



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Návrh artefaktu pro ověření přesnosti souřadnicových měřicích strojů

Design of artefact for verifying the accuracy of coordinate measuring machines

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš

Bc. Jakub Vostrovský



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vostrovský** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **397321**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh artefaktu pro ověření přesnosti souřadnicových měřicích strojů

Název diplomové práce anglicky:

Design of artefact for verifying the accuracy of coordinate measuring machines

Pokyny pro vypracování:

1. Ověřování přesnosti CMM dle normy EN ISO 10 360
2. Dostupné artefakty pro kontrolu přesnosti CMM
3. Návrh vlastního artefaktu pro ověření přesnosti CMM
4. Tvorba metodiky kontroly s využitím navrženého artefaktu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Mikeš, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.09.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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 použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne 8. 9. 2017

Bc. Jakub Vostrovský



Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Mikešovi za jeho rady a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky.

Mé poděkování patří rovněž mé rodině za pomoc a podporu během studia.

**Anotace:**

Práce se zabývá problematikou ověřování přesnosti souřadnicových měřicích strojů (CMM). Nejprve je řešen přístup a předpisy normy ISO 10360, zabývající se přijímacími a periodickými zkouškami souřadnicových měřicích strojů. Další část práce je věnována souhrnu a popisu dostupných artefaktů pro ověření přesnosti CMM, jejich členění a způsob použití. V praktické části se jedná o vlastní návrh designu artefaktu pro ověřování přesnosti, rozbor jeho částí a způsob výroby tohoto artefaktu. V závěru se věnuji návrhu strategie měření pro ověřování přesnosti na CMM pomocí uvedeného artefaktu. Jedná se o vytvoření programu pro řízení CMM pomocí softwaru CALYPSO.

Klíčová slova:

Ověření přesnosti, CMM, artefakt, ISO 10360, přijímací a periodické zkoušky, CALYPSO, souřadnicový měřicí stroj

Annotation:

The thesis deals with the verification of accuracy of coordinate measuring machines (CMM). Firstly, the approach and regulations of norm ISO 10360, dealing with acceptance and periodic tests of coordinate measuring machines. Next part is devoted to summary and description of available artifacts for reverification of accuracy of CMM, their classification and method of use. In the practical part, this is an own design of an artifact for accuracy verification, an analysis of its parts and a method of production of this artifact. In conclusion, I am devoting myself to the draft of measurement strategy for verification of accuracy on CMM using the mentioned artifact. This is to create a CMM control program using CALYPSO software.

Keywords:

Verifying of accuracy, CMM, artifact, ISO 10360, acceptance and reverification tests, CALYPSO, coordinate measuring machines



Obsah

1. Ověřování přesnosti CMM dle normy EN ISO 10 360	11
1.1. EN ISO 10 360-2	13
1.1.1. Environmentální a metrologické požadavky.....	13
1.1.2. Přejímací a periodické zkoušky	13
1.2. ISO 10360-3	19
1.2.1. Environmentální a metrologické podmínky	19
1.2.2. Přejímací a periodická zkouška.....	20
1.3. ISO 10360-4	22
1.3.1. Environmentální a metrologické požadavky.....	23
1.3.2. Přejímací a periodická zkouška.....	23
1.4. ISO 10360-5	26
1.4.1. Environmentální a metrologické požadavky.....	26
1.4.2. Přejímací a periodické zkoušky	27
2. Dostupné artefakty pro kontrolu přesnosti CMM.....	33
2.1. 1D artefakty	33
2.1.1. Koncové měrky.....	33
2.1.2. Stupňové měrky.....	35
2.1.3. Ball bar.....	36
2.2. 2D artefakty	38
2.2.1. Ball plate	38
2.2.2. Hole plate.....	41
2.3. 3D artefakty	41
2.3.1. Ball Tetrahedron a Ball Cube	41
2.3.2. ZEISS CMM-Check	43
2.3.3. TORUS EasiCheck.....	44
2.3.4. Renishaw MCG	45
2.4. Laserový interferometr.....	46
2.5. Artefakty pro micro-CMM.....	49
2.5.1. METAS mini Ball Bar	49
2.5.2. A*STAR mini multi Ball Bar	49



2.5.3.	ZEISS Mini Ball Plate.....	50
2.5.4.	METAS Ball Plate	50
2.5.5.	Kruger plates – válec, koule a díra	51
2.5.6.	PTB micro ball plates.....	51
2.5.7.	Micro-contour standard.....	52
3.	Návrh vlastního artefaktu pro ověření přesnosti CMM.....	53
3.1.	Součásti artefaktu	54
4.	Tvorba metodiky kontroly s využitím navrženého artefaktu	62
5.	Závěr.....	74
6.	Bibliografie	75
6.1.	Seznam obrázků.....	79



Seznam použitých zkratk

CMM	Coordinate Measuring Machine – Souřadnicový měřicí stroj
E₀	Chyba při měření délky s minimální délkou odsazení sondy
E_{0, MPE}	Maximální dovolená chyba při měření délky, odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly 0 mm
E₁₅₀	Chyba při měření délky, odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly 150 mm
E_{150, MPE}	Maximální dovolená chyba při měření délky, odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly 150 mm
E_L	Chyba při měření délky
E_{L, MPE}	Maximální dovolená chyba při měření délky, odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly 150 mm
FA	Chyba indikace, axiální směr
FR	Chyba indikace, radiální směr
FT	Chyba indikace, tangenciální směr
GPS	Geometrické požadavky na výrobky
HN	Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmутí velké hustoty bodů
HP	Skenování na předem stanovené dráze pro sejmутí velké hustoty bodů
LN	Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmутí malé hustoty bodů
LP	Skenování na předem stanovené dráze pro sejmутí malé hustoty bodů
MPE_{FA}	Maximální dovolená chyba indikace, axiální směr
MPE_{FR}	Maximální dovolená chyba indikace, radiální směr
MPE_{FT}	Maximální dovolená chyba indikace, tangenciální směr
MPE_{Tij}	Maximální dovolená chyba snímání při skenování
MPE_t	Nejdelší dovolená doba zkoušky skenování
P_{FTE}	Chyba tvaru složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{FTE, MPE}	Maximální dovolená chyba tvaru složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{FTI}	Chyba tvaru složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci



P_{FTI, MPE}	Maximální dovolená chyba tvaru složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
P_{FTU}	Chyba tvaru jednotlivého doteku
P_{LTE}	Hodnota polohy složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{LTE, MPL}	Maximální dovolená hodnota polohy složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{LTI}	Hodnota polohy složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
P_{LTI, MPL}	Maximální dovolená hodnota polohy složeného doteku kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
P_{LTM}	Hodnota polohy složeného doteku, pevný složený dotekový snímací systém
P_{LTN}	Hodnota polohy složeného doteku, pevný složený systém sondy
P_{STE}	Chyba rozměru složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{STE, MPE}	Maximální dovolená chyba rozměru složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{STI}	Chyba rozměru složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
P_{STI, MPE}	Maximální dovolená chyba rozměru složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
R₀	Opakovaný rozsah chyby při měření délky
R_{0, MPL}	Maximální dovolená hodnota opakovaného rozpětí
T_{ij}	Chyba snímání při skenování
T	Doba zkoušky skenování



Úvod

Souřadnicové měřicí stroje jsou v dnešní době hojně využívány, ovšem kondici stroje ovlivňuje mnoho faktorů, jako je stálá teplota, minimální vibrace a jiné. Pro uživatele je tudíž velmi důležité, aby měl způsob (postup), jak verifikovat způsobilost stroje k měření a jeho technický stav. Tato problematika bude předmětem celé diplomové práce.

V první části se práce bude zabývat přístupem a předpisy normy ISO 10 360 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM). Ta obsahuje několik částí, které se zabývají zkouškami pro stroje, např. s otočnou snímací hlavou, hlavou s několika pevnými snímacími doteky nebo osou otočného stolu jako čtvrtou osou. Také je řešen postup při měření pomocí diskrétních bodů či měření pomocí skenovací snímací hlavy.

Cílem další části je vytvořit rešerši současných dostupných artefaktů na trhu pro ověřování přesnosti. Jsou zde zmíněny jak známé artefakty, jako je např. ball bar či koncové měrky, ale i jiné, využívané například pro micro souřadnicové měřicí stroje.

V praktické části a hlavním cílem této práce je návrh designu vlastního artefaktu pro ověřování přesnosti. Nejde o zcela nový artefakt, ale spíše o modifikaci a vylepšení. Celá myšlenka vychází z již používaného artefaktu – ball baru. Důraz je kladen na to, aby uživatel mohl ověřit požadované směry měření pomocí jednoho hlavního ustavení artefaktu a aby další polohování bylo uživatelsky přívětivé a rychlé.

Závěr práce bude zaměřen na návrh a tvorbu metodiky měření pomocí navrženého artefaktu. Bude zde uvedeno, v jakých směrech a také jakou strategií by se měření mělo provádět, aby pokud možno vyhovovalo normě ISO 10360. Program bude tvořen v softwaru CALYPSO, který je využíván pro ovládání souřadnicových měřicích strojů firmy Zeiss.



1. Ověřování přesnosti CMM dle normy EN ISO 10 360

Přesnost měření pomocí souřadnicových měřicích strojů ovlivňuje mnoho faktorů. Zdroje variability měření jsou jak náhodné tak i systematické, které se snažíme identifikovat a určitým způsobem minimalizovat či korigovat. Mezi zdroje variability patří hlavní prvky v systému měření, jako je etalon, obrobek, přístroj, pracovník a prostředí (viz. Obrázek 1). Důležitou roli hraje i správná volba strategie měření. Problematikou ověřování přesnosti a její metodiky se zabývá technická norma ISO 10 360 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM). Tato norma obsahuje několik částí:

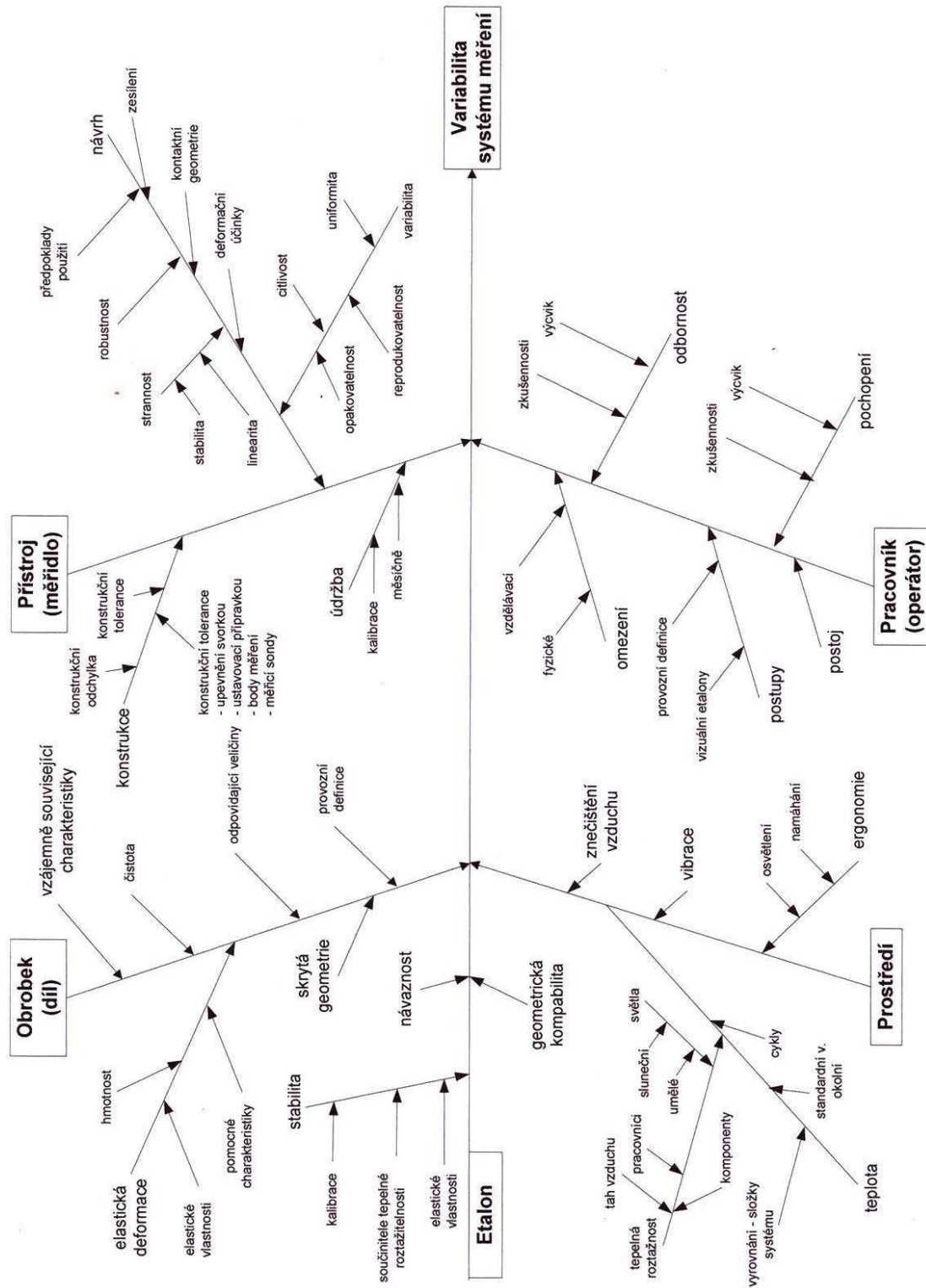
- Část 1: Slovník
- Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření délkových rozměrů
- Část 3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou
- Část 4: Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenování
- Část 5: Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s několika doteky
- Část 6: Odhad chyb při výpočtu prvků přiřazených metodou nejmenších čtverců
- Část 7: Souřadnicové měřicí stroje vybavené zobrazovacími snímacími systémy
- Část 8: Souřadnicové měřicí stroje s optickými snímači vzdálenosti
- Část 9: Souřadnicové měřicí stroje s vícenásobnými snímacími systémy
- Část 10: Trakční laser pro měření vzdálenosti bod po bodu (1)

Dále se připravuje tato část:

- Část 12: Kloubové rameno souřadnicových měřicích strojů (1)

Předmětem budoucí části 11 má být počítačová tomografie. (1)

Vzhledem k velkému množství faktorů ovlivňujících měření je nutné provádět ověřovací zkoušky CMM. Tyto zkoušky se provádějí pro ověření kondice technického stavu CMM, a zda stroj odpovídá výrobním parametrům, především co týče maximální dovolené chyby měření. Lze je rozdělit na přejímací a periodické. V následujících podkapitolách se zaměřím na některé výše zmíněné části normy ČSN EN ISO 10 360 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM).



Obrázek 1: Diagram variability systému měření (2)



1.1. EN ISO 10 360-2

Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření délkových rozměrů

Tato část normy specifikuje přijímací zkoušky stanovené výrobcem CMM a periodické zkoušky CMM pro ověření způsobilosti stroje při měření lineárních rozměrů.

1.1.1. Environmentální a metrologické požadavky

Pro správné provedení zkoušek CMM se musí dodržet dané environmentální podmínky jako je teplota, vlhkost vzduchu a vibrace v místě měření. Tyto podmínky specifikuje v případě přijímacích zkoušek výrobce, v případě zkoušek periodických pak uživatel. Pokud uživatel nezajistí takové podmínky, které jsou specifikovány výrobcem v datovém listu, nemůže požadovat dodržení mezních hodnot chyb měření $E_{0, MPE}$ a $E_{L, MPE}$, případně $R_{0, MPL}$. (3)

Při provádění zkoušek musí být CMM používán dle postupů uvedených výrobcem. Mezi tyto postupy patří např.:

- Spuštění stroje/cyklus zahřátí
- Konfigurace systému snímacích doteků
- Proces čištění snímacích doteků
- Kvalifikace snímacího systému
- Teplotní stabilita snímacího systému před kalibrací
- Hmotnost systému snímacího doteku a/nebo systému snímací hlavy
- Umístění, typ a počet senzorů teplot (3)

1.1.2. Přijímací a periodické zkoušky

Přijímací zkoušky se provádějí dle specifikací a postupů výrobce v souladu s normou ISO 10360. Výrobce je oprávněn vybrat artefakt pro ověření CMM, který představuje kalibrovanou zkušební délku tehdy, pokud uživatel stanoví kalibrovanou zkušební délku.

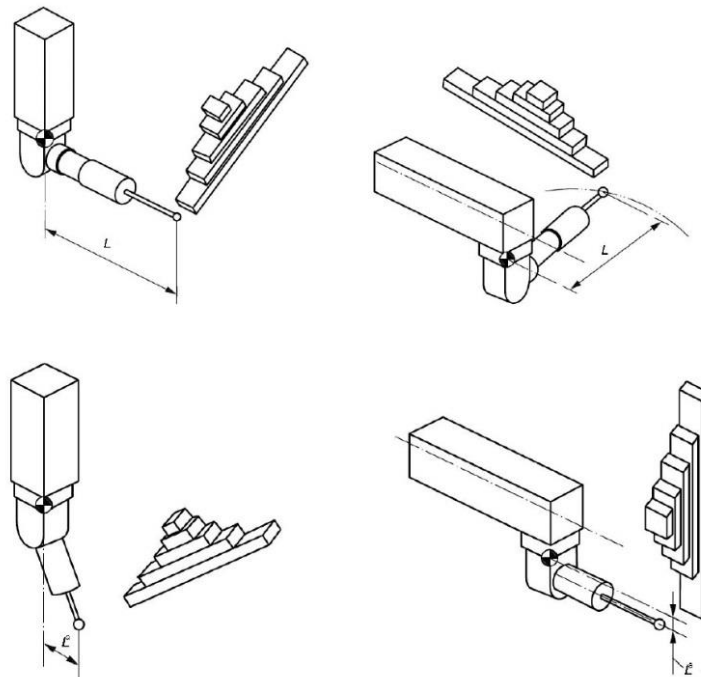
Periodické zkoušky se provádějí dle specifikací uživatele a dle postupů výrobce.



Principem metody je použití kalibrované zkušební délky. Měření je možno provádět na CMM, který je schopen měřit v mezních stanovených maximálních hodnotách $E_{0, MPE}$, $E_{150, MPE}$ a chyb měření délky stanovené pro daný CMM. Dále také v mezních maximálních hodnotách opakovaného rozpětí $R_{0, MPL}$. Hodnocení se provádí porovnáním indikovaných hodnot s kalibrovanými hodnotami z pěti různých kalibrovaných zkušebních délek, přičemž každá délka je měřena třikrát. (3)

Při měření na stroji bez kompenzace teplotní roztažnosti obrobku mohou nastat značné chyby způsobené rozdílnou teplotou CMM a zkušebním tělesem. Při měření na CMM s kompenzací teplotní roztažnosti obrobku se chyba značně snižuje.

Při přejímacích a periodických zkouškách rozlišujeme měření s nulovým odsazením hrotu snímacího doteku od osy pinoly a s nenulovým odsazením hrotu snímacího doteku od osy pinoly.



Obrázek 2: Odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly pro kloubový snímací systém (3)



Chyba při měření délky s nulovou vzdáleností osy pinoly od odsazení hrotu snímacího doteku E_0

Zkouška E_0 se musí provádět s nulovou vzdáleností osy pinoly od odsazení hrotu snímacího doteku nebo s minimální prakticky možnou vzdáleností. Mohou totiž nastat případy, kdy v závislosti na typu CMM, použitém artefaktu, může být tato vzdálenost požadována větší než nula. (3)

Je dáno, že nejmenší přípustná kalibrovaná zkušební délka musí být alespoň 66 % rozsahu měřicí přímky CMM v daném směru. Z toho vyplývá, že minimální zkušební délka ve směru diagonály prostoru CMM bude větší než zkušební délka ve směru osy CMM. (3)

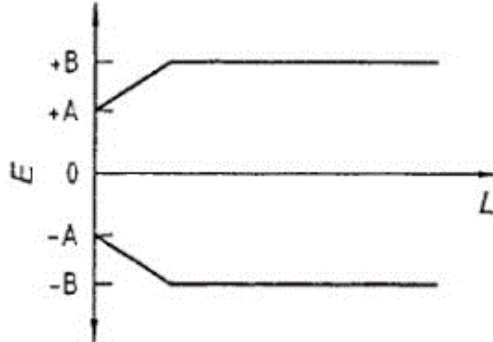
Pět různých zkušebních délek musí být umístěno v sedmi různých polohách, přičemž každá délka musí být měřena třikrát. Ve výsledku pak máme 105 měření. Čtyři ze sedmi poloh jsou diagonálami prostoru CMM a další tři jsou rovnoběžné s osami CMM. (3)

Pro měření s velkým poměrem mezi délkami os jsou navržena dvě doplňková měření na základě dohody mezi výrobcem a uživatelem. Jako CMM s velkým poměrem mezi délkami os je považován stroj, kdy je nejdelší osa stroje minimálně trojnásobkem délky střední osy. Doporučené polohy zkušebních délek jsou dvě diagonály v rovině kolmé k nejdelší ose a jsou umístěny přibližně ve středu nejdelší osy. (3)

Pro 105 měření se následně vypočítá chyba při měření délky E_0 , kdy se vypočítá rozdíl mezi indikovanou a kalibrovanou hodnotou každé zkušební délky. Všechny chyby měření se následně vynesou do diagramu odpovídající hodnotě $E_{0, MPE}$ (viz Obrázek 3 nebo Obrázek 4 nebo Obrázek 5). Maximální dovolená chyba indikace CMM při měření rozměru E_{MPE} se stanoví jedním ze tří vztahů:

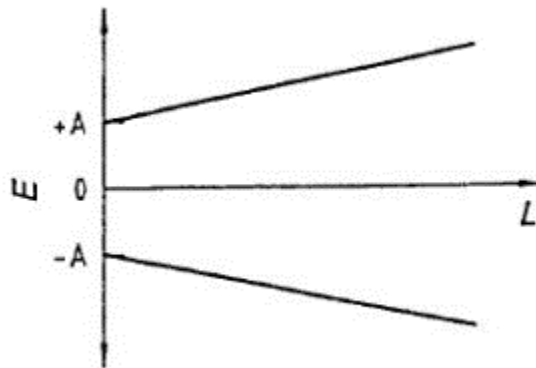


a) $E_{MPE} = \pm \text{minimum} (A + L/K)$ a B (3)



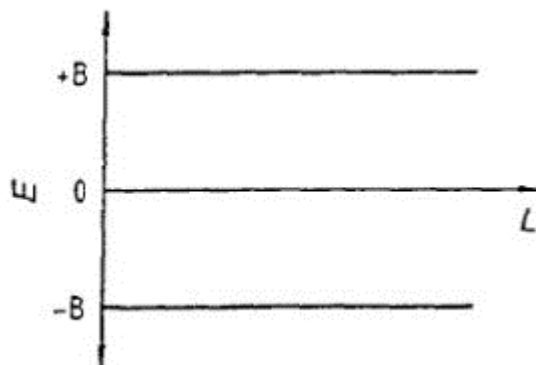
Obrázek 3: Největší dovolená chyba indikace CMM při měření rozměru E_{MPE} (3)

b) $E_{MPE} = \pm (A + L/K)$ (3)



Obrázek 4: Největší dovolená chyba indikace CMM při měření rozměru E_{MPE} (3)

c) $E_{MPE} = \pm B$ (3)



Obrázek 5: Největší dovolená chyba indikace CMM při měření rozměru E_{MPE} (3)



Kde:

A ... kladná konstanta, vyjádřená v mikrometrech a poskytnutá výrobcem

K ... bezrozměrná kladná konstanta poskytnutá výrobcem

L ... měřený rozměr v milimetrech

B ... největší dovolená chyba E_{MPE} v mikrometrech poskytnutá výrobcem

Pro každou sadu tří opakovaných měření se vypočte opakované rozpětí R_0 , přičemž se vyhodnotí rozpětí tří opakovaných měření délek. (3)

Chyba měření při měření délky pro vzdálenost 150 mm odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly E_{150}

Je dáno, že nejmenší přípustná kalibrovaná zkušební délka musí být alespoň 66 % rozsahu měřicí přímky CMM v daném směru. (3)

Předem zvolené odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly je 150 mm (± 15 mm). Směr odsazení hrotu snímacího doteku je kolmý na měřicí přímku, která je určena kalibrovanou zkoušenou délkou a je vedena ve směru jedné z os CMM. (3)

Pro každé měření může uživatel specifikovat směr vzdálenosti středu snímací koule k ose pinoly tak, že snímací dotek směřuje buďto v kladném či záporném směru osy. Pokud není uvedeno jinak, zkouší se pouze dvě kombinace z osmi možných kombinací pro polohy zkušebních délek a smysl dotyku snímání. (3)

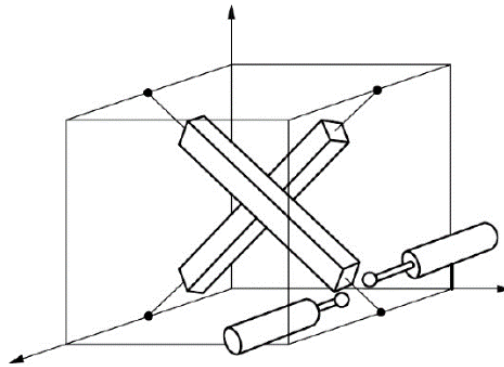
Tabulka 1: Možné pozice měření (3)

Číslo pozice	Orientace v měřicím objemu
1A	v YZ-rovině diagonálně z bodu ($\frac{1}{2}$, 0, 0) k bodu ($\frac{1}{2}$, 1, 1)
1B	v YZ-rovině diagonálně z bodu ($\frac{1}{2}$, 0, 1) k bodu ($\frac{1}{2}$, 1, 0)
2A	v XZ-rovině diagonálně z bodu (0, $\frac{1}{2}$, 0) k bodu (1, $\frac{1}{2}$, 1)
2B	v XZ-rovině diagonálně z bodu (0, $\frac{1}{2}$, 1) k bodu (1, $\frac{1}{2}$, 0)

POZNÁMKA Pro specifikace uvedené v této tabulce se zobrazují protilehlé rohy měřicího objemu s (0, 0, 0) a (1, 1, 1) v souřadnicích (X, Y, Z).



Pro každou kombinaci polohy zkoušené délky a orientace polohy snímací hlavy se musí měřit pět různých kalibrovaných délek ve třech měřeních. To nám ve výsledku dá 30 měření. (3)



Obrázek 6: Ukázka dvou ze čtyř možných poloh kalibrované zkušební délky a dvou ze čtyř možných orientací snímací hlavy (3)

Pro všech 30 měření se následně vypočítá chyba při měření délky E_{150} , kdy se vypočítá rozdíl mezi indikovanou a kalibrovanou hodnotou každé zkušební délky. Všechny chyby měření se následně vynesou do diagramu odpovídající hodnotě $E_{150, MPE}$ (viz Obrázek 3 nebo Obrázek 4 nebo Obrázek 5). (3)

Soulad se specifikacemi

Způsobilost CMM používaného pro měření lineárních rozměrů je ověřena pokud:

- Chyby při měření délky (E_0) s nulovou vzdáleností odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly jsou v rozpětí maximální dovolené chyby měření délky $E_{0, MPE}$
- Opakované rozpětí chyby při měření délky (R_0) je v rozpětí maximální dovolené meze opakovaného měření $R_{0, MPL}$
- Chyby při měření délky (E_{150}) pro vzdálenost 150 mm odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly jsou v rozpětí maximální dovolené chyby měření délky $E_{150, MPE}$ (3)

U CMM, které nejsou určeny nebo nejsou způsobilé pro měření s odsazením hrotu snímacího doteku od osy pinoly s nenulovou vzdáleností, ověření chyby při měření délky E_L není požadováno. (3)



Při měření délky s nulovým odsazením hrotu snímacího doteku od osy pinoly může, maximálně u pěti z 35 sad ze třech opakovaných měření, jedna ze tří hodnot chyby při měření délky ležet mimo pole shody. Pro každé měření, které leží mimo pole shody, se musí provést další, třikrát opakované, měření v dané poloze. Pokud všechny hodnoty chyb pro tři opakovaná měření leží uvnitř pole shody, je způsobilost CMM ověřena. (3)

Pro opakovaný rozsah chyby měření délky R_0 platí, že pokud zkušební měřená délka je měřena opakovaně, musí být provedena v rozsahu tří opakovaných měření ke stanovení R_0 pro příslušnou polohu a původní tři hodnoty měření musí být smazány. Nesmí být prováděna další opakovaná měření. (3)

U chyby při měření délky pro vzdálenost 150 mm odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly E_L platí, že maximálně u dvou z deseti sad ze tří opakování může právě jedna ze tří hodnot ležet mimo pole shody. Pro takové měření, které je mimo pole shody, se měření opakuje třikrát v dané poloze. Pokud všechny hodnoty chyb pro tři opakovaná měření leží uvnitř pole shody, je způsobilost CMM v této poloze ověřena. (3)

1.2. ISO 10360-3

Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou

Tato část normy ISO 10360 stanovuje přijímací a periodické zkoušky pro čtyřosé CMM, kdy čtvrtou osou je osa otočného stolu. Maximální dovolené chyby indikace MPE_{FR} , MPE_{FT} a MPE_{FA} jsou vztaženy k jakémukoliv bezpečnému zatížení, poloze a orientaci otočného stolu CMM a k jakékoliv poloze zkušební koule na otočném stole ve stanovených mezích. Tyto meze stanoví výrobce v případě přijímacích zkoušek a uživatel v případě zkoušek periodických. (4)

1.2.1. Environmentální a metrologické podmínky

Pro správné provedení zkoušek CMM se musí dodržet dané environmentální podmínky jako je teplota, vlhkost vzduchu a vibrace v místě měření. Tyto podmínky specifikuje v případě přijímacích zkoušek výrobce, v případě zkoušek periodických pak uživatel.



Při provádění zkoušek musí být CMM používán dle postupů uvedených výrobcem. Mezi tyto postupy patří např.:

- Spuštění stroje/cyklus zahřátí
- Konfigurace systému snímacích doteků
- Proces čištění špičky snímacího doteku a referenční koule
- Kvalifikace snímacího systému
- Nastavení a vymezení otočného stolu (4)

Špičku snímacího hrotu a referenční koule je třeba před kvalifikací snímacího systému řádně očistit od ulpělých nečistot, např. zbytků maziva, které by mohly ovlivnit výsledky měření.

1.2.2. Přejímací a periodická zkouška

Principem této metody je zjistit, zda je CMM schopen měřit v dovolených maximálních mezích chyb indikací při určení rozptylu měřených souřadnic středů dvou zkušebních koulí upevněných na otočném stole. Střed zkušební koule je definován třemi směry, a to ve směru radiálním, tangenciálním a axiálním. (4)

Chyby indikace jsou vypočítány odděleně pro každou zkušební kouli jako rozpětí mezi maximální a minimální hodnotou měření v každém ze tří směrů. (4)

Jako měřicí zařízení je zde použito dvou zkušebních koulí (A a B) o průměru minimálně 10 mm a maximálně 30 mm. Ty musí být dobře připevněny, aby upnutí bylo dostatečně tuhé a tím nevznikala nepřesnost způsobená ohybem, a to především, je-li otočná osa horizontální. (4)

Nejprve se umístí zkušební koule A na otočný stůl co nejbližší povrchu otočného stolu ve vzdálenosti r dle následující tabulky. Následně umístíme zkušební kouli B ve stejné vzdálenosti r a přibližně diametrálně oproti kouli A výše o hodnotu Δh . (4)



Pro stanovení kartézské souřadnicové soustavy platí:

- Střed zkušební koule B určuje počátek
- Primární osa určující axiální směr musí být rovnoběžná s osou otočného stolu
- Sekundární osa stanovující radiální směr musí ležet v rovině tvořené primární osou a středem zkušební koule A (4)

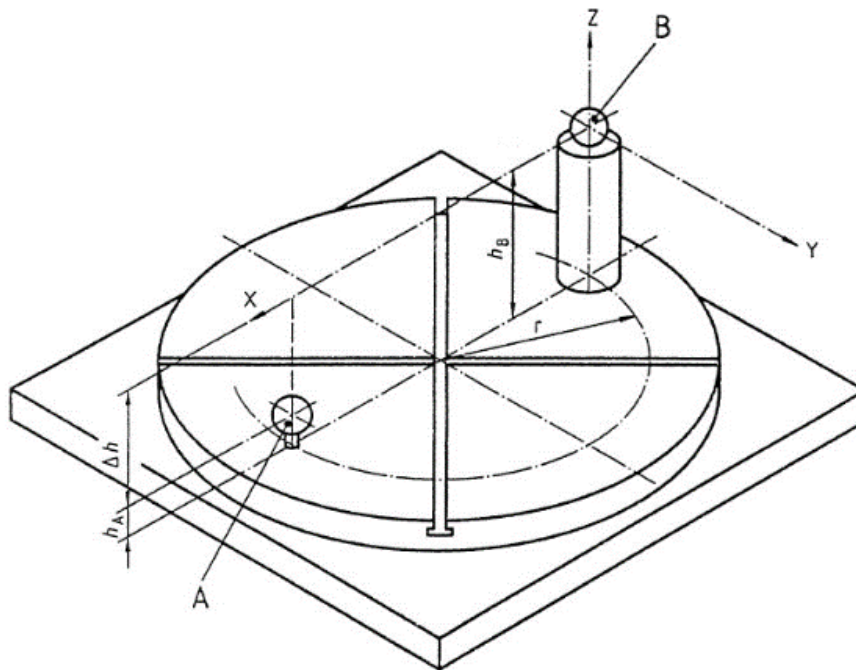
Poté, co je stanoven souřadnicový systém, uživatel stanoví počáteční úhlovou polohu. Poté se otočný stůl pootáčí v sérii sedmi úhlových intervalech, kdy se měří koule A je doporučeno, aby úhlový rozsah těchto sedmi poloh byl alespoň 720° od výchozí polohy. Poté se otočný stůl pootáčí v opačném smyslu otáčení v sedmi sériích úhlového intervalu, kdy se opět měří koule A. Po vrácení se do počáteční polohy je číslo úhlové polohy 14. Poté se tento postup opakuje, ovšem měří se koule B. Po vrácení se do počáteční polohy je číslo měření pro obě koule 28. (4)

Standardní hodnoty poloměru r a rozdílů výšky Δh jsou uvedeny na následující tabulce.

Tabulka 2: Umístění zkušebních koulí na otočném stole (4)

Číslo kombinace	Výška rozdílu Δh	Poloměr
	mm	r mm
1	200	200
2	400	200
3	400	400
4	800	400
5	800	800

POZNÁMKA Standardní hodnoty – jedna z uvedených kombinací, která musí být předepsána výrobcem. Ostatní hodnoty smí být použity na základě dohody mezi výrobcem a uživatelem.



Obrázek 7: Polohy zkušebních koulí na otočném stole pro přijímací a periodickou zkoušku (4)

Pomocí měření 28 poloh označených souřadnicemi X_A, Y_A, Z_A pro zkušební kouli A a X_B, Y_B, Z_B pro zkušební kouli B vypočítáme tři chyby čtvrté osy FR, FT, FA jako variace rozpětí hodnot každé z radiálních, tangenciálních a axiálních souřadnic středů obou zkušebních koulí. (4)

Technický stav CMM s čtvrtou osou jako osou otočného stolu je ověřen, pokud žádná z chyb čtvrté osy $FR_A, FT_A, FA_A, FR_B, FT_B, FA_B$ není větší než maximální dovolené chyby čtvrté osy $MPE_{FR}, MPE_{FT}, MPE_{FA}$ stanovené výrobcem v případě přijímacích zkoušek a stanovené uživatelem v případě zkoušek periodických. (4)

1.3. ISO 10360-4

Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenování

Tato část normy ISO 10360-4 stanovuje přijímací a periodické zkoušky pro ověření způsobilosti a technického stavu CMM. Přijímací a periodická zkouška popsaná v této části je použitelná pouze pro souřadnicové měřicí stroje používané v režimu skenování při použité libovolného dotykového snímacího systému. (5)



1.3.1. Environmentální a metrologické požadavky

Chyby snímání při skenování T_{ij} nesmí překročit dovolené chyby $MPE_{T_{ij}}$ dané výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických. Tyto chyby a jejich maximální hodnota jsou vyjádřeny v mikrometrech. (5)

Omezená je i doba zkoušky skenování τ , která nesmí překročit maximální dovolenou hodnotu MPE_{τ} danou výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických. Také musíme respektovat podmínky jako teplotu, vlhkost vzduchu a vibrace v místě CMM, které ovlivňují měření. (5)

Pro zkoušku CMM používaných pro skenování, použijeme dotek s poloměrem zaoblení špičky 3 mm. (5)

Mezi specifikace, které se musí při zkoušce dodržet, patří např.:

- Spuštění stroje/cykly zahřívání
- Konfigurace systému snímacích doteků
- Postup čištění špičky snímacího doteku a referenční koule
- Kvalifikace systému snímací hlavy (5)

Špičku snímacího hrotu a referenční koule je třeba před kvalifikací snímacího systému řádně očistit od ulpělých nečistot a např. zbytků maziva, které by mohly ovlivnit výsledky měření.

1.3.2. Přijímací a periodická zkouška

Následující zkoušky lze použít pro:

- Skenování na předem stanovené dráze pro sejmutí velké hustoty bodů (HP)
- Skenování na předem stanovené dráze pro sejmutí malé hustoty bodů (LP)
- Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmutí velké hustoty bodů (HN)
- Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmutí malé hustoty bodů (LN) (5)

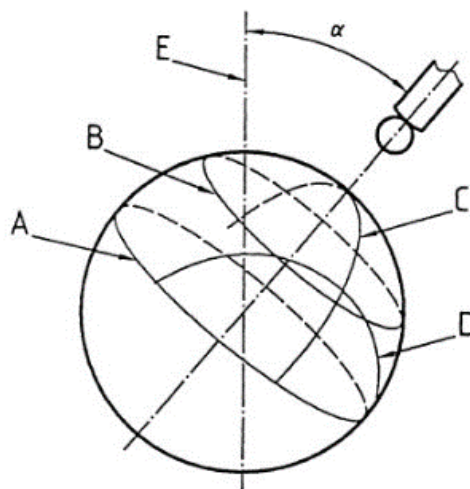


Skenování při velké hustotě bodů je významné především při měření různých úchylek tvarů. Skenování při malé hustotě se využívá spíše pro optimalizaci rychlosti, když se požadují informace o charakteristikách sdruženého prvku.

Principem metody je zjistit, zda je CMM schopen měřit při stanovené maximální dovolené chybě snímání při skenování $MPE_{T_{ij}}$, určením rozsahu hodnot rádiusu zkušební koule a v maximální dovolené době zkoušky MPE_T . Zkušební koule se měří ve čtyřech rovinách a následně je zjištěn její střed a poloměr. Absolutní rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou poloměru je definován jako chyba snímání při skenování T_{ij} . (5)

Pro zkoušku se využívá ocelová zkušební koule o jmenovitém průměru 25 mm, drsností povrchu s R_a do $0,05 \mu\text{m}$ a tvrdostí nejméně HV 800. Tato zkušební koule se musí odlišovat od koule použité pro kvalifikaci systému a také musí být umístěna v jiné pozici. (5)

Měření probíhá ve čtyřech rovinách zkušební koule tak, jak můžeme vidět na následujícím obrázku, kde rovina A je na rovníku. Rovina A a B jsou rovnoběžné a jsou vzdálené 8 mm. Roviny B, C a D jsou navzájem kolmé. Rovina C prochází pólem zkušební koule. Rovina D je vzdálena od pólu 8 mm. Úhel α značí úhel sklonu stopky snímacího doteku od osy pinoly, který definuje pól a rovník zkušební koule a doporučuje se volit hodnotu přibližně 45° . (5)



Obrázek 8: Čtyři cílové skenovací roviny na zkušební kouli (5)



V následující tabulce jsou uvedeny vzdálenosti dané pro malou a velkou hustotu bodů při skenování. Jednotky jsou uváděny v milimetrech.

Tabulka 3: Vzdálenosti mezi skenovanými body (5)

Rozměry v milimetrech

	Vzdálenost mezi po sobě jdoucími skenovanými body	Doporučená největší vzdálenost od cílové roviny skenování
Pro HP a HN	0,1	0,2
Pro LP a LN	1	0,2

Každé skenování roviny musí začínat a končit na pomocné poloze vzdálené nejméně 10 mm po normále od povrchu zkušební koule. Z tohoto bodu by se měl skenovací dotek přibližovat k povrchu koule stanovenou přesouvací rychlostí. Také se musí zaznamenat doba zkoušky skenování τ , která začíná od pomocného bodu v počátku skenování první roviny do pomocného bodu na konci skenování čtvrté roviny. Při zkoušce by se neměla použít žádná filtrace či jiná optimalizace. (5)

Následně se vypočítá střed přiřazené Gaussovy koule, získané pomocí metody nejmenších čtverců. Pro každý naskenovaný bod se vypočítá radiální vzdálenost R . Spočte se chyba snímání skenování T_{ij} jako řada vyčíslených radiálních vzdáleností R . Dále zjistíme největší absolutní rozdíl mezi touto libovolnou vzdáleností R a polovinou certifikované hodnoty průměru zkušební koule. (5)

Technický stav CMM při snímání v režimu skenování je ověřen, jestliže:

- Chyba snímání při skenování T_{ij} není větší než maximální dovolená chyba snímání skenování $MPE_{T_{ij}}$, stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických.
- Maximální absolutní rozdíl mezi libovolným poloměrem zkušební koule a její polovinou certifikovaného průměru není větší než $MPE_{T_{ij}}$, stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických.



- Doba zkoušky skenování τ není větší než maximální dovolená hodnota MPE_{τ} , stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických. (5)

Jestliže musí být souhlas se specifikací, vezme se nejistota měření v úvahu podle ISO14253-1.

Protože tato zkouška nepostihuje všechny uvedené chyby způsobené dynamickou odezvou systému jako např. chyby způsobené vnitřními a vnějšími nespojitostmi, drsností povrchu nebo mazi-
vem na povrchu, uživatel CMM může provést další zkoušky pro ověření technického stavu CMM při skenování. Využívanou metodou je porovnání výsledků měření typického obrobku v režimu skenování a v režimu snímání diskrétními body. Rozdíly mezi výsledky by měli být menší než předem dané hodnoty, které závisí na vzájemné domluvě výrobce a uživatele. (5)

1.4. ISO 10360-5

Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s několika doteky

Přijímací a periodické zkoušky obsažené v této části normy ISO 10360 jsou použitelné pro CMM, které používají dotykové sondy s nebo bez složených doteků nebo složené kloubové sondy poloh, které měří obrobek.

Případy, na které lze tuto normu aplikovat:

- Snímací systémy s jednotlivým dotekem
- Složené doteky spojené se sondou CMM
- Instalace používané kloubový snímací systém, který může být rekvalifikován
- Instalace používající systém opakovatelné výměny sondy
- Instalace používající systém opakovatelné výměny doteků
- Instalace složené sondy (6)

1.4.1. Environmentální a metrologické požadavky

Doteky používané pro provedení zkoušek uvedených v této kapitole musí být odsouhlaseny výrobcem CMM. Musí být vyrobené ze stejného materiálu mající stejný průměr doteku a jmenovitou



délku. Může ovšem nastat situace, kdy přesná délka doteku nebude k dispozici a poté je možno použít dotek se jmenovitou délkou až o 6 mm nebo 10 % jinou, dle toho, která je větší. (6)

Při provádění zkoušek musí být CMM používán dle postupů uvedených výrobcem. Mezi tyto postupy patří např.:

- Spuštění stroje/cyklus zahřátí
- Konfigurace systému doteku a montáže
- Čistící postupy pro snímací dotek, zkušební kouli a kouli referenční
- Kvalifikace snímacího systému
- Pokud výrobce specifikuje tak umístění referenční koule dle manuálu (6)

Všechny snímací doteky, zkušební koule a referenční koule je třeba před kvalifikací snímacího systému řádně očistit od ulpělých nečistot, např. zbytků maziva, které by mohly ovlivnit výsledky měření.

1.4.2. Přejímací a periodické zkoušky

Uspořádání jednotlivého doteku

Tato část je použitelná při uspořádání snímání jednotlivého doteku a CMM používající pevné složené sondy, pevné složené doteky nebo kloubové snímací systémy.

Principem této zkoušky je měření koule pomocí 25 bodů jednotlivým dotekem a přiřazení Gaussovy vhodné koule metodou nejmenších čtverců. Tato analýza poskytuje chybu tvaru jednotlivého doteku P_{FTU} . Výsledky těchto zkoušek mohou být značně závislé na použité délce doteku. Proto je zvažována sada délek doteku a jen ty délky, které jsou specifikovány výrobcem, musí být způsobilé pro zkoušku. (6)

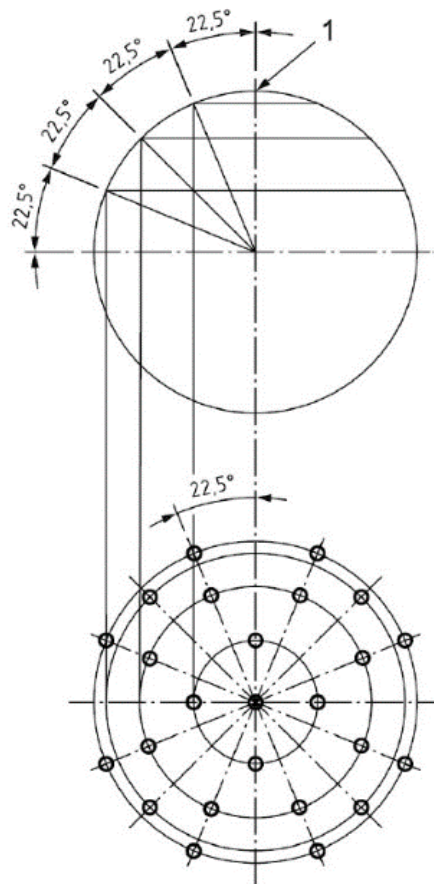
Zkušební koule musí mít jmenovitý kalibrovaný průměr od 10 mm do 50 mm a kalibrovaný tvar. Délka doteku je vybrána uživatelem z následujících hodnot: 20 mm, 30 mm, 50 mm a 100 mm. Uživatelem musí být vybrána a zkoušena pouze jedna z délek, která je specifikována výrobcem. Pokud není uvedeno jinak, musí být orientace doteku paralelně k pinole. Je důležité, aby zkušební



koule byla namontována pevně a dosahovala určité tuhosti, aby se minimalizovali chyby způsobené ohýbáním. (6)

Na povrchu koule se měří 25 bodů rovnoměrně rozložených, a pokud není specifikováno jinak, doporučuje se následující rozložení:

- Jeden bod na pólu zkušební koule
 - Čtyři body $22,5^\circ$ pod pólem
 - Osm bodů 45° pod pólem a otočené o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině
 - Čtyři body $67,5^\circ$ pod pólem a otočené o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině
 - Osm bodů 90° pod pólem (tj. na rovníku) a otočené o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině
- (6)



Obrázek 9: Rozmístění bodů na zkušební kouli, 1 - pól koule (6)



Pro 25 snímaných bodů je vypočtena Gaussova radiální vzdálenost R . Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou R nám určuje chybu tvaru jednotlivého doteku P_{FTU} . (6)

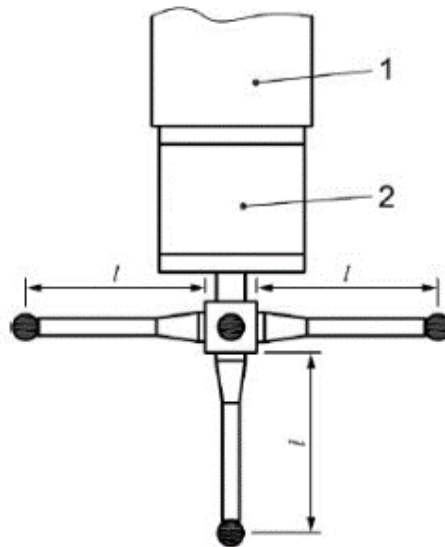
Pevné složené sondy a složené doteky snímacích systémů

Principem této zkoušky je měření tvaru, rozměru a umístění zkušební koule pomocí pěti různých pevných doteků. Každý dotek sejme 25 bodů, což nám ve výsledku dává 125 bodů pro všech pět doteků. (6)

Následně se vypočítají rozsahy souřadnic středů všech pěti koulí. Největší z těchto rozsahů určuje hodnotu polohy P_{LTM} nebo P_{LTN} . Ze všech 125 bodů je vypočítána Gaussova koule, která slouží pro tvar a rozměr chyb označení. Tato analýza udává chybu rozměru složeného doteku P_{STM} nebo P_{STN} a chybu tvaru složeného doteku P_{FTM} nebo P_{FTN} . (6)

Zkušební koule musí mít jmenovitý průměr od 10 mm do 50 mm. Rozměr a tvar zkušební koule musí být kalibrován. (6)

Složený systém doteku určený pro zkoušku je uspořádán jako „hvězdice“ složená z jednoho doteku paralelně s osou sondy a čtyř doteků umístěných v rovině kolmé k ose sondy a každý je orientovaný s 90° odstupem od sousedního. Použitá délka doteku musí být specifikována výrobcem a vybrána z následující sady délek: 10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm a 400 mm. (6)



Obrázek 10: Složený snímací systém, 1 - pinola, 2 - sonda, l - délka pevného složeného doteku snímacího systému (6)

Zkušební koule je změřena pomocí 25 bodů pro každý dotek, to nám ve výsledku dává 125 bodů. Body je doporučeno rozmístit dle stejného rozvržení jako při zkoušce s jednotlivým dotekem (viz výše). (6)

Kloubový snímací systém

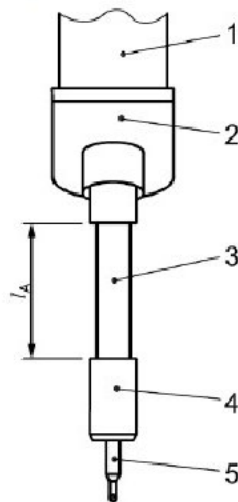
Principem této zkoušky je měření tvaru, rozměru a umístění koule pomocí pěti různých úhlových poloh kloubového snímacího systému. V každé poloze je měřeno 25 bodů na povrchu zkušební koule, dohromady tedy 125 bodů. Pro každou polohu snímacího systému je vypočtena jedna koule pomocí metody nejmenších čtverců. (6)

CMM s kloubovým snímacím systémem mohou používat buďto empirické nebo odvozené kvalifikace dat pro měření. Největší dovolené chyby a meze pro CMM používající empirickou kvalifikaci označujeme jako $P_{FTE, MPE}$, $P_{STE, MPE}$ a $P_{LTE, MPL}$, zatímco dovolené chyby a meze pro CMM používající odvozenou kvalifikaci značíme $P_{FTI, MPE}$, $P_{STI, MPE}$ a $P_{LTI, MPL}$. Obdobně tomu je i u hodnot získaných měření. (6)



Následně se vypočítají rozsahy souřadnic středů všech pěti koulí. Největší z těchto rozsahů určuje hodnotu polohy snímacího systému P_{LTE} nebo P_{LTI} . Ze všech 125 bodů je vypočítána Gaussova koule, která slouží pro určení úchytky tvaru a rozměru. Tato analýza udává chybu rozměru složeného doteku P_{STE} nebo P_{STI} a chybu tvaru složeného doteku P_{FTE} nebo P_{FTI} . (6)

Zkušební koule musí mít jmenovitý průměr od 10 mm do 50 mm. Rozměr a tvar zkušební koule musí být kalibrován. Použitelné hodnoty délky odsazení sondy l_A jsou následující: 50 mm, 100 mm, 200 mm a 400 mm. (6)



Obrázek 11: Kloubový snímací systém, 1 - pinola, 2 - držák kloubové sondy, 3 - prodloužení sondy, 4 - sonda, 5 - dotek, l_A - délka odsazení sondy (6)

Body je doporučeno rozmístit dle stejného rozvržení jako při zkoušce s jednotlivým dotekem (viz výše).

Výkon snímání složeným dotekem je ověřen, jestliže:

- Chyba tvaru složeného doteku P_{FTI} není větší než relevantní největší dovolená chyba tvaru složeného doteku $P_{FTI, MPE}$, stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických.



- Chyba rozměru složeného doteku P_{STj} není větší než relevantní největší dovolená chyba rozměru složeného doteku $P_{STj, MPE}$, stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických.
- Hodnota polohy snímacího systému P_{LTj} není větší než relevantní největší dovolená mez polohy snímacího systému $P_{LTj, MPE}$, stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických. (6)

Při vyhodnocování se vezme nejistota měření v úvahu podle ISO14253-1. (6)



2. Dostupné artefakty pro kontrolu přesnosti CMM

2.1. 1D artefakty

2.1.1. Koncové měrky

Koncové měrky jsou vyráběné v zásadě ze tří materiálů, a to z oceli, tvrdokovu a keramiky. Měrky z tvrdokovu a keramiky vynikají svojí odolností proti opotřebení. Keramické se navíc vyznačují svojí odolností proti korozi a vzhledem k této vlastnosti nacházejí uplatnění především v dílenských podmínkách. Dále se koncové měrky dělí do čtyř tříd přesnosti:

- K – především pro kalibrační laboratoře ke kalibraci a navazování koncových měrek nižších řádů sekundárních etalonů
- 0 – pro přesné délkové měření, ke kalibraci koncových měrek z oblasti pracovních měřidel, ke kalibraci a k nastavení měřicích přístrojů
- 1 – ke kalibraci kalibrů a nastavování měřicích přístrojů
- 2 – pro běžné měření a nastavování míry ve strojírenství (7)

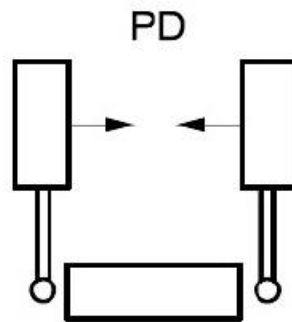
Dovolené odchylky přesnosti koncových měrek jsou uvedeny v následující tabulce:

A – dovozená odchylka délky měrky od jmenovité hodnoty

B – dovozená odchylka rovinnosti a rovnoběžnosti

Tabulka 4: Dovolené odchylky pro třídy přesnosti v μm dle DIN EN ISO 3650 (7)

Jmenovitá hodnota (mm)		třída př. K		třída př. 0		třída př. 1		třída př. 2	
od	do	A	B	A	B	A	B	A	B
-	10	0,20	0,05	0,12	0,10	0,20	0,16	0,45	0,30
10	25	0,30	0,05	0,14	0,10	0,30	0,16	0,60	0,30
25	50	0,40	0,06	0,20	0,10	0,40	0,18	0,80	0,30
50	75	0,50	0,06	0,25	0,12	0,50	0,18	1,00	0,35
75	100	0,60	0,07	0,30	0,12	0,60	0,20	1,20	0,35
100	150	0,80	0,08	0,40	0,14	0,80	0,20	1,60	0,40
150	200	1,00	0,09	0,50	0,16	1,00	0,25	2,00	0,40
200	250	1,20	0,10	0,60	0,16	1,20	0,25	2,40	0,45
250	300	1,40	0,10	0,70	0,18	1,40	0,25	2,80	0,50
300	400	1,80	0,12	0,90	0,20	1,80	0,30	3,60	0,50
400	500	2,20	0,14	1,10	0,25	2,20	0,35	4,40	0,60
500	600	2,60	0,16	1,30	0,25	2,60	0,40	5,00	0,70
600	700	3,00	0,18	1,50	0,30	3,00	0,45	6,00	0,70
700	800	3,40	0,20	1,70	0,30	3,40	0,50	6,50	0,80
800	900	3,80	0,20	1,90	0,35	3,80	0,50	7,50	0,90
900	1000	4,20	0,25	2,00	0,40	4,20	0,60	8,00	1,00



Obrázek 12: Měření koncové měrky v obou směrech (PD - smysl snímání) (3)

Kalibrované koncové měrky umožňují měření pouze v obou směrech. Měření v obou směrech zahrnuje snímání jednotlivého bodu na každém konci měrky a také sonda se k daným plochám přibližuje z diametrálně protilehlých smyslů.

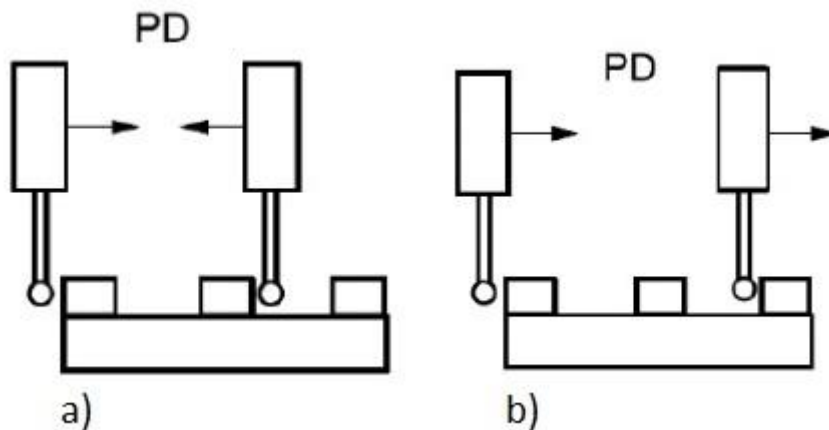
Při vyrovnávání měrek s rovnoběžnými čely se postupuje tak, že na jednom čele se změří skupina bodů a z nich se následně vypočte metodou nejmenších čtverců referenční rovina. Kolmice na tuto referenční rovinu představuje směr (osu) měrky. Změří se jeden bod na každém čele, přičemž musí ležet co nejbližně kalibrovanému místu měrky. Vyhodnotí se vzdálenost mezi jednotlivými body a promítne se do osy měrky. Tento rozměr se poté porovnává s kalibrovaným rozměrem měrky. (3)

Pro velmi dlouhé měrky (např. pokud kalibrovaná zkušební délka je větší než desetinásobek velikosti plochy měrky) můžeme pro určení osy měrky použít body ležící na podélných nefunkčních plochách. (3)



2.1.2. Stupňové měrky

Kalibrované stupňové měrky můžeme použít pro měření v obou směrech snímání metodou od jednotlivého bodu k druhému jednotlivému bodu. Při měření v jednom směru snímání musí být všechny měřené plochy měrky měřeny třemi diskrétními body ve stejném místě a ty se následně



Obrázek 13: Měření stupňové měrky - a) oba směry snímání, b) jeden směr snímání (3)

zprůměrují. Pro vyhodnocení vzdálenosti daných ploch se tedy používají již průměrné hodnoty souřadnic. (3)

Stupňové měrky se vyrábějí v různých provedeních, jako jsou jednoduché, čistě vodorovně umístěné nebo pod daným pevným úhlem (často 45°) či úhlově stavitelné, které poskytují největší variabilitu a měření ve všech polohách, což využijeme především u souřadnicových měřicích strojů s otočnou hlavou jak plynulou tak i krokovou.



Obrázek 14: Stupňové měrky Koba-step (8)

Při vyrovnání stupňových měrek postupujeme stejně jako při vyrovnání měrek koncových (viz výše).

2.1.3. Ball bar

Jedná se o poměrně jednoduchý artefakt pro ověřování přesnosti CMM. Je složen ze dvou pevně spojených kalibrovaných koulí o známé vzdálenosti.



Obrázek 15: Ball bar (9)



Při měření v obou směrech snímání se kalibrovaná zkušební délka rovná kalibrované vzdálenosti středu koulí plus jedna polovina kalibrovaného průměru každé koule. Měrka je měřena v obou směrech metodou jednotlivého bodu k jednotlivému bodu (stejně jako koncová měrka). (3)

Jedna z metod vyrovnání v obou směrech musí zajistit, aby přiblížení snímacího doteku bylo ve směru osy měřky, kterou definuje spojnice středů koulí. Bezpodmínečně v průběhu seřizovací metody musí být použito tohoto typu zkušební délky jen u CMM, které mají snímání řízené počítačem. (3)

Další metoda vyrovnání v obou směrech je měření každé koule ve čtyřech bodech, přičemž jeden je umístěn na kouli a ose, která koulí prochází. Další tři body jsou oproti tomuto bodu pootočený o 90° a leží v rovině, která je kolmá k ose měřky a obsahuje středový bod koule. (3)

Také se můžeme setkat s modifikací v podobě multi ball bar, kde je umístěno namísto dvou koulí několik koulí v jedné řadě. Kupříkladu firma Koba dodává toto řešení v provedení s třemi až osmi koulemi, které jsou vyrobeny z keramiky. (10) V mnoha případech se jako materiál pro spojení jednotlivých koulí používá Fe – Ni slitina INVVAR, která má velmi malý koeficient tepelné roztažnosti (přibližně 10x menší než železo).



Obrázek 16: Multi ball bar (10)



Další zajímavou alternativou na klasický ball bar je řešení firmy Renishaw QC20-W. Jedná se o dvě spojené kalibrované koule, přičemž jedna je kinematicky umístěna k pinole CMM a druhá je upevněna ke stojanu zafixovanému k základní desce souřadnicového měřicího stroje. Koule jsou spojeny vysoce přesným, teleskopickým, lineárním senzorem, který zaznamenává změnu vzdáleností daných koulí. Stroj poté provádí pohyb po ideální kružnici a tento systém zaznamenává aktuální odchylku od teoretické kružnice. Data jsou přenášena bezdrátově do počítače, kde jsou následně vyhodnocena a umožňují například grafické online zobrazení. Vyrábí se v délkách, kdy rádius teoretické kružnice je od 100 do 600 mm a umožňuje měření oblouku v rovině rovnoběžné s pinolou až 220°. (11)



Obrázek 17: Produkt firmy Renishaw QC20M-W (7)

2.2. 2D artefakty

2.2.1. Ball plate

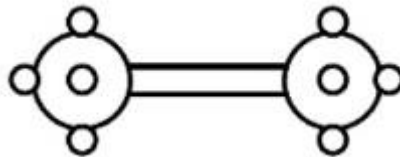
Jedná se o artefakt využívající systém kalibrovaných koulí umístěných na desku. Jsou rozmístěny tak, že vytváří jakousi síť koulí s přesně danými rozestupy. Při měření se postupuje tak, že změříme jednotlivé koule a k nim přiřadíme jejich vypočtené středy. Tyto vzdálenosti poté porovnáváme se známými hodnotami vzdáleností jednotlivých koulí. Můžeme se setkat jak s kovovými koulemi, které ovšem mají vyšší hodnotu součinitele tepelné roztažnosti a při kolísání teploty v prostředí souřadnicového měřicího stroje to může vést ke vzniku vyšší chyby měření, nebo s keramickými koulemi, u kterých je součinitel tepelné roztažnosti velmi malý a tím jsou teplotně značně stabilní.



Při měření v obou smyslech snímání se kalibrovaná zkušební délka rovná kalibrované vzdálenosti středu koulí plus jedna polovina kalibrovaného průměru každé koule. Měrka je měřena v obou smyslech metodou jednotlivého bodu k jednotlivému bodu (stejně jako koncová měrka). (3)

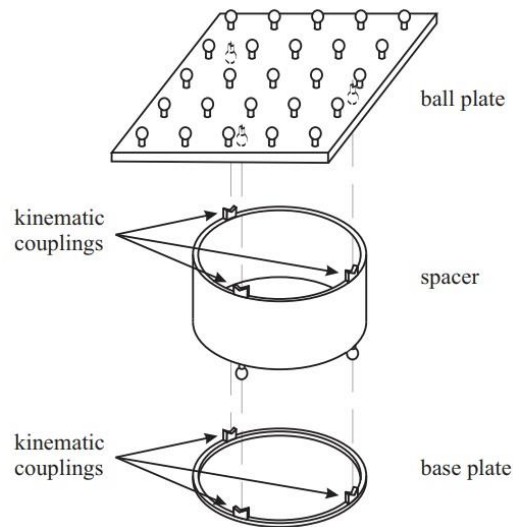
Jedna z metod vyrovnání v obou smyslech musí zajistit, aby přiblížení snímacího doteku bylo ve směru osy měrky, kterou definuje spojnice středů koulí. Bezpodmínečně v průběhu seřizovací metody musí být použito tohoto typu zkušební délky jen u CMM, které mají snímání řízené počítačem. (3)

Další metoda vyrovnání v obou smyslech je měření každé koule ve čtyřech bodech, přičemž jeden je umístěn na kouli a na ose, která koulí prochází. Další tři body jsou oproti tomuto bodu pootočený o 90° a leží v rovině, která je kolmá k ose měrky a obsahuje středový bod koule. (3)



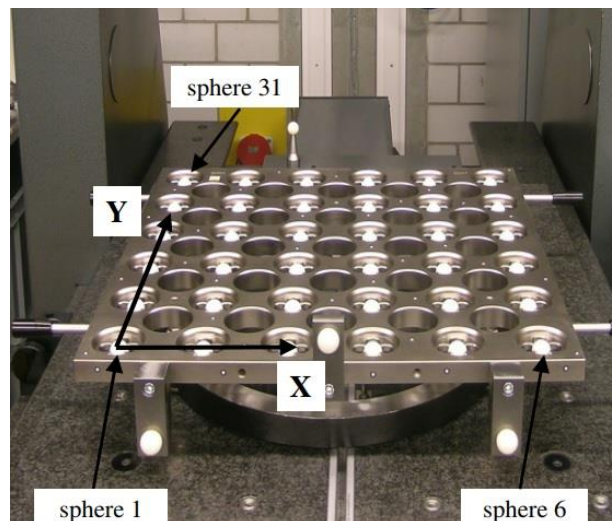
Obrázek 18: Náhled na model čtyř bodů na kouli při měření v obou smyslech (3)

Také se můžeme setkat s určitou modulací tohoto artefaktu, kterou uvádí švýcarský federální institut technologie v Zurichu. Jedná se o ballplate opatřený o jakési distanční kroužky, které se podkládají pod ballplate. Tím umožníme měření artefaktu v různých výškách a vytvoříme z toho tak 3D artefakt.



Obrázek 19: Schématické znázornění 3D-ball plate artefaktu (3)

Typický komerční ball plate používaný pro měření na CMM obsahuje 36 koulí. Souřadný systém ball plateu je definován třemi koulemi, které se nacházejí v rozích (viz následující obrázek). Souřadný počátek je reprezentován koulí 1, středové body koulí 1 a 6 definují osu X. Rovinu XY definují koule 1, 6 a 31 a osa Y je kolmá na osu X. (1)



Obrázek 20: Ball plate a jeho souřadný systém (12)

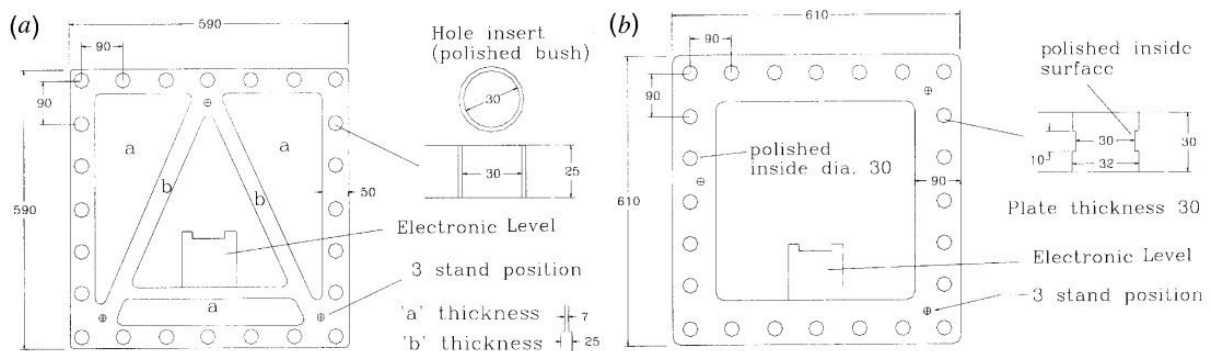
Také se doporučuje provádět měření ve čtyřech polohách, kdy se jednotlivé polohy liší natočením celého ball plateu o 90° , čímž snížíme chybu měření.



2.2.2. Hole plate

Jedná se o artefakt na podobném principu jako ball plate, ovšem s tím rozdílem, že místo koulí se zde nacházejí kalibrované díry. Výhodou oproti ball plate může být i fakt, že celková hmotnost je nižší, a tím je i umožněna snadnější manipulace s tímto artefaktem.

Britský standard BS-7172 doporučuje nejméně pět bodů pro definování kružnice. Při měření by měl být průměr díry dostatečně velký, aby bylo umožněno snímacímu doteku nasnímat pět jednotlivých bodů. Vyskytují se provedení, kde je otvor přímo v základním materiálu hole plate nebo se používá vsazeného broušeného kroužku. Na následujícím obrázku můžeme vidět dvě provedení. V prvním případě se jedná o hole plate z titanu s vsazenými broušenými kroužky. Často je hole plate navrhován s odlehčovacími částmi pro snížení hmotnosti a pro větší komfort při manipulaci. V druhém případě je jako materiál použita keramika pro snížení tepelného efektu na hole plate a není zde použito vsazeného kroužku. (13)



Obrázek 21: a) hole plate z titanu, hmotnost = 12,5 kg, b) hole plate z keramiky, hmotnost = 12 kg (13)

2.3. 3D artefakty

2.3.1. Ball Tetrahedron a Ball Cube

Jedná se o 3D artefakty pro ověřování CMM. Jedná se o seskupení čtyř kalibrovaných koulí spojených konstrukcí. Na následujícím obrázku můžeme vidět příklad Tetrahedronu od firmy Innovalia Metrology produkováný pod názvem TETRA-CHECK.



Obrázek 22: Tetrahedron TETRA-CHECK firmy Innovalia Metrology (14)

Dodává se ve čtyřech velikostech od 400 mm do 1 500 mm, myšleno od jednoho rohu k druhému. Je dodáván s vlastním softwarem TetraCheck pro vyhodnocování měření. Můžeme si vybrat i z varianty pro bezkontaktní měření, kdy jsou kalibrované koule opatřeny povrchovou úpravou. (14) Hojně se využívá uhlíkových vláken pro konstrukci tohoto artefaktu. Dále jsou na trhu i varianty, které je možno složit, a je tak dosaženo značné skladnosti při přepravě. Tyto koule je možné složit a rozložit v deseti minutách. (15)



Obrázek 23: Složený Tetrahedron v přepravním pouzdře (15)

Celé měření pomocí tohoto artefaktu trvá něco kolem 10 minut a umožňuje tak rychlé ověření přesnosti. (16)



Podobným artefaktem je Ball Cube, který je složen ne ze čtyř koulí, ale z osmi. Tyto jsou spojeny pevnou konstrukcí. Firma Innovalia Metrology dodává toto řešení ve čtyřech velikostech hrany, a to od 400 mm do 850 mm. (14)



Obrázek 24: Ball Cube CUBE-CHECK firmy Innovalia Metrology (14)

2.3.2. ZEISS CMM-Check

Společnost Zeiss nabízí hned několik artefaktů pro ověření přesnosti CMM. Mezi nejuniverzálnější patří CMM-Check. S tímto artefaktem je možno měřit a následně vyhodnocovat následující funkce:

- Dotykový snímací systém sondy
- Kondici skenovacího systému sondy
- CMM jako stroj pro měření tvaru obsahující charakteristiky filtru
- Chyby lineárního měření (17)

Artefakt obsahuje:

- Jeden nastavovací kroužek o průměru 50 mm
- Tři keramické koule o průměru 30 mm



- Jeden Flick standard – válec, který má na sobě dva ploché leštěné řezy velké 10 μm a 250 μm , které detekují chybu citlivosti snímání
- Dvě paralelní koncové měrky o délce 50 mm a 400 mm (17)



Obrázek 25: ZEISS CMM-Check (17)

2.3.3. TORUS EasiCheck

Firma Torus Group nabízí své řešení pod názvem EasiCheck.



Obrázek 26: TORUS EasiCheck (18)



Celá jednotka obsahuje:

- Dvě paralelní koncové měrky o délce 50 mm a 400 mm
- Vnitřní kroužek o průměru 50 mm
- Keramickou kouli o průměru 30 mm
- Vnější kužel (18)

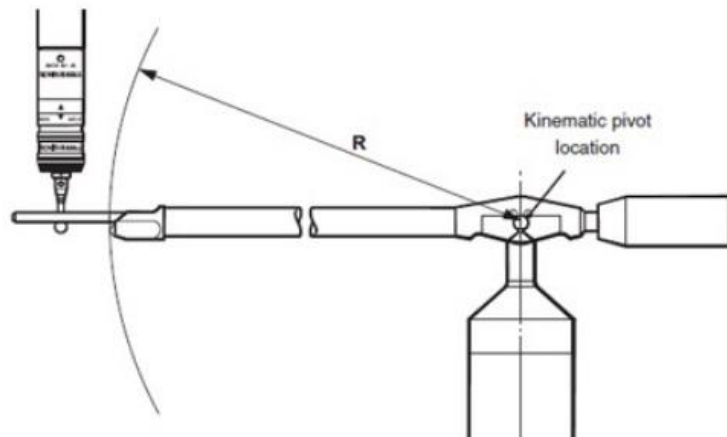
Řešení se vyrábí ve třech provedeních. První dvě jsou svými elementy stejné, rozdíl je ten, že u druhé varianty je povrchová úprava pro bezkontaktní souřadnicové měřicí stroje. Třetí varianta se jmenuje EasiCheck Mini, je určena pro malé CMM a obsahuje následující:

- Dvě paralelní koncové měrky o délce 50 mm a 300 mm
- Vnitřní kroužek o průměru 35 mm
- Keramickou kouli o průměru 30 mm
- Vnější kužel (18)

EasiCheck může být natočen do třech poloh pro ověření jednotlivých os CMM. Zařízení se dodává s CMM programem v PC-DMIS a MCOSMOS, ale jsou možné i jiné, jako třeba Modus a další.

2.3.4. Renishaw MCG

Dalším artefaktem pro ověřování přesnosti CMM je produkt MCG (Machine Checking Gauge) od společnosti Renishaw. Je založen na alternativě k ball baru. Rameno MCG je kinematicky spojeno se snímacím systémem CMM a rubínovou kuličkou na stojanu zařízení. Toto kinematické uložení umožňuje pohyb v horizontální rovině v úhlu 360° a ve vertikální rovině v úhlu $\pm 45^\circ$. Následně stroj provádí sférický pohyb s rádiusem, který je dán délkou ramene zařízení. Ta se dodává v šesti délkách, a to od 101 mm do 685 mm. (19)



Obrázek 27: Produkt Renishaw MCG (19)

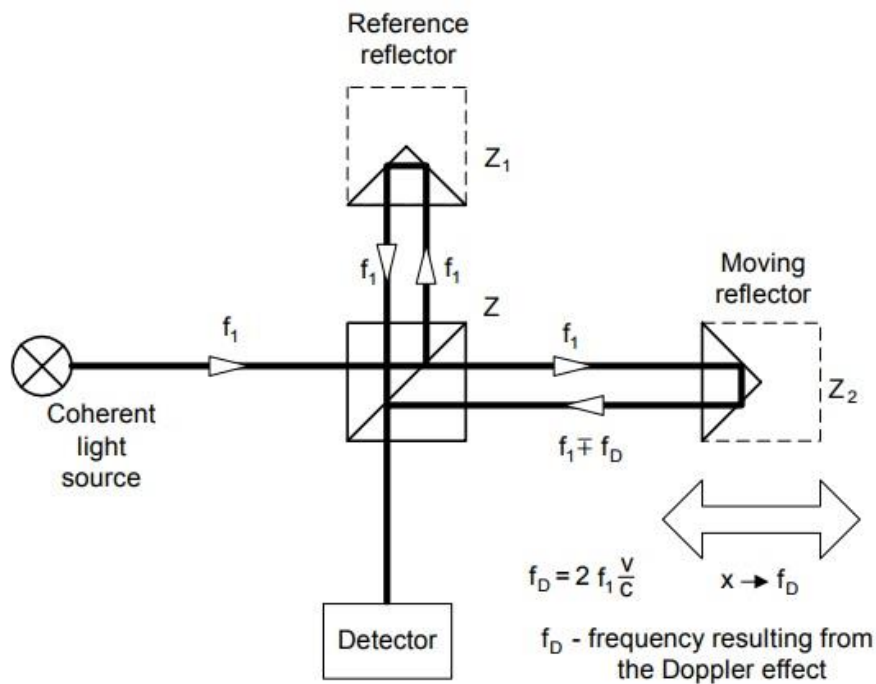
2.4. Laserový interferometr

Použití laserového interferometru je patrně nejpřesnější způsob pro kalibraci a ověřování přesnosti souřadnicových měřicích strojů. Interferometrie je metoda, která využívá interferenci optických vln k porovnání dvou či více vlnoploch. Dle počtu interferujících ploch rozdělujeme interferenci dvousvazkovou nebo mnohosvazkovou. Interference je superpozice světelných svazků. Pro to, aby tento jev mohl nastat, musí být zajištěny určité podmínky jako:

- Interferující svazky mají stejný směr
- Interferující svazky mají stejnou polarizaci
- Interferující svazky mají stejnou frekvenci (popř. vlnovou délku) (20)

Dle toho, v jaké jsou jednotlivé vlnoplochy vůči sobě fázi, rozdělujeme interferenci na konstruktivní a destruktivní.

První interferometr sestavil A. A. Michelson v roce 1881 a jednalo se o interferometr dvousvazkový. (21)

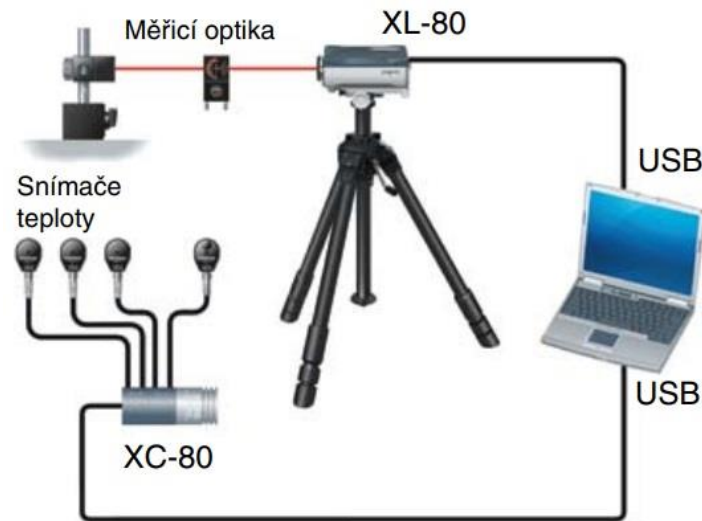


Obrázek 28: Schéma Michelsonova interferometru (21)

Koherentní světelný paprsek dopadá na polopropustné zrcadlo a to ho následně rozdělí na paprsky dva. První paprsek jde do referenční větve a následně se odráží od reflektoru Z1. Druhý paprsek jde do měřicí větve a odráží se od reflektoru Z2. Odražené paprsky se potkávají na detektoru. Pořád paprsky pocházejí ze stejného, koherentního zdroje nastane interference. Když poté budeme zaznamenávat tento signál, zjistíme, že mezi dvěma po sobě jdoucími maximy (popř. minimy) intenzity na výstupu interferometru se měřící zrcadlo posune o polovinu vlnové délky laseru. (21), (22)

Mezi další typy interferometru patří také Fabryův-Perotův nebo Murtyův interferometr.

Na trhu je pro kalibrační a měřicí účely hojně využíván přenosný laserový systém společnosti Renishaw. Základem tohoto systému je laserová hlavice XL-80 a samostatný kompenzátor podmínek prostředí XC-80.



Obrázek 29: Laserový systém společnosti Renishaw (23)

Zaručená přesnost lineárního měření je $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$ v celém rozsahu podmínek prostředí, tj. při teplotě $0 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ a při tlaku $650 - 1150 \text{ mbar}$. Dosahované lineární rozlišení 1 nm je zachováno v celém rozsahu rychlosti měření, která má maximální hodnotu 4 m/s . Integrovaný USB konektor umožňuje přímé spojení laseru k PC. (23)

Velmi důležitým prvkem celého systému je též kompenzátor podmínek prostředí. Sensory měří velmi přesně teplotu vzduchu, tlak vzduchu a relativní vlhkost. Dále lze připojit až 3 snímače teploty materiálu, aby bylo možno normalizovat lineární měření na standardní teplotu materiálu $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Na základě zjištěných údajů upravuje vlnovou délku tak, aby do výpočtů vstupovala stále správná hodnota. Kompenzace se provádí každých 7 vteřin. Celý systém váží něco kolem 12 kg . (23)

Také lze tento systém rozšířit o otočný systém RX10, který slouží pro měření přesnosti polohování rotačních os. Zde se dosahuje přesnosti ± 1 úhlová vteřina. (23)

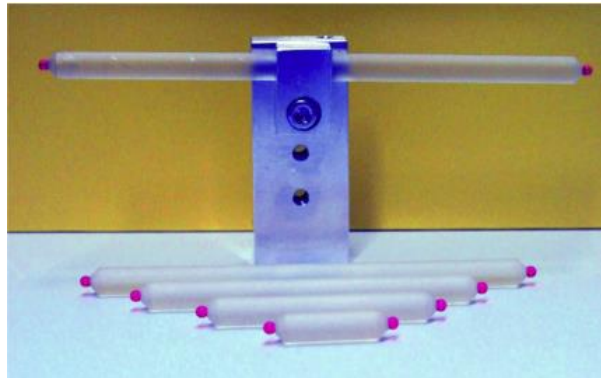
Interferometry lze využít pro měření polohy, úhlu, rovinnosti, přímosti a kolmosti.



2.5. Artefakty pro micro-CMM

2.5.1. METAS mini Ball Bar

Tento set je tvořen dvěma syntetickými rubínovými koulemi a spojovací tyčí z materiálu Zerodur. Zerodur je sklokeramický materiál s extrémně nízkým koeficientem tepelné roztažnosti, a to až $0 \pm 0,007 * 10^{-6} \text{ K}$. (24) Ball Bar je dodáván v délkách od 20 mm do 100 mm. (25)



Obrázek 30: METAS mini Ball Bar (25)

2.5.2. A*STAR mini multi Ball Bar

Tento mini multi Ball Bar byl vyvinut v Národním metrologickém centru v Singapuru. Obsahuje deset rubínových koulí o průměru 5 mm, které jsou rozmístěny s intervalem 10 mm. Koule jsou umístěny na tyči z uhlíkových vláken z důvodu nízkého koeficientu tepelné roztažnosti, který činí $-0,8 * 10^{-6} \text{ K}$. Koule mají specifikovanou odchylku kulovitosti $0,08 \mu\text{m}$. (25)

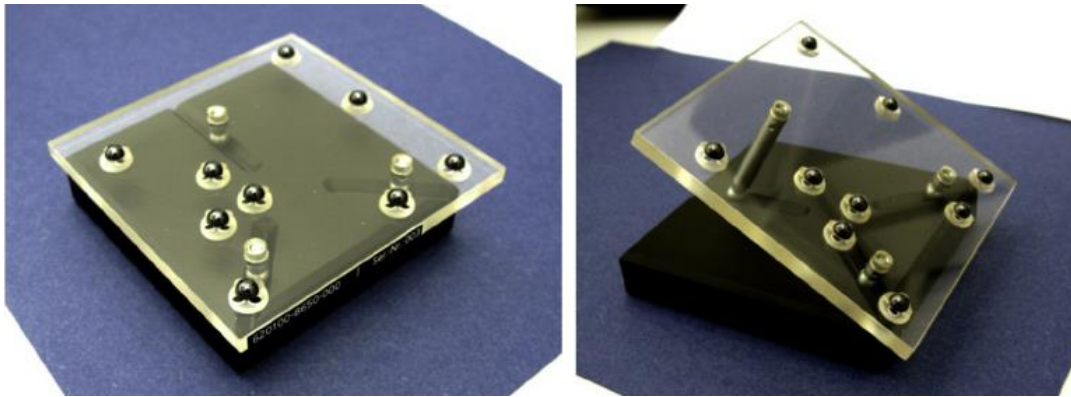


Obrázek 31: A*STAR mini multi Ball Bar (25)



2.5.3.ZEISS Mini Ball Plate

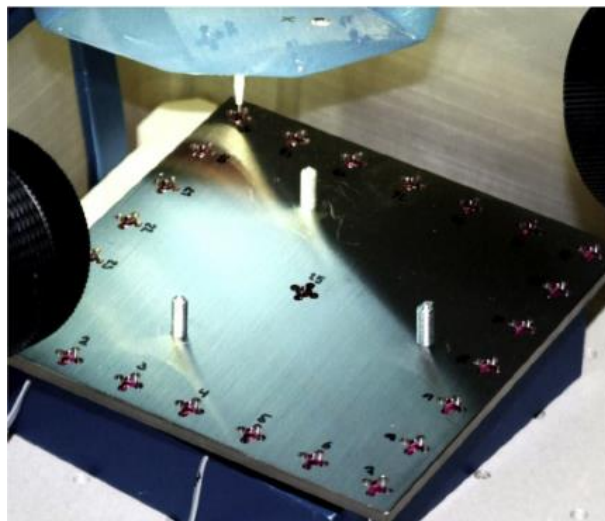
Miniaturní Ball Plate, vyráběný firmou Carl Zeiss, obsahuje základ z materiálu Zerodur, na kterém je umístěno devět silikon-nitridových polokoulí. Design artefaktu umožňuje vyhodnotit 36 vzdáleností v rozmezí od 13 mm do 100 mm. Polokoule jsou přístupné z horní a spodní strany základní desky. Z horní strany lze měřit v rozsahu 88° od pólu polokoule a pokryje tak 96,5 % povrchu polokoule. Při přístupu ze spodní strany desky pokryje přibližně 5 %. (25)



Obrázek 32: ZEISS Mini Ball Plate (25)

2.5.4.METAS Ball Plate

Tento Ball Plate byl navržen firmou METAS. Obsahuje 25 rubínových koulí o průměru 3 mm, které jsou umístěné na Invarové základní desce o rozměrech 85 mm * 85 mm. (25)

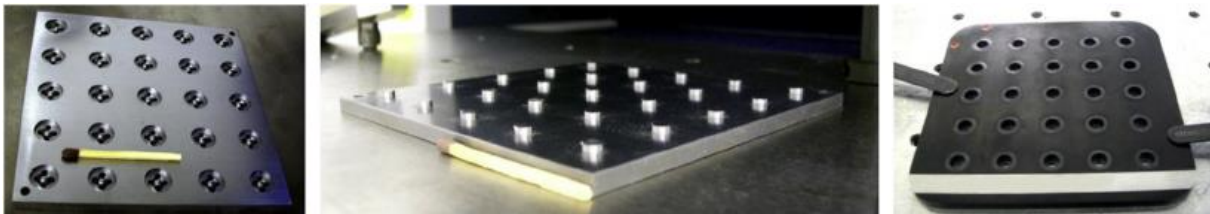


Obrázek 33: METAS Ball Plate (25)



2.5.5. Kruger plates – válec, koule a díra

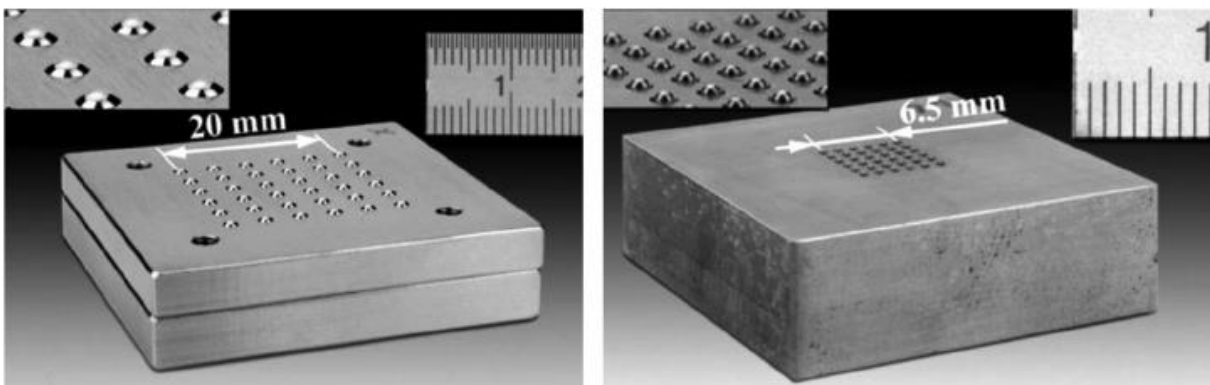
Set 2D artefaktů byl navržen a vyroben v Národním metrologickém institutu Jižní Afriky (NMISA). Lze ho použít pro kontaktní a optické snímací systémy. Klasický ball plate zde byl vyroben v malém měřítku. Tento ball plate ovšem není vhodný pro měření pomocí optických CMM, protože optický sensor není schopen provést automatickou detekci hrany koule. Z tohoto důvodu set obsahuje další dvě desky – jednu s válci a druhou s děrami osazenými keramickými vložkami. Tloušťka těchto desek je přibližně 4 mm.



Obrázek 34: Tři Krugerovy desky - Ball Plate (vlevo), Cylinder Plate (uprostřed) a Hole Plate (vpravo) (26)

2.5.6. PTB micro ball plates

Tento koncept byl vyvinut společností PTB jako dva separátní artefakty. První artefakt obsahuje 36 koulí z korozivzdorné oceli o průměru 2 mm rozmístěných v síti 6 x 6 koulí. Celý artefakt měří pouze 20 mm x 20 mm. Druhá micro Ball Plate obsahuje 36 koulí o průměru 500 µm a zabírá plochu 6,5 mm x 6,5 mm.

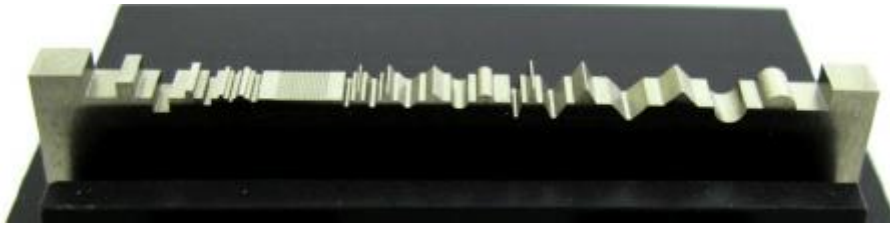


Obrázek 35: Dvě PTB micro Ball Plates (27)



2.5.7. Micro-contour standard

Micro-contour standard byl vyvinut společností PTB, a byl vyroben za použití elektroerozivního obrábění (EDM). Drsnost povrchu umožňuje měření artefaktu micro CMM s použitím kontaktních i optických snímačů. Na artefaktu se měří mnoho detailů a především je tento artefakt používán pro ověření rozeznávání hran a přechodů.

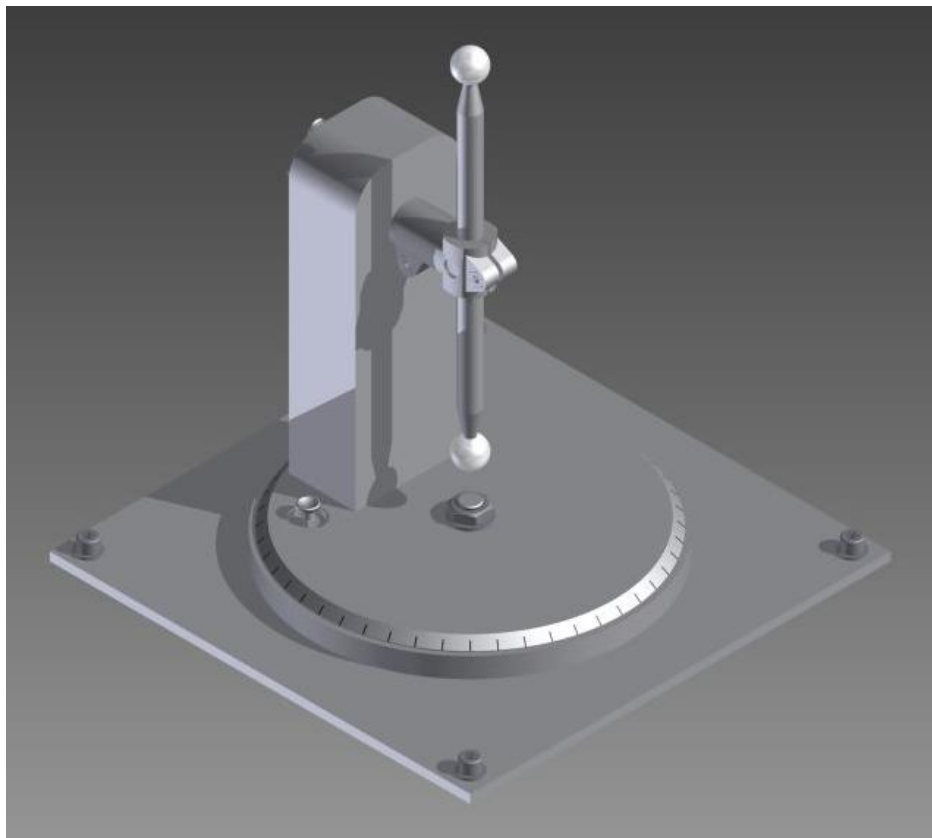


Obrázek 36: PTB micro-contour standard (28)

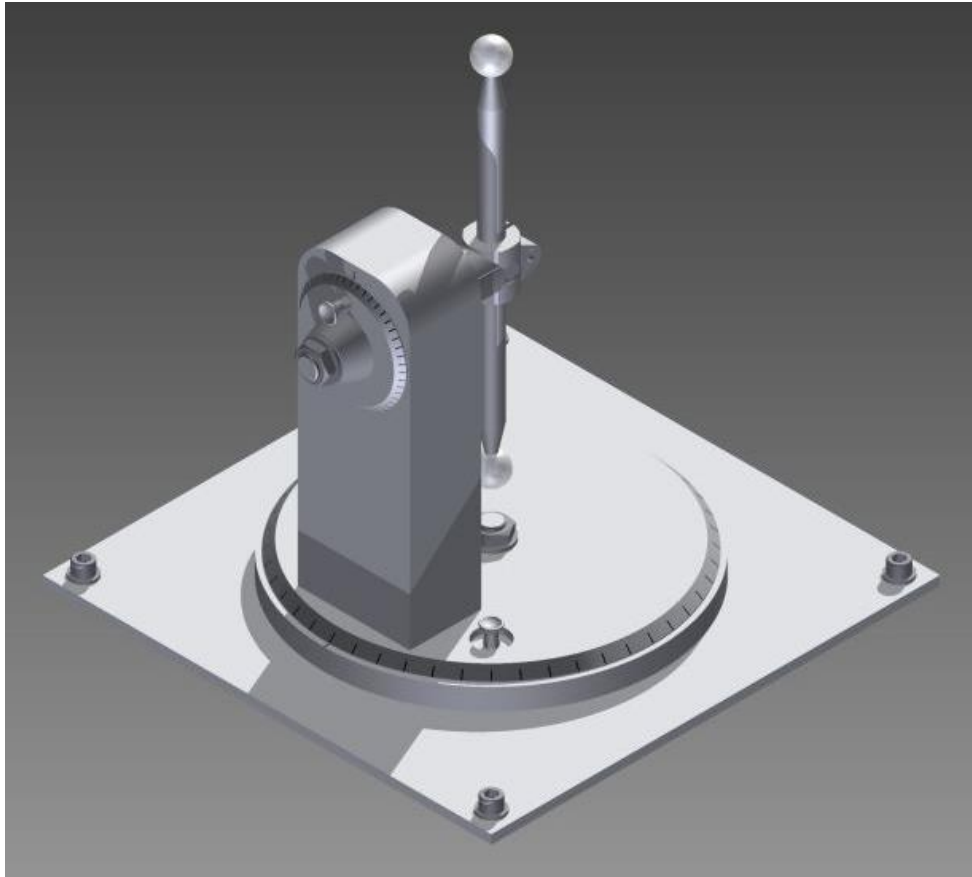


3. Návrh vlastního artefaktu pro ověření přesnosti CMM

Myšlenka tohoto artefaktu vychází z konceptu ball baru. Jedná se o dvě koule pevně spojené tyčí z materiálu Invar pro jeho velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti. Tato tyč se poté může polohovat kolem vertikální a horizontální osy, přičemž má bod společného otáčení. Pro snazší polohování je pomocí aretačních čepů možno ustavit tyč do předem daných poloh s úhlovým natočením 45° v každé ose. Pokud bychom se nechtěli omezovat předem danými polohami, lze si libovolně nastavit jakýkoliv úhel s tím, že noniová stupnice pro odměřování úhlu je s krokem $7,5^\circ$. Tento úhel je vybrán záměrně, protože se často můžeme setkat s krokovými otočnými snímacími hlavami, které mají krok právě $7,5^\circ$. Celý artefakt je umístěn na desce se čtyřmi připojovacími otvory s roztečí 400 mm x 400 mm. Tento rozměr odpovídá připojovacím rozměrům na základní desce souřadnicových měřicích strojů Zeiss. Pomocí šroubů zafixujeme celý artefakt, aby bylo dosaženo potřebné tuhosti.



Obrázek 37: Navržený artefakt - přední pohled



Obrázek 38: Navržený artefakt - zadní pohled

3.1. Součásti artefaktu

Součást – Tyč

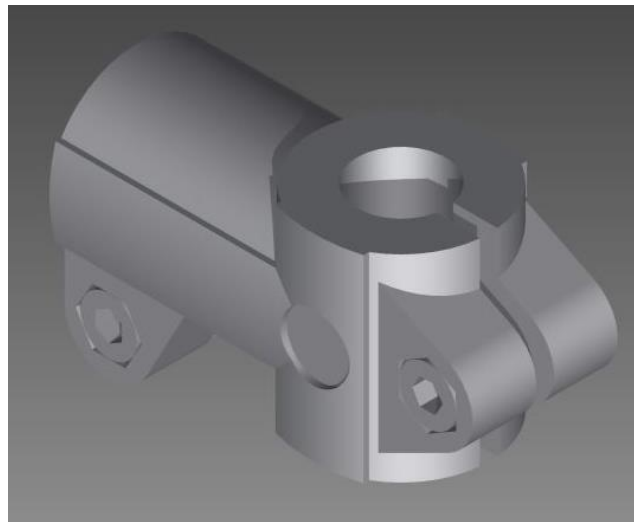
Tato součást je tvořena dvěma keramickými koulemi o průměru 30 mm, které jsou spojeny pomocí tyče, a vzdálenost jejich středů je 350 mm. Průměr tyče je 20 mm. Jako materiál pro výrobu tyče je zvolen Invar. Jedná se o jednofázovou Fe-Ni slitinu s plošně středěnou kubickou krystalovou mřížkou. Je unikátní tím, že vykazuje minimální hodnotu součinitele délkové roztažnosti, a to do teploty cca 230 °C. Při obsahu niklu okolo 36 % vykazuje slitina nejnižší součinitel délkové roztažnosti. Jeho hodnota je menší než $1,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Obrábí se podobně jako austenitické korozivzdorné oceli.



Obrázek 39: Součást Tyč

Součást – T-spojka

Zde se jedná o nakupovaný díl od firmy Kipp s označením K0475.52020. Jde o hliníkovou T- spojku, která slouží pro upevnění tyče k horizontální ose otáčení. Stahování spojky je dosaženo pomocí dvou šroubů M8 s vnitřním šestihranem. Průměr válcových otvorů pro uchycení tyčí o průměru 20 mm je 20,1 mm.



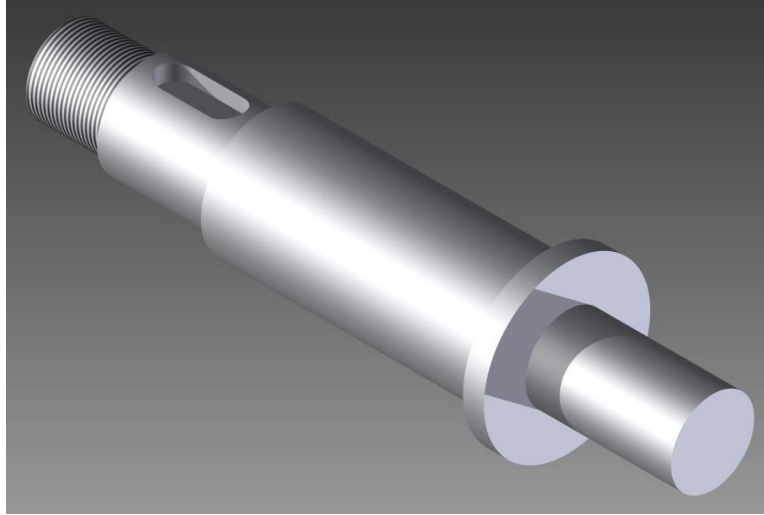
Obrázek 40: Součást T-spojka

Součást - Hřídel

Jedná se o hliníkový soustružený hřídel. Nákrůžek slouží zprava k dosednutí trubkové T-spojky a zleva k opření o stojinu, aby se předešlo možnému posunu při dotažení. V levé části se nachází metrický závit s jemným stoupáním M20x1 pro dotažení maticí, a tím zajištění úhlové horizontální



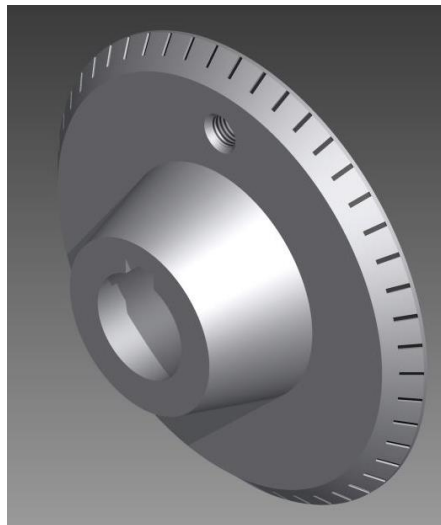
polohy. Na osazení s vyfrézovanou drážkou pro pero je nasazen kroužek se stupnicí pro řízení úhlového natočení horizontální osy.



Obrázek 41: Součást Hřídel

Součást – Kroužek noni horizontální

Jedná se o hliníkový soustružený díl. Slouží k řízení úhlového natočení horizontální osy. Po obvodu je opatřen stupnicí s krokem $7,5^\circ$. Celý se nasadí na hřídel a je s ním spojen těsným perem. Dále se na čelním mezikruží nachází otvor s metrickým závitem M8x1, který je určen pro přišroubování aretačního čepu.

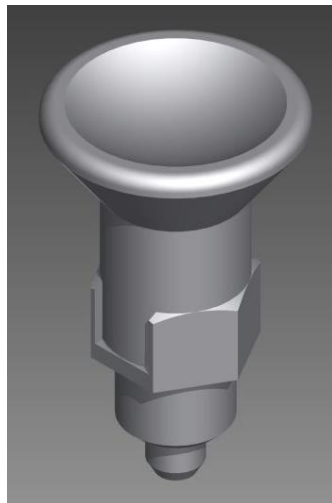


Obrázek 42: Součást noni horizontální



Součást – Aretační čep

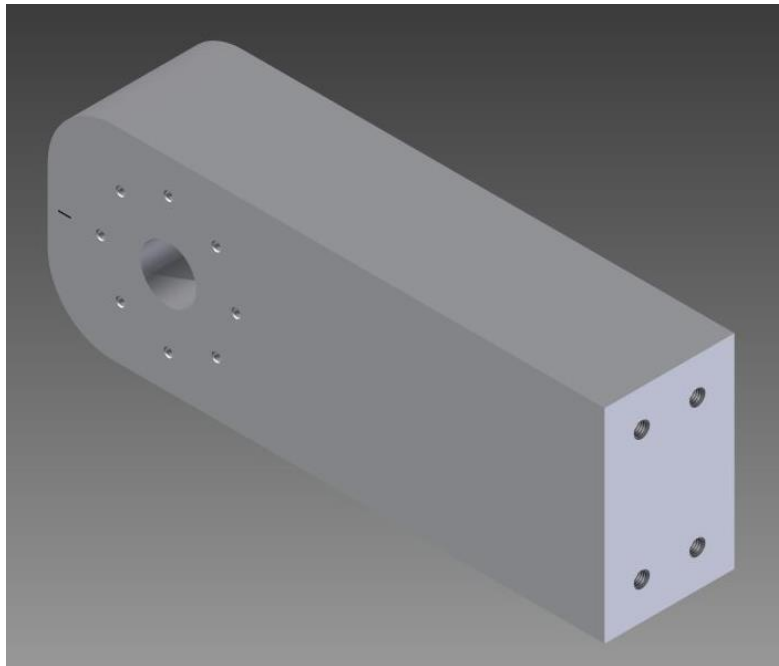
Zde se opět jedná o kupovaný díl od firmy Kipp s označením K0631.17004. Díl je vyrobený z oceli. Jeho připevňování je zajištěno pomocí metrického jemného závitu M8x1. Průměr čepu, který zapadá do otvorů v protikuse, je 4 mm. Dotažení celého čepu ke kusu je pomocí klíče s otvorem o velikosti 10 mm. Tento díl se na artefktu vyskytuje dvakrát a slouží pro rychlé úhlové zapolohování horizontální a vertikální osy otáčení. Pokud budeme některou z os používat v jiné úhlové poloze než předem dané (po 45°), má čep možnost ho povytáhnout a pootočením ho zajistíme v horní poloze. Pokud čep zajistíme v horní poloze, můžeme volit libovolné úhlové natočení osy.



Obrázek 43: Součást Aretační čep

Součást - Stojina

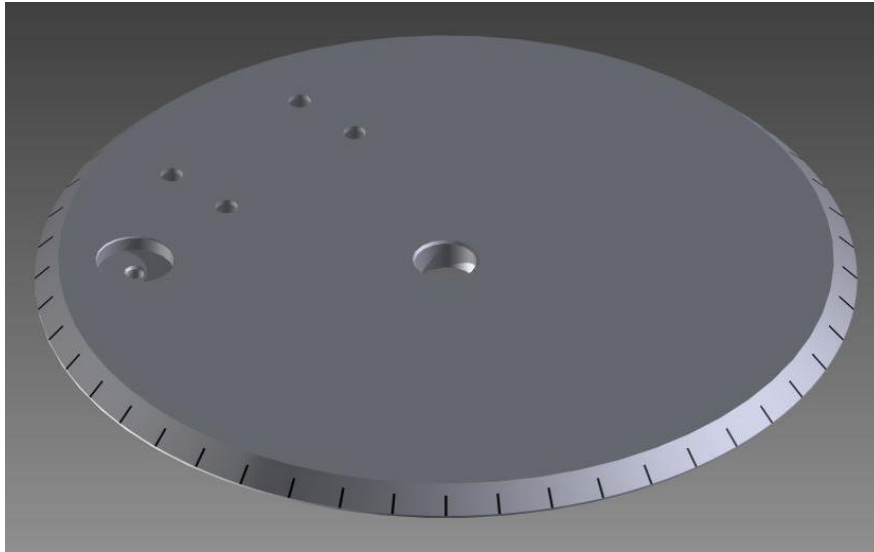
Jedná se hliníkový hranol se zaoblením v horní části. Do válcové díry se vsadí hřídel držící Invarovou tyč s koulemi. Na soustředné roztečné kružnici s tímto otvorem je vyvrtáno 8 otvorů (po 45°) o průměru 4 mm pro zapadnutí aretačního čepu, čímž dojde k úhlovému zapolohování horizontální osy. Dále je součást opatřena také rýskou pro případ, že uživatel bude chtít použít artefakt pro měření v jiných než předem daných polohách. Celá stojina je spojena se součástí „Kroužek noni vertikální“ pomocí šroubů s vnitřním šestihranem s metrickým závitem M8, které se zašroubují do děr ve spodní části stojiny.



Obrázek 44: Součást Stojina

Součást - Kroužek noni vertikální

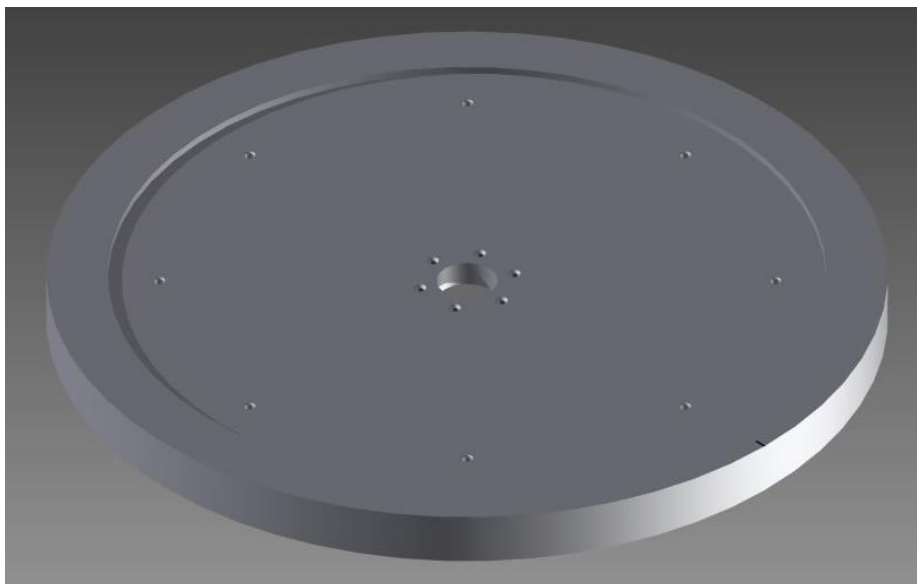
Zde se jedná o podobnou součást jako „Kroužek noni horizontální“. Uprostřed je válcový otvor o průměru 24 mm, kterým prochází součást podstavy a pomocí matice dochází k utažení a zafixování v daném natočení. Dále je opatřen zahloubením a otvorem s metrickým závitem, pro přišroubování aretačního čepu, který urychluje polohování. Dále se zde nacházejí čtyři díry se zahlobením pro hlavy šroubů s vnitřním šestihranem, které slouží pro přišroubování součásti „Stojina“. Po obvodu je opět součást opatřena ryskami s úhlovým krokem $7,5^\circ$ pro případ, kdy uživatel bude chtít použít artefakt pro měření v jiných než předem daných polohách.



Obrázek 45: Součást Kroužek noni vertikální

Součást - Podstava

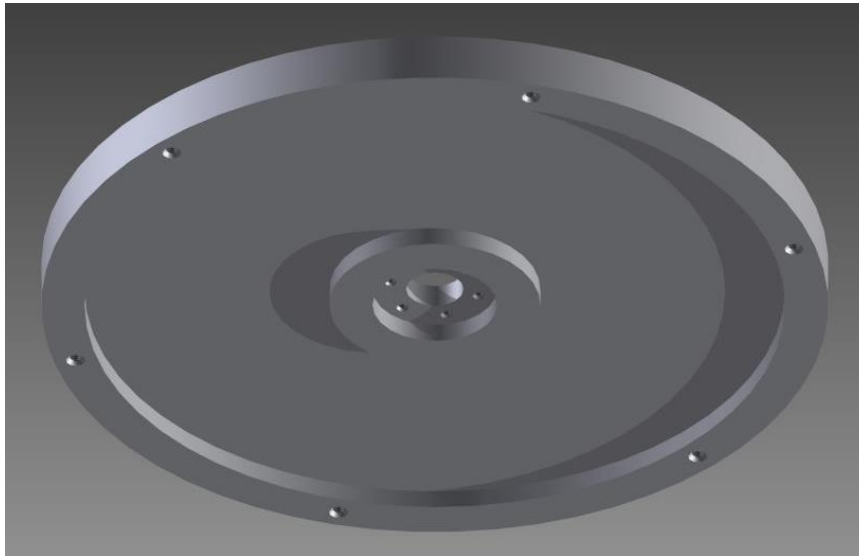
Jedná se o kruhovou součást o největším průměru 328 mm. Z vrchní části na ni dosedne součást „Kroužek noni vertikální“. V horní části se nachází 8 otvorů po 45 ° pro zapadnutí aretačního čepu, a tím úhlového zaplohotování vertikální osy. Také se zde nachází rýska pro polohování do jiných než předem daných poloh.



Obrázek 46: Součást Podstava - horní pohled



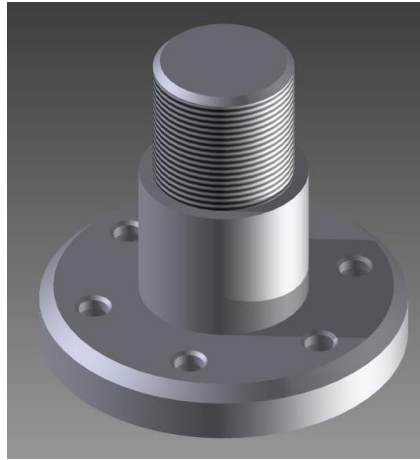
V dolní části je vytvořeno zhloubení s 6 otvory s metrickým závitem M4, pomocí kterých se přišroubuje spoučást „Příruba podstavy“. Stejně tak je po obvodu 6 otvorů s metrickým závitem M6, které složí pro přišroubování celého artefaktu k základní desce. Pro snížení hmotnosti je odsoustruženo mezikruží na spodní straně součásti.



Obrázek 47: Součást Podstava - dolní pohled

Součást – Příruba podstavy

Jedná se o hliníkový soustružený kus. Dolní přírubová část slouží k připevnění k součásti „Podstava“. To je docíleno pomocí 6 šroubů M4 s vnitřním šestihranem, pro které je v této součásti vytvořeno zhloubení pro hlavu šroubu. Na válcovou část se nasadí součást „Kroužek noni vertikální“, která se následně pomocí matice zafixuje v dané úhlové poloze. Pro fixaci je zde vysoustružen metrický závit s jemným stoupáním M20x1, aby bylo dosaženo dostatečně tuhého upnutí.

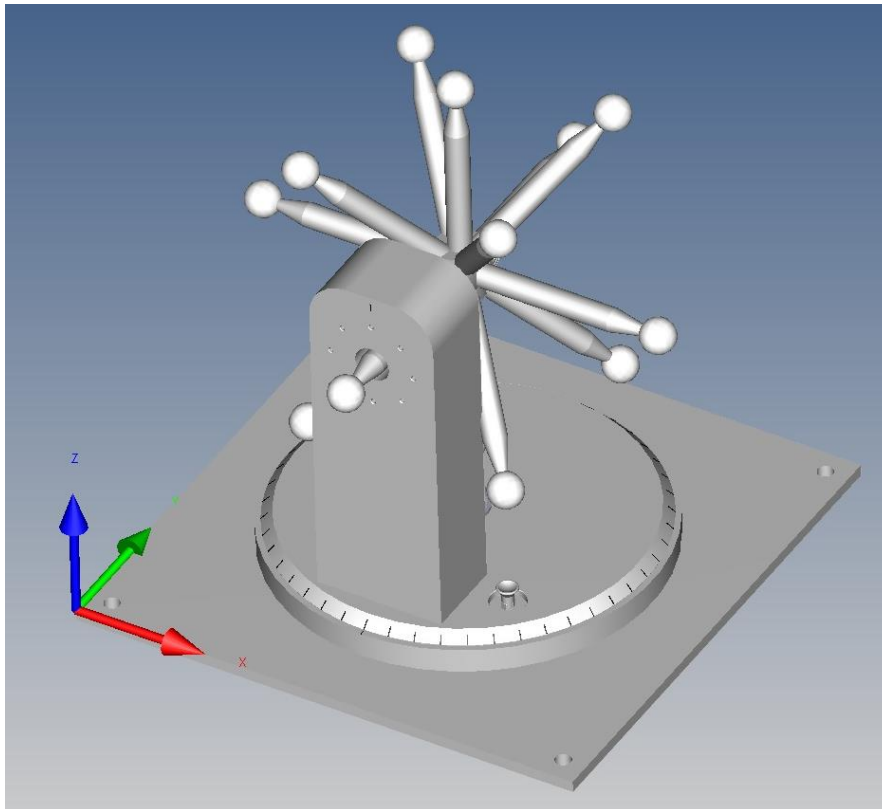


Obrázek 48: Součást Příklad podstav



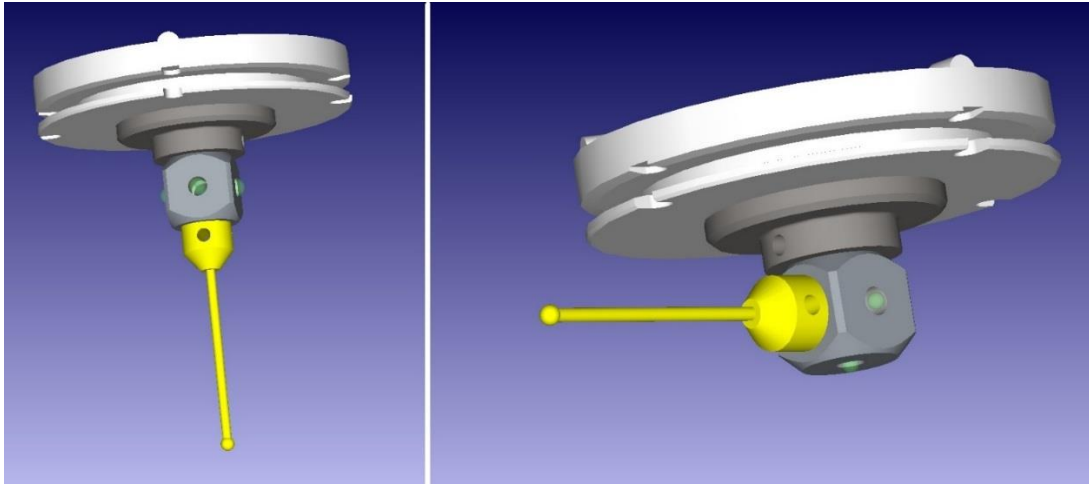
4. Tvorba metodiky kontroly s využitím navrženého artefaktu

Návrh metodiky kontroly s využitím navrženého artefaktu spočívá ve změření obou koulí a vyhodnocení vzdálenosti jejich středů, kdy jmenovitý rozměr je 350 mm. Měření bude probíhat v 7 polohách. Tři polohy jsou ve směru jednotlivých os X, Y a Z souřadnicového měřicího stroje. Další čtyři polohy jsou diagonálami v prostoru CMM. Vytvořený postup je dělán v softwaru CALYPSO, který je určen pro ovládání souřadnicových měřicích strojů firmy Zeiss. V postupu je použita snímací hlava typu VAST, ovšem není to nutné, pokud by byl následně program upraven pro jiný snímací systém či CMM, který touto hlavou není vybaven. Pro názornost jsou v některých následujících obrázcích zneviditelněny některé části artefaktu.



Obrázek 49: Navržených sedm poloh měření

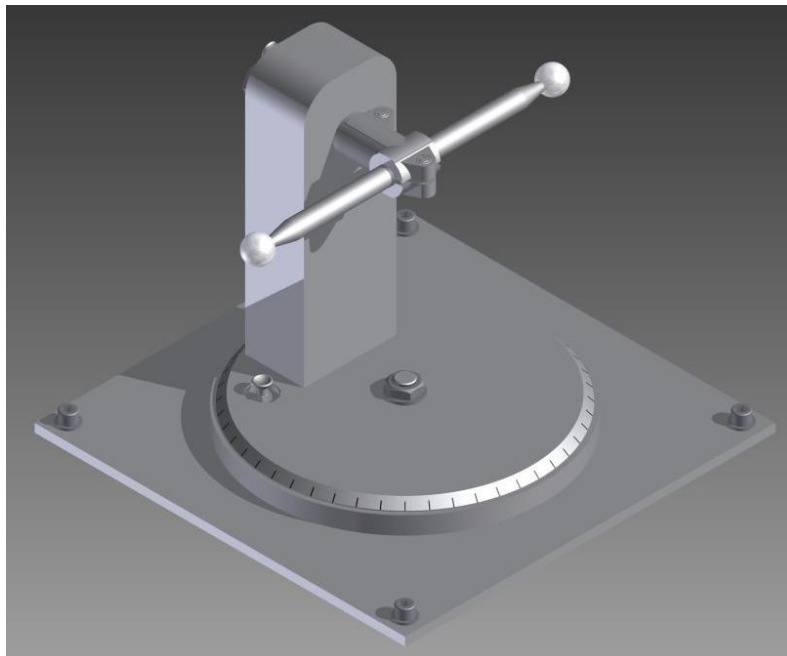
Pro měření je využíváno dvou výměnných snímacích systémů. První směřuje ve směru $-Z$ a druhý ve směru $-Y$. V obou směrech je použitý snímací dotek o délce 50 mm s rubínovou kuličkou o průměru 3 mm. Jako materiál dílku snímacího doteku je zvolen materiál ThermoFit.



Obrázek 50: Použité snímání doteky - vlevo směr -Z, vpravo směr -Y

Jako mezikus mezi talířkem snímání hlavy a jednotlivými doteky je použita titanová kostka Cube o hraně 15 mm a závity M5 pro uchycení doteků.

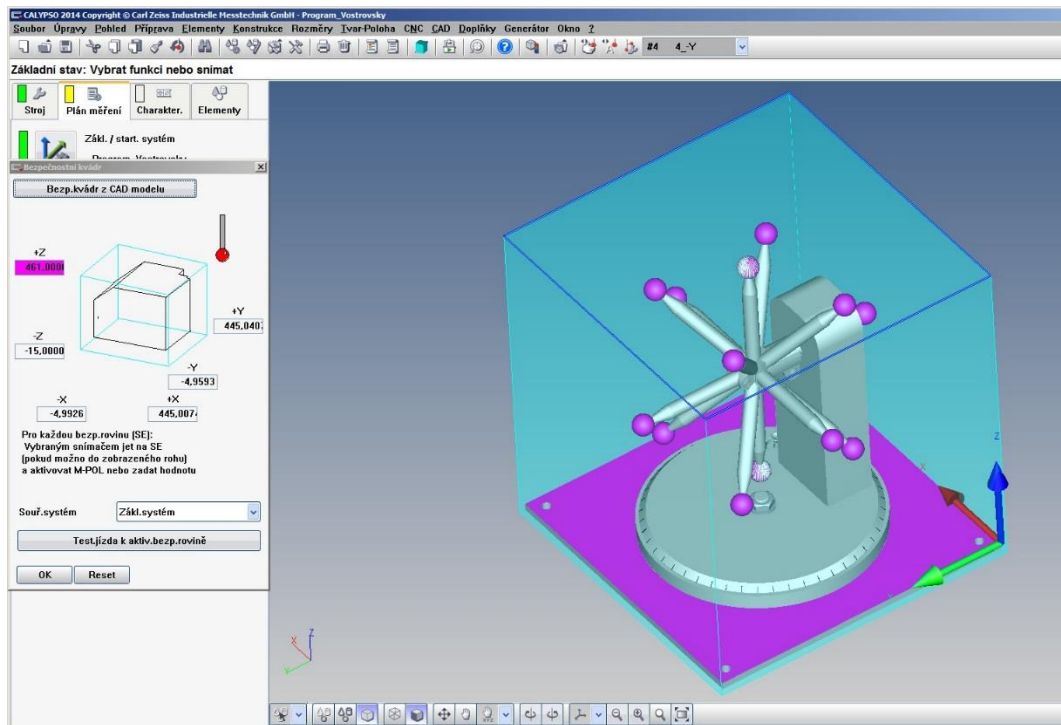
Obsluha stroje nejprve umístí celý artefakt na základní desku CMM a pomocí šroubů s vnitřním šestihranem M12 přišroubuje a dostatečně utáhne. Poté natočí artefakt do první měřené polohy – ve směru osy X a tuto polohu zajistí pomocí utažení matice klíčem velikosti 32.



Obrázek 51: První poloha měření ve směru osy X CMM

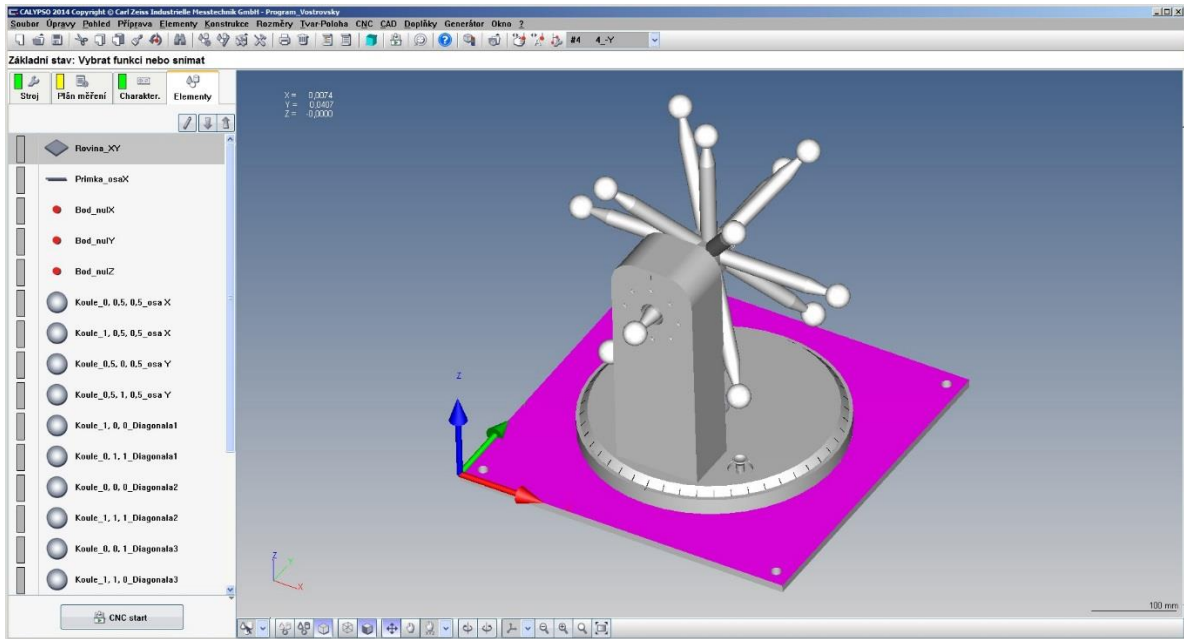


Dále je určen bezpečnostní kvádr s přesahem 5 mm vytvořený z CAD modelu artefaktu. Ten slouží k vymezení prostoru, kde se stroj nesmí pohybovat při přejezdech mezi jednotlivými měřenými elementy. Tím je zamezeno tomu, aby stroj naboural do nějaké části artefaktu a nedošlo tak k prasknutí rubínové kuličky doteku, zlomení snímacího doteku či k poškození snímací hlavy.

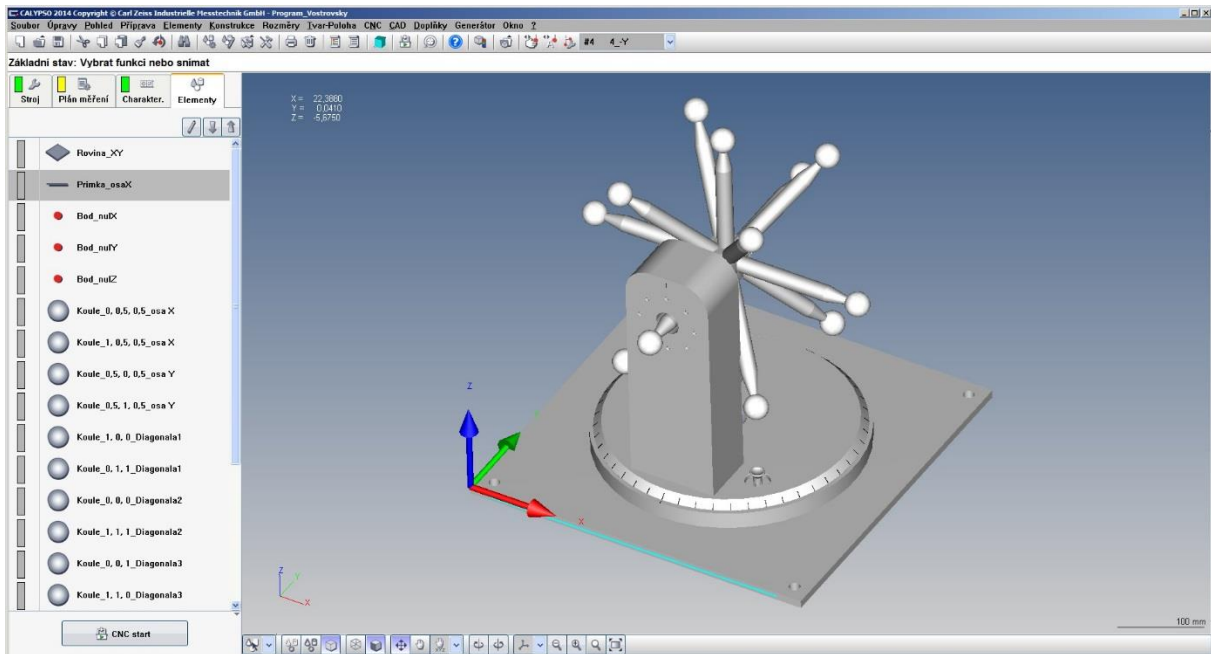


Obrázek 52: Bezpečnostní kvádr

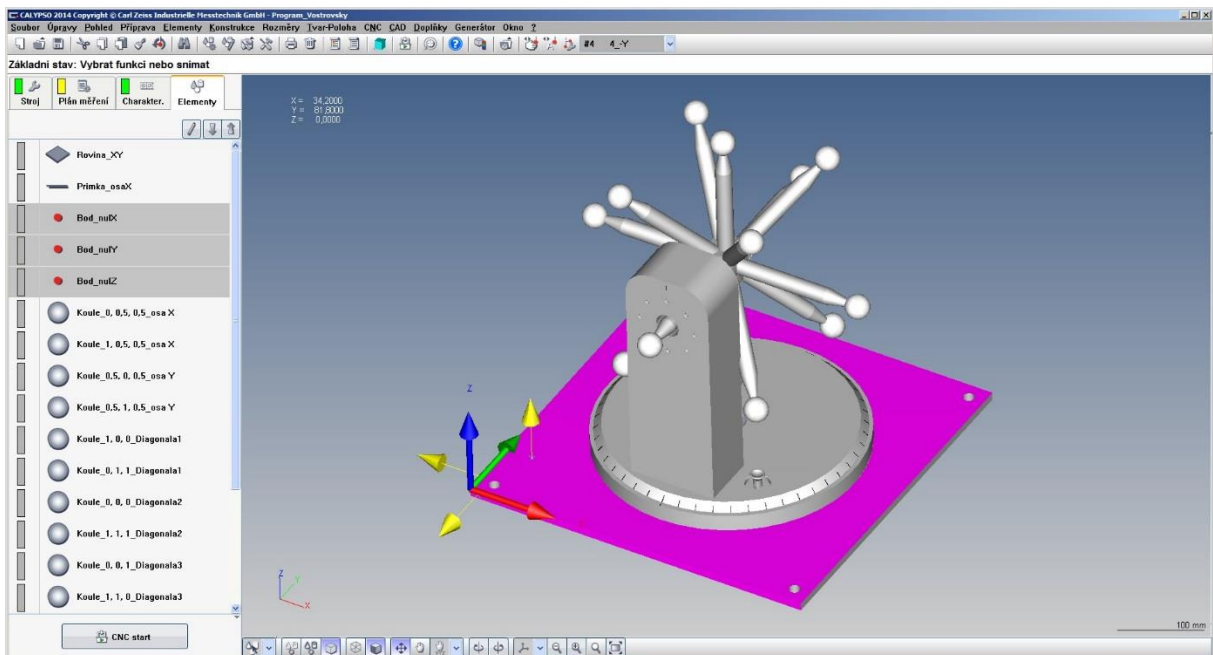
Měření začíná základním vyrováním. Uživatel nejprve ručně změří rovinu XY pomocí osmi diskretních bodů, která je dána rovinou základní desky artefaktu. Dále se změří přímka určující osu X, a poté tři nulové body pro počátky jednotlivých os.



Obrázek 53: Vyrovnání - rovina XY

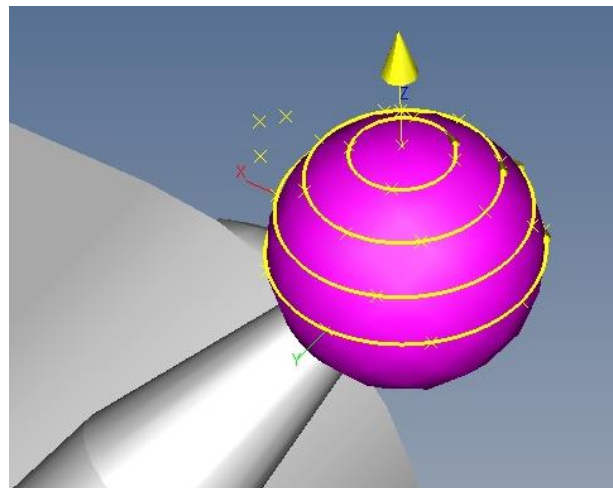


Obrázek 54: Vyrovnání - osa X



Obrázek 55: Vyrovnání - nulové body pro směry X, Y a Z

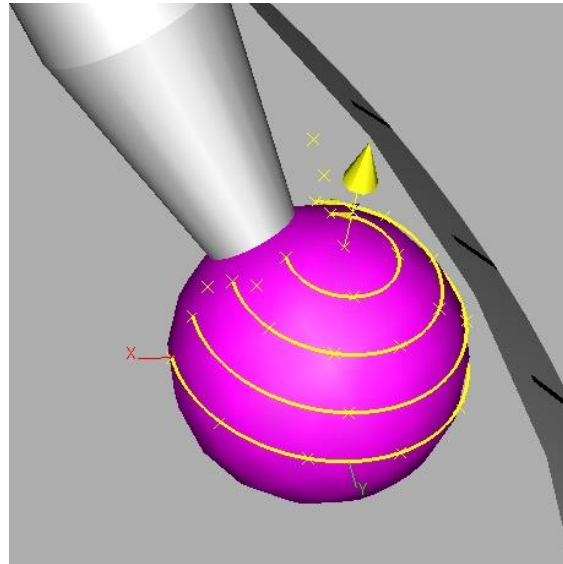
Po vyrovnání už začíná samotné měření koulí. Měření probíhá pomocí snímání diskretních bodů. Na kouli je vždy rozmístěno 25 bodů, které jsou použity pro výpočet středu dané koule. Rozmístění bodů je navrženo dle normy ISO 10360-5 (viz str. 27-28).



Obrázek 56: Rozmístění bodu na kouli dle ISO 10360-5



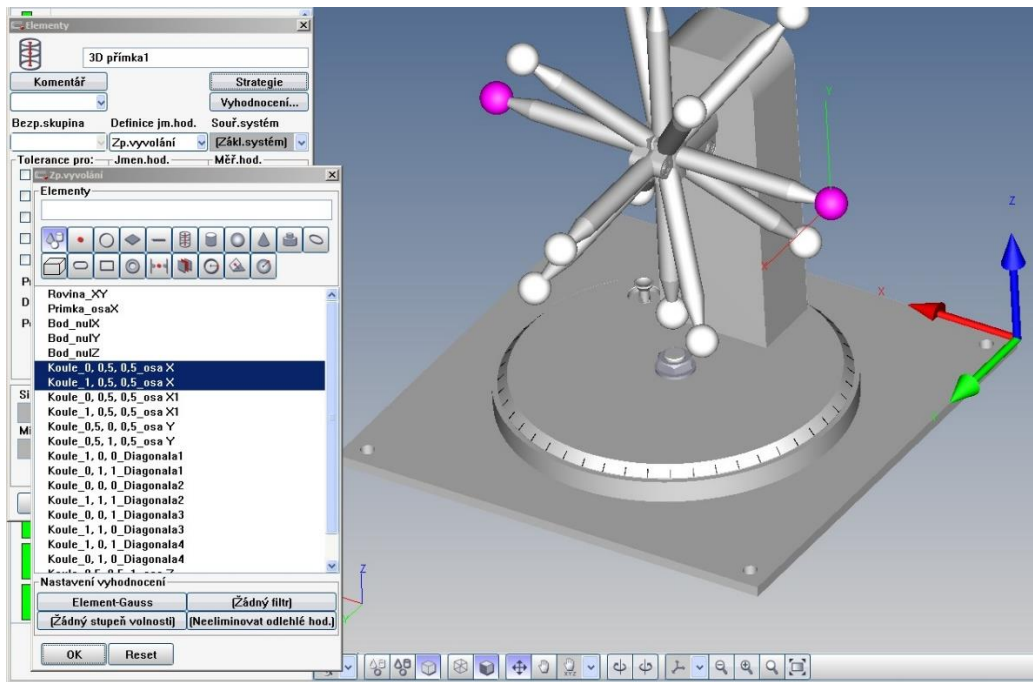
V některých polohách je ovšem nutné toto rozmístění upravit tak, že je snížen úhlový rozsah měřených kružnic na kouli z důvodu přítomnosti tyče, na které jsou koule připevněny.



Obrázek 57: Rozmístění bodů se sníženým úhlovým rozsahem kružnic

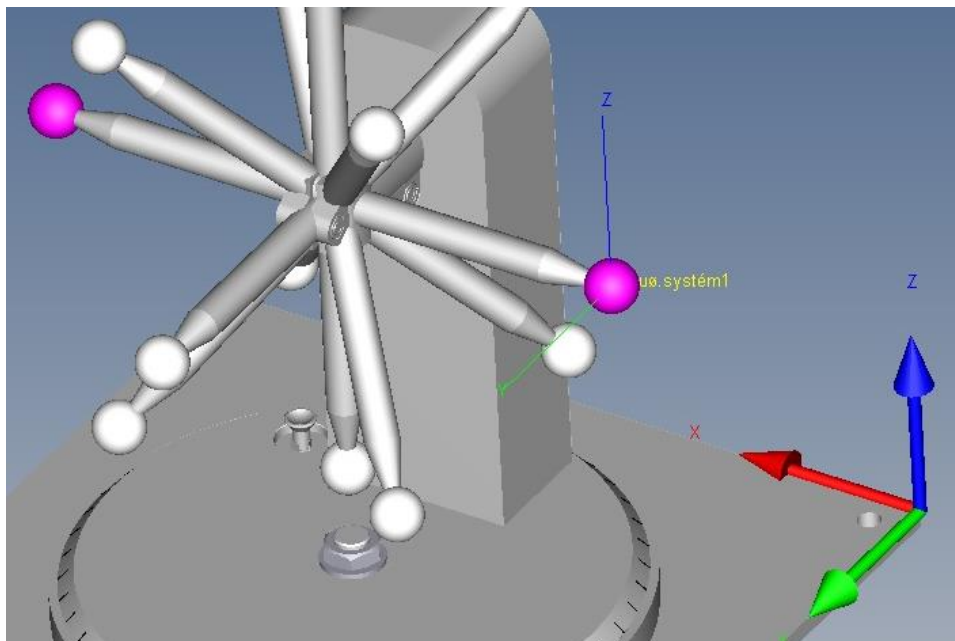
Pro měření je použita strategie měření po kruhové dráze a doplněno o snímání jednotlivého bodu, který se nachází na pólu koule určeného směrem dotyku. Při přejezdech mezi jednotlivými snímanými řezy je použita mezipoloha.

Z důvodu eliminace chyby způsobené polohováním tyče artefaktu je provedeno nejprve změření dvou koulí, které slouží k určení pomocného souřadného systému. Z těchto dvou koulí je pomocí konstrukce vytvořena přímka, která určuje směr osy pomocného souřadného systému.



Obrázek 58: Přímka určena dvěma změřenými koulemi

Střed jedné z těchto koulí určuje počátek nového pomocného souřadného systému.

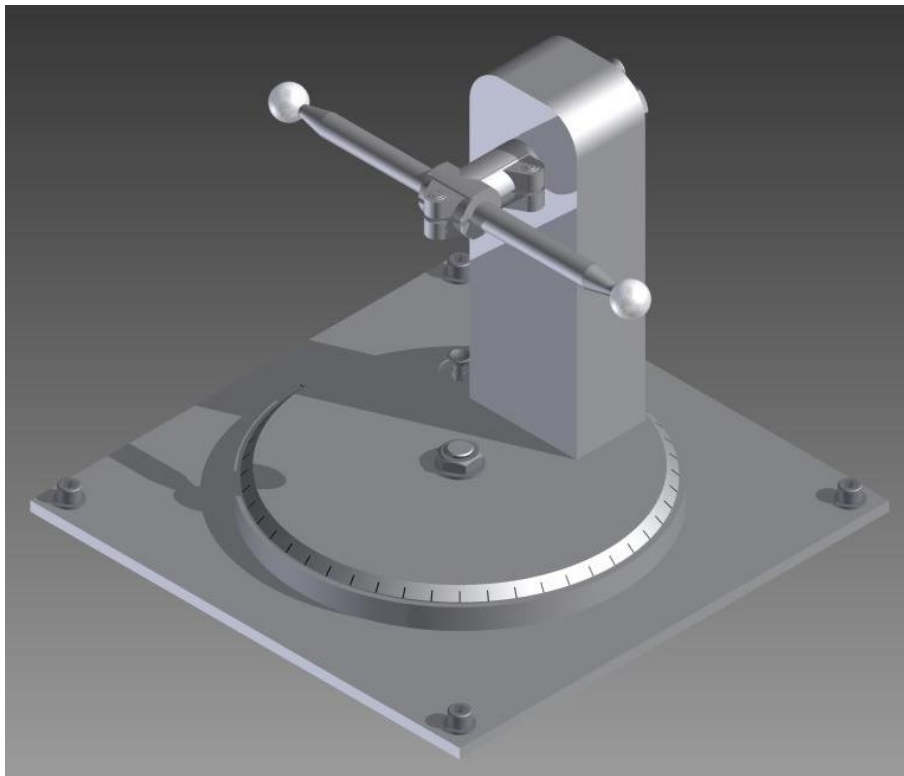


Obrázek 59: Nově vytvořený pomocný souřadný systém



Po určení nového pomocného souřadného systému probíhá měření dvou výše zmíněných koulí znovu, ovšem už v novém pomocném souřadném systému. Tímto jsme eliminovali chybu polohování artefaktu a polohy měřených bodů budou odpovídat těm teoretickým. Takto je postupně vytvořeno sedm pomocných souřadných systémů – jeden pro každou ze sedmi poloh natočení artefaktu.

Následně je do programu umístěn programovatelný stop. Ten slouží k tomu, aby obsluha CMM povolila utahovací matice a umístila tyč do následující polohy, kterou zajistí opětovným utažením těchto matic. Další měřená poloha je dána směrem osy Y souřadnicového měřicího stroje.



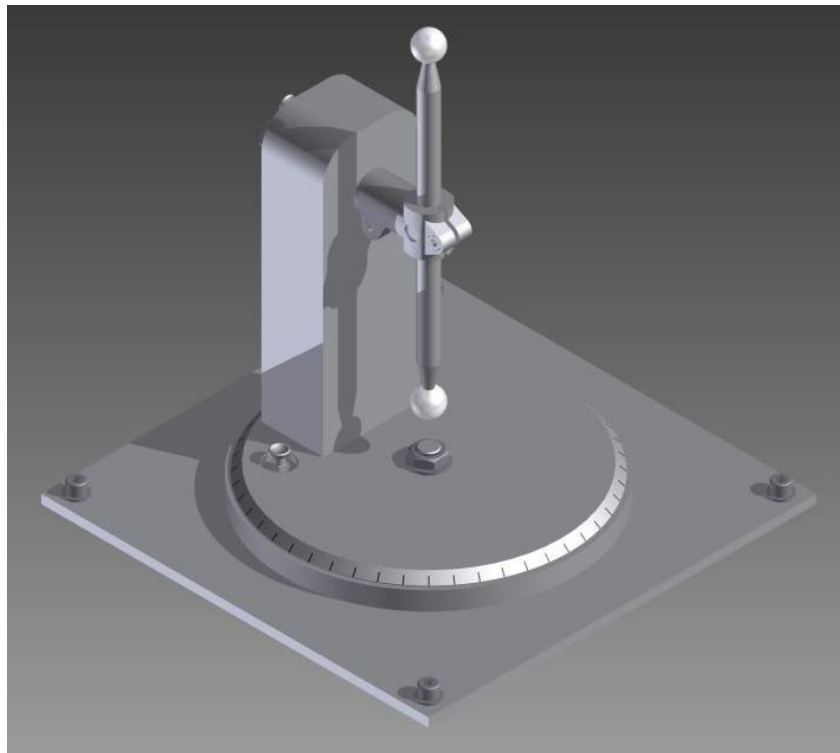
Poté obsluha stroje potvrdí programovatelný stop, a tím začne další měření v nově nastavené poloze. Měření probíhá stejným postupem jako v první poloze. Takto se postupně změří všech sedm navržených poloh.



Pro popis směrů a elementů je využita jejich poloha v prostoru CMM v podobě (X, Y, Z). Měření probíhá v následujícím sledu poloh:

- 1. poloha: Osa X – směr (0, 0,5, 0,5) -> (1, 0,5, 0,5)
- 2. poloha: Osa Y – směr (0,5, 0, 0,5) -> (0,5, 1, 0,5)
- 3. poloha: Diagonála 1 – směr (1, 0, 0) -> (0, 1, 1)
- 4. poloha: Diagonála 2 – směr (0, 0, 0) -> (1, 1, 1)
- 5. poloha: Diagonála 3 – směr (0, 0, 1) -> (1, 1, 0)
- 6. poloha: Diagonála 4 – směr (1, 0, 1) -> (0, 1, 0)
- 7. poloha: Osa Z – směr (0,5, 0,5, 1) -> (0,5, 0,5, 0)

Měření osy Z je záměrně umístěno na závěr, poněvadž pro tuto polohu je nutno vyměnit snímač s dotekem ve směru $-Z$ na snímač s dotekem ve směru $-Y$.



Obrázek 60: Poloha ve směru osy Z



Pro vyhodnocení vzdálenosti středů jednotlivých párů koulí je použito prostorové 3D přímky. Výsledky celého měření jsou zpracovány do protokolu, kde máme údaje o naměřených hodnotách a jejich odchylkách od jmenovité hodnoty 350 mm.

ZEISS Calypso		ZEISS		
	Datum 6 September 2017			
Plán měření Program_Vostrovsky		Zakázka		
Operátor Petr Mikes	Stroj Prismo	Č.dílu inkrementálně 4		
Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Celkový výsledek			
	Všechny charakteristiky: 7			
	...v toleranci: 7			
	...Mimo toleranci: 0			
	...Nad výstražnou mezi: 0			
	...Nevypočteno: 0			
	Souř.systémů celkem: 2			
	...Nevypočteno: 0			
	Text.elementů celkem: 0			
	Osa X_0, 0,5, 0,5 - 1, 0,5, 0,5			
	350.0003	350.0000		0.0003
	Osa Y_0,5, 0, 0,5 - 0,5, 1, 0,5			
	350.0002	350.0000		0.0002
	Osa Z_0,5, 0,5, 1 - 0,5, 0,5, 0			
	350.0001	350.0000		0.0001
	Diagonala1_1, 0, 0 - 0, 1, 1			
	349.9995	350.0000		-0.0005
	Diagonala2_0, 0, 0_1, 1, 1			
	349.9998	350.0000		-0.0002
	Diagonala3_0, 0, 1 - 1, 1, 0			
	350.0002	350.0000		0.0002
	Diagonala4_1, 0, 1 - 0, 1, 0			
	349.9991	350.0000		-0.0009

Obrázek 61: Protokol měření

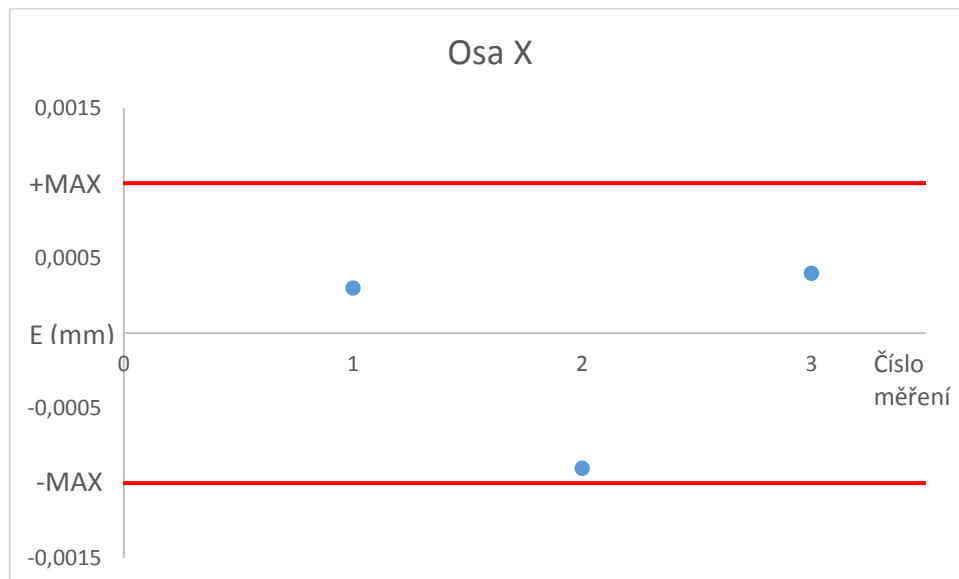


Celé měření ve všech polohách se celkově opakuje třikrát. To je prováděno proto, že se následně výsledky ze všech třech sérií měření pro každou polohu zprůměrují. Níže jsou v tabulce vidět zpracované výsledky naměřených hodnot.

Tabulka 5: Zpracované výsledky měření

Číslo měření	Osa X	Osa Y	Osa Z	Diagonála 1	Diagonála 2	Diagonála 3	Diagonála 4
1	350,0003	350,0002	350,0001	349,9995	349,9996	350,0002	349,9991
2	349,9991	350,0001	349,9996	350,0003	349,9995	349,9998	350,0009
3	350,0004	350,0007	350,0008	349,9998	350,0003	350,0002	349,9995
Průměrná hodnota	349,9999	350,0003	350,0002	349,9999	349,9998	350,0001	349,9998
Jmenovitá hodnota	350,0000	350,0000	350,0000	350,0000	350,0000	350,0000	350,0000
Max. odchylka	-0,0009	0,0007	0,0008	-0,0005	-0,0005	0,0002	0,0009
Směrodatná odchylka	0,0006	0,0003	0,0005	0,0003	0,0004	0,0002	0,0008

Dále je z těchto hodnot zpracovaný graf (pro názornost pouze pro jeden směr měření) zobrazující chyby indikace a jejich maximální horní a dolní hranici, zvolenou uživatelem.



Obrázek 62: Graf výsledných chyb indikací pro směr osy x



Celé měření je zde prováděno pouze v režimu simulace a i výše uvedené číselné hodnoty jsou vygenerovány náhodně a to z důvodu, že nedošlo k fyzické výrobě artefaktu a bylo možno použít pouze CAD model pro celou tvorbu programu a měření.

Pokud by došlo k výrobě artefaktu, bylo by vhodné a zajímavé rozšířit celý program, kdy by měření probíhalo pomocí skenování. Výsledky z měření pomocí snímání diskrétních bodů a pomocí skenování poté mezi sebou porovnat. Též by se pomocí artefaktu dalo zjišťovat, jaká je opakovatelnost měření na daném souřadnicovém měřicím stroji. V tom případě by bylo ovšem potřeba celé měření opakovat značně vícekrát.



5. Závěr

V první části jsou shrnuty postupy a přístupy k ověřování přesnosti souřadnicových měřicích strojů dle normy ISO 10360. Provedl se rozbor částí 2, 3, 4 a 5. Tato norma není zavazující, ovšem z hlediska sjednocení a standardizace je doporučena. Jedná se především o to, aby výsledky zkoušek byly hodnověrné a srovnatelné mezi různými uživateli a výrobcí CMM.

V další části, která je zpracována formou rešerše, jsou shrnuty dostupné artefakty pro ověřování přesnosti CMM na trhu. Jedná se o artefakty 1D – koncové měrky, stupňové měrky a ball bar, 2D – ball plate, hole plate a 3D artefakty jako je ball cube, ball tetrahedron a další artefakty kombinující předešlé 1D a 2D artefakty. Dále se jedná o použití laserového interferometru, jakožto zařízení s velmi vysokou přesností. Dále jsou uvedeny ostatní artefakty a přípravy využívané pro micro souřadnicové měřicí stroje.

Návrh vlastního artefaktu byl popsán v další kapitole. Jedná se o hliníkový přípravek založený na konceptu ball baru. Hlavní část – spojovací tyč mezi kalibrovanými koulemi je vyrobena z materiálu Invar, který se vyznačuje velmi nízkým koeficientem délkové roztažnosti. Celý artefakt je možno otáčet kolem dvou, navzájem kolmých os. Ty mají společný bod otáčení a je možno je rychle přenastavit do předem daných úhlových poloh po 45° v každé ose pomocí aretačních čepů.

Co se týče návrhu metodiky měření pomocí navrženého artefaktu, jedná se o měření vzájemné vzdálenosti středů dvou koulí. Toto měření probíhá v 7 polohách – 3 polohy jsou dány osami celého CMM a zbylé čtyři jsou diagonálami měřicího prostoru CMM. Program je vytvořen v softwaru CALYPSO, který je používán k ovládní strojů firmy Zeiss. Pro měření je použito snímání diskretních bodů a jejich rozmístění je inspirováno normou ISO 10360-5. V některých polohách není možné dodržet toto rozmístění z důvodu přítomnosti tyče, ke které jsou kalibrované koule připevněny a je tudíž snížen úhlový rozsah bodů na jednotlivých kružnicích. Po případné výrobě tohoto artefaktu by bylo zajímavé a užitečné upravit měřicí program pro případ, kdy by se nesnímaly diskretní body, ale měření by probíhalo v režimu skenování. Tyto dvě metody měření poté mezi sebou porovnat a zjistit odchylky přesnosti měření při použití měření diskretních bodů a měření pomocí skenování. Pokud by se měření opakovalo vícekrát, bylo by možné sledovat opakovatelnost měření daného souřadnicového měřicího stroje.



6. Bibliografie

[1] ISO 10360-10:2016(en). *ISO*. [Online] 2016. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10360:-10:ed-1:v1:en>.

[2] Müller, Marek. Vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření. *Diplomová práce*. [Online] ČVUT v Praze, 2015. <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63650/F2-DP-2015-Muller-Marek-Vliv%20produktivity%20kontroly%20na%20CMM%20na%20zpusobilost%20procesu%20mereni.pdf?sequence=-1>.

[3] ISO 10360-2. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. Praha : ÚNMZ, 2010.

[4] ISO 10360-3. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou*. Praha : ÚNMZ, 2001.

[5] ISO 10360-4. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 4: Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu skenováním*. Praha : ÚNMZ, 2001.

[6] ISO 10360-5. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 5: Souřadnicové měřicí stroje používající snámací systém s jednotlivým a složeným snímacím dotekem*. Praha : ÚNMZ, 2011.

[7] Koncové měřky. *UNIMETRA*. [Online] UNIMETRA spol. s r. o. http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/84_1.pdf.



- [8] KOBA-step Gage Bar Reference Master from Paul W. Marino Gages, Inc. *ManufacturingNews*. [Online] 2012. <http://www.mfgnewsweb.com/archives/4/36207/Quality-Control-Measurement-mar12/KOBA-step-Gage-Bar-Reference-Master-from-Paul-W.-Marino-Gages-Inc.aspx>.
- [9] All Ball Bar Information. [Online] Ball-Tech. http://www.precisionballs.com/all_ball_bar.php#Ball_Bar_magic.
- [10] KOBA Ball Bar. [Online] KOBA. <http://www.koba.de/en/products/artifacts-for-3-coordinate-measuring-machines/koba-ball-bar.html>.
- [11] QC20-W ballbar system. [Online] RENISHAW. <http://www.renishaw.com/en/qc20-w-ballbar-system--11075>.
- [12] Liebrich, Thomas, Bringmann, Bernhard a Knapp, W. Calibration of a 3D-ball plate. [Online] Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2010. <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/151964/eth-1292-01.pdf>.
- [13] E. S. Lee, M. Burdekin. A Hole-Plate Artifact Design for the Volumetric Error Calibration. [Online] *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001. <https://link.springer.com/article/10.1007/s001700170151>.
- [14] Contact Artifacts. [Online] UNIMETRIK Metrology and Calibration. <http://www.unimetrik.es/en/products/artifacts/contact-artifacts/>.
- [15] 3D artefacts. *Trapet Precision Engineering*. [Online] <http://trapet.de/en/3d%20artefacts.html>.
- [16] UNIMETRIK, S.A.: rapid verification of coordinate measuring machines. *Euskadinet*. [Online] http://www.basquecountry.eus/t32-6874/en/contenidos/noticia/lideres_u_z/en_unimetri/unimetrik.html.



[17] Artifacts and Software, CMM monitoring ensures the reliability of your measuring results.

[Online] Carl Zeiss.

https://us.probes.zeiss.com/out/mediaserver/files/cfile_d56646af33674c43c47563922b330aaf.pdf.

[18] EASICHECK CMM REFERENCE ARTEFACT. [Online] TORUS Group. <https://www.torus-group.com/easichck-cmm-reference-artefact-product.html>.

[19] Machine checking gauge (MCG) system user's guide. [Online] Renishaw, 2017.

file:///C:/Users/Kuba/Downloads/MCG_users_guide.pdf.

[20] O. Číp, Z. Buchta. Přesné měření délek pomocí. [Online] Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií , 14. 10 2011.

http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf.

[21]. PRINCIPLES OF OPERATION. [Online] Feanor OÜ.

http://www.feanor.com/laser_principles.pdf.

[22] Pikálek, Tomáš. Analýza a ověření metody měření indexu lomu vzduchu pro laserovou.

[Online] Vysoké učení technické v Brně, 2016. <https://www.tpikalek.cz/soubory/DP-text.pdf>.

[23] Přenosný laserový měřicí a kalibrační. [Online] RENISHAW, 2007.

file:///C:/Users/Kuba/Downloads/Laserov%C3%BD%20syst%C3%A9m%20XL-80.pdf.

[24] ZERODUR® Extremely Low Expansion Glass Ceramic. SCHOTT. [Online]

http://www.schott.com/advanced_optics/english/products/optical-materials/zerodur-extremely-low-expansion-glass-ceramic/zerodur/index.html#2.

[25] J. D. Claverley, R. K. Leach. A review of the existing performance verification infrastructure for micro-CMMs. [Online] EURAMET, 2013.

https://www.euramet.org/Media/docs/Repository/A169/IND59/2015_-_Prec_Eng_-_Claverley.pdf.



[26] The three Kruger plates: ball plate (left), cylinder plate (middle) and hole plate with ceramic inserts (right). Image courtesy of the NMISA, ZA. [Online] https://www.researchgate.net/figure/273847699_fig10_Fig-10-The-three-Kruger-plates-ball-plate-left-cylinder-plate-middle-and-hole.

[27] Two ball plate artefacts suitable for measurement on a contacting micro-CMM and various optical systems. Image courtesy of PTB, DE. . [Online] https://www.researchgate.net/figure/273847699_fig11_Fig-11-Two-ball-plate-artefacts-suitable-for-measurement-on-a-contacting-micro-CMM-and.

[28] A miniature tetrahedron suitable for precision measurements on a micro- CMM and for measurements on a micro-XCT system. The full height of the tetrahedron is approximately 1 mm. . [Online] https://www.researchgate.net/figure/273847699_fig18_Fig-18-A-miniature-tetrahedron-suitable-for-precision-measurements-on-a-micro-CMM-and.

[29] KOBA-check® Sphere Plate. [Online] Paul W. Marino Gages, Inc. <http://www.pmargage.com/kobacheck.shtml>.



6.1. Seznam obrázků

Obrázek 1: Diagram variability systému měření (2)	12
Obrázek 2: Odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly pro kloubový snímací systém (3)...	14
Obrázek 3: Největší dovolená chyba indikace CMM při měření rozměru E_{MPE} (3).....	16
Obrázek 4: Největší dovolená chyba indikace CMM při měření rozměru E_{MPE} (3).....	16
Obrázek 5: Největší dovolená chyba indikace CMM při měření rozměru E_{MPE} (3).....	16
Obrázek 6: Ukázka dvou ze čtyř možných poloh kalibrované zkušební délky a dvou ze čtyř možných orientací snímací hlavy (3)	18
Obrázek 7: Polohy zkušebních koulí na otočném stole pro přijímací a periodickou zkoušku (4).	22
Obrázek 8: Čtyři cílové skenovací roviny na zkušební kouli (5).....	24
Obrázek 9: Rozmístění bodů na zkušební kouli, 1 - pól koule (6).....	28
Obrázek 10: Složený snímací systém, 1 - pinola, 2 - sonda, l - délka pevného složeného doteku snímacího systému (6)	30
Obrázek 11: Kloubový snímací systém, 1 - pinola, 2 - držák kloubové sondy, 3 - prodloužení sondy, 4 - sonda, 5 - dotek, l_A - délka odsazení sondy (6).....	31
Obrázek 12: Měření koncové měřky v obou smyslech (PD - smysl snímání) (3).....	34
Obrázek 13: Měření stupňové měřky - a) oba smysly snímání, b) jeden smysl snímání (3).....	35
Obrázek 14: Stupňové měřky Koba-step (8).....	36
Obrázek 15: Ball bar (9)	36
Obrázek 16: Multi ball bar (10)	37
Obrázek 17: Produkt firmy Renishaw QC20M-W (7)	38
Obrázek 18: Náhled na model čtyř bodů na kouli při měření v obou smyslech (3)	39
Obrázek 19: Schématické znázornění 3D-ball plate artefaktu (3)	40
Obrázek 20: Ball plate a jeho souřadný systém (12)	40
Obrázek 21: a) hole plate z titanu, hmotnost = 12,5 kg, b) hole plate z keramiky, hmotnost = 12 kg (13)	41
Obrázek 22: Tetrahedron TETRA-CHECK firmy Innovalia Metrology (14)	42
Obrázek 23: Složený Tetrahedron v přepravním pouzdře (15)	42
Obrázek 24: Ball Cube CUBE-CHECK firmy Innovalia Metrology (14)	43
Obrázek 25: ZEISS CMM-Check (17).....	44
Obrázek 26: TORUS EasiCheck (18)	44



Obrázek 27: Produkt Renishaw MCG (19)	46
Obrázek 28: Schéma Michelsonova interferometru (21)	47
Obrázek 29: Laserový systém společnosti Renishaw (23)	48
Obrázek 30: METAS mini Ball Bar (25).....	49
Obrázek 31: A*STAR mini multi Ball Bar (25).....	49
Obrázek 32: ZEISS Mini Ball Plate (25)	50
Obrázek 33: METAS Ball Plate (25).....	50
Obrázek 34: Tři Krugerovy desky - Ball Plate (vlevo), Cylinder Plate (uprostřed) a Hole Plate (vpravo) (26)	51
Obrázek 35: Dvě PTB micro Ball Plates (27)	51
Obrázek 36: PTB micro-contour standard (28)	52
Obrázek 37: Navržený artefakt - přední pohled	53
Obrázek 38: Navržený artefakt - zadní pohled.....	54
Obrázek 39: Součást Tyč.....	55
Obrázek 40: Součást T-spojka	55
Obrázek 41: Součást Hřídél	56
Obrázek 42: Součást noni horizontální	56
Obrázek 43: Součást Aretační čep	57
Obrázek 44: Součást Stojina.....	58
Obrázek 45: Součást Kroužek noni vertikální	59
Obrázek 46: Součást Podstava - horní pohled	59
Obrázek 47: Součást Podstava - dolní pohled.....	60
Obrázek 48: Součást Příruba podstavy	61
Obrázek 49: Navržených sedm poloh měření.....	62
Obrázek 50: Použité snímací doteky - vlevo směr -Z, vpravo směr -Y	63
Obrázek 51: První poloha měření ve směru osy X CMM	63
Obrázek 52: Bezpečnostní kvádr	64
Obrázek 53: Vyrovnaní - rovina XY.....	65
Obrázek 54: Vyrovnaní - osa X	65
Obrázek 55: Vyrovnaní - nulové body pro směry X, Y a Z.....	66
Obrázek 56: Rozmístění bodu na kouli dle ISO 10360-5.....	66
Obrázek 57: Rozmístění bodů se sníženým úhlovým rozsahem kružnic.....	67



Obrázek 58: Přímka určena dvěma změřenými koulemi	68
Obrázek 59: Nově vytvořený pomocný souřadný systém.....	68
Obrázek 60: Poloha ve směru osy Z.....	70
Obrázek 61: Protokol měření	71
Obrázek 62: Graf výsledných chyb indikací pro směr osy x	72