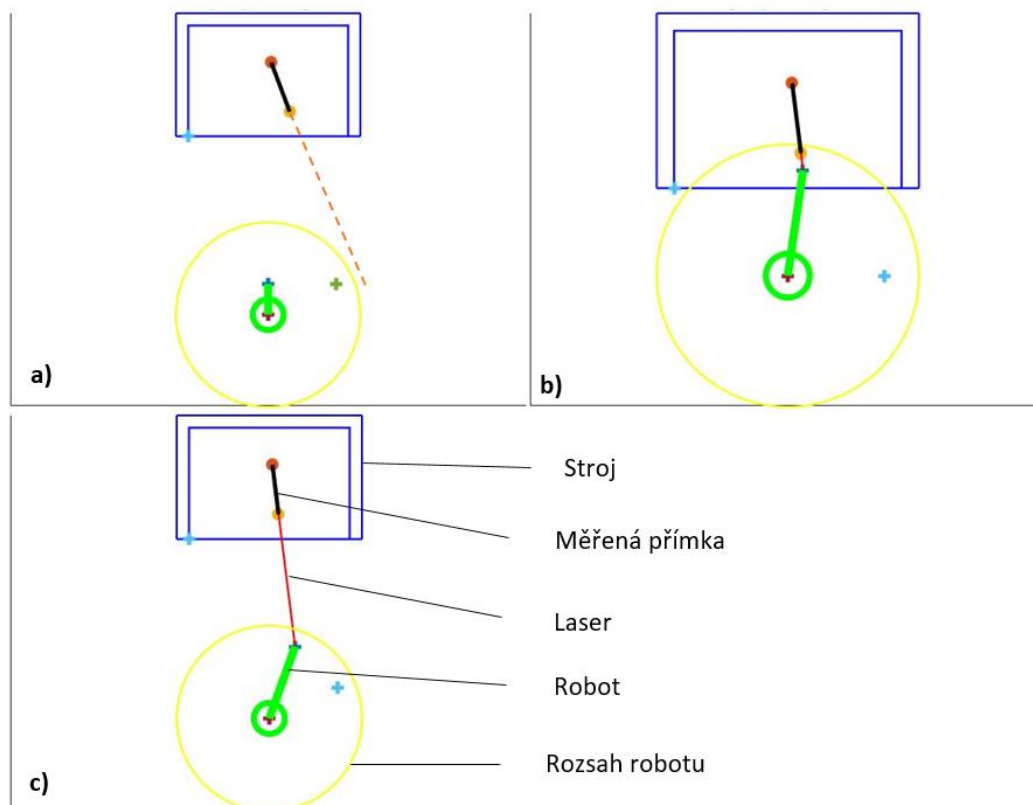
Stavový automat pro polohování robotu

První podmínka v programu zjistí, zda je možné robot polohovat do definované bezpečné vzdálenosti od prvního měřeného bodu. Pokud ano, vypočte hodnotu pro polohování robotu. Pokud ne, pokračuje další podmínkou, která zjišťuje, zda existuje nějaká nejbližší možná poloha pro robot, ve které je možné provést měření. Pokud ne, robot zůstává v aktuální pozici. Pokud ano, robot se zapoložuje do nejbližšího možného bodu pro měření. Kód pro výběr stavu robotu je zobrazen v tabulce 17.

Tabulka 17: Stavový automat pro polohování robotu

Zápis v Matlabu
<pre> if Le <= 1500 && not (a==0) Trp = Tz(550)*Tkbe; elseif a == 0 Trp = Tstart; else Trp = Tz(550)*Tkb3; end X = Trp(1,4) Y = Trp(2,4) Z = Trp(3,4) x_uhel = 180-alfa_bod*180/pi y_uhel = 180-beta_bod*180/pi z_uhel = 180-gama_bod*180/pi if a == 0 fprintf('Mimo dosah robotu'); end </pre>

Jednotlivé stavy v závislosti na zadaných bodech jsou v prostředí Matlab zobrazeny formou 3D grafu. V němž jsou znázorněny jednoduchým drátovým modelem. Kde zelenou barvou je znázorněn robot, modrou barvou je znázorněn stroj a červenou barvou je znázorněn laserový paprsek. Na níže uvedeném obrázku 40 jsou zobrazeny tři možné stavy robotu.

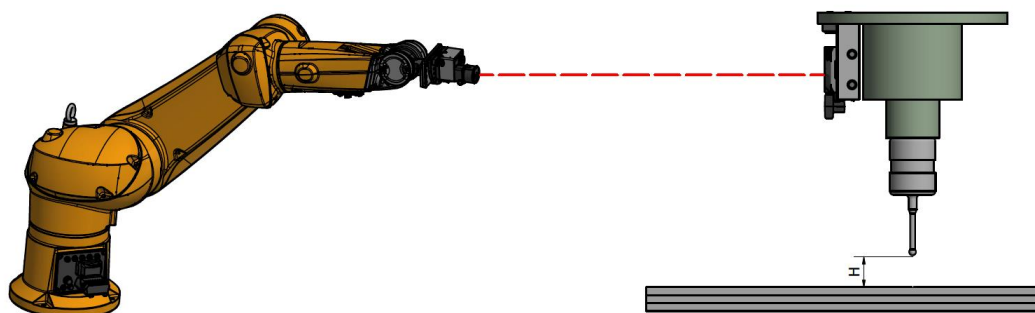


Obrázek 40: Stavy robotu a) Mimo dosah, b) Definovaná vzdálenost, c) Nejbližší bod

4.6 Měření dotykovou sondou

Pro správné zpřesnění měření dotykovou sondou na stroji laserovým měřicím zařízením je zapotřebí zajistit včasnou synchronizaci odečtení pozice dotykové sondy řídicím systémem a odchylku laserovým měřicím zařízením. Pohyb stroje nelze v místě sepnutí sondy zastavit, proto zavedeme zjednodušení, při kterém budeme odečítat hodnotu odchylky, až po odjetí do definované vzdálenosti od bodu dotyku. Jelikož vzdálenost odjezdu od bodu dotyku je parametrem cyklu v řídicím systému stroje a předpokládáme, že tedy stroj ve všech měřených bodech odjede o stejnou vzdálenost, budeme snímat odchylku dotykové sondy až v místě odskoku.

K zadaným bodům, které nám definují přímku, po které se bude měřit, přičteme hodnotu tohoto odskoku. Pro přesné odečtení hodnot nastavíme do NC programu prodlevu, která nám zajistí odměření odchylky po ustálení stroje a měřícího zařízení. Schéma odměrování odchylky TCP stroje je zobrazeno na obrázku 41.



Obrázek 41: Schéma odečtení odchylky stroje laserem

Před měřením je nutné dotykovou sondu kalibrovat. K tomu bude využito cyklu 461 a 462 řídicího systému Heidenhain TNC 640. Pro měření dotykovou sondou využijeme cyklu 4 z řídicího systému Heidenhain TNC 640. Klíčovými parametry pro tento cyklus pro nás jsou směr najetí k měřenému bodu a vzdálenost odjetí sondy od měřeného bodu. Příklad cyklu je zobrazen na obrázku 42.

```

4 TCH PROBE 4.0 MERENI VE 3-D
5 TCH PROBE 4.1 Q1
6 TCH PROBE 4.2 IX-0.5 IY-1 IZ-1
7 TCH PROBE 4.3 ABST+45 F100 MB50
  VZTAZNY SYSTEM:0
  
```

Obrázek 42: Příklad zadání parametrů cyklu 4 [47]

Pro následnou prodlevu mezi jednotlivými měřeními a pro ustálení stroje při měření laserem použijeme cyklus 90 řídicího systému Heidenhain TNC 640. Jako parametr je zde čas v sekundách. Příklad cyklu je zobrazen na obrázku 43.

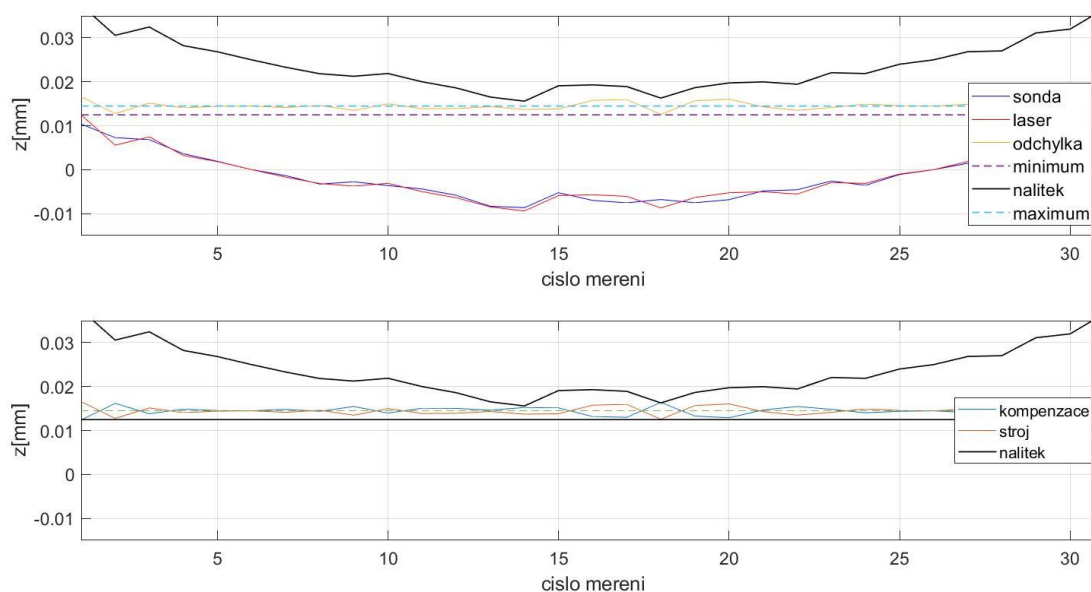
```

89 CYCL DEF 9.0 CASOVA PRODLEVA
90 CYCL DEF 9.1 PRODLV 1.5
  
```

Obrázek 43: Příklad zadání parametrů cyklu 90 [47]

4.7 Výpočet kompenzačních dat

Kompenzační data budou generována na základě měření dotykovou sondou na stroji a měření laserovým vysílačem a přijímačem. Hodnota odchylky od jmenovitého rozměru naměřená dotykovou sondou bude porovnána s hodnotou odchylky naměřené laserem. Na základě toho bude vypočtena geometrická přesnost měřeného dílce a ta bude využita při následném obrábění proměřené plochy obrobku. Na základě měření bude vyhodnocena odchylka od jmenovité hodnoty naměřená na obrobku a zpřesněná o měření laserem. Na základě měření bude vyhodnoceno, zda obrobek vyhovuje zadané toleranci. Pro simulaci výpočtu kompenzačních dat bylo využito prostředí Matlab. V následujícím obrázku 44 je znázorněn průběh měření dotykovou sondou (modře) a zpřesněný průběh měření laserem (červeně). Černou linkou je znázorněn (nálitek) přídavek na obrobku předpřipravený k obrobení tak, aby bylo možné vyrobit vodorovnou plochu. Na obrázku je znázorněna čerchovaná čarou tolerance pro obrobení. Na horní mezi tolerance je znázorněn oranžovou čarou průběh obrobení strojem s volumetrickou chybou, kterou chceme eliminovat. Na spodním obrázku jsou znázorněna kompenzační data, která budou vyslána do stroje. Stroj na základě těchto dat upraví dráhu při obrábění a výsledný povrch bude mít přesnější tvar.



Obrázek 44: Simulace výpočtu kompenzačních dat

Výpočet kompenzačních dat pro stroj

Nejprve je vypočtena volumetrická chyba stroje pro danou souřadnici měření. Výpočet se skládá z hodnoty naměřené sondou na stroji, z hodnoty naměřené laserem a požadované hodnoty. Dále je pomocí volumetrické chyby určena zpřesněná hodnota rozměru obrobku měřená na stroji. Následně je vypočtena opačná hodnota volumetrické chyby jako kompenzační hodnota pro stroj.

$$Z_{\text{volum}} = (-1) \cdot (Z_{\text{sonda}} - \text{Value} + Z_{\text{laser}}) \quad (27)$$

$$Z_{\text{skut}} = Z_{\text{sonda}} + Z_{\text{volum}} + \text{Value} \quad (28)$$

$$Z_{\text{komp}} = (-1) \cdot Z_{\text{volum}} \quad (29)$$

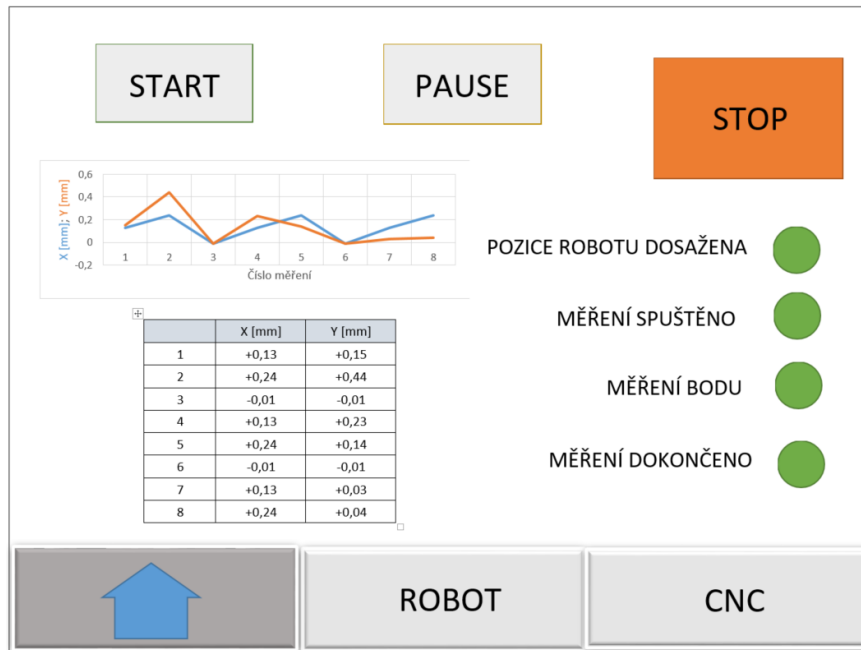
Kde Z_{volum} je hodnota volumetrické chyby stroje v Z-tové souřadnici. Z_{sonda} je hodnota naměřená sondou v ose Z. Proměnná Value zde představuje jmenovitou hodnotu v ose Z. Z_{laser} je hodnota odchylky v Z naměřená na přijímači laserového paprsku. Z_{skut} je zpřesněná hodnota Z-tové souřadnice. Z_{komp} je kompenzační hodnota Z-tové souřadnice.

4.8 Návrh uživatelského rozhraní

Uživatelské rozhraní (HMI – *Human machine interface*) bude realizováno formou jednoho displeje, na kterém bude možné přepínat mezi domovskou obrazovkou, obrazovkou pro ovládání robotu a obrazovkou stroje. Uživatelské rozhraní bude zobrazeno přímo na řídicím panelu stroje.

Domovská obrazovka

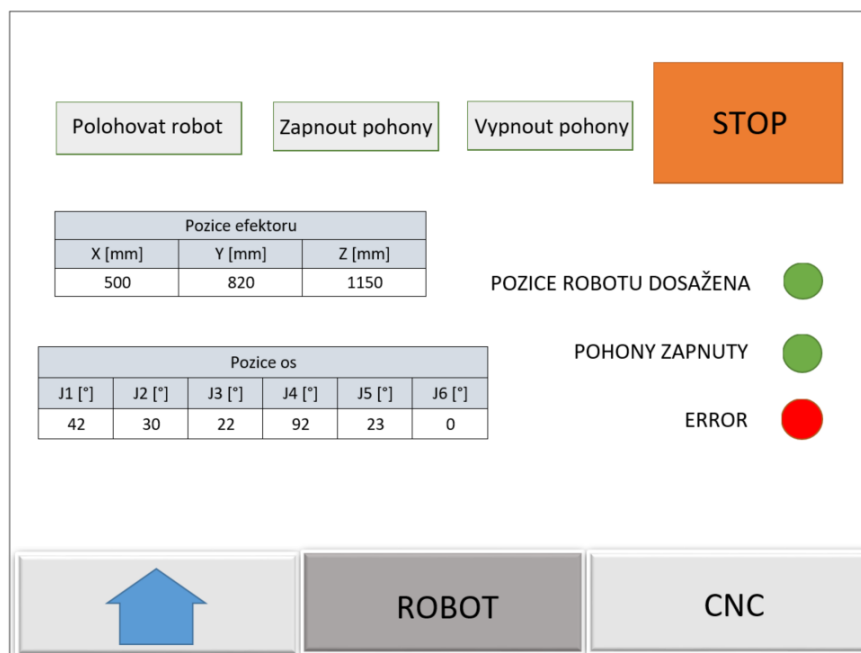
Na této obrazovce bude ovládán celý systém. Lze zde spustit měření, následně jej pozastavit, nebo zcela zastavit. Dále zde bude možné sledovat průběh měření v grafickém znázornění a stavy stroje a robotu, které znázorní kontrolky (obrázek 45). Na této obrazovce bude znázorněna tabulka naměřených hodnot během měření.



Obrázek 45: HMI - domovská obrazovka

Obrazovka pro robot

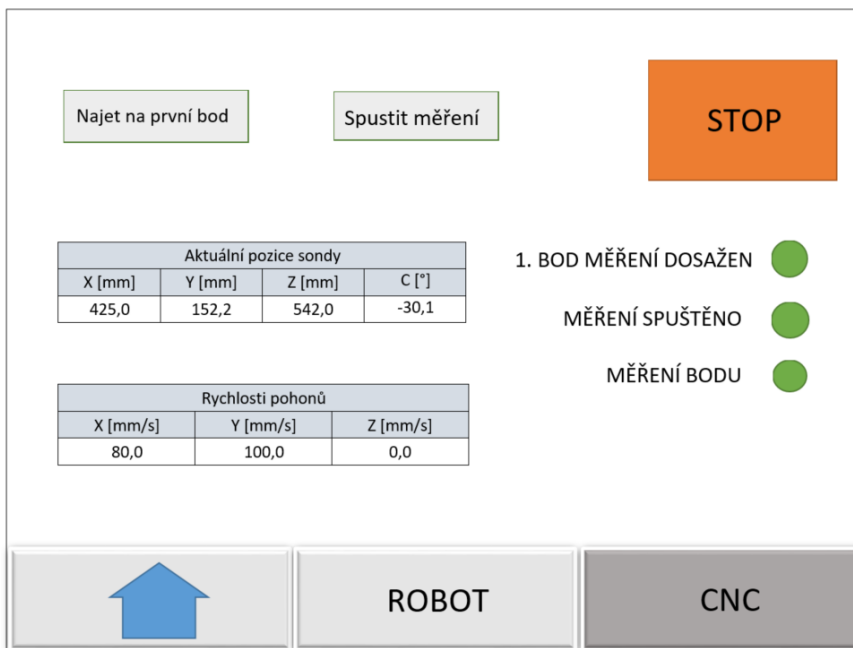
Zde bude možné ovládat robot, polohovat jej do optimální pozice, zastavit jej, nebo vypnout pohony. Na této obrazovce budou znázorněny hodnoty polohy efektoru robotu v milimetrech, natočení jednotlivých os ve stupních a stavy robotu zobrazené pomocí kontrolky viz obrázek 46.



Obrázek 46: HMI - obrazovka robotu

Obrazovka stroje

Z obrazovky pro stroj půjde ovládat měření dotykovou sondou na stroji. Lze spustit měření, či jenom najet na první měřený bod. Budou zde zobrazeny rychlosti pohonů v mm/s, pozice sondy v milimetrech vzhledem k souřadnému systému stroje a stavy stroje při měření viz obrázek 47.



The HMI interface includes the following elements:

- Control buttons: "Najet na první bod" (Go to first point), "Spustit měření" (Start measurement), and a large orange "STOP" button.
- Position data table:

Aktuální pozice sondy			
X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	C [°]
425,0	152,2	542,0	-30,1
- Speed data table:

Rychlosti pohonů		
X [mm/s]	Y [mm/s]	Z [mm/s]
80,0	100,0	0,0
- Status indicators:
 - 1. BOD MĚŘENÍ DOSAŽEN (1st measurement point reached) - Green circle
 - MĚŘENÍ SPUŠTĚNO (Measurement started) - Green circle
 - MĚŘENÍ BODU (Measurement point) - Green circle
- Mode selection buttons: A blue arrow pointing up, "ROBOT", and "CNC".

Obrázek 47: HMI - obrazovka stroje

5 Experiment

Provedené experimenty sestávaly z ověření navržené komunikace a změření přesnosti polohování robotu.

5.1 Měření přesnosti robotu

Pro měření robotu byl použit laserový měřicí systém Renishaw XM-60. Jedná se o laserový měřicí systém schopný měřit chyby v šesti stupních volnosti současně. Používá se zejména pro měření geometrické přesnosti pohybových os. Laserový systém se skládá z vysílače (obrázek 48 vlevo) a přijímače (obrázek 48 vpravo) laserového paprsku. Zdroj paprsku je helium neonový laser a LED dioda. Přesnost měření na tomto zařízení se pohybuje okolo $\pm 1 \mu\text{m}$.



Obrázek 48: Renishaw XM60(vlevo zdroj laserového paprsku, vpravo přijímač laserového paprsku) [50]

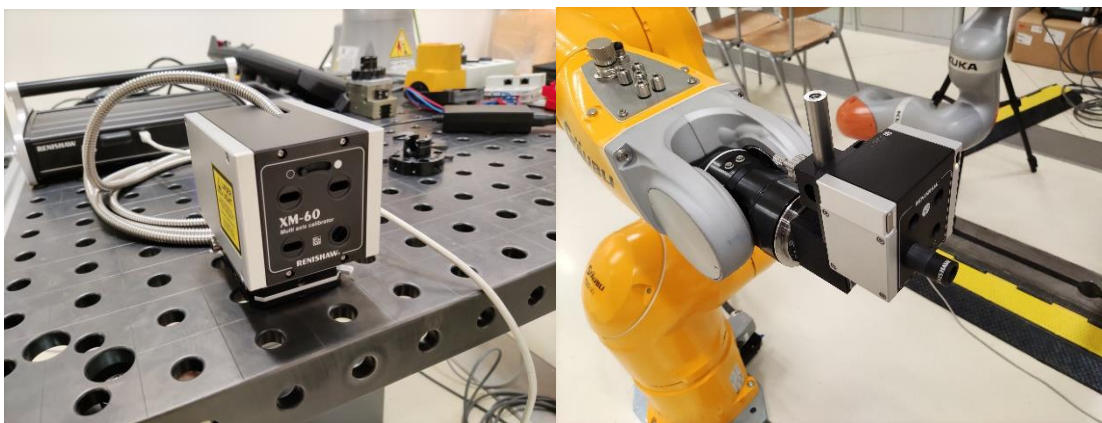
Pro experiment byl použit robot Stäubli řady TX2-90. Dosah tohoto robotu je jeden metr. Robot lze zatížit až 14 kilogramy. Uváděná opakovatelnost robotu výrobcem je $\pm 0,03 \text{ mm}$. Hmotnost robotu je 114 Kg. Konfigurace robotu je znázorněna na obrázku 49.



Obrázek 49: Robot Stäubli TX2 - 90

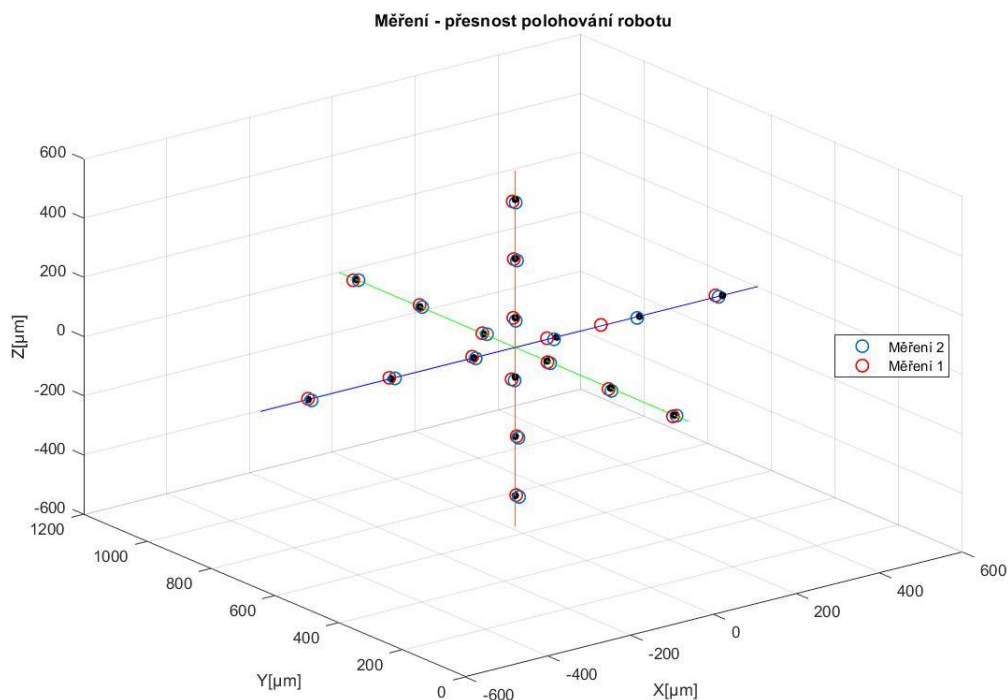
Konfigurace experimentu

Na robot Staubli byl upevněn pomocí magnetu přijímač laserového paprsku Renishaw XM-60 (obrázek 50 vpravo). Vysílač laserového paprsku byl připevněn pomocí magnetického upínače na laboratorní stůl (obrázek 50 vlevo). Robot byl ovládán pomocí teachpendantu a byl polohován tak, aby přijímač laserového paprsku zachytil laser na středu PSD senzorů. Pro sledování stavu zařízení a čtení naměřených dat, byl použit software CARTO. V rámci tohoto softwaru bylo provedeno doladění polohy přijímače vůči vysílači. Tedy ladění stáčení a klonění přijímače.



Obrázek 50: Uchycení (vlevo) laserový vysílač (vpravo) laserový přijímač

V rámci experimentu bylo provedeno měření přesnosti polohování robotu v osách X, Y a Z. Robot byl polohován na střed přijímače v manuálním režimu pomocí teachpendantu. Hodnoty polohy robotu v jednotlivých osách byly zapsány a na základě nich byl vytvořen program pro polohování robotu, jenž měl za úkol polohovat efektozem robotu o 0,1; 0,3 a 0,5 mm od středu ve všech osách. Mezi jednotlivými pohyby byla do programu přidána časová prodleva pro odečtení hodnot po ustálení robotu a přijímače laserového paprsku. Měření probíhalo dvakrát. Na základě naměřených hodnot byl vytvořen 3D graf v němž jsou výsledky porovnány s žádanými hodnotami (obrázek 51). Modrou čarou v grafu je znázorněna osa X, zelenou barvou osa Y a oranžovou barvou osa Z. Žádané hodnoty jsou zobrazeny v grafu formou černých bodů a naměřené hodnoty jsou zobrazeny pomocí červených kroužků pro první měření a modrých kroužků pro druhé měření.

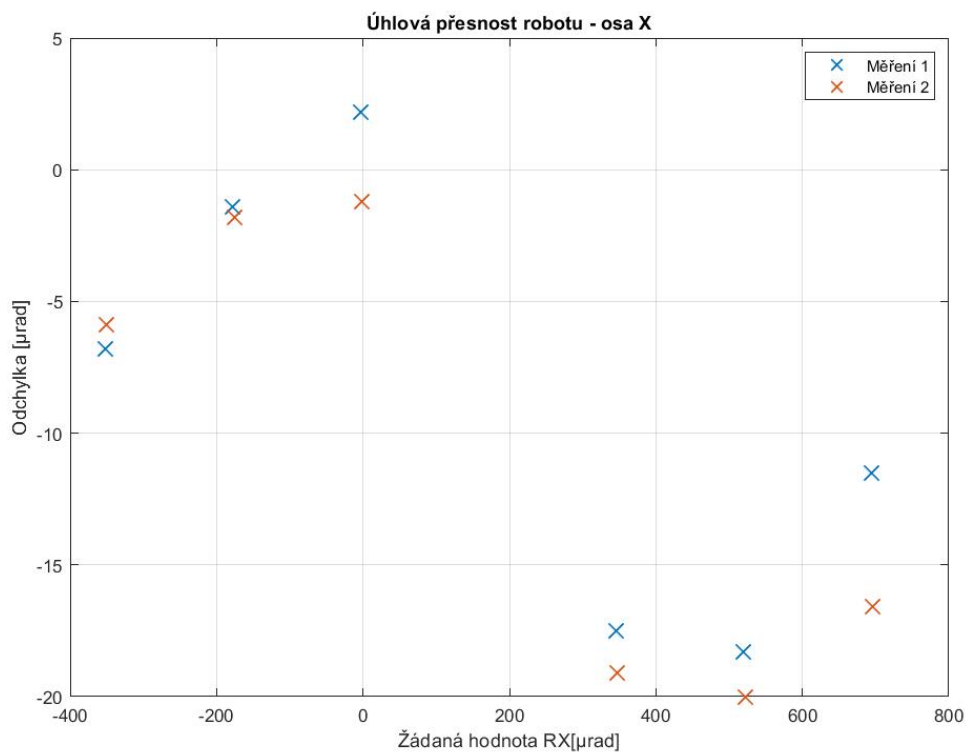


Obrázek 51: Přesnost polohování robotu v osách X, Y a Z

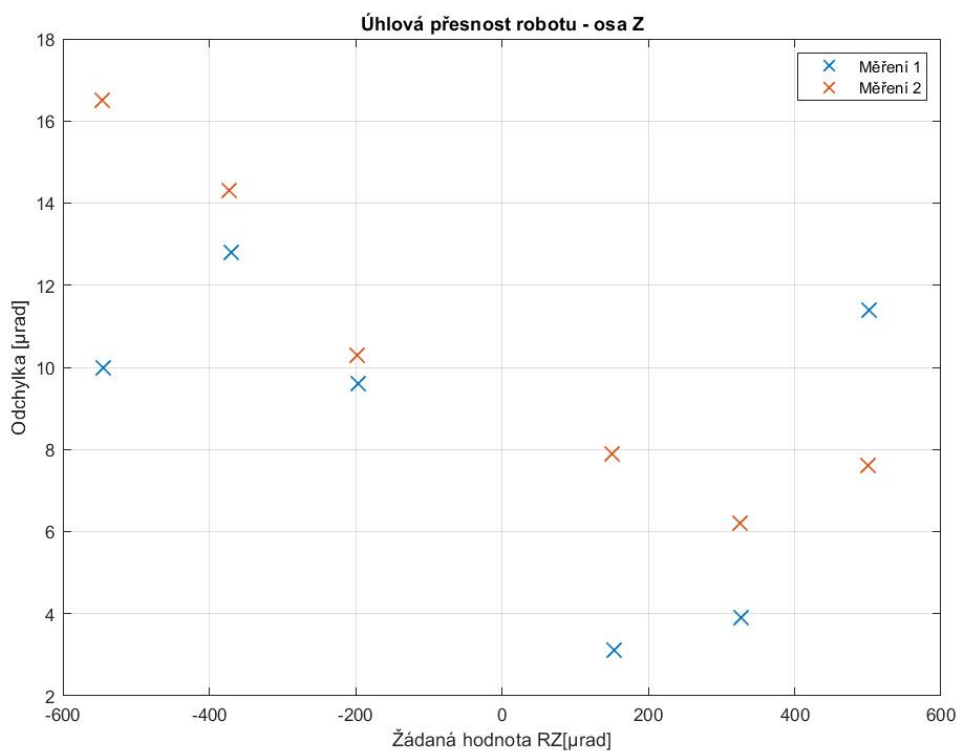
Na základě naměřených hodnot a vypočtených odchylek byla určena průměrná hodnota odchylky od žádané hodnoty.

$$\bar{\varepsilon}_L = 11,4 \mu m \quad (30)$$

V rámci experimentu byla dále ověřena úhlová přesnost robotu. Ta se ověřila tak, že byl robot polohován postupně o $0,01^\circ$ v osách X a Z. Měření bylo provedeno opět dvakrát. V následujících grafech jsou znázorněny úhlové odchylky od požadovaných hodnot zadaných do řídicího systému robotu. Úhlová přesnost robotu kolem osy X je na obrázku 52, úhlová přesnost robotu kolem osy Z na obrázku 53. Odchylky jsou vyneseny v μrad .



Obrázek 52: Odchylka od požadované hodnoty úhlového natočení kolem osy X



Obrázek 53: Odchylka od požadované hodnoty úhlového natočení kolem osy Z

Na základě naměřených hodnot vypočtených odchylek byla vypočtena průměrná hodnota celkové úhlové chyby robotu.

$$\bar{\varepsilon}_R = 11,9 \mu rad \quad (31)$$

Změna polohy při vypnutí pohonů

Během experimentu bylo zjištěno, že při vypnutí pohonů robotu dojde k mírnému poklesnutí efektoru robotu. Proto byl proveden experiment s cílem detekce této chyby robotu. Robot byl třikrát zapnut a vypnut. Hodnoty polohy efektoru a natočení byly zaznamenány vždy jak při zapnutí, tak při vypnutí pohonů. Měření bylo provedeno ve dvou konfiguracích robotu. První konfigurace robotu odpovídala složenému stavu robotu. Druhá konfigurace robotu byla při více vysunutém efektoru robotu a tedy horší konfiguraci pro výslednou přesnost robotu. Na základě naměřených dat byly vypočteny odchylky mezi zapnutým a vypnutým robotem. Z nich byly vypočteny průměrné hodnoty odchylek ve všech osách, ty jsou zobrazeny v tabulkách 18 a 19.

Tabulka 18: Odchylka po vypnutí pohonů robotu – konfigurace 1 „složený robot“

	X [μm]	Y [μm]	Z [μm]	RX [μrad]	RY [μrad]	RZ [μrad]
1	-2,3	-3,1	17,9	30,2	0,1	5,9
2	-0,8	-3,4	14,7	28,5	-0,1	0,8
3	-2,2	-3,5	18,5	27,1	-0,4	-0,2
Průměr	-1,8	-3,3	17,0	28,6	-0,1	2,2

Tabulka 19: Odchylka po vypnutí pohonů robotu – konfigurace 2 „natažený robot“

	X [μm]	Y [μm]	Z [μm]	RX [μrad]	RY [μrad]	RZ [μrad]
1	-2,3	-13,7	42,1	51	-0,6	2,6
2	3,2	-12,6	38,9	48,5	1,1	2,8
3	-0,9	-14,1	36,1	54,1	0,6	0,2
Průměr	0,0	-13,5	39,0	51,2	0,4	1,9

Přesnost polohování robotu na 10 metrech

Využití navrženého systému přidavného odměřování se předpokládá na vzdálenosti až deseti metrů, je nutné vypočítat, jak velkou chybu způsobí změna polohy robotu při vypnutí pohonů.

$$\Delta z = \varepsilon_{Lz} + L \cdot \tan(\varepsilon_{Rx}) \quad (32)$$

$$\Delta z = 39 + 10^7 \cdot \tan(51,2 \cdot 10^{-6}) \quad (33)$$

$$\Delta z = 551 \mu m \quad (34)$$

Zhodnocení

Z výsledků experimentu je patrné, že navržený systém je použitelný. Přesnost polohování robotu byla vyhodnocena na vzdálenosti čtyř metrů od vysílače laserového paprsku 11,4 μ m. Úhlová přesnost polohování robotu při změně úhlu o setinu stupně je 11,9 μ rad. V rámci experimentu byla objevena odchylka polohy efektoru robotu při vypnutém a zapnutém stavu pohonů. Ta se projevovala zejména v ose Z a v natočení kolem osy X. Robot tedy mírně sjel při vypnutí pohonů. Při první konfiguraci byla průměrná odchylka v ose Z 17 μ m a natočení kolem osy X 28,6 μ rad. Při druhé konfiguraci, kdy byl robot více vysunutý efektozem od paty robotu, byla odchylka větší. Odchylka v ose Z byla 39 μ m a odchylka natočení kolem osy X 51,2 μ rad. Na základě této odchylky byla vypočtena změna polohy dopadu laser na deseti metrech pro horší konfiguraci. Při měření na deseti metrech by tato chyba způsobila změnu polohy v ose Z o 551 μ m. Je tedy patrné, že pokud bychom chtěli měřit při vypnutých pohonech, měli bychom zavést do výpočtu polohy robotu kompenzaci, která bude tento vliv eliminovat.

5.2 Ověření navržené komunikace

V rámci experimentu byla ověřena komunikace mezi robotem a průmyslovým počítačem v režimu externí automatiky. Robot a počítač komunikovali přes průmyslovou sběrnici EtherCAT. Komunikace mezi průmyslovým počítačem a laserovým systémem Renishaw xk10 nebyla ověřena experimentálně, ale byla potvrzena výrobcem tohoto laserového měřicího systému.

6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá konceptem systému přídavného odměřování pro zpřesnění měření na obráběcím stroji. Nejprve byly vybrány vhodné komponenty, ze kterých se systém skládá. Bylo navrženo jejich propojení včetně uchycení laserového zařízení k robotu a uchycení přijímače laserového paprsku k vřetenu stroje ve dvou variantách. Součástí řešení je kompletní architektura komunikace mezi jednotlivými komponenty, která byla částečně experimentálně ověřena. Pro zobrazení uživatelského rozhraní byla zvolena možnost zobrazení vzdálené plochy na řídicím panelu stroje. Toto řešení zvyšuje komfort ovládání navrženého systému pro operátora.

V rámci diplomové práce byl vytvořen algoritmus pro výpočet optimální polohy pro měření robotem. Optimální poloha robotu je charakterizována minimalizací měřené vzdálenosti pro dosažení maximální přesnosti měření.

Dále byl navržen výpočet kompenzačních dat pro stroj na základě naměřené hodnoty obráběcím stroje a odchylkou změřenou přídavným odměřováním. Pro řešení byl navržen postup měření dotykovou sondou, který předpokládá odečítání hodnot až po odjezdu dotykové sondy do definované vzdálenosti od bodu dotyku.

Na závěr byl proveden experiment pro ověření funkčnosti navrženého řešení. V rámci experimentu byla testována přesnost lineárního a úhlového polohování. V rámci experimentu byla zjištěna chyba polohy robotu při vypnutí pohonů, která se projevovala zejména v ose Z a horizontálním natočení a je závislá na konfiguraci robotu. Tato chyba je ovšem snadno detekovatelná a lze jí kompenzovat. Výsledná přesnost robotu je pro navržený systém přídavného odměřování vyhovující. Potenciálním nebezpečím pro plnou funkcionalitu navrženého řešení může být vliv vibrací podlahy na robot a tedy na celý přídavný měřicí systém, který by snížil dosažitelnou přesnost měření.

Navržený systém má uplatnění pro stanovení korekcí před dokončovacími operacemi s vyšší přesností, než při měření pouze obráběcím strojem. Dále se otevírá možnost využití robotu nejen pro polohování laserového vysílače, ale také pro jiné operace, například vykládání a zakládání obrobků do stroje. Tato úloha již přesahuje rámec řešené diplomové práce.

Seznam použité literatury

- [1] Gao, W., Haitjema, H., Fang, F. Z., Leach, R. K., Cheung, C. F., Savio, E., & Linares, J. M. (2019). On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing. *CIRP Annals*, 68(2), 843-866. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.005>
- [2] Kuo, C.-H.; Chen, P.-C. On-Machine Measurement and Error Compensation for 6061 Aluminum Alloy Hexagonal Punch Using a Turn-Milling Machine. *Machines* 2021, 9, 180. <https://doi.org/10.3390/machines9090180>
- [3] Gepard 5bt prospekt english. [online]. Dostupné z: http://www.uzimex.cz/soubory/20070121_gepard_bt_prospekt_en.pdf
- [4] Uzimex měření přímosti RAYTEC system. [online]. Dostupné z: <http://www.uzimex.cz/Vyrobce/Raytec-system-ag/Mereni-primosti/Merici-pristroj-GEPARD.html>
- [5] XK10 Vyrovňovací laserový systém. [online]. Copyright © [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/xk10-vyrovnavaci-laserovy-system--44377>
- [6] Manuály a uživatelské příručky pro kalibraci [online]. Copyright © [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/manualy-a-uzivatelske-prirucky-pro-kalibraci--38648>
- [7] CHVÁLA, Břetislav, TALÁCKO, Jaroslav a MATIČKA, Robert. *Průmyslové roboty a manipulátory: celost. vysokošk. učebnice pro stud. fak. strojnické*. Praha: SNTL, 1990. s. 43. ISBN 80-03-00361-X. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:65f40830-f78c-11e2-9584-001018b5eb5c>
- [8] KR CYBERTECH nano | KUKA AG. *industrial intelligence 4.0_beyond automation | KUKA AG* [online]. Copyright © KUKA AG 2021 [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/pr%C5%AFmyslov%C3%A9-roboty/kr-cybertech-nano>
- [9] ABB robot datasheet. [online]. Dostupné z: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=PR10343EN_R5&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
- [10] Robot FANUC M-10iD 10L pro manipulaci s materiály - Fanuc. [online]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%af/%c5%99ada-m-10/m-10id-10l>

- [11] *Staubli robot datasheet*. [online]. Copyright © [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/en/file/25832.show>
- [12] *Kuka-Manual* [online]. Copyright © [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <http://www.wtech.com.tw/public/download/manual/kuka/krc4/KUKA%20KSS-8.3-Programming-Manual-for-SI.pdf>
- [13] What are teach pendants? - ICR Services. *Industrial engineering solutions - Robotics, Field Service, Repair Services* [online]. Copyright © 2021 ICR Services. All Rights Reserved. [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <https://icrservices.com/2015/07/22/what-are-teach-pendants/>
- [14] Offline programování - Blumenbecker. *International industrial service provider - Blumenbecker* [online]. Copyright © 2019 MyFonts Inc [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <https://www.blumenbecker.com/cz/prumyslova-automatizace/prumyslove-roboty/offline-programovani>
- [15] [online]. Copyright © [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <https://www.fmt.vsb.cz/export/sites/fmt/638/cs/studium/podklady-k-predmetum/Prirucka-1-ABB-ROBOTICS.pdf>
- [16] Ovládání a programování robotu ABB. [online]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2753-7.pdf>
- [17] [online]. Copyright © [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf
- [18] SIMATIC IPC627E - Industry Mall - Siemens WW. [online]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10350979?activeTab=productinformation&ionUrl=WW#Application>
- [19] C6017 | Fanless ultra-compact Industrial PC | Beckhoff Česká republika. [online]. Copyright © Beckhoff Automation 2021 [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/products/ipc/pcs/c60xx-ultra-compact-industrial-pcs/c6017.html>
- [20] Jalový, M., Jalová, M., Andrlík, V. (2005): *Průmyslové roboty a manipulátory*. Skripta ČVUT Praha. ISBN 978-80-01-04321-1.
- [21] FEATURE: On-machine measurement removes CMM bottleneck and cuts inspection time. *Institution of Mechanical Engineers - IMechE* [online]. Copyright © [cit. 19.01.2022]. Dostupné z: <https://www.imeche.org/news/news-article/feature-on-machine-measurement-removes-cmm-bottleneck-and-cuts-inspection-time>

- [22] BRAL | BRAY CNC Machining Centres®. *BRAY CNC* [online]. Copyright © 2017 [cit. 19.01.2022]. Dostupné z: <https://www.bray-cnc.cz/bral>
- [23] [online]. Dostupné z: <https://iso10360.wordpress.com/mpee/>
- [24] GLOBAL eXtra | Hexagon Manufacturing Intelligence. *Object moved* [online]. Copyright © 2022 [cit. 19.01.2022]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/global-extra>
- [25] W. Gao, H. Haitjema, F.Z. Fang, R.K. Leach, C.F. Cheung, E. Savio, J.M. Linares,
On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing,
- [26] Cesty ke zvýšení efektivnosti obráběcích strojů | Technický týdeník. *TT / Technický týdeník* [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit.29.05.2022]. Dostupné z:<https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumnehocentra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabecich-stroju-35252.html>
- [27] Cloudflare. *ResearchGate / Find and share research* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Laser-tracker-kinematic-model_fig3_321954677
- [28] Solems [online]. Dostupné z: <https://www.solems.com/en/project/psd>
- [29] PSD - polohově citlivé detektory > LAO - lasery a optika. *LAO - lasery a optika* [online]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/detektory---oem-prvky-119k/psd---polohove-citlive-detektory-46p>
- [30] Control Staubli robot by Simatic[online]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109749979/how-do-you-control-a-st%C3%A4ubli-robot-with-a-simatic-controller-?dti=0&lc=en-WW>
- [31] TS460 HEIDENHAIN | RETOS. *RETOS* [online]. Copyright ©2017 RETOS VARNSDORF s.r.o. [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: <https://www.retos.cz/ts460>
- [32] *HEIDENHAIN / Controls, encoders, and digital readouts* [online]. Copyright © [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Touch_Probes_ID1113984_en.pdf

- [33] DNC komunikace pro CNC výrobní provozy - Strojárstvo / Strojírenství. *Prvý strojářský portál - Strojárstvo / Strojírenství* [online]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/informacne-technologie/680-dnc-komunikace-pro-cnc-vyrobn-provozy>
- [34] Wireless DNC komunikace pro CNC výrobní provozy | Technický týdeník. *TT / Technický týdeník* [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/wireless-dnc-komunikace-pro-cnc-vyrobn-provozy_18000.html
- [35] *Home - HEIDENHAIN* [online]. Copyright © [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/628968-24_RemoTools_SDK_en.pdf
- [36] Connected Machining: Remote Desktop Manager - HEIDENHAIN . *Home - HEIDENHAIN* [online]. Copyright © [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty/cnc-rizeni/connected-machining/remote-desktop-manager/
- [37] *Home - HEIDENHAIN* [online]. Copyright ©C [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/1225632-C0_Connected_Machining_cs.pdf
- [38] *chiark home page* [online]. Dostupné z: <https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/faq.html>
- [39] SSH protocol is the standard for strong authentication, secure connection, and encrypted file transfers. We developed it.. *PAM solutions, Key Management Systems, Secure File Transfers / SSH* [online]. Copyright © Copyright SSH.COM [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: <https://www.ssh.com/academy/ssh/protocol>
- [40] CARTO software suite. [online]. Copyright © [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/carto-software-suite--31845>
- [41] TwinCAT 3 Kinematic Transformation | Beckhoff Worldwide. *Object moved* [online]. Copyright © Beckhoff Automation 2022 [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/automation/twincat-3-kinematic-transformation/>
- [42] EtherCAT [online]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/ethercat-automation-protocol-2017_02_0_9811/

- [43] Software | Beckhoff Česká republika. *Object moved* [online]. Copyright © Beckhoff Automation 2022 [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/support/download-finder/software-and-tools/>
- [44] Beckhoff Information System - English. *Beckhoff Information System - German* [online]. Dostupné z: https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcplccontrol/html/tcplcctrl_intro.htm&id=
- [45] *TwinCAT 3* [online]. Copyright © [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/54877.pdf
- [46] *UniVAL* [online]. Copyright © [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: https://download.beckhoff.com/download/document/automation/twincat3/TF5130_TC3_Robotics_uniVAL_PLC_EN.pdf
- [47] Heidenhain cycles[online]. Copyright ©i [cit. 29.05.2022]. Dostupné z: https://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/TNC640/34059x-09/zyklen/892905-C6.pdf
- [48] : TechPark.sk : Co je laser tracker a jak se s ním měří?. : *TechPark.sk* : [online]. Copyright © 2008 [cit. 31.05.2022]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-52009/co-je-laser-tracker-a-jak-se-s-nim-meri.html>
- [49] HEIDENHAIN Extended Workspace – Mehr Raum für wichtige Informationen | TEDI Technische Dienste GmbH. *TEDI Technische Dienste: Industrieller Maschinenservice* [online]. Dostupné z: <https://www.tedi-online.com/referenzen/heidenhain-extended-workspace-%E2%80%93-mehr-raum-f%C3%BCr-wichtige-informationen>
- [50] [online]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/download/user-guide-xm-60-and-xm-600-multi-axis-calibrator--112591?userLanguage=en&>
- [51] J. Koubek, (2016): Adaptivní kompenzace nepřesnosti obráběcích strojů. Disertační práce ČVUT Praha.
- [52] Gepard 5bt manual. [online]. Dostupné z: http://www.uzimex.cz/soubory/20090529_gepardbt-manual-de.pdf

- [53] Uzimex přehledový katalog 20080403. [online]. Dostupné z: http://www.uzimex.cz/soubory/20080403_uzimex-prehledovy_katalog_2008.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1: Měření na stroji dotykovou sondou [21].	13
Obrázek 2: Pětiosé portálové obráběcí centrum BRAY BRAL [22].	14
Obrázek 3: Kalibrace délky dotykové sondy [47]	17
Obrázek 4: Kalibrace vnitřního poloměru kuličky dotykové sondy [47]	18
Obrázek 5: Dotyková sonda Heidenhain TS 460 [31].	18
Obrázek 6: Volumetrická kompenzace obráběcího stroje [26]	20
Obrázek 7: Souřadnicový měřicí stroj HEXAGON [24].	21
Obrázek 8: Princip fungování laser trackeru [27].	22
Obrázek 9: Přídavný odměřovací systém deformace volného konce smykadla [51].	22
Obrázek 10: Schéma zařízení pro optické měření deformace smykadla [51]	23
Obrázek 11: Kartézská kinematická struktura [7]	24
Obrázek 12: Cylindrická kinematická struktura [20].	24
Obrázek 13: Sférická kinematická struktura [20].	25
Obrázek 14: Angulární robot [14].	26
Obrázek 15: Souřadné systémy robotu [12].	27
Obrázek 16: Řídicí systém robotů kuka [12].	28
Obrázek 17: Teachpendant od firmy KUKA [12].	29
Obrázek 18: Koncept systému přídavného odměřování	36
Obrázek 19: Laserové měřicí zařízení Gepard 5bt [2].	37
Obrázek 20: Schéma USB převodníku [1].	38

Obrázek 21: Vysílač laserového měřicího zařízení Renishaw XK10 (vlevo), displejová jednotka (vpravo) [6].	40
Obrázek 22: Robot KUKA KR Cybertech nano [8].	42
Obrázek 23: Robot – ABB IRB 1660ID [9].	43
Obrázek 24: Robot Fanuc M10 [10].	43
Obrázek 25: Robot Stäubli TX2-160 [11].	44
Obrázek 26: Průmyslový počítač Beckhoff C6017 [19].	45
Obrázek 27: Průmyslový počítač Siemens simatic IPC627E [18].	46
Obrázek 28: Upevnění přijímače Renishaw XK10 na vřeteno stroje šrouby	48
Obrázek 29: Výkres sestavy konzole pro uchycení přijímače šrouby	48
Obrázek 30: Upevnění přijímače Renishaw XK10 na vřeteno stroje magnetem	49
Obrázek 31: Výkres sestavy konzole pro uchycení přijímače magnetem	49
Obrázek 32: Upevnění vysílače Renishaw XK10 k robotu	50
Obrázek 33: Výkres upevňovací příruby vysílače Renishaw XK10	51
Obrázek 34: Návrh komunikace mezi komponenty systému	52
Obrázek 35: Extended workspace pro řídicí systém Heidenhain TNC640 [49].	54
Obrázek 36: Funkcionalita SSH klienta a serveru [39]	56
Obrázek 37: Transformace souřadných systémů	59
Obrázek 38: Úhly natočení přímky v prostoru	60
Obrázek 39: Výpočet nejbližšího bodu pro zapolohování robotu (vlevo) vyznačená vzdálenost mezi osou 2 a 5 (vpravo) použitá pro výpočet.	61
Obrázek 40: Stav robotu a) Mimo dosah, b) Definovaná vzdálenost, c) Nejbližší bod 64	
Obrázek 41: Schéma odečtení odchylky stroje laserem	65
Obrázek 42: Příklad zadání parametrů cyklu 4 [47]	65
Obrázek 43: Příklad zadání parametrů cyklu 90 [47]	65

Obrázek 44: Simulace výpočtu kompenzačních dat	66
Obrázek 45: HMI - domovská obrazovka.....	68
Obrázek 46: HMI - obrazovka robotu.....	68
Obrázek 47: HMI - obrazovka stroje	69
Obrázek 48: Renishaw XM60(vlevo zdroj laserového paprsku, vpravo přijímač laserového paprsku) [50]	70
Obrázek 49: Robot Stäubli TX2 - 90	70
Obrázek 50: Uchycení (vlevo) laserový vysílač (vpravo) laserový přijímač	71
Obrázek 51: Přesnost polohování robotu v osách X, Y a Z.....	72
Obrázek 52: Odchylka od požadované hodnoty úhlového natočení kolem osy X	73
Obrázek 53: Odchylka od požadované hodnoty úhlového natočení kolem osy Z.....	73

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry obráběcího centra BRAY BRAL [22].....	14
Tabulka 2: Parametry dotykové sondy Heidenhain TS 460 [32].....	19
Tabulka 3: Vstupy FB_MC_MoveDirectAbsolute [46]	30
Tabulka 4: Výstupy FB MC_MoveDirectAbsolute [46]	31
Tabulka 5: InOut FB MC_MoveDirectAbsolute [46]	31
Tabulka 6: Vstupy FB MC_GroupReadActualPosition [46].....	32
Tabulka 7: Výstupy FB MC_GroupReadActualPosition [46].....	32
Tabulka 8: InOut FB MC_GroupReadActualPosition [46]	32
Tabulka 9: Technické parametry vysílače měřicího zařízení Gepard 5bt [2].....	39
Tabulka 10: Technické parametry přijímače měřicího zařízení Gepard 5bt [2].....	39
Tabulka 11: Technické parametry vysílače měřicího zařízení Renishaw XK10 [6].	40
Tabulka 12: Technické parametry přijímače měřicího zařízení Renishaw XK10 [6]. ...	40

Tabulka 13: Porovnání měřících zařízení Renishaw XK10 a Gepard 5bt [2], [6].....	41
Tabulka 14: Porovnání robotů od různých výrobců [8], [9], [10], [11].....	45
Tabulka 15: Parametry průmyslového počítače Beckhoff C6017 [19].	46
Tabulka 16: Parametry průmyslového počítače Siemens simatic IPC627E [18].	47
Tabulka 17: Stavový automat pro polohování robotu	63
Tabulka 18: Odchylka po vypnutí pohonů robotu – konfigurace 1 „složený robot“.....	74
Tabulka 19: Odchylka po vypnutí pohonů robotu – konfigurace 2 „natažený robot“	74

Seznam použitého softwaru

Microsoft Word – Textový editor

Microsoft Excel – Tabulkový editor

Matlab R2020b – Vývojové prostředí pro tvorbu skriptů

Draw IO – Grafický editor

Autodesk Inventor Professional 2020 – CAD software

CARTO – Software pro měření od firmy Renishaw

TwinCAT – Vývojové prostředí pro PLC programování

Seznam příloh

Příloha č. 1: PoziceRobot.rar – Výpočet optimální polohy robotu (Matlab)