



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ ZAŘÍZENÍM LASER TRACER

GEOMETRIC ERROR MEASUREMENT OF MACHINE TOOLS WITH A
LASER TRACKER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Pavel Malý

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Josef Knobloch, MSc

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Malý

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů zařízením Laser Tracer

v anglickém jazyce:

Geometric error measurement of machine tools with a Laser Tracker

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Laser Tracer je moderní měřicí zařízení pracující na principu multilaterálního měření používané k přesnému měření geometrické přesnosti a následné kompenzaci souřadnicových měřicích i obráběcích strojů. Cílem práce je popsat metodiku stanovení geometrické přesnosti obráběcích strojů pomocí tohoto zařízení a provést a vyhodnotit měření na stroji.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše možných aplikací zařízení Laser Tracer
- změření pracovního prostoru stroje MCV 754 QUICK
- statistické zpracování a vyhodnocení naměřených dat

Seznam odborné literatury:

- WECK, Manfred, BRECHER, Christian. Werkzeugmaschinen 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2006. 701 s. ISBN 978-3-642-38748-7
-www.infozdroje.cz
-http://www.etalon-ag.com/

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Knobloch, MSc

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 20.11.2013



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Pavel Malý

Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů zařízením Laser Tracer

Bakalářská práce, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2014.

Bakalářská práce má za cíl přiblížit možné aplikace a využití laser traceru v současné době. V práci je popsán postup uskutečněného měření a porovnání dvou možných metod měření stroje. Statistické zpracování je vyhotoveno v aplikaci Microsoft Excel.

Klíčová slova: laser tracer, geometrická přesnost, volumetrická přesnost

ABSTRACT

Pavel Malý

Geometric error measurement of machine tools with a Laser Tracker

Bachelor thesis aims to bring the possible applications and uses laser tracer. In the thesis is describe how effected measuring and comparsion of two possible methods of measuring equipment. Statistical pocessing is executed in Microsoft Excel.

Key words: laser tracer, geometric accuracy, volumetric accuracy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MALÝ, P. Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů zařízením Laser Tracer. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Knobloch, MSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů zařízení Laser Tracer** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce

Datum

Pavel Malý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu této práce, Ing. Josefu Knoblochovi, MSc za velice cenné rady a připomínky, za pomoc při měření a za jeho čas věnovaný konzultacím. Také bych chtěl poděkovat své přítelkyni, rodině a přátelům, kteří mě při psaní bakalářské práce nemálo podporovali.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 GEOMETRICKÁ PŘESNOST.....	8
1.1 Odchyly pohybu lineární osy	8
1.2 Odchyly pohybu rotační osy	10
1.3 Volumetrické chyby.....	10
2 LASER TRACER.....	12
2.1 Princip laserinterferometru.....	12
2.2 Princip trilaterace.....	13
2.3 Měřicí přístroj laser tracer.....	14
2.4 Aktuální možné aplikace laser traceru.....	16
2.4.1 Využití metody měření „On the fly“	16
2.4.2 Kalibrace rotačních os.....	17
2.4.3 Porovnání laser traceru oproti jiným srovnatelným zařízením.....	18
3 POSTUP MĚŘENÍ.....	21
3.1 Trac-cal	22
3.1.1 Modul plán.....	23
3.1.2 Modul měření	26
3.1.3 Modul vyhodnocení	27
3.1.4 Modul kvalifikace	29
4 VYHODNOCENÍ DAT.....	30
4.1 Porovnání modelu FRB a RRB	30
4.2 Statistické vyhodnocení	31
ZÁVĚR.....	36
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	37
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	39
SEZNAM OBRÁZKŮ	40
SEZNAM TABULEK.....	40
SEZNAM PŘÍLOH.....	41

ÚVOD

Světovým trendem současné doby je vývoj nových technologií. Ve strojírenství se jedním z hlavních tahounů stal automobilový průmysl, kde rychlá a cenově výhodná nabídka na produkci vysoce kvalitních výrobků je klíčem k budoucímu úspěchu. V procesu obrábění, kde je stále více kladen důraz na přesnost a kvalitu povrchu nejen obrobeneho prvku, ale také samotného obráběcího stroje, se začínají opracovávat nové a hlavně náročnější materiály. Výsledná přesnost je neustále ovlivňována chybami, které mají rozhodující vliv na dodržení požadovaných parametrů. Aby tyto chyby byly minimalizovány, v lepších případech úplně odstraněny, je nezbytnou operací tyto chyby vyhledávat a zjišťovat jejich příčinu.

Jednou ze základních podmínek úspěšného nasazení obráběcího stroje v reálné výrobě je jeho geometrická přesnost. Přesnost stroje a jeho kontrola představuje komplexní problematiku, kterou se musí v určité míře zabývat každý uživatel moderních strojů. Seřízení geometrické přesnosti vyžaduje velké zkušenosti, kterým je potřeba se určitou dobu učit. Platí, že čím pečlivěji a kvalitněji jsou provedeny všechny kroky, které předcházejí seřízení na stroji, tím snadněji je dosaženo požadované přesnosti. Jedná se především o konstrukční fázi vývoje stroje, kvalitu výrobní dokumentace strojních dílů a skupin, preciznost výroby a následná montáž stroje. Toto všechno poskytuje možnosti výrobcům měřicích zařízení a metod omezit možnost lidské chyby při měření i korigování dalších možných chyb.

Již na začátku 20. století byly učiněny první pokusy o vypracování a zveřejnění přejímacích podmínek pro přesnost obráběcích strojů. V současné době se tímto zabývá norma ISO 230 Zásady zkoušek obráběcích strojů, a to konkrétně část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění a část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. Nejmodernější a nejpřesnější měřicí systém je přístroj laser tracer, vyvinutý německou společností Etalon AG ve spolupráci se spolkovým úřadem PTB (Physikalisch-Technische-Bundesanstalt) a národní fyzikální laboratoří NPL (National Physical Laboratory). Pro tento přístroj není doposud vytvořena žádná norma, podle které by mělo probíhat správné měření. Hlavní podklady pro kalibrační postup jsou v souladu s normami ISO 230-2/4/6. Další možností je provedení kruhového testu dle ISO 230-4 a kalibrace otočné osy.

Jak zmiňuji v předchozím odstavci, laser tracer je nejmodernějším přístrojem v oblasti měření geometrické přesnosti. Práce pro mne bude obrovskou zkušeností a velkou výzvou proniknout do problematiky tohoto oboru. Výsledek bude obsahovat základní informace o laser traceru a konkrétní postup měření. Na základě provedeného měření bude výstupem porovnání dvou metod, které lze s přístrojem uskutečnit.

1 GEOMETRICKÁ PŘESNOST

Přesnost obráběcího stroje je dána geometrickou přesností, do které patří odchylky tvaru a polohy funkčních částí stroje (týkají se pouze jednoho prvku), dále pak vzájemnou polohou funkčních částí nebo ploch. Při měření geometrické přesnosti kontrolujeme (1):

- přímost,
- rovnoběžnost,
- kolmost,
- rovinnost,
- souosost,
- čelní házení,
- obvodové házení,
- osovou vůli,
- osový pohyb.

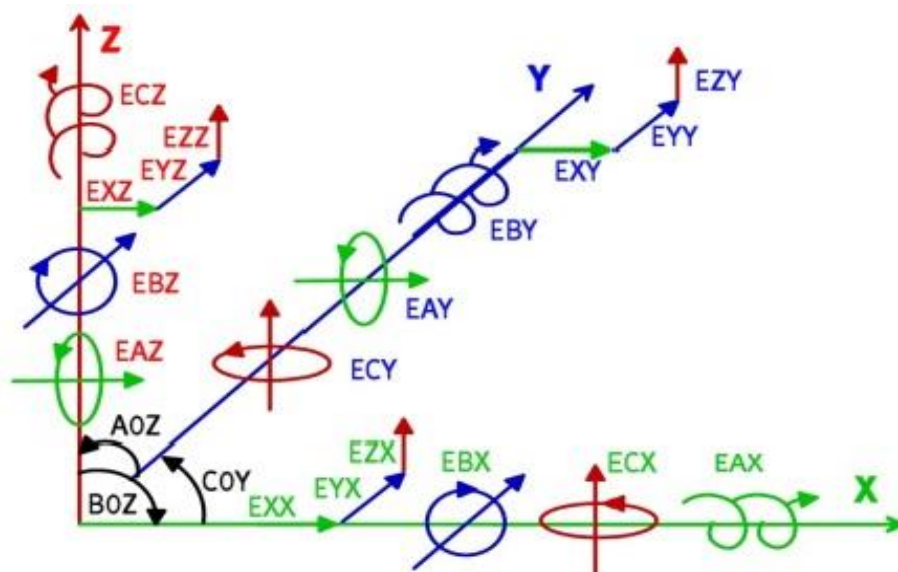
Geometrická přesnost se na stroji měří za klidu nebo při volném chodu naprázdno. U některých druhů strojů (např. u vrtaček) se různé části stroje zatěžují, zejména tehdy, ověřuje-li se měřením tuhost stroje. Takzvanou funkční zkouškou se ověřují výsledky měření geometrické přesnosti. Přesnost stroje je ovlivněna také teplotou, proto při měření přesnosti stroje mají mít jednotlivé části takovou teplotu, jakou mají při normálních pracovních podmínkách, tj. při zatížení a při normálním oběhu mazacího oleje. Při měření má být stroj chráněn před přímým vlivem tepla a slunečních paprsků (1).

Hlavním činitelem ovlivňujícím přesnost je prvotní ustavení stroje, dále ovlivňuje přesnost zejména zatížení stroje, zrychlení pohybujících se hmot a změna procesních sil. Negativním vlivem je samobuzené kmitání, které ovlivňuje velikost deformace stroje v závislosti na jeho dynamické poddajnosti (2).

Chyby v obrábění jsou rozděleny mezi chyby náhodné a systematické. Náhodné chyby jsou způsobeny kombinací více faktorů, např. vůle v uložení, tření, nepřesnost měřicího zařízení atd. a mají Gaussovo normální rozdělení. Na druhé straně systematické chyby posouvají střed rozložení jedním nebo druhým směrem. Jsou způsobeny statickou poddajností, tepelnou roztažností konstrukce obráběcího stroje při obrábění atd. Geometrické chyby spadají pod tuto kategorii, způsobují systémové odchylky rozměrů obrobku a jsou ze své podstaty pozičně závislé (3).

1.1 Odchylky pohybu lineární osy

Jedná se o nechtěné lineární a úhlové pohyby součástí při pohybu podél nominální (přímkové) trajektorie (Obr. 1.1). Pro libovolný bod, který leží na ose X , můžeme identifikovat šest různých geometrických odchylek, odpovídající počtu stupňů volnosti. Bude-li se prvek pohybovat, rozlišujeme tři translační odchylky a tři úhlové odchylky. Identicky je tomu tak i v ose Y a Z (4). Jednotlivé chyby, které mohou při pohybu v lineární ose vzniknout jsou pospány pod obrázkem (5):

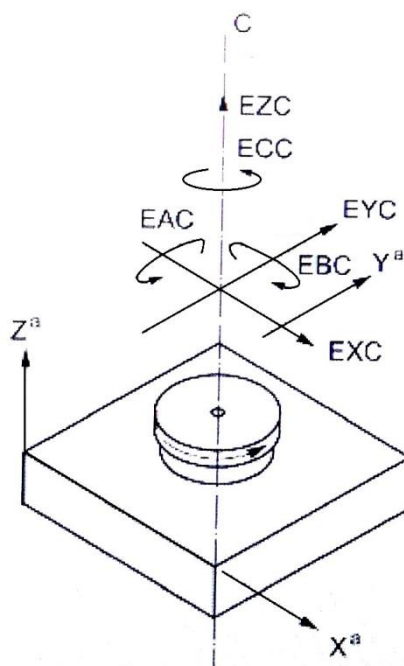


Obr. 1.1: Chyby vznikající při pohybu v lineární ose (5)

- EXX – přesnost najetí do polohy v ose X,
- EYY – přesnost najetí do polohy v ose Y,
- EZZ – přesnost najetí do polohy v ose Z,
- EYX – odchylka přímosti Y ve směru osy X,
- EZX – odchylka přímosti Z ve směru osy X,
- EXY – odchylka přímosti X ve směru osy Y,
- EZY – odchylka přímosti Z ve směru osy Y,
- EXZ – odchylka přímosti X ve směru osy Z,
- EYZ – odchylka přímosti Y ve směru osy Z,
- EAX – naklápění ve směru osy X („roll“),
- EBX – klopení ve směru osy X („pitch“),
- ECX – natáčení ve směru osy X („yaw“),
- EAY – naklápění ve směru osy Y („roll“),
- EBY – klopení ve směru osy Y („pitch“),
- ECY – natáčení ve směru osy Y („yaw“),
- EAZ – naklápění ve směru osy Z („roll“),
- EBZ – klopení ve směru osy Z („pitch“),
- ECZ – natáčení ve směru osy Z („yaw“),
- A0Z – kolmost v rovině Y-Z,
- B0Z – kolmost v rovině Z-X,
- C0Y – kolmost v rovině X-Y.

1.2 Odchyšky pohybu rotační osy

Do této kategorie patří změny v poloze a orientaci os otáčení vzhledem k průměrné přímce osy jako funkce úhlu otáčení osy otáčení (Obr. 1.2). I v tomto případě existuje šest odchylek. Pohybová osa je tvořena rotační osou C . Axiální pohyb tvoří translační odchylka EZC . Radiální chyba pohybu je způsobena odchylkami EXC a EYC . Naklápění rotační osy C ve směrech os x a y je vyznačeno EAC a EBC . Chyba v polohování je způsobena odchylkou ECC (5).



Obr. 1.2: Chyby vznikající při pohybu v rotační ose (6)

1.3 Volumetrické chyby

Velký význam má v dnešní době přesnost polohování měřená ne odděleně v jednotlivých osách, ale při jejich součinnosti v prostoru. Jedná se o tzv. volumetrickou přesnost. Technický výbor Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) již několik let pracuje na publikaci nové normy, která bude sloužit pro numerickou kompenzaci geometrických chyb u obráběcích strojů. Tato norma má v úmyslu poskytnout informace pro jednotnou identifikaci a charakterizaci geometrických chyb numericky řízeného stroje (7).

Pro tříosý obráběcí stroj byla volumetrická přesnost nejprve definována jako odmocnina ze součtu druhých mocnin rozdílů maximální a minimální hodnoty přesnosti najetí do polohy v jednotlivých osách X , Y a Z . Tato definice byla dostačující do doby, kdy se začali více využívat parametry přímoty a rovinnosti. Následně byla zavedena nová definice, která zahrnuje chybu polohy v každém směru pro všechny osy. Ovšem při používání interferometru pro měření přímoty a rovinnosti bylo měření časově náročné. Z tohoto důvodu byla měření prováděna podle normy (ISO 230-6 – Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn), to zajistilo přesnou kontrolu volumetrických chyb (8).

Volumetrické chyby zahrnují chyby polohové, chyby rovinnosti, kolmosti a úhlové chyby (8). Volumetrická přesnost je reprezentována mapou pozic a orientací chybových vektorů nástroje při pohybu v prostoru obráběcího stroje (7). Existují dva způsoby měření

volumetrické přesnosti ve směru prostorové diagonály pracovního prostoru obráběcího centra (9):

- souvislý způsob měření diagonály,
- sekvenční způsob měření diagonály – při měření tímto způsobem je nashromážděno 3x více dat a mohou být měřeny všechny složky celkové chyby.

Novodobější možností pro měření volumetrické přesnosti je systém ballbar, který vyvíjí mimo jiné společnost Renishaw. Výraz ballbar reprezentují velmi přesné teleskopické lineární snímače s dvojicí přesných koulí na obou koncích. Dále se systém sestává z přesných magnetických držáků. Jeden držák je nastavitelný a připevňuje se ke stolu stroje, druhý je uchycen k vřetenu stroje nebo tělu vřetena. Při používání se kuličky kinematicky umístí mezi přesnými magnetickými miskami a je měřena kruhová dráha vřetene. Měření volumetrické přesnosti umožňuje testování ve 3 navzájem kolmých rovinách pomocí jediného referenčního bodu (Obr. 1.3) (10).



Obr. 1.3: Měření volumetrické přesnosti systémem ballbar (10)

Nejvyšším přínosem volumetrie je jednoznačně zmapování geometrických chyb u velkých obráběcích strojů a center. U těchto typů strojů se nejčastěji projevuje chyba kolmosti při pohybu v lineární ose. V případě pětiosých strojů se tato chyba nejvíce projevuje při pohybu rotační osy v závislosti na zvětšující se vzdálenosti. Maximálního přínosu numerické kompenzace lze dosáhnout právě při minimalizaci úhlových a rotačních chyb (7).

2 LASER TRACER

Pro měření volumetrické přesnosti je nejvhodnějším měřicím přístrojem laser tracer. Ten poskytuje úplný obraz přesnosti v celém pracovním prostoru stroje. Výstupem je kompletní zmapování chyb pomocí matematické metody Monte Carlo. Matematická metoda Monte Carlo je stochastická metoda používaná pro odhad nejistoty měření. Do matematického modelu vstupují náhodné veličiny a metoda sleduje jejich výstupy. (11)

Tracer provádí prostorovou kalibraci obráběcích strojů plně ve 3D, což je v dnešní době obrovskou výhodou. Jedná se o jedinečnost přístroje, protože žádný jiný systém toto neumožňuje. Stejně tak, jako přímé zadávání korekcí do řídicích systémů obráběcích strojů mnoha světových výrobců (12).

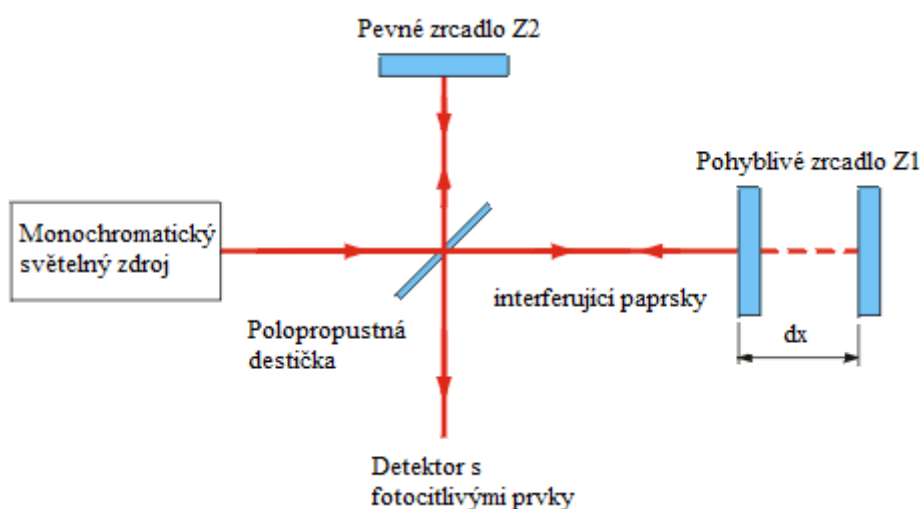
Měření je založeno na dvou principech, prvním je laserinterferometrie a druhým trilaterace. Základním prvkem laser traceru je laserový interferometr s nanometrovým rozlišením. Ten automaticky sleduje odražeč a měří vzdálenost. Jedná se o vlastní sledování umožňující měření vzdálenosti s nejvyšší přesností v téměř každém směru. Odražeč je uchycen ve snímací hlavě souřadnicového měřicího stroje nebo ve vřetenu obráběcího stroje. Dráha, kterou kalibrovaný stroj projede, je navržena uživatelem. Nakonec je vygenerována korekční mapa a korekce jsou přímo uloženy do řídicí jednotky měřeného obráběcího stroje (12).

2.1 Princip laserinterferometru

Světelný svazek vystupující z laseru si můžeme představit jako světelnou vlnu se sinusovým průběhem. Světelná vlna je charakterizována třemi základními vlastnostmi (1313):

- přesně známá vlnová délka záření,
- velmi malá vlnová délka umožňuje měřit s vysokým rozlišením,
- všechny světelné vlny mají stejnou fázi a umožňují vznik interference.

Na obrázku (Obr. 2.1) je popsán princip laserinterferometru. Ze zdroje vychází paprsek monochromatického světla a dopadá na slabě postříbřenou polopropustnou destičku nastavenou pod úhlem 45° ke směru paprsku. Na destičce se paprsek rozdělí na dva vzájemně kolmé paprsky. Paprsek, který projde destičkou, následně dopadá na pohyblivé zrcadlo Z1. Odražený paprsek dopadá na zrcadlo fixní Z2. Po odrazu na zrcadlech se oba paprsky vrátí na polopropustnou destičku, kde se opět rozdělí. Část paprsků se vrací do zdroje a část postupuje směrem k detektoru s fotocitlivými prvky, kde se detekuje interference paprsků. Interferometrie vyjadřuje vzájemné ovlivňování, prolínání nebo střetání se jevů či hmoty. V tomto případě paprsků. Při jejich pohybu a prolínání se v určitém bodě vzájemně zesilují, zatímco v jiných bodech vzájemně ruší. Počet interferenčních proužků prošlých přes štěrbinu fotodetektoru je mírou změny délky dx (2).



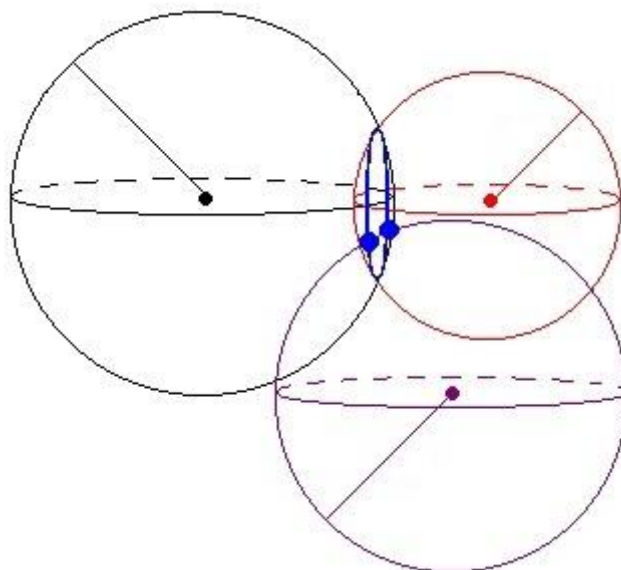
Obr. 2.1: Princip funkce interferometru (9)

Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu závisí na indexu lomu vzduchu. Index lomu vzduchu je funkcí teploty, tlaku, vlhkosti a jeho složení. Nejistotu měření ovlivňuje též znečištění optické cesty mezi laserem, interferometrem a odražečem a dále skutečná teplota měřeného předmětu. Vlnová délka laserového záření vzroste o 1 μm těmito změnami atmosférických podmínek (13):

- 1 $^{\circ}\text{C}$ nárůst teploty vzduchu,
- 3,7 millibaru pokles tlaku vzduchu,
- 30 % pokles relativní vlhkosti.

2.2 Princip trilaterace

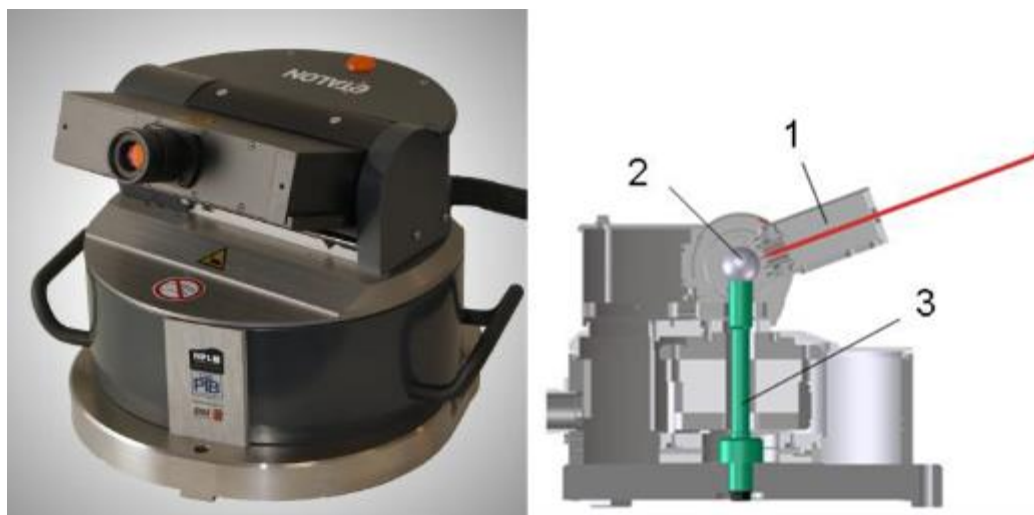
Trilaterace je způsob výpočtu polohy na principu kreslení průsečíků kružnic nebo koulí (Obr. 2.2). Při znalosti vzdálenosti od jedné měřicí pozice se předpokládá, že měřený bod se nachází v místě povrchu koule. Pokud k tomu přidáme vzdálenost od druhé měřicí pozice, poloha měřeného bodu se zredukuje na kružnici, která je průnikem těchto dvou koulí. Koule, vytvořená z místa třetí měřicí pozice, vymeze pouze dvě možné polohy měřeného bodu. Jedna z nich se nachází mimo měřicí prostor stroje a pro měření je tedy nepoužitelná. Druhá poloha je zaznamenána a zpracována. Tohoto principu využívají GPS přístroje pro zaznamenání pozice na povrchu Země (14).



Obr. 2.2: Princip trilaterace (14)

2.3 Měřicí přístroj laser tracer

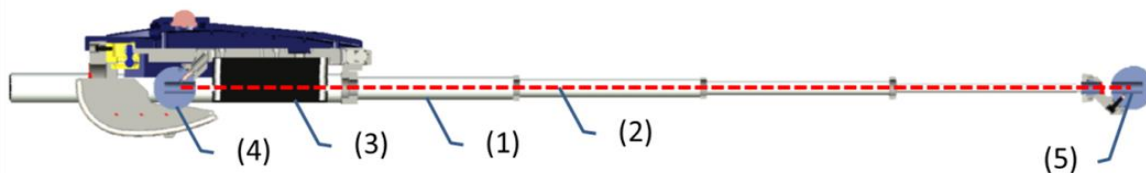
Hlavní výhodou laser traceru je možnost sledování bodu na libovolné dráze v prostoru. V kombinaci se softwarem Trac-cal je kalibrace možná v extrémně rychlém čase, jednoduše a velmi přesně. Obrázek (Obr. 2.3) schematicky popisuje laser tracer. Číslem 1 je označen měřicí paprsek interferometru s přesností $0,001 \mu\text{m}$, číslo 2 označuje patentovou referenční kouli s odchylkou $< 0,050 \mu\text{m}$ a jako poslední je na obrázku číslem 3 zobrazen pevný čep (5).



Obr. 2.3: Laser tracer a jeho řez (5)

Firma Etalon AG vyrábí laser tracer ve dvou provedeních. Pro kalibraci menších nebo středně velkých obráběcích center poskytuje Laser tracer-MT (mechanical tracking). Ten se využívá pro měření strojů s pracovním rozsahem od 0,3 do 1 metru (Obr. 2.5). Přístroj je spojen s obráběcím strojem pomocí velice přesných kulových kloubů a víceúhlový teleskopický systém je zodpovědný za sledování interferometru. Uvnitř každého prvku teleskopického systému jsou speciální části, které jej chrání před nečistotami

a poškozením. Vliv podmínek prostředí je kompenzován užitím teplotních a tlakových senzorů. Na obrázku (Obr. 2.4) je číslem (1) označena teleskopická jednotka, číslo (2) zobrazuje měřící paprsek, číslo (3) interferometr a čísla (4) a (5) kulové klouby (5).



Obr. 2.4: Laser tracer mechanical tracking – řez (5)

Hélio-neonová jednotka laseru se nachází v externím kontrolním boxu a paprsek je předáván do laser traceru pomocí optických vláken. Tepelné zatížení je díky tomu u obou typů přístroje výrazně sníženo (5).



Obr. 2.5: Laser tracer MT (5)

V tabulce (Tabulka 2.1) jsou shrnuty základní parametry laser traceru a v tabulce (Tabulka 2.2) základní parametry laser traceru MT (5).

Tabulka 2.1: Parametry laser traceru (5)

Hmotnost a rozměr		Provozní rozsah		Přesnost	
hmotnost	přibližně 15 kg	úhlový rozsah elevační osy	-20° až +85°	Frekvenční stabilita laseru 24 h	$2 \cdot 10^{-8}$
hmotnost ovladače	přibližně 10 kg	úhlový rozsah osy azimutu	$\pm 200^\circ$	stabilita referenční koule	$\pm 0.1 \mu\text{m}$
výška	200 mm	měřicí rozsah	0,2 až 15 m	rozlišení interferometru	0.001 μm

Tabulka 2.2: Parametry laser traceru MT (5)

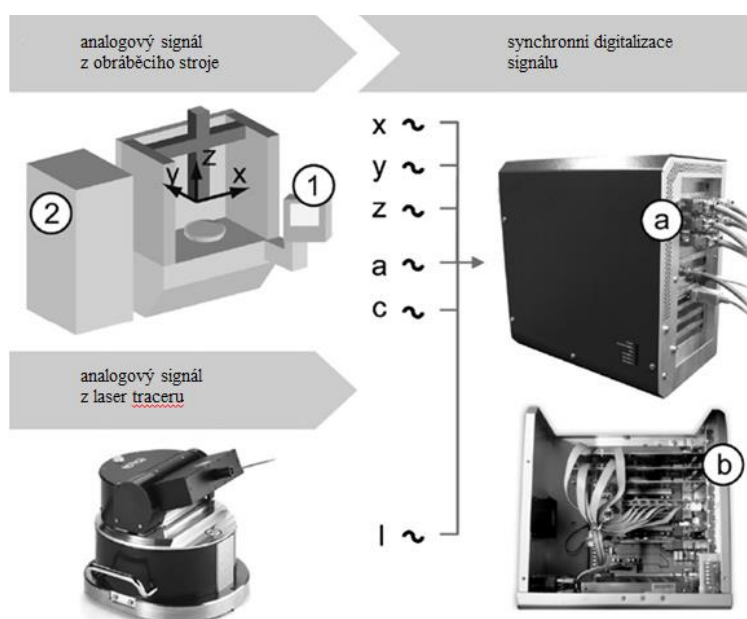
Hmotnost a rozměr		Provozní rozsah		Přesnost	
hmotnost	přibližně 2.2 kg	úhlový rozsah elevační osy	-35° až +80°	Frekvenční stabilita laseru 24 h	$2 \cdot 10^{-8}$
hmotnost ovladače	přibližně 8 kg	úhlový rozsah osy azimutu	omezený	rozlišení interferometru	0.001 μm
výška	120 mm	měřicí rozsah	0,3 až 1 m		

2.4 Aktuální možné aplikace laser traceru

Jak již bylo zmíněno, laser tracer je „nováčkem“ mezi měřicími systémy. Některé možnosti využití tohoto přístroje a aplikace použití jsou shrnuty v následujících třech kapitolách.

2.4.1 Využití metody měření „On the fly“

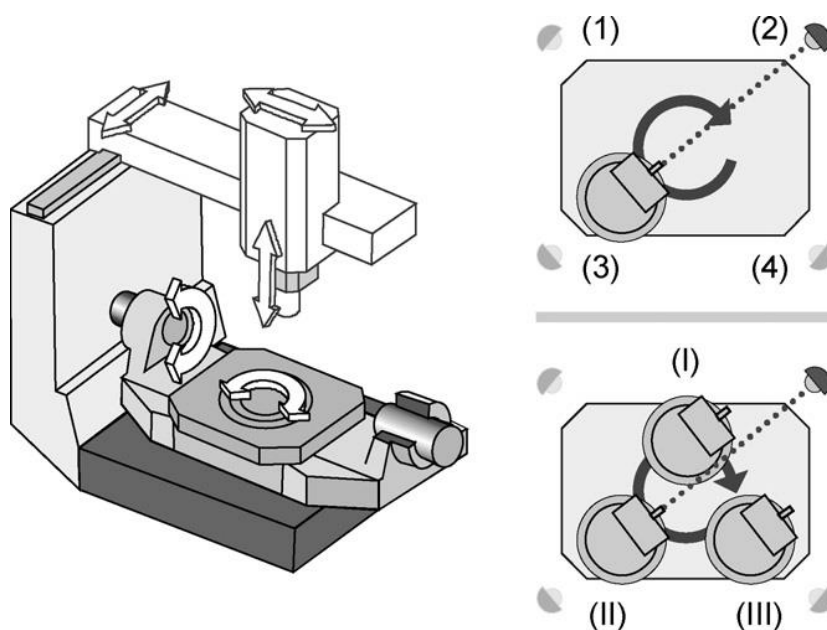
Existují tři možné způsoby zaznamenávání údajů o poloze obráběcího stroje. První z nich získává data z obráběcího stroje v tzv. režimu „offline“. Doba měření daného bodu je pevně daná. Druhou možností je triggerování, při kterém se rozjíždění a zastavování stroje řídí signály od měřicího přístroje. Třetí způsob je zpracování měřených hodnot z měřicího zařízení, kdy elektronika, která je zabudovaná v laser traceru, je obousměrně propojená s řídicí jednotkou stroje a data o poloze konfrontuje s průběhem interferometrického měření (Obr. 2.6). Zde je doba potřebná k zaznamenání hodnoty měření přizpůsobena aktuální situaci. Tento způsob měření se nazývá „On the fly“ (11). Zajišťuje tak plynulé měření pohybu stroje, rychlejší provedení kalibrace a drastické zvýšení hustoty měřených bodů. Je možné zaznamenat úchytky s krátkou vlnovou délkou, lze také dosáhnout vzorkování až $3 \text{ body} \cdot \text{mm}^{-1}$ a dobu měření lze redukovat na polovinu. V případě nestihnutí zaznamenání hodnoty měřené pozice nehrozí, že by muselo být celé měření provedeno znovu (15).



Obr. 2.6: Možné způsoby zaznamenávání naměřených hodnot (11)

2.4.2 Kalibrace rotačních os

U mnoha moderních obráběcích strojů a center je kinematický řetězec lineárních os doplněn rotačními osami. Jedná se o čtyř- a pětiosá obráběcí centra. Přesná poloha a orientace rotačních os v obráběcím stroji souřadnicového systému jsou důležité pro pohyb v prostoru stroje. V současné době se pro měření odchylek rotačních os používají bezkontaktní senzory v kombinaci s interferometrem a pomocnými středícími zařízeními. Jedná se o časově velmi náročné měření. Laser tracer umožňuje vhodnější způsob měření rotační osy, ten je vyobrazen na obrázku (Obr. 2.7) (11). Tracer je postupně umístěn do třech různých pozic na rotačním stole stroje označených (I), (II) a (III). Obráběcí stroj se pohybuje dle nakonfigurovaného pohybu a v každém definovaném místě měření (1), (2), (3) a (4) je změřena poloha reflektoru při současném otáčení rotačního stolu stroje (5).

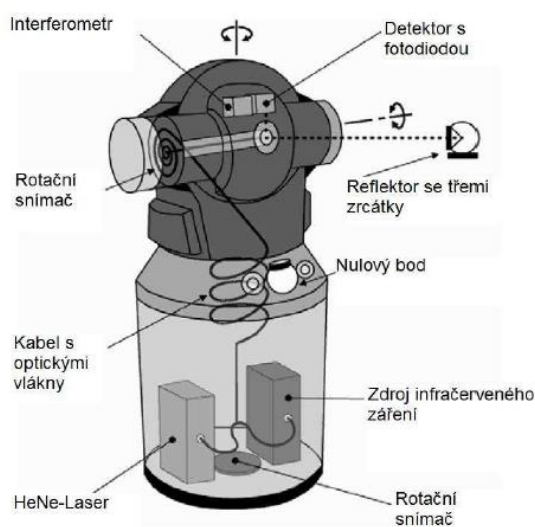


Obr. 2.7: Způsob měření rotačních os (11)

2.4.3 Porovnání laser traceru oproti jiným srovnatelným zařízením

V experimentu, který bude níže popsán, byla použita měřící zařízení laser tracer a různými firmami vyrobené laser trackery. Srovnání těchto zařízení je možné proto, že pracují na podobném principu měření.

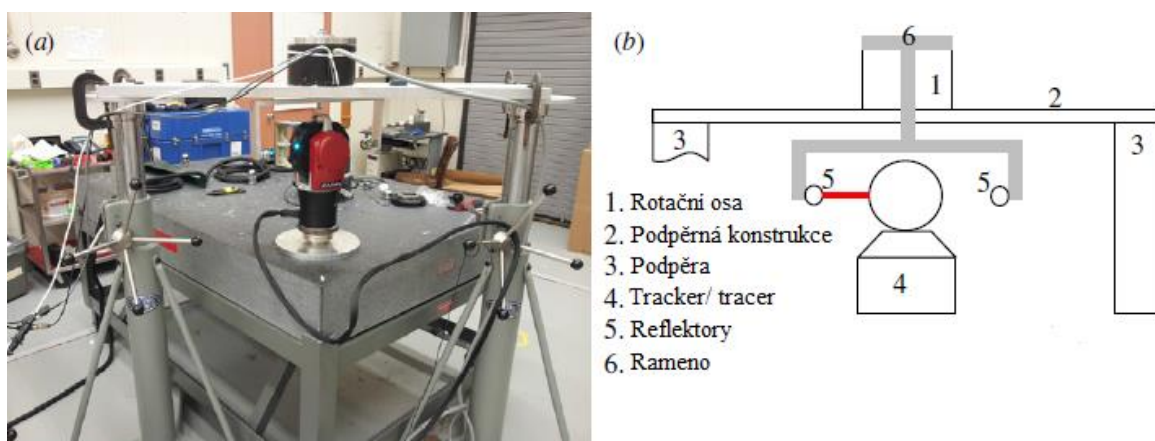
Laser tracker (Obr. 2.8) je velmi přesný přenosný laserový přístroj, který také může sloužit pro kalibraci obráběcích strojů. Princip měření je založen na sledování polohy sondy s koutovým odražečem (SMR = Spherically Mounted Retro Reflector) laserovým paprskem a odečítáním sférických souřadnic sondy. To znamená, že tracker měří dva úhly a vzdálenost (16).



Obr. 2.8: Schéma Laser trackeru

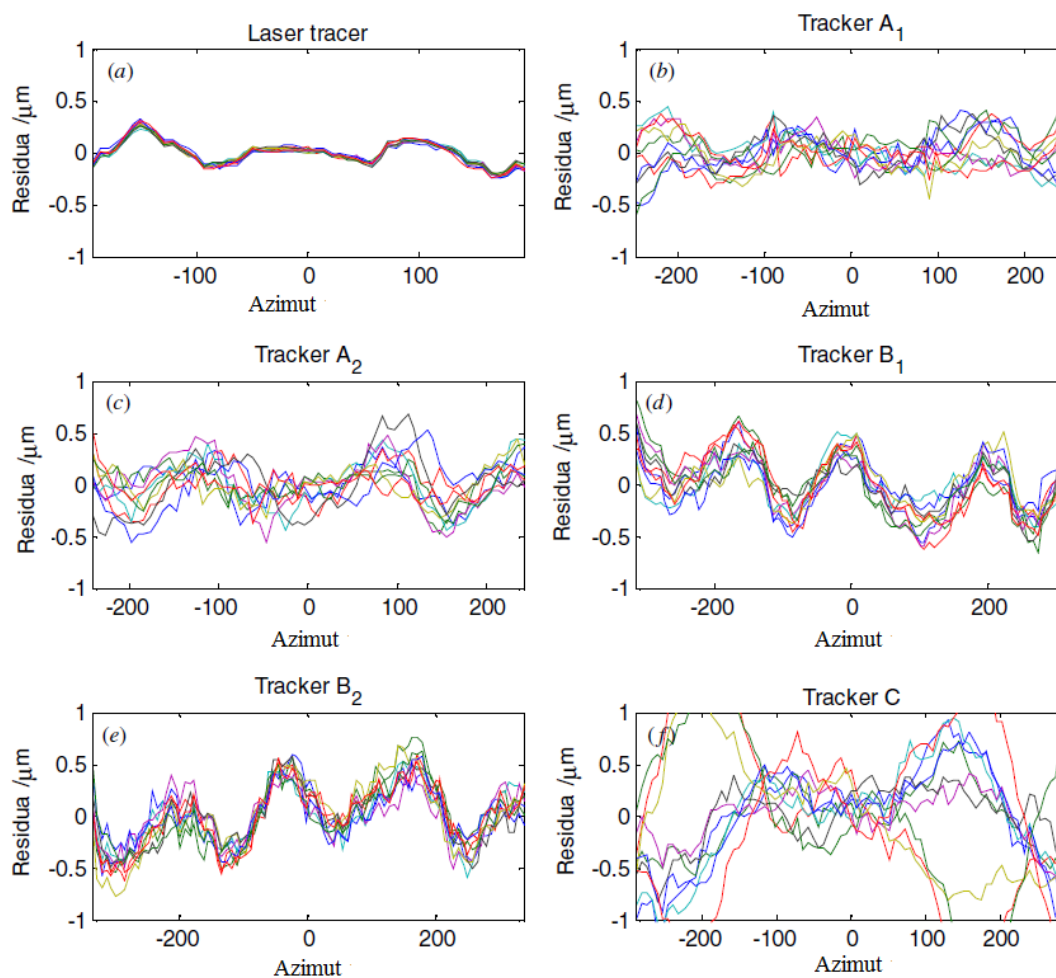
Při měření laser trackery vznikají malé, ale měřitelné úhlové chyby v důsledku otáčení se hlavy trackeru. Laser tracer byl proto navržen tak, aby mohl tyto chyby co nejvíce eliminovat. Cílem měření je tyto chyby porovnat a to tak, že zařízení budou snímat polohy kruhové dráhy (17).

Pro realizaci kruhové dráhy byla vytvořena speciální aparatura. Její reálnou podobu a schéma zobrazuje obrázek (Obr. 2.9). Číslo 1 reprezentuje prvek s rotační osou, který vykonává rotační pohyb. Na tomto prvku je připevněno kovové rameno označené číslem 6, a to při otáčení vytváří kruhovou dráhu. Na tomto profilu jsou připevněny dva reflektory, umístěné vůči sobě o 180° - číslo 5. Mezi reflektory je umístěno měřící zařízení, číslo 4. Konstrukce potřebná pro realizaci experimentu je označena čísly 2 a 3. Je ovšem nutné oddělit chybu vznikající při rotaci osy od chyb, které vytváří měřící zařízení. (17)



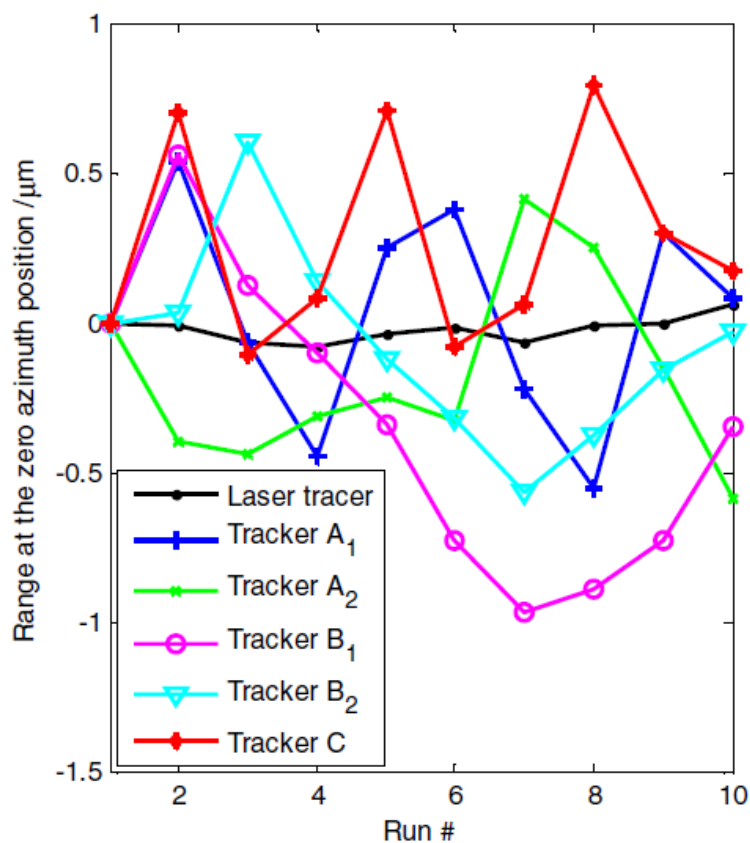
Obr. 2.9: Experiment měření (a) Reálná podoba, (b) schéma (17)

Jedním z výsledků bylo měření opakovatelnosti 10 po sobě jdoucích měření. Porovnání hodnot zobrazuje obrázek (Obr. 2.10). Hodnoty směrodatné odchyly reziduí (rozdíl mezi naměřenou a vypočítanou hodnotou) v jakékoliv poloze azimutu (úhlovém rozsahu v jedné rovině) jsou pro laser tracer asi $0,02 \mu\text{m}$. U trackerů se tyto hodnoty pohybují od $0,10 \mu\text{m}$ do přibližně $0,50 \mu\text{m}$. Výsledné zhodnocení ukazuje, že u laser traceru je viditelná přítomnost malé systematické chyby, ovšem jeho použití je nejvhodnější (17).



Obr. 2.10: Výsledky testu měření opakovatelnosti (17)

Výsledky z výše uvedeného měření byly použity při dalším vyhodnocení. Jak již bylo zmíněno, probíhalo 10 po sobě jdoucích měření, přičemž jedno měření trvalo zhruba 10 minut. Data z tohoto experimentu sloužila ke studii krátkodobé opakovatelnosti. Obrázek (Obr. 2.11) zobrazuje měření rozsahu pro první naměřený bod v každém běhu, který odpovídá nulovému úhlu natočení vřetene. Krátkodobá opakovatelnost laser traceru je mnohem lepší oproti laser trackerům. Odchyłky pro laser tracer mají rozsah $\pm 0,1 \mu\text{m}$, zatímco odchyłky pro trackery se pohybují v rozsahu $\pm 1 \mu\text{m}$ (17).



Obr. 2.11: Porovnání krátkodobé opakovatelnosti (17)

3 POSTUP MĚŘENÍ

Cílem měření bylo porovnání vhodnosti dvou různých kinematických modelů na měření tříosých frézovacích center, které software Trac-Cal umožňuje. Jedná se o metody FRB a RRB, které jsou podrobněji popsány níže. Metoda FRB umožňuje plné zmapování chyb v prostoru stroje, tzn. výsledkem je všech 21 chybových parametrů, oproti tomu metoda RRB vyhodnocuje pouze 17 chybových parametrů.

Měření bylo provedeno na stroji MCV 754 QUICK (Obr. 3.1) od společnosti KOVOSVIT MAS. Jedná se o vertikální obráběcí centrum, které používá lineární valivá vedení k pohybu všech tří os (18).

Tabulka 3.1: Parametry stroje (18)



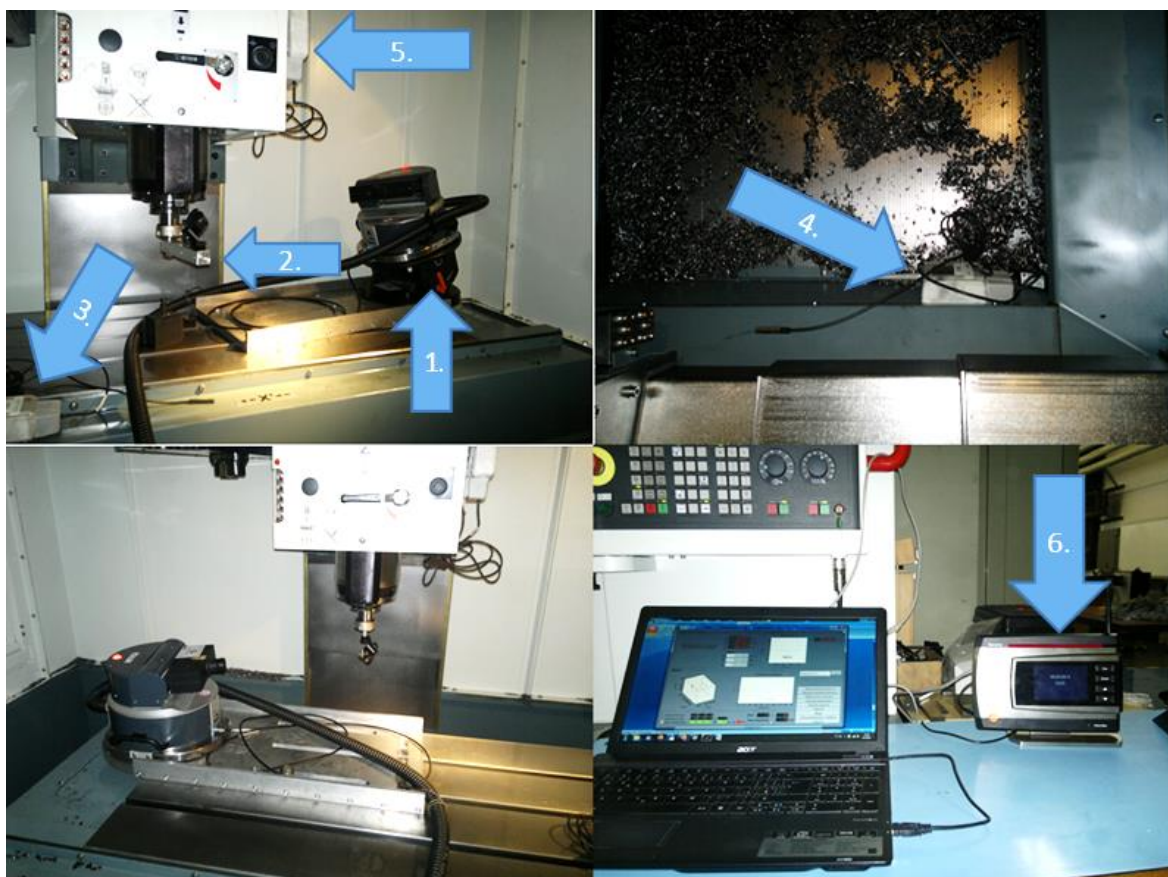
Osa X	754 mm
Osa Y	500 mm
Osa Z	550 mm
Max. posuv	15 000 mm/min
Přesnost polohování	0,012 mm
Opakovaná přesnost	0,005 mm

Obr. 3.1: MCV 754 QUICK (18)

Postup měření je v obou případech identický. Hlavními prvky potřebnými k měření byly laser tracer od firmy Etalon a též firmou vytvořený softwarový program Trac-cal. Software Trac-cal slouží k provedení kalibrace včetně vytvoření korekcí do řízení kalibrovaného obráběcího stroje. Po zadání potřebných informací uživatel navrhne postup kalibrace a za pomoci softwaru vygeneruje kalibrační mapu a zanesse korekce do řízení obráběcího stroje.

Laser tracer byl postupně umístěn do šesti různých pozic uvnitř pracovního prostoru obráběcího centra. V některých pozicích byl pod tracer vložen podstavec vyrobený firmou Etalon a to z toho důvodu, aby se měnila poloha traceru i v Z-tové ose. To napomáhá k zpřesnění výsledků měření. Do vřetene stroje byl uchycen upínací prvek a na něj byl připevněn reflektor, který odráží paprsky vyslané laser tracerem. Upínacím prvkem se v tomto případě myslí hliníkový profil kvádřového tvaru, který slouží k možné změně polohy reflektoru. Tracer automaticky sleduje nakonfigurovaný pohyb stroje přes námi zadaný soubor poloh v prostoru. V každé definované pozici je přístroj zastaven a zaznamenává naměřené vzdálenosti. Důležitým krokem je také umístění teplotních čidel,

kteřá snímají teplotu jednotlivých os. Tyto snímače vyrábí firma Testo, která spolupracuje s firmou Etalon. Po dobu měření je zaznamenávání teploty plně synchronizováno se softwarem. Obr. 3.2 plně reprezentuje popsany postup měření. Číslem 1 je zobrazen již zmiňovaný podstavec, upínací prvek je popsán číslem 2, teplotní čidla v ose X, Y a Z znázorňují čísla 3, 4 a 5. Snímač Testo je zobrazen číslem 6. Důležité je dbát na pozornost při pohybu přes celý pracovní prostor obráběcího stroje, aby nedošlo k přerušení signálu mezi tracerem a reflektorem a dále také na možný náraz do jakéhokoliv předmětu.



Obr. 3.2: Popis důležitých prvků při měření

3.1 Trac-cal

V případě softwaru Trac-cal se jedná o revoluční metodu pro prostorové kalibrace a ověřování měřidel obráběcích strojů všech velikostí. Metoda je založena na principu interferometrického měření prostorových posunů. Doba potřebná pro plné zmapování chyb se pohybuje v řádech hodin, záleží na velikosti měřeného stroje (19).

Software Trac-cal je rozdělen do čtyř hlavních částí:

- modul plán – konfigurace strategie měření a simulace výsledků,
- modul měření – aktuální problematika probíhajícího měření,
- modul vyhodnocení – přehled naměřených hodnot,
- modul kvalifikace – vyhodnocení dle normy.

Výhody softwaru:

- flexibilní adaptace na různé typy strojů,
- prognóza dosažitelné přesnosti v simulačním režimu,
- automatické generování požadovaného kontrolního kódu pro měření,
- přímá vazba mezi strojem a kvalitou naměřených dat,
- automatické vyhodnocení měřené a grafická vizualizace,
- výstupem je kompletní mapa chyb.

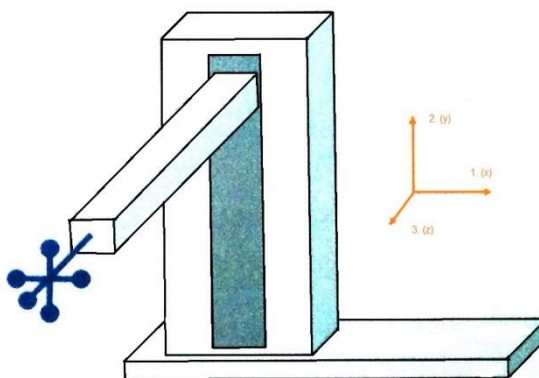
3.1.1 Modul plán

Modul plán slouží k přípravě a vytváření cest pro měření a simulaci výsledků. Nejprve by měl být zvolen model stroje, na kterém bude měření probíhat. Zde je na výběr z deseti možných typů. V tabulce (Tabulka 3.2) jsou shrnuty vlastnosti mnou vybraných modelů. Pro svá měření jsem používal model FRB (plné těleso) a RRB (redukované pevné tělo).

Tabulka 3.2: Modely strojů a jejich parametry

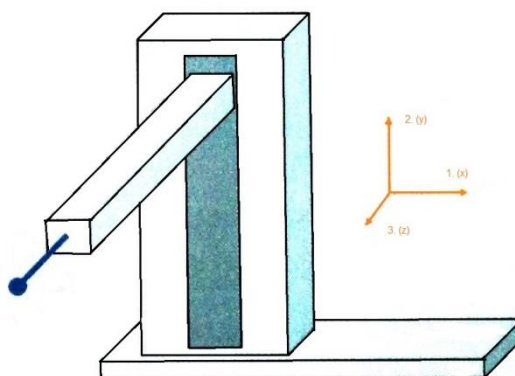
Model	Použití	Výstup chybových parametrů		Požadavky
		Změří (počet)	Nezměří	
FRB	CMM s hvězdicovou hlavou	21	-	6 měřících pozic a offset ve směru všech tří os
RRB	Stroje s jedním ohniskovým bodem	17	ECY, EAZ, EBZ, ECZ	4 měřící pozice a bez offsetu
FRB+E	Stoje s hvězdicovou hlavou, u kterých dochází k ohýbání sloupu	23	-	6 měřících pozic a offset ve směru všech tří os
IRB1	Frézovací stroje s vřetenem ve směru první osy	20	EAZ	5 měřících pozic a offset ve směru osy X
RRB (2D)	U dvouosých strojů, např. soustruhy	11	-	4 měřící pozice a bez offsetu

- Model FRB – plná tělesa je schopen vyhodnotit 21 chybových parametrů. Rotace poslední osy je určena nejméně 3 měřeními s rozdílným offsetem reflektoru (19).



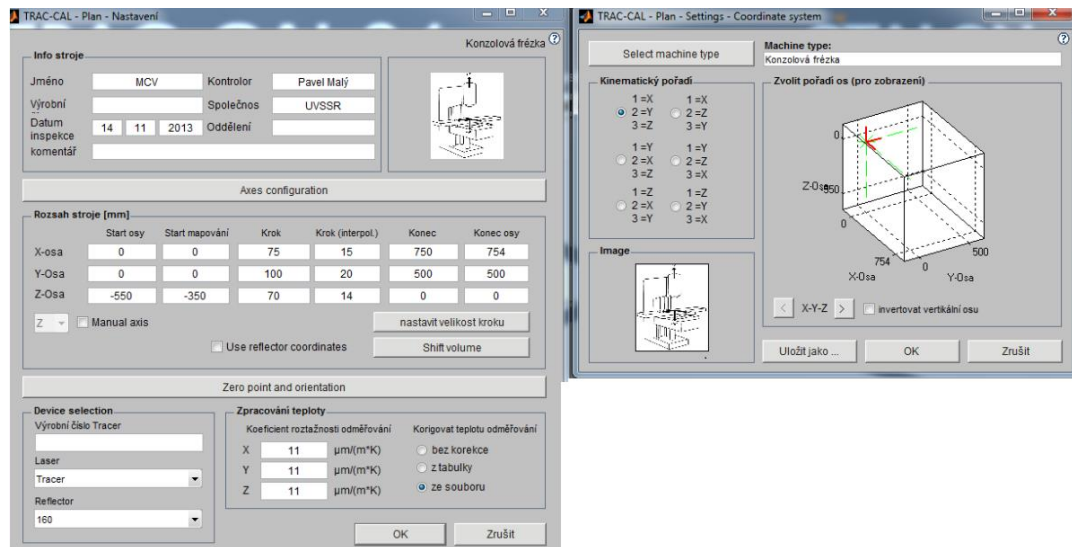
Obr. 3.3: Model FRB

- Model RRB – redukované pevné těleso, vyhodnocuje 17 chybových parametrů. Reflektor je namontovaný na středu bodu nástroje. Rotace kolem bodu středu nástroje nejsou stanoveny (19).



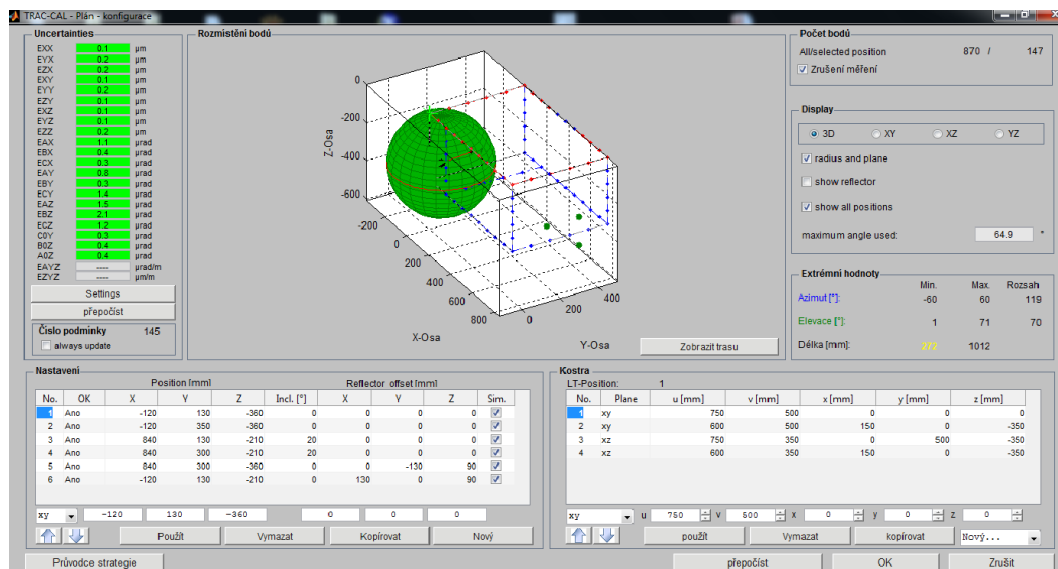
Obr. 3.4: Model RRB

Po zvolení modelu přichází na řadu odkaz nastavení. Zde se nastavuje měřicí rozsah stroje, dále počáteční a koncový rozsah, ve kterém bude probíhat mapování výsledků a také krok, který definuje vzdálenost mezi jednotlivými měřícími body. Dále je nutno definovat měřicí zařízení, v tomto případě Laser Tracer a používaný reflektor. Důležitým krokem je zvolení správné orientace os v souřadném systému a jejich kinematické pořadí. Jedním z posledních kroků v této záložce je nastavení teplotního koeficientu roztažnosti (Obr. 3.5).



Obr. 3.5: Modul nastavení

Základní částí přípravy je záložka konfigurace, ve které se nastavuje strategie měření, a která významně ovlivňuje nejistotu výsledků. Zde se definují polohy, ve kterých bude umístěn laser tracer. Pro jednotlivé polohy traceru se musí vytvořit trasa měření, ve které budou zaznamenávány body. V případě modelu FRB bylo definováno 6 různých pozic pro měřicí zařízení a ve třech těchto polohách byl nadefinován podstavec. U modelu FRB je důležité nadefinovat také polohu offsetu, což bylo provedeno pro pátou a šestou pozici. Důraz musí být kladen na to, aby zadané hodnoty byly v milimetrech. Po nastavení všech pozic a jednotlivých tras pro tyto pozice musí být proveden přepočítání, který vyhodnotí námi zvolenou strategii a určí možné nejistoty. Ty jsou zobrazeny v levém horním rohu pro jednotlivé úchytky (Obr. 3.6). Jestliže jsou nejistoty v námi zvolené toleranci, všech 21 úchytek je podsvíceno zelenou barvou a zvolená strategie je vhodná. Jestliže je strategie navrhována špatně, jsou některé parametry podsvíceny červenou barvou a je možné si vybrat ze dvou možností. První z nich je upravit strategii, např. změnou trasy nebo polohou offsetu a nebo druhá, spokojit se s možností větší odchylky a strategii ponechat.



Obr. 3.6: Záložka konfigurace

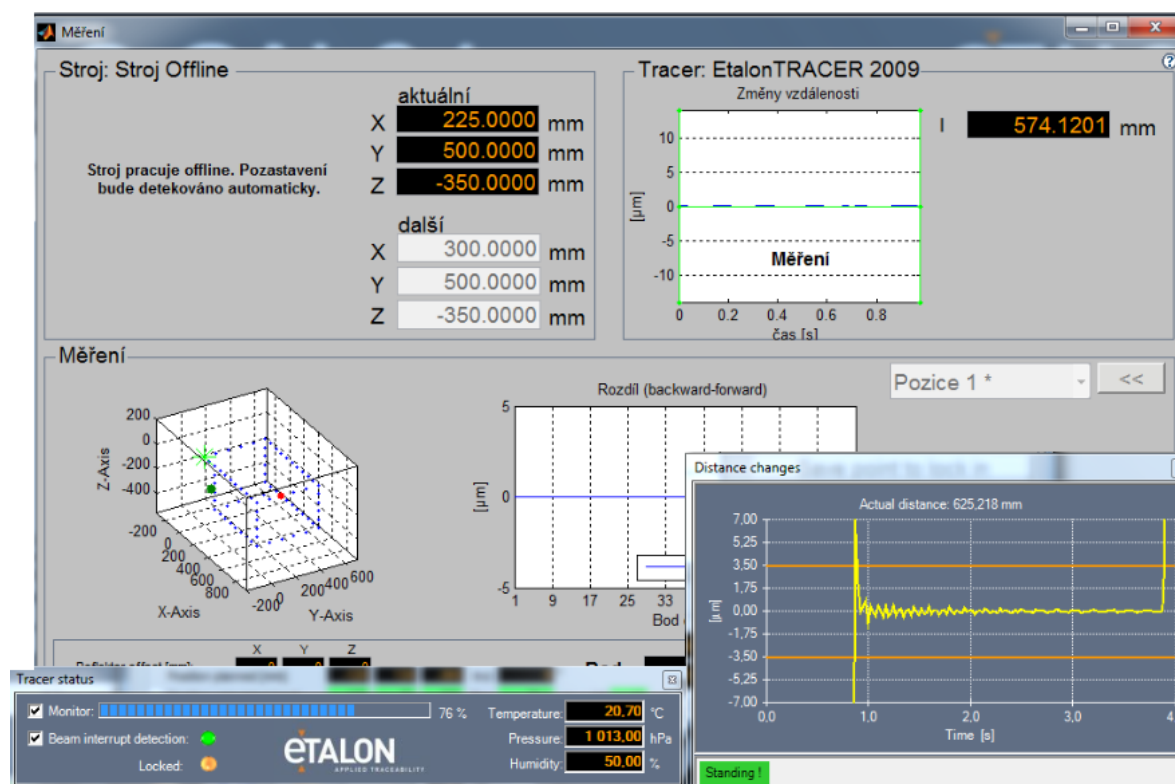
Pomocí funkce simulace proběhne vyhodnocení nejistot pomocí numerické metody Monte Carlo. Tato funkce nejen vyhodnotí, zda je reálné následné vyhodnocení při měření, ale také vypíše s jakou nejistotou mohou být parametry stanoveny. Je tedy možné ještě před samotným měřením optimalizovat konfiguraci měření a vzít v úvahu kvalitu výsledků. Při spuštění simulace je možné vybrat počet chodů simulace touto metodou. Po provedení simulace jsou vypsány nejistoty v příslušném schématu a jestliže program simulaci nedovolí, znamená to, že nejsou splněny dané podmínky pro kinematický model (19).

Tlačítkem vytvořit instrukce se vytvoří dokument aplikace Word, ve kterém je vypsána strategie měření. Najdeme zde např. název stroje, na kterém probíhá měření, jeho pracovní rozsah, nejistoty, které mohou vzniknout při měření parametrů a jako poslední rozpis všech pozic, do kterých jsme umístili měřící přístroj, popřípadě umístění offsetu.

Poslední záložkou v tomto modulu je generovat CNC. Jak již název vypovídá, po spuštění se provede vytvoření CNC kódu, ve kterém je přesně nakonfigurovaný pohyb stroje. Tento kód je načten obráběcím strojem a je možno přejít k dalšímu kroku.

3.1.2 Modul měření

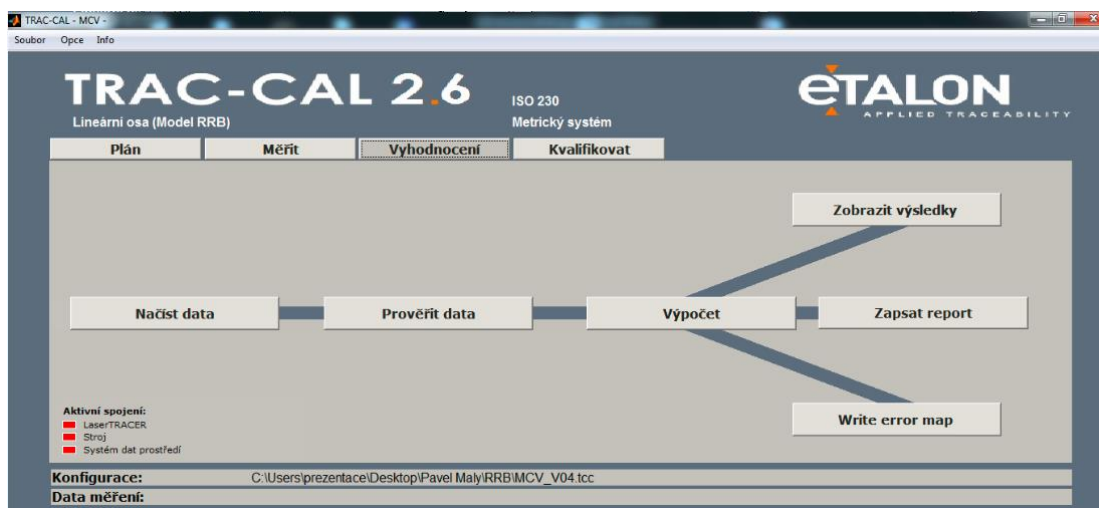
Zde jsou pouze dvě možné funkce. První je analýza spojení, při které se vytváří spojení mezi obráběcím strojem, měřícím strojem a snímačem teplot. Po úspěšném spojení přichází na řadu druhá funkce, která aktivuje samotné měření. V této části je možné kontrolovat a nastavovat námi definované pozice, ve kterých v danou chvíli chceme měřit. Po celou dobu měření je možné kontrolovat aktuální pozici traceru, odchylku v daném místě nebo průběh teplot v jednotlivých osách, hodnoty teploty okolního prostředí, tlaku a vlhkosti (Obr. 3.7).



Obr. 3.7: Modul měření

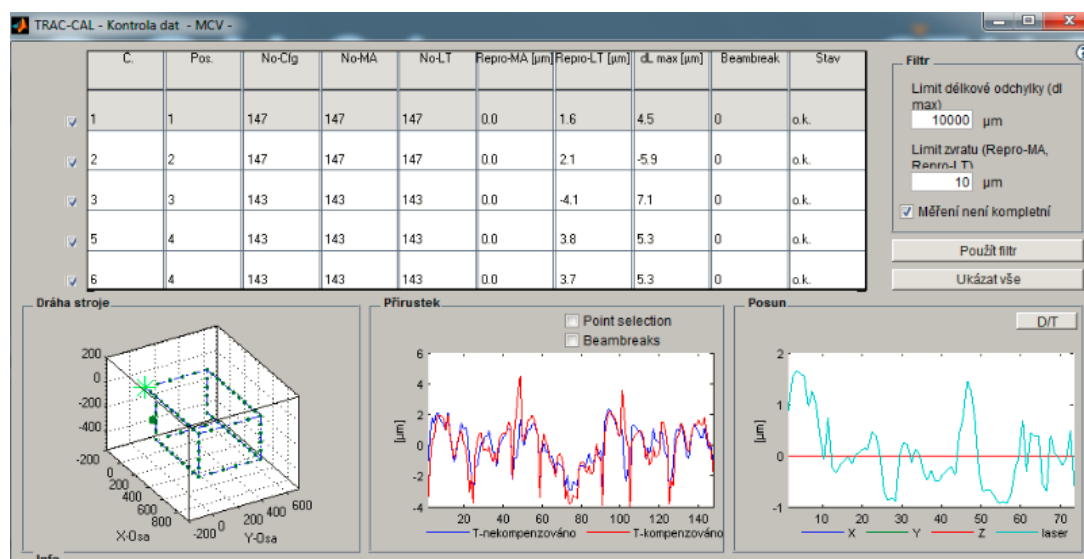
3.1.3 Modul vyhodnocení

V tomto modulu (Obr. 3.8) je hlavní funkcí vyhodnocení a zdokumentování naměřených dat. Prvním úkonem dochází k načtení souboru naměřených dat. Tento pokyn zpracovává informace všech naměřených bodů (vzdálenosti, teploty atd.).



Obr. 3.8: Modul vyhodnocení

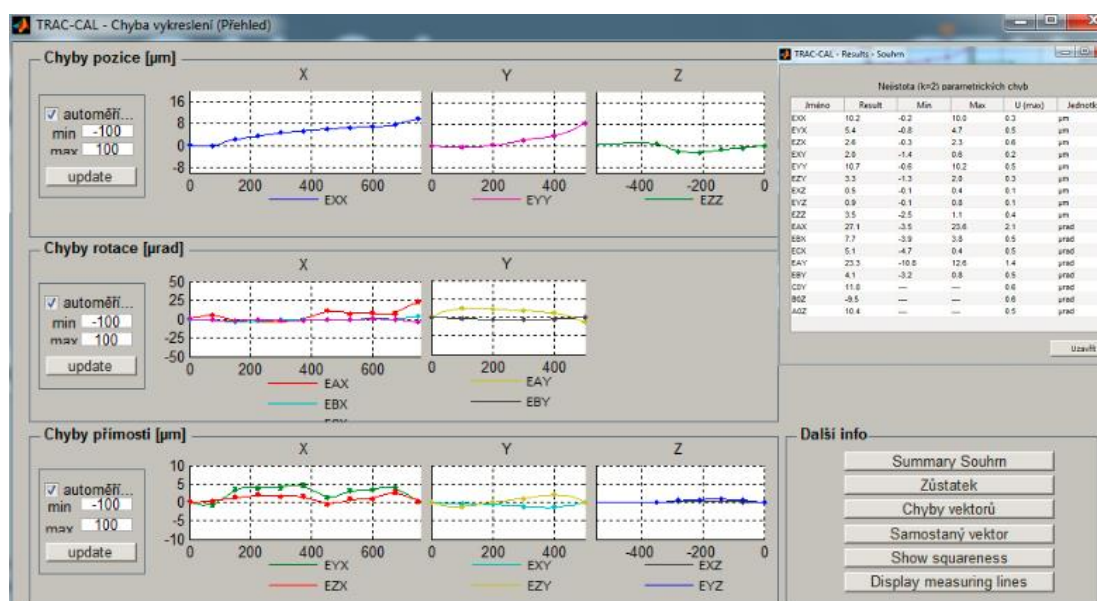
Po jejich načtení je další funkcí prověřit data. V tabulce jsou uvedeny jednotlivé měřené pozice a pro každou z nich počet měřených bodů, rozdíly vzdáleností při pohybu traceru a hlavně stav, který posuzuje, zda měření v dané pozici může být vyhodnoceno. Dále je v tomto okně možno vidět dráhu stroje a grafy reziduí při kompenzaci teploty a bez kompenzace a graf posunu, který reprezentuje rozdíl vzdáleností pohybu vybraného bohu měření (Obr. 3.9).



Obr. 3.9: Kontrola dat

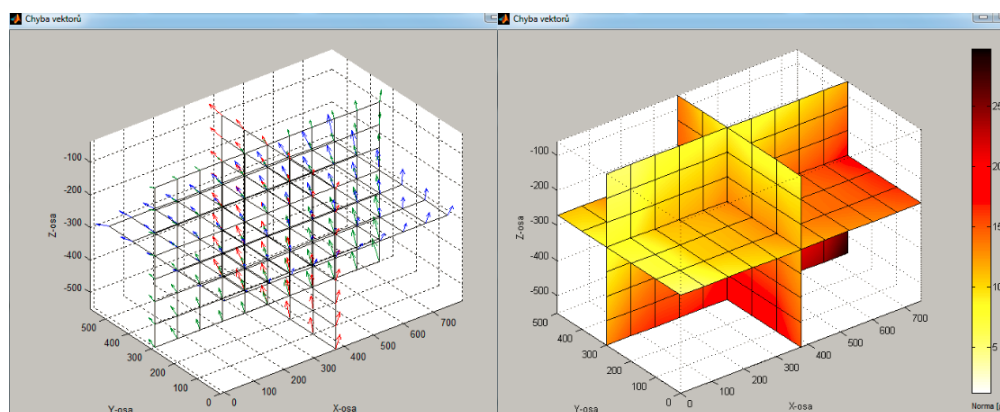
Další prvkem modulu vyhodnocení je záložka výpočet. Při spuštění dojde k vypočítání výsledků měření. Příslušné nejistoty odchylek jsou stanoveny matematickou metodou Monte Carlo. Následuje část zobrazit výsledky. Po spuštění se otevře okno (Obr. 3.10), ve kterém jsou vyobrazeny grafy měřených odchylek (chyby pozice, chyby rotace, chyby

přímosti). Tyto grafy jsou součástí měřicího reportu. Odkaz souhrn zobrazuje konkrétní číselné hodnoty daných odchylek. Je také součástí měřicího reportu.



Obr. 3.10: Přehled vyhodnocení

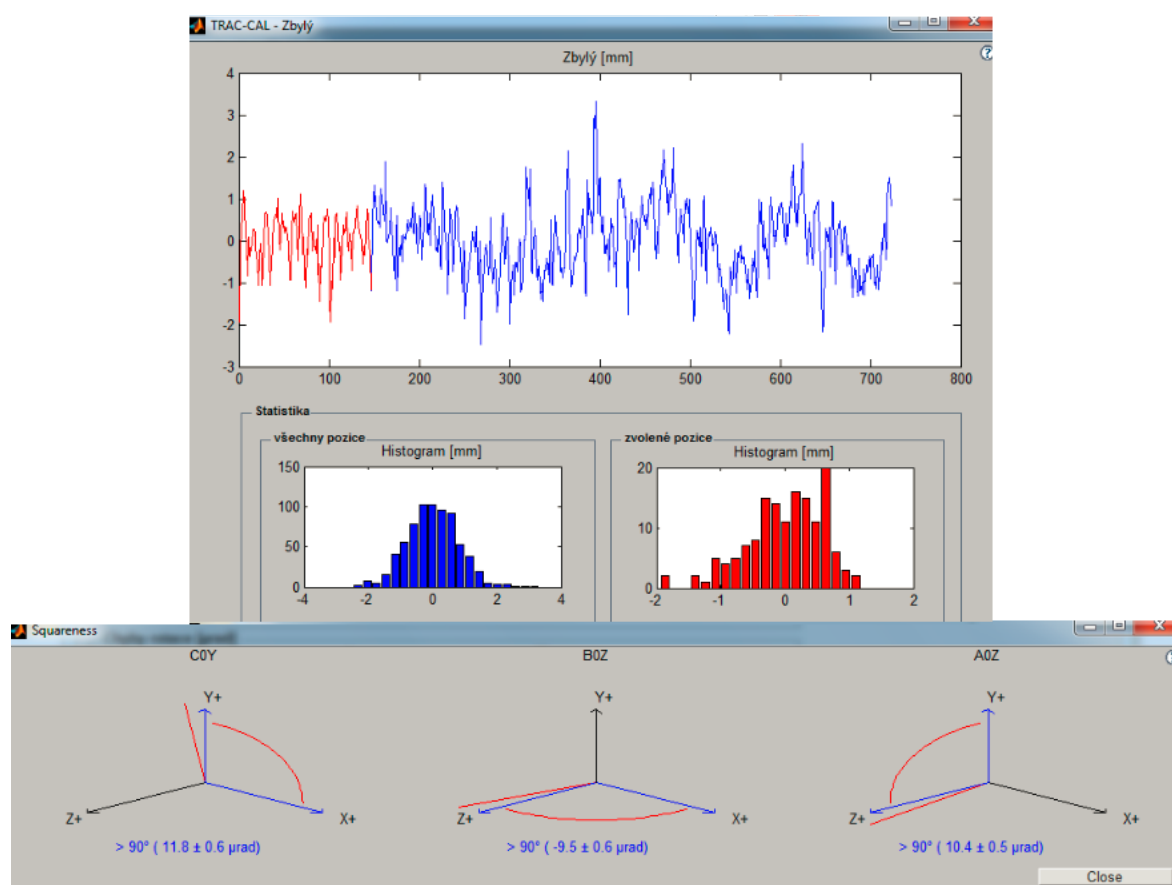
Další částí je mapa chybových vektorů. Ta umožňuje zobrazit chybové vektory v prostoru nebo v požadovaných rovinách. Pro konkrétní představivost se nabízí možnost zobrazení chybových vektorů v měřítku. Tato možnost (Obr. 3.11 vpravo) reprezentuje celý prostor obráběcího stroje různou barvou zbarvení a s větší odchylkou se barva ztmavuje.



Obr. 3.11: Chyby vektorů

Jedním z dalších výpočtů jsou hodnoty kolmosti, které jsou pro větší přehlednost také vykresleny. Uživatel si snadněji představí, zda je úhel mezi dvěma osami větší nebo menší než 90° (Obr. 3.12).

Vykreslení reziduí neboli zbytků, získáme graf, který reprezentuje všechny měřicí pozice a také dva histogramy. Rezidua jsou rozdíly mezi naměřenou a vypočítanou hodnotou. Jejich histogram by měl představovat Gaussovo normální rozdělení. Jestliže tomu tak je, znamená to, že měřením bylo zachyceno chování stroje a identifikována kvalita měření (19). V tomto případě (Obr. 3.12) histogram připomíná křivku Gaussova normálního rozdělení a měření tedy se dá považovat za správné.



Obr. 3.12: Vyhodnocení reziduí a kolmosti

Posledními prvky modulu vyhodnocení je: záložka zapsat mapu chyb, tato funkce zpřístupní mapu chyb pod univerzálním formátem a zapsat report, který vypíše podrobnější krátkou zprávu se stanovenými hodnotami odchylek a graficky je znázorní.

3.1.4 Modul kvalifikace

Tento modul nebyl při měření využit, avšak při jeho použití je software schopen kvantifikovat naměřená data dle vybrané normy.

4 VYHODNOCENÍ DAT

4.1 Porovnání modelu FRB a RRB

Výsledné měřicí zprávy těchto měření jsou uvedeny v bakalářské práci jako přílohy. Přílohou 1 je vytvořená měřicí zpráva softwarem Trac-cal, po dokončení měření metodou FRB. Příloha 2 obsahuje konečné vyhodnocení metody RRB.

Již prvním viditelným rozdílem jsou naměřené teploty při jednotlivých měřeních, ty mají velmi výrazný vliv na přesnost měření. V případě metody FRB se teploty v jednotlivých osách téměř vždy pohybovaly nad 20°C, v porovnání s použitím modelu RRB, kdy se teploty jednotlivých os pohybovaly v průměru o 1 ÷ 2 °C méně. Nejmenší rozdíl teplot vykazuje Y-ová osa.

Tabulka Summary (stručný obsah) rekapituluje výsledná měření. V následující tabulce (Tabulka 4.1) jsou vybrány ty hodnoty, které vykazují nejvýraznější rozdíly odchylek:

Tabulka 4.1: Porovnání hodnot s nejvýraznějšími odchylkami

Model	FRB				RRB			
	Odchylka		U_{\max} (95%)		Odchylka		U_{\max} (95%)	
EXX	33,7 μm		0,2 μm		10,2 μm		0,3 μm	
EZX	9,2 μm		0,5 μm		2,6 μm		0,6 μm	
EXZ	12,0 μm		0,1 μm		0,5 μm		0,1 μm	
EBX	58,3 micro rad	12,0 "	0,6 micro rad	0,1 "	7,7 micro rad	1,6 "	0,5 micro rad	0,1 "
COY	30,6 micro rad	0,1 "	0,4 micro rad	0,1 "	11,8 micro rad	2,4 "	0,6 micro rad	0,1 "
BOZ	90,9 micro rad	0,1 "	18,7 micro rad	0,1 "	-9,5 micro rad	-2,0 "	0,6 micro rad	0,1 "

Jak je již zmíněno výše, metoda FRB umožňuje proměřit 21 chybových parametrů, tedy o čtyři parametry více, nežli metoda RRB. Jedná se o parametry ECY (natáčení ve směru osy Y), EAZ (naklápění ve směru osy Z), EBZ (klopení ve směru osy Z) a ECZ (natáčení ve směru osy Z), jejichž hodnoty jsou vyobrazeny v tabulce (Tabulka 4.2).

Tabulka 4.2: Měřitelné parametry metodou FRB oproti metodě RRB

Parametr	Odchyłka		U_{\max} (95%)	
	ECY	30,6 micro rad	6,3 "	1,7 micro rad
EAZ	35,6 micro rad	7,3 "	1,9 micro rad	0,4 "
EBZ	20,5 micro rad	4,2 "	2,7 micro rad	0,6 "
ECZ	34,6 micro rad	7,1 "	2,1 micro rad	0,4 "

Při porovnání výsledných grafů se tvarem křivky podobají pouze tři grafy. Prvním z nich je odchyłka přesnosti najetí do polohy v ose X (EXX). Druhým grafem je odchyłka přímosti X ve směru osy Y (EXY) a posledním je také graf odchyłky přímosti Z ve směru osy Y (EZY). U ostatních grafů je výsledná křivka rozdílná.

Výsledným zhodnocením lze říci, že měření metodou FRB je jednoznačně přesnější, ovšem náročnější na celkový čas potřebný ke změření a také na realizaci uchycení upínacího prvku do vřetene. Tato metoda vykazuje u většiny změřených parametrů větší odchyłku. Tyto hodnoty se s 95% pravděpodobností vyskytují v menších intervalech oproti metodě RRB, a proto je měření přesnější. Dalším důvodem úspěšnějšího výsledku může být počet měřících poloh a také použití upínacího prvku, díky němuž byla změněna pozice reflektoru. Na druhou stranu byl experiment ovlivněn různými externími podmínkami měření, a to například teplotou, kterou jsem zmiňoval na začátku.

4.2 Statistické vyhodnocení

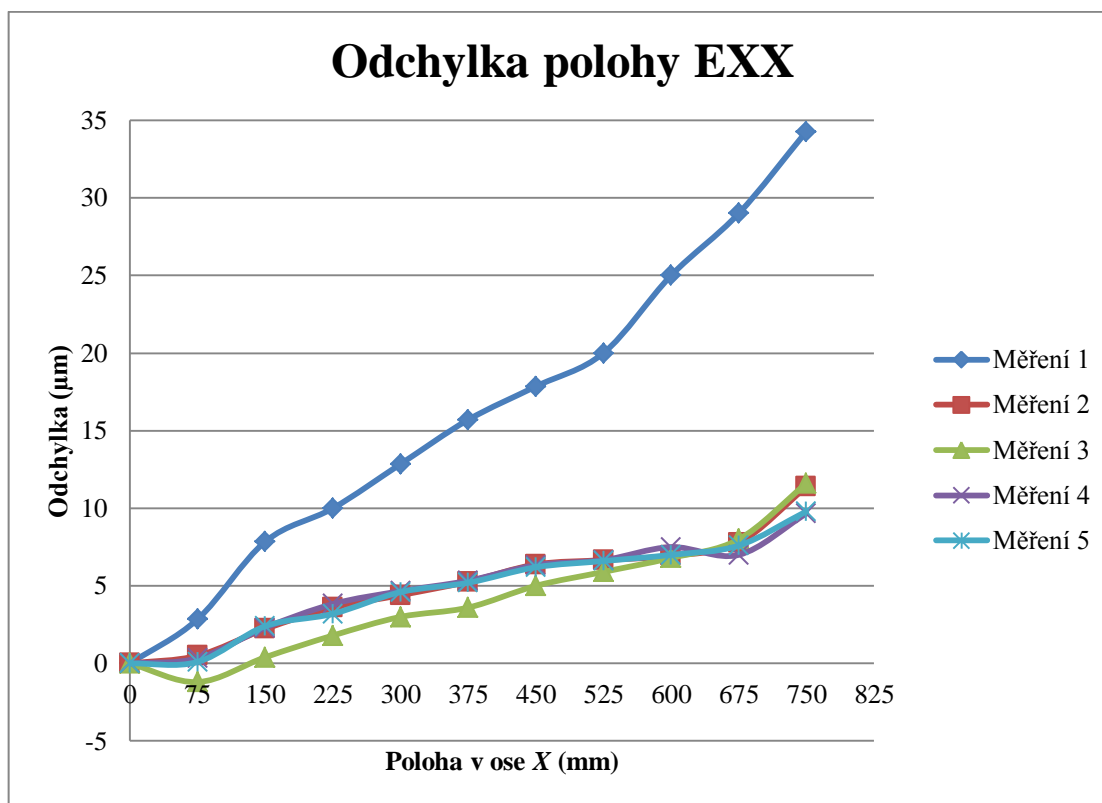
V této kapitole jsou statisticky zpracovány opakované výsledky měření pomocí laser traceru. Statistické vyhodnocení nemohlo proběhnout v příliš velkém rozsahu. Zpřístupnění všech naměřených dat, resp. konkrétních číselných hodnot je omezeno firmou Etalon. Na statistické vyhodnocení budou využita data z dříve provedených měření na tomto stroji. Data byla měřena na modelu RRB v různých časových intervalech za použití různých strategií.

Pro své vyhodnocení jsem si vybral polohování v ose X. Naměřená data byla zaznamenána do tabulky (Tabulka 4.3). Z těchto dat byl vytvořen graf závislosti odchyłky na dané poloze, ve které byly při měření zaznamenávány hodnoty.

Tabulka 4.3: Naměřená data EXX

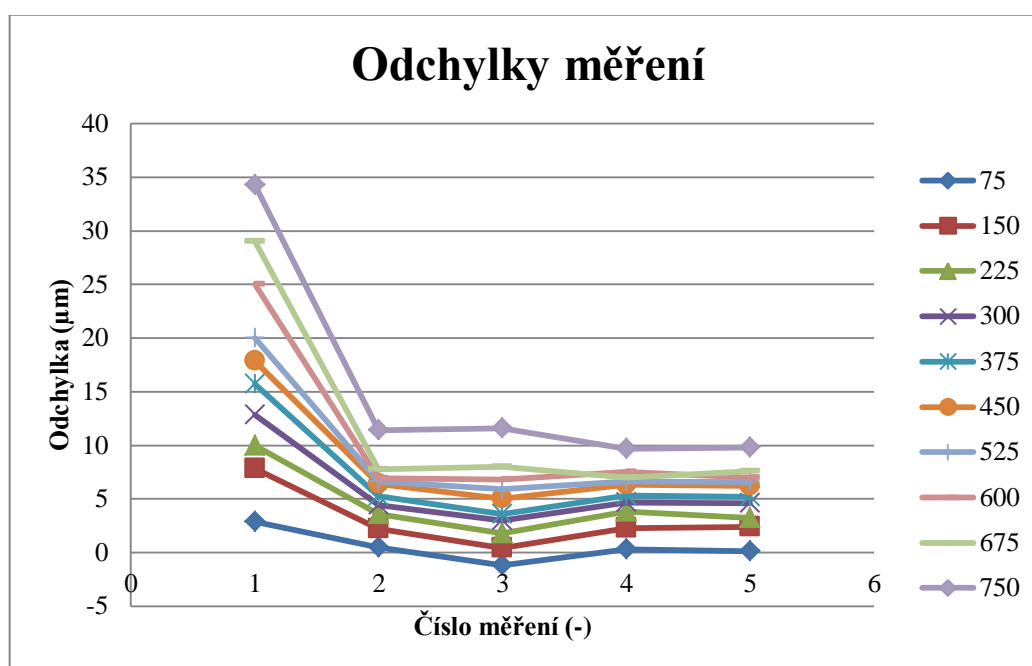
Poloha v ose X (mm)	0	75	150	225	300	375	450	525	600	675	750
Odchyłka při 1. měření (μm)	0	2,85	7,85	10	12,85	15,7	17,85	20	25	29	34,28
Odchyłka při 2. měření (μm)	0	0,5	2,22	3,6	4,4	5,27	6,38	6,66	6,94	7,77	11,38
Odchyłka při 3. měření (μm)	0	-1,2	0,4	1,8	3	3,6	5	5,9	6,8	8	11,6
Odchyłka při 4. měření (μm)	0	0,33	2,3	3,83	4,66	5,33	6,33	6,66	7,5	7	9,66
Odchyłka při 5. měření (μm)	0	0,1	2,4	3,2	4,6	5,2	6,2	6,6	7	7,6	9,8

Z grafu (Obr. 4.1) je vidět, že při prvním měření docházelo k „velkému“ vychýlení při měření. Po tomto měření bylo obráběcí centrum zkalibrováno a následující měření si byla již téměř podobná. K jisté odchylce dochází při každém měření. Tento typ chyby se dá vysvětlit nepřesným stoupání u závitu kuličkového šroubu, který zajišťuje pohyb stolu v obráběcím centru.



Obr. 4.1: Graf závislosti odchylky polohy na poloze

V následujícím grafu jsou opět použity hodnoty z tabulky (Tabulka 4.3), avšak X-ová osa reprezentuje jednotlivá měření a na Y-ové ose jsou vyneseny hodnoty naměřených odchylek. Křivky v tomto případě vyobrazují body, ve kterých tracer zastavoval. Zde je zcela jednoznačně viditelné, že po prvním měření bylo obráběcí centrum zkalibrováno a následně jsou hodnoty téměř podobné.



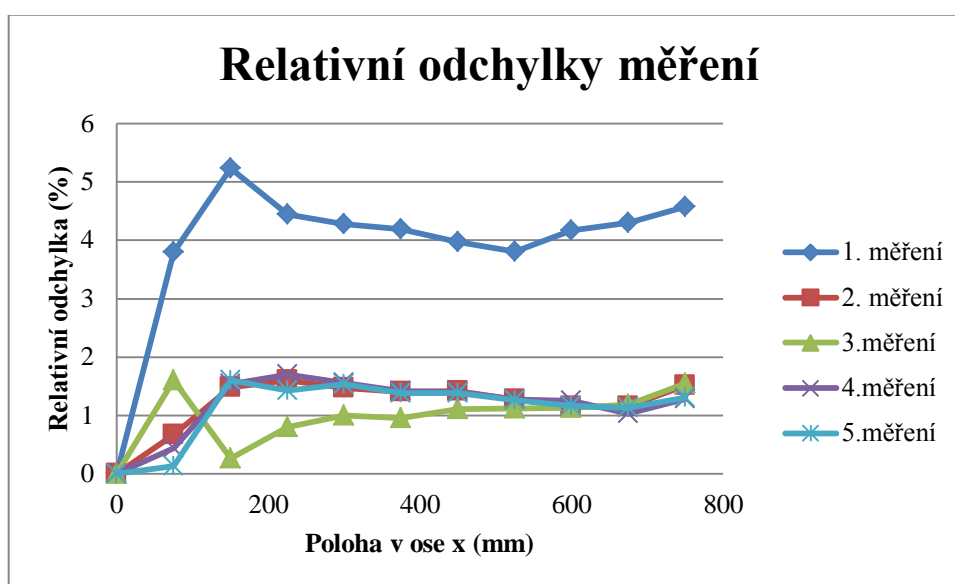
Obr. 4.2: Graf závislosti změřené odchylky na pořadí měření

Absolutní odchylky rostou se zvyšující se měřenou vzdáleností. Proto, aby bylo možné porovnat odchylky pro různé měřené vzdálenosti u jednoho měření, byly vypočteny relativní odchylky. V následující tabulce (Tabulka 4.4) jsou uvedeny relativní hodnoty odchylky polohy vzhledem k dané poloze v ose x . Naměřená hodnota byla podělena polohou v ose x , a toto číslo bylo vynásobeno 100, aby výsledek představoval procentuální hodnotu.

Tabulka 4.4: Tabulka relativní odchylky

Poloha v ose X (mm)	Relativní odchylka při 1. měření (%)	Relativní odchylka při 2. měření (%)	Relativní odchylka při 3. měření (%)	Relativní odchylka při 4. měření (%)	Relativní odchylka při 5. měření (%)
0	0	0	0	0	0
75	3,80	0,67	1,60	0,44	0,13
150	5,23	1,48	0,27	1,53	1,60
225	4,44	1,60	0,80	1,70	1,42
300	4,28	1,47	1,00	1,55	1,53
375	4,19	1,41	0,96	1,42	1,39
450	3,97	1,42	1,11	1,41	1,38
525	3,81	1,27	1,12	1,27	1,26
600	4,17	1,16	1,13	1,25	1,17
675	4,30	1,15	1,19	1,04	1,13
750	4,57	1,52	1,55	1,29	1,31

Tyto hodnoty byly dále využity v následujícím grafu. Z toho je viditelné, že odchylky měření jsou pro všechny měřené hodnoty stabilní. Po kalibraci stroje dochází k odchytkám přibližně dvakrát menším, než před ní. Z grafu je také patrná reprodukovatelnost provedeného měření.



Obr. 4.3: Graf závislosti relativní odchylky na poloze v ose X

Jako poslední byly hodnoty z tabulky (Tabulka 4.3) vyhodnoceny jako statistické veličiny pomocí matematických funkcí v programu Microsoft Excel. Výstupem byly tyto statistické charakteristiky:

- aritmetický průměr – průměr všech hodnot souboru,
- rozptyl – udává, jak moc jsou hodnoty v statistickém souboru rozptýleny,
- směrodatná odchylka – udává, jak moc se od sebe liší hodnoty v statickém souboru,
- šikmost – udává, jak jsou hodnoty kolem aritmetického průměru rozloženy.

Pro výpočet těchto veličin nebyly použity hodnoty z prvního měření. Důvod je ten, že by výrazně ovlivňovaly výsledky. Ty jsou vyobrazeny v tabulce (Tabulka 4.5).

Tabulka 4.5: Statistické charakteristiky

Poloha v ose X (mm)	Aritmetický průměr (μm)	Rozptyl (μm^2)	Směrodatná odchylka (μm)	Šikmost (-)
0	0	0	0	0
75	-0,068	0,448	0,669	-1,003
150	1,830	0,686	0,828	-1,134
225	3,108	0,621	0,788	-0,889
300	4,165	0,462	0,679	-1,088
375	4,850	0,523	0,723	-1,141
450	5,978	0,323	0,568	-1,109
525	6,455	0,103	0,321	-1,135
600	7,060	0,070	0,264	0,890
675	7,593	0,137	0,370	-0,663
750	10,610	0,783	0,885	0,014

Nejpřesnější měření podle tabulky (Tabulka 4.5) bylo měření ve vzdálenosti 600 mm, vykazuje nejmenší rozptyl hodnot a směrodatnou odchylku. Naopak nejméně přesné výsledky byly dosaženy v poloze 750 mm. Koeficient šikmosti je ve většině případů

záporný, což znamená, že vlevo od průměru se nacházejí odlehlejší hodnoty než vpravo a většina hodnot se nachází vpravo od hodnoty průměru.

ZÁVĚR

Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů má již dlouhou dobu své opodstatnění. Tento obor udělal ve svém zdokonalení se obrovský technický pokrok a dovoluji si tvrdit, že vývoj laser traceru je na dlouhou dobu jeho vrcholem. Vysoká přesnost měření a revoluční možnosti mapování chyb celého prostoru obráběcího stroje plně ve 3D dělají z tohoto přístroje absolutní špičku v oboru. Limitující je ovšem cenové ohodnocení, které omezuje využití tohoto přístroje u menších firem.

V kapitole 1 jsou shrnuty základní poznatky a možnosti vzniku geometrických chyb. Zmiňuji se také o činitelích, kteří geometrickou přesnost ovlivňují. Hlavní část této kapitoly je věnována volumetrickým chybám, které laser tracer dokáže měřit.

V další části je popsán měřicí přístroj, jeho princip měření, poznamenávám zde hlavní parametry, kterými tracer oplývá a porovnávám zde jeho dvě výrobní verze. V podkapitole 2.4 shrnuji aktuální problematiku a možnosti aplikací laser traceru. Jedinečnost tohoto přístroje podtrhuje část, ve které se zmiňuji o výsledcích provedeného experimentu měření úhlových chyb. Tracer se v uvedeném experimentu prezentuje jako nejpřesnější měřicí přístroj.

Ve třetí kapitole je popsán celý postup měření, které jsem za pomoci svého vedoucího práce provedl. Vyjadřuji se zde ke konkrétnímu postupu, snažím se přiblížit jednotlivé kroky v pořadí, v jakém měření probíhalo. Hlavní částí je nastavení softwaru Trac-cal. V práci jsou použity také fotografie, které jsem během měření pořídil a pro reálnější představivost využil.

Kapitola 4 je rozdělena na dvě části. V první porovnávám výsledky provedeného měření. Model měření FRB poukazuje na jasnou výhodu možnosti proměření všech 21 chybových parametrů. Druhá část je zaměřena na statistické vyhodnocení. Bohužel mi nebyla poskytnuta potřebná data od firmy Etalon, a proto jsem vyhodnocoval data z předchozích měření. Toto vyhodnocení poukazovalo na dva fakty. Jedním je ten, že po uskutečnění prvního měření a následném kalibraci měřicího přístroje dochází k viditelnému zpřesnění polohování obráběcího stroje. Druhým fakt zahrnuje skutečnost, že po zkalibrování jsou relativní odchylky polohování téměř srovnatelné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ERAZIM, Karel. *Kontrola přesnosti obráběcích strojů*. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1961, 339 s. Řada strojírenské literatury.
2. WECK, Manfred. *Werkzeugmaschinen*. 7. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2006, xvii, 502 s. ISBN 3-540-22505-6.
3. MEHRABI, M.G.; O'NEAL, G. *Improving machining accuracy in precision line boring*. Netherland : Kluwer Academic Publisher, 2002.
4. ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
5. ETALON AG [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.etalon-ag.com/>.
6. ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
7. IBARAKI, Soichi a Wolfgang KNAPP. Indirect measurement of volumetric accuracy for three-axis and five-axis machine tools: Review. *Automation Technology* [online]. 2012, roč. 6, č. 2 [cit. 2014-05-07].
8. WANG, Charles. What is 3D volumetric positioning accuracy and How to define and measure it. *CNC CMM Machine Tool Laser Calibration Interferometer* [online]. 2003 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.optodyne.com>.
9. ÚSTAV METROLOGIE A ZKUŠEBNICTVÍ. *Úvod do laserové interferometrie*. Brno, 2005.
10. Renishaw [online]. © 2001-2014 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com>.
11. SCHWENKE, H., R. SCHMITT, P. JATZKOWSKI a C. WARMANN. On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2009, vol. 58, issue 1, s. 477-480 [cit. 2014-04-24]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.007>.
12. Produkty. *Měřicí přístroje, kalibrace měřidel, kalibrační laboratoř* [online]. 2010 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/produkty/>.
13. VÝZKUMNÉ CENTRUM PRO STROJÍRENSKOU VÝROBNÍ TECHNIKU A TECHNOLOGII. *Nové metody měření přesnosti obráběcích strojů*. Praha, 2009. Dostupné z: <http://www.rcmt.cvut.cz>.
14. *Vše okolo GPS: Trilaterace* [online]. © 2007 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://gps.tym.cz/>.
15. *MM Průmyslové spektrum: Nová dimenze kalibrace strojů*. Praha: Vogel Publishing, 2011. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/>.
16. Co je laser tracker a jak se s ním měří?. In: *TechPark.sk* [online]. © 2008 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/>.

17. MURALIKRISHNAN, Bala, Vincent LEE, Christopher BLACKBURN, Daniel SAWYER, Steve PHILLIPS, Wei REN a Ben HUGHES. Assessing ranging errors as a function of azimuth in laser trackers and tracers. *Measurement Science and Technology* [online]. 2013, vol. 24, issue 6 [cit. 2014-04-24]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/24/6/065201>.
18. KOVOSVIT MAS [online]. 2013 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/>.
19. TRAC-CAL: *Online Help*. 2.6. 2012. Dostupné z: <http://www.etalon-ag.com>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
3D	Třírozměrná dimenze
CNC	Comuter Numeric Control – číslicově řízený počítačem
FRB	Full rigid body – model plného tělesa
FRB+E	Full rigid body + elastic – model plného tělesa + elastický
GPS	Global Positioning System – Globální polohový systém
IRB	intermediate rigid body – středně tuhé těleso
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
MT	Mechanical tracking – mechanické polohování
NPL	National Physical Laboratory – Národní fyzická laboratoř
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt – Fyzikální spolkový úřad
RRB	Reduced rigid body – model redukovaného tělesa
SMR	Spherically Mounted Retro Reflector – sonda s koutovým odražečem

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Chyby vznikající při pohybu v lineární ose (5).....	9
Obr. 1.2: Chyby vznikající při pohybu v rotační ose (6).....	10
Obr. 1.3: Měření volumetrické přesnosti systémem ballbar (10)	11
Obr. 2.1: Princip funkce interferometru (9).....	13
Obr. 2.2: Princip trilaterace (14)	14
Obr. 2.3: Laser tracer a jeho řez (5)	14
Obr. 2.4: Laser tracer mechanical tracking – řez (5).....	15
Obr. 2.5: Laser tracer MT (5).....	15
Obr. 2.6: Možné způsoby zaznamenávání naměřených hodnot (11)	17
Obr. 2.7: Způsob měření rotačních os (11).....	17
Obr. 2.8: Schéma Laser trackeru.....	18
Obr. 2.9: Experiment měření (a) Reálná podoba, (b) schéma (17)	19
Obr. 2.10: Výsledky testu měření opakovatelnosti (17).....	19
Obr. 2.11: Porovnání krátkodobé opakovatelnosti (17)	20
Obr. 3.1: MCV 754 QUICK (18).....	21
Obr. 3.2: Popis důležitých prvků při měření.....	22
Obr. 3.3: Model FRB.....	24
Obr. 3.4: Model RRB	24
Obr. 3.5: Modul nastavení	25
Obr. 3.6: Záložka konfigurace	25
Obr. 3.7: Modul měření	26
Obr. 3.8: Modul vyhodnocení.....	27
Obr. 3.9: Kontrola dat.....	27
Obr. 3.10: Přehled vyhodnocení	28
Obr. 3.11: Chyby vektorů	28
Obr. 3.12: Vyhodnocení reziduí a kolmosti.....	29
Obr. 4.1: Graf závislosti odchyly polohy na poloze.....	32
Obr. 4.2: Graf závislosti změřené odchyly na pořadí měření	33
Obr. 4.3: Graf závislosti relativní odchyly na poloze v ose X	34

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Parametry laser traceru (5)	16
Tabulka 2.2: Parametry laser traceru MT (5)	16
Tabulka 3.1: Parametry stroje (18).....	21
Tabulka 3.2: Modely strojů a jejich parametry	23
Tabulka 4.1: Porovnání hodnot s nejméně výraznějšími odchyly.....	30
Tabulka 4.2: Měřitelné parametry metodou FRB oproti metodě RRB	31
Tabulka 4.3: Naměřená data EXX	31
Tabulka 4.4: Tabulka relativní odchyly.....	33
Tabulka 4.5: Statistické charakteristiky	34

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Meřící report metody FRB

Příloha 2 Meřící report metody RRB