



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

# Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Strategie extrahovaných bodů při měření na souřadnicových měřicích strojích

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Simeon Dragančev

**Studijní program:** B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Mikeš, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dragančev** Jméno: **Simeon** Osobní číslo: **476066**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Strategie extrahovaných bodů při měření na CMM**

Název bakalářské práce anglicky:

**Strategies of points extraction when measuring on CMM**

Pokyny pro vypracování:

1) Přehled snímacích systémů používaných na CMM. 2) Dostupné strategie snímání bodů pro jednotlivé elementy. 3) Vliv použitých strategií na výsledek měření na reálné součásti.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

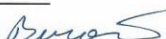
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Petr Mikeš, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne.....

.....

Simeon Dragančev

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Mikešovi, Ph.D., za odborné vedení práce a umožnění přístupu do laboratoře, kde jsem prováděl měření. Velké poděkování patří panu Ing. Vladimíru Šulcovi za pomoc při práci na souřadnicovém měřicím stroji.

## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřená na vliv strategií použitých při měření na souřadnicovém měřicím stroji. První část se věnuje popisu souřadnicových měřicích stojů, jejich rozdělení, přehledem používaných snímacích systémů a standardními elementy v softwaru Calypso. Dále jsou rozebírány strategie na jednotlivých elementech a jejich vliv na výsledek měření. Ve druhé části je popsán postup měření modelové úlohy a vyhodnocení jak grafických, tak číselných výsledků.

## **Klíčová slova**

CMM, souřadnicové měřicí stroje, snímací systémy, strategie měření, Calypso, kruhovitost

## **Annotation**

This bachelor thesis is focused on influence of strategies on coordinate measuring machine. Subject of the first part is description of coordinate measuring machine, overview of probe sensors and elements used in software Calypso. The next part describes effect of strategies on results of measurement. In second half of the thesis is described measurement of chosen part.

## **Key words**

CMM, coordinate measuring machines, probing systems, measurement strategies, Calypso, roundness

1. Úvod.....	10
2. Souřadnicové měřicí stroje.....	11
3. Snímací systém CMM .....	12
3.1 Dotykové snímací systémy .....	12
3.1.1 Pevné.....	12
3.1.2 Otočné.....	14
3.2 Bezdotykové snímací systémy.....	15
3.2.1 Kamerové snímací systémy .....	16
3.2.2 Triangulační senzory.....	17
3.2.3 Chromatický senzor bílého světla .....	20
4. Faktory ovlivňující přesnost měření.....	22
5. Přehled měřených elementů v Calypso.....	24
5.1 Element bod.....	24
5.2 Element kružnice .....	25
5.3 Element rovina.....	25
5.4 Element 2D přímka .....	26
5.5 Element 3D přímka .....	26
5.6 Element válec .....	27
5.7 Element kužel .....	27
5.8 Element koule .....	28
6. Strategie měření.....	29
6.1 Měřicí metoda .....	29
6.1.1 Strategie pro bod.....	30
6.1.2 Strategie pro kružnice .....	30
6.1.3 Strategie pro rovinu.....	31
6.1.4 Strategie pro válec .....	31
6.1.5 Strategie pro kužel .....	32
6.1.6 Strategie pro kouli .....	32
6.2 Metoda vyhodnocení .....	33
6.2.1 Gaussova vyhodnocovací metoda .....	34
6.2.2 Čebyšev (kritérium minima).....	34
6.2.3 Element L1 .....	34
6.2.4 Výpočet jako min. opsaný / max. vepsaný element.....	34
6.2.5 Výpočet jako tangenciální element (vnější/vnitřní) .....	35
6.3 Filtrace naměřených hodnot .....	35

6.3.1	Nízkopásmový filtr (dolní propust).....	36
6.3.2	Vysokopásmový filtr (horní propustnost) .....	36
6.3.3	Pásmová propust .....	36
6.4	Eliminace odlehlých hodnot .....	37
7.	Modelová úloha .....	38
7.1	Příprava měření .....	38
7.2	Plán měření .....	39
7.3	Rovinnost.....	40
7.4	Měření rovinnosti na součásti .....	40
7.5	Grafické výsledky z měření rovinností .....	43
7.6	Číselné výsledky z měření rovinnosti.....	45
7.7	Kruhovitost.....	46
7.8	Měření kruhovitosti na součásti .....	46
7.8.1	Měření kruhovitosti na vnitřním průměru .....	46
7.8.2	Grafické vyhodnocení kruhovitosti vnitřního průměru .....	49
7.8.3	Číselné výsledky z měření kruhovitosti vnitřního průměru .....	51
7.8.4	Měření kruhovitosti na vnějším průměru .....	52
7.8.5	Grafické vyhodnocení kruhovitosti na vnějším průměru .....	54
7.8.6	Číselné výsledky z měření kruhovitosti vnějšího rozměru .....	56
7.9	Vyhodnocení výsledků .....	57
8.	Závěr .....	59
	Použité informační zdroje: .....	60
	Seznam obrázků: .....	63
	Seznam tabulek .....	64

# 1. Úvod

Tato práce se zabývá problematikou přesnosti používaných strategií, které jsou využívány na souřadnicových měřicích strojích. Zajištění požadované kvality je klíčové nejen pro správnou funkčnost měřeného dílce, ale také pro výrobní podnik. Kvalita výrobku je měřena na souřadnicových strojích a tím je podnik schopen ověřit požadavky zákazníka na daný výrobek.

Při měření na souřadnicových měřicích strojích bylo zjištěno, že strategie bodového měření je nedostačující pro zhodnocení reálného tvaru součásti. Na základě této skutečnosti byla potřeba vytvořit strategie, které by umožnily přesné zachycení tvaru součásti, včetně všech nerovností. Tato strategie schopná plnit kladené požadavky se nazývá scanning. Z tohoto důvodu bych chtěl zjistit, jak velký vliv má zvolená strategie na výsledek měření.

Cílem této bakalářské práce je zhodnotit důležitost a vliv jednotlivých strategií. Abych poukázal na rozdílnost zvolených strategií, zvolil jsem součást typu příruba, na které budou proměřeny geometrické elementy pomocí různých strategií. Také použiji různé metody vyhodnocení, které by mohly silně ovlivnit výsledek měření. Hodnoty z měření budou použity pro porovnání použitých strategií a metod vyhodnocení. Očekávaným výsledkem měření je větší nepřesnost tvaru při použití strategie snímání jednotlivých bodů než při použití strategie scanningu.



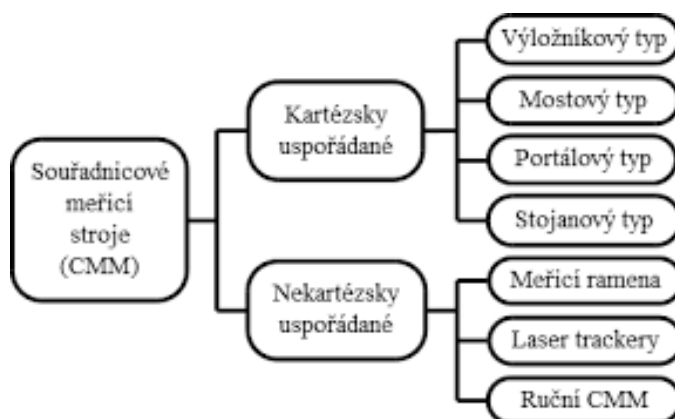
## 2. Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (SMS) jsou zařízení pro měření rozměrů, tvarů a polohy geometrických vlastností obrobků. Tyto stroje jsou určeny k přesnému a většinou automatizovanému měření strojních součástí. Hlavním důvodem, proč se souřadnicové měřicí stroje používají, je jejich přesnost. Na Obr.1 je zobrazen souřadnicový měřicí stroj firmy Zeiss, typ UPMC 850 Carat.



Obr. 1 Portálový souřadnicový měřicí stroj UPMC 850 Carat

Rozdělení souřadnicové měřicí techniky můžeme provést dle několika hledisek, například z pohledu, zda je CMM kartézsky, nebo nekartézsky uspořádáno. Dále je lze rozdělit dle konstrukčního uspořádání. Toto uspořádání je schematicky zobrazeno na Obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení souřadnicových měřicích strojů

## 3. Snímací systém SMS

Jednou z nejdůležitějších součástí všech SMS je snímací systém. Spadá sem použitá sensorika a jednotlivé snímače, pomocí kterých dochází ke snímání bodů. Snímací systém ovlivňuje přesnost a možnost automatizace měření. Tento snímací systém je spojen se zbytkem stroje pomocí pinoly. Snímací systémy lze rozdělit do dvou hlavních kategorií, a to na dotykové a bezdotykové, viz Obr. 3.



Obr. 3 Rozdělení snímacích systémů [1]

### 3.1 Dotykové snímací systémy

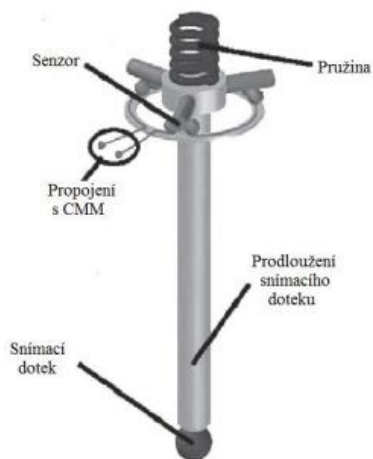
Jak z názvu vyplývá, je u těchto snímačů potřeba fyzického doteku mezi snímačem a měřenou součástí. Dotykové snímací systémy dosahují větší přesnosti než bezdotykové. Proto se druh měření, kde je potřeba vysoké přesnosti, provádí s dotykovými snímači.

#### 3.1.1 Pevné

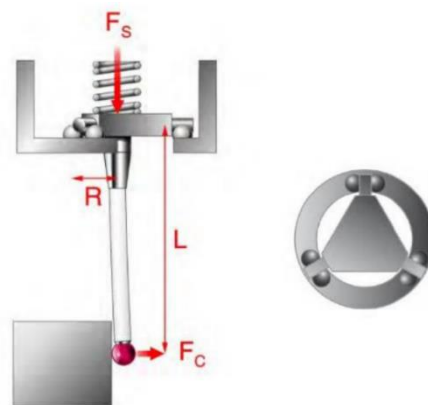
U pevných snímacích systémů je sensorová hlava připevněna k pinole. Pohyby lze provádět pouze strojem, nikoli snímačem. Výhodou je eliminace nepřesností vlivem mechanického pohybu, k němuž dochází například u otočných hlav.

## Spínací systémy

Spínací systém (Obr. 5) funguje tak, že v okamžiku, kdy dojde ke kontaktu snímacího dotyku a měřeného kusu, sonda vydá zvukový signál, následuje zastavení pohybu a dojde k odečtení aktuální polohy, tedy souřadnic z odměřovacího systému stroje. Jedná se o uzavřený elektrický obvod, kde při kontaktu snímače s měřeným dílcem dojde k rozepnutí kontaktů. Toto rozpojení je binárním signálem pro odečtení souřadnic. Binární systém, který je zde použit, rozpozná pouze dva stavy. Logickou hodnotu 1 nebo 0. To znamená, že je obvod sepnutý nebo rozepnutý. Po odjetí snímače z měřeného povrchu dojde opět k sepnutí kontaktů. V angličtině se tento systém značí **Touch and Trigger**. Pro sejmutí každého bodu musí snímač vždy přijet, dotknout se a odjet. [2]



Obr. 5 Schéma snímacího systému [2]



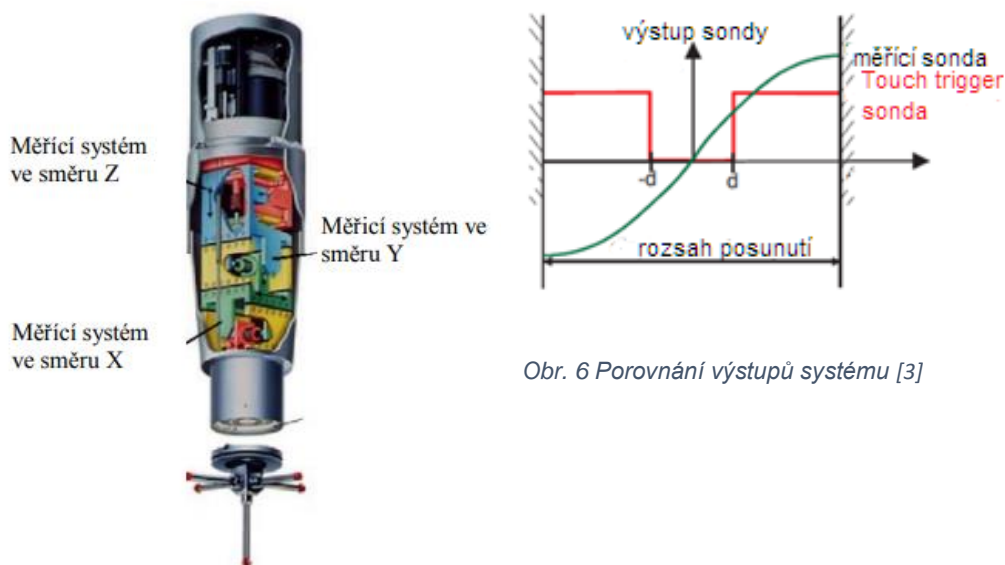
Obr. 4 Konstrukce snímacího systému [4]

Na obrázku číslo 4 a 5 můžeme vidět, že je systém tvořen třemi kontakty rozmístěnými po 120°, pružinou a dříkem. Výsledná síla  $F_c$  generuje moment na rameni  $L$  a tento ohybový moment se snaží potlačit síla  $F_s$  vyvolaná pružinou. Tato pružina tlačí na opěrný talířek a snaží se vrátit systém do původní polohy, v níž jsou kontakty sepnuté. [2]

## Skenovací systémy

Skenovací systémy nebo také snímací systémy jsou systémy, při kterých dochází ke kontinuálnímu snímání bodů při pohybu snímače po měřené součásti. Snímací systém je oproti spínacímu mnohonásobně rychlejší. Dokáže na jednom

segmentu spojitě zaznamenat až několik tisíc bodů. Avšak tento systém dokáže snímat i ve spínacím režimu. Systémy schopné spojitého snímání bodu jsou také často označovány jako měřicí (angl. Measuring Systems). Pro zajištění neustálého dotyku s měřeným dílem jsou zde použity tři sériově propojené paralelogramy. Každá osa má svůj paralelogram, jak můžeme vidět na Obr. 7. [3]



Obr. 6 Porovnání výstupů systému [3]

Obr. 7 Skenovací snímací systém Zeiss [2]

K odměření výchylky mechanismu paralelogramů slouží indukční systém. Paralelogramy jsou vybaveny cívkou a upnuty do neutrální pozice, kde jsou nastaveny nulové body tohoto indukčního systému. Když se snímač vychýlí, dojde ke změně hodnoty proudu v cívce. K vychýlení dojde při dotyku snímače s povrchem. Snímač je před elektrostatickými vlivy chráněn ocelovým pouzdrem. Tento druh systému je používán při měření přesných tvarových ploch, jako jsou například lopatky motorů. [4]

### 3.1.2 Otočné

V případě otočného snímacího systému je na pinolu upnutá otočná sensorová hlava. Tyto systémy mají dvě na sebe kolmé rotační osy, které provádějí polohování. Nejpoužívanější je varianta s motory, jež při polohování konají rotační pohyby. Tento typ senzoru je programovatelný a umí také pracovat v automatickém režimu. Existuje však i mechanická verze, kde musí operátor ručně nastavit polohu a pevně ji zafixovat. Nevýhodou je, že snímač má pouze

jeden měřicí dotek, to znamená, že máme pouze jeden průměr snímacího doteku a tím se musí provést celé měření. Avšak největší nevýhodou je chybovost a špatná opakovatelnost měření. To je způsobeno konstrukcí a motory, jež vnášejí do soustavy vůle, které se projeví na měření. Velkou výhodou je možnost polohování i do těžko přístupných míst a možnost natočit snímač kolmo ke snímané ploše. Příkladem otočné hlavy je VAST XXT na Obr. 8 od firmy Zeiss.

[2]



Obr. 8 Otočná hlava VAST XXT [5]

### 3.2 Bezdotykové snímací systémy

Bezdotykovými snímacími hlavami označujeme takové snímací hlavy, které nevyžadují dotek s měřeným dílcem. Tento typ systému nahrazuje tradiční kontaktní měření v případě, že je třeba měřit rychle, nebo tam, kde není možné použít dotykové měření a zároveň není nutné dosahovat vysoké přesnosti měření v jednotkách mikrometrů. Ke zvýšení efektivity měření nebo ke kalibraci obrazu se bezdotykové systémy kombinují s dotykovými. Takovéto systémy pak označujeme jako multi-senzorové. V minulosti zde byl také problém při měření reflexních, průhledných materiálů nebo také ostrých hran, kde nejsou jasně vidět přechody. Dnes už na takovýto problém nenarážíme díky sensorům bílého světla. Dále můžeme bezdotykové systémy rozdělit na:

- Kamerové senzory
  
- Triangulační senzory
  - Laser scanner
  
  - Pruhová projekce
  
  - Fotogrammetrie

- Chromatický senzor bílého světla

[6]

### 3.2.1 Kamerové snímací systémy

Tento druh bezdotykového snímacího systému je vhodný především pro měření dílů s dvourozměrnými geometrickými prvky a dílu z měkkých materiálů jako plast, plech nebo pryž. Důvodem, proč při měření měkkých materiálů používáme kamerové snímací systémy, je ten, že by dotyk snímací sondy se součástí mohla danou součástku poškodit. Častým doplňkem těchto systémů jsou mobilní stolky, které mají LED osvětlení, kde se dají provádět i měření málo kontrastních objektů. Typicky to jsou plechové výstřižky. Příkladem takového snímače je HP-C-VE Vision Sensor od společnosti Hexagon Metrology.



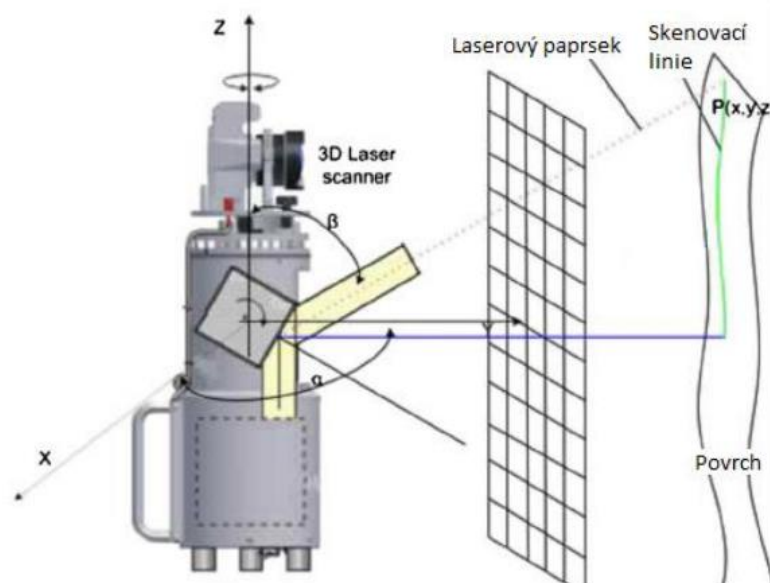
Obr. 9 HP-C-VE Vision Sensor [7]

## 3.2.2 Triangulační senzory

### Triangulace

Triangulace je založena na vytvoření imaginárního triangulačního trojúhelníku mezi jednotlivými triangulačními prvky a následném dopočítání potřebné souřadnice. Triangulační metody se dělí na aktivní a pasivní. Při aktivní triangulaci dochází k nasvícení povrchu světelným zdrojem, zatímco CDD snímač snímá. Poté zdroj světla spolu se snímačem a osvětleným bodem vytvoří triangulační trojúhelník. Hlavním rozdílem mezi aktivní a pasivní triangulací je ten, že při pasivní nepoužíváme zdroj světla. V tomto případě nám triangulační trojúhelník tvoří dvě snímací zařízení a zobrazovaný bod. Pro správné měření je podstatné, aby byl každý měřený bod zachycen oběma detektory. [8, 9]

### Laser scanner



Obr. 10 Schéma měření laser scannerem [10]

Tento druh bezkontaktního snímání funguje tak, že se proti předmětu vyše linie laserových paprsků, která se odrazí od předmětu a vrátí se zpět do skenovacího zařízení, kde se vyhodnotí (Obr. 10). Využívá tedy principu aktivní triangulace, konkrétně 2D triangulace. Zakřivení povrchu vyhodnocuje pomocí úhlu, pod nímž

se paprsek vrací. Vzdálenost se určí podle doby, kterou paprsek urazil od svého vyslání po navrácení zpět do zařízení. Jelikož se promítá laserový pruh, a ne pouze bod, je snímání bodů mnohem produktivnější, a to proto, že zaznamenává všechny body na povrchu. Konkrétním příkladem laser scanneru je T-SCAN na Obr. 11 od firmy ZEISS. [11, 12]

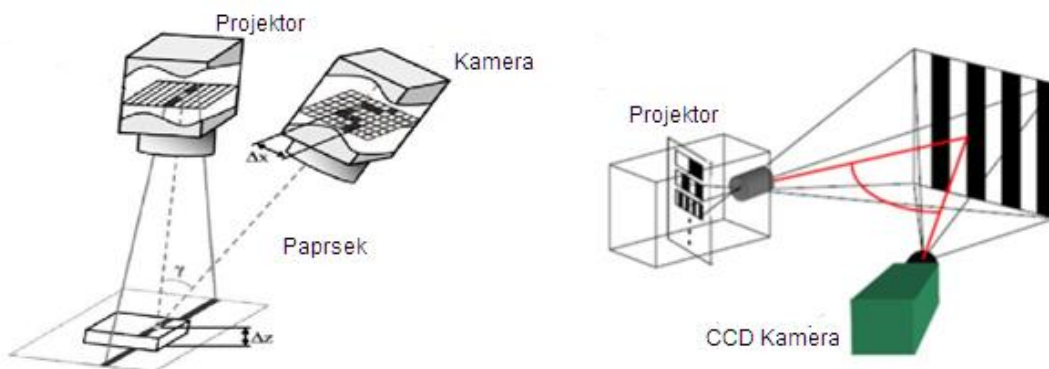


Obr. 11 T-SCAN [13]

### Pruhová projekce

Při tomto druhu snímání se skenovaný objekt snímá z několika úhlů. Na objekt se umístí pomocné značky, díky kterým si systém vypočte pozici měřících kamer a přesněji sestaví 3D model. Aby nenastala situace, kdy snímáný objekt splývá s pozadím, vytvoří se co nejvíce kontrastní pozadí a promítnuté pruhy jsou často nasvěcovány modrým světlem. Celý proces měření probíhá tak, že se na objekt promítnou proužky, které se zdeformují podle povrchu, a kamera nebo kamery zachytí tyto zdeformované pruhy (Obr. 12). Pokud se pro snímání používá pouze jedna kamera, je třeba snímat z různých poloh, aby bylo měření co nejpresnější.

[14]



Obr. 12 Schéma měření pruhovou projekcí [15]



Hlavní nevýhoda tohoto druhu snímání se projevuje při skenování lesklých a transparentních povrchů, kdy dochází k nesprávnému zachycení strukturovaného vzoru. K tomu dojde při chybném odrazu paprsku nebo také v případě, že paprsek projde materiálem. Pro tento druh snímání se používají například senzory Zeiss COMET (Obr. 13).



*Obr. 13 Zeiss COMET [16]*

## **Fotogrammetrie**

Fotogrammetrie je jednou z dalších optických měřicích metod. Základem této metody je zachycení povrchu objektu z různých úhlů pomocí obrazového senzoru. Tímto senzorem se myslí nejčastěji digitální fotoaparát. Tato metoda měření nám umožňuje určit tvar, velikost nebo také polohu měřené součásti v prostoru. Cílem takového měření je získat třírozměrné rekonstrukce měřeného objektu. Data z takového měření jsou v digitální podobě, tedy jako souřadnice a geometrické parametry, nebo také v grafické formě, například obrazy, plány. Výhodou této metody je snímání zahřátých nebo ochlazených předmětů, aniž by došlo ke zkreslení naměřených dat. Před začátkem snímání je třeba na měřený objekt umístit pomocné značky. Počet značek závisí na tvarové složitosti měřeného objektu. Minimální počet snímků je takový, aby byla každá značka nejméně na třech snímcích zachycených z různých úhlů. Zde se zase uplatní triangulační princip a vztahy mezi danými úhly. Z toho lze vypočítat prostorové souřadnice daného geometrického prvku. Příkladem fotogrammetrické kamery je například UMK 1318. [15]



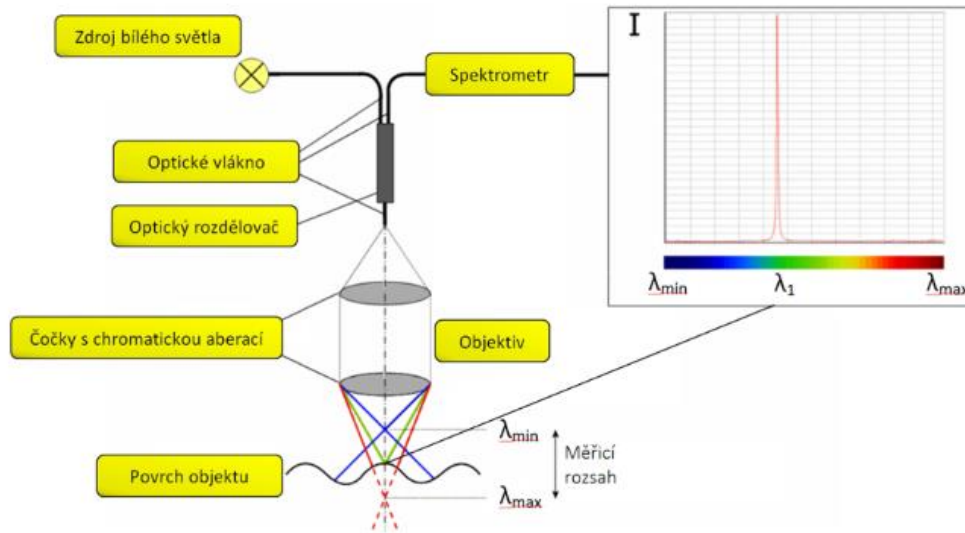
Obr. 14 Fotogrammetrická kamera UMK 1318 [17]

Fotogrammetrický přístroj zobrazený na Obr. 14 vyráběla firma Zeiss a sloužil k mapování nepřístupných lokalit nebo také v průmyslové fotogrammetrii pro určení přesných rozměrů. Její maximální odchylka se pohybovala od  $-10\ \mu\text{m}$  do  $+10\ \mu\text{m}$ , v závislosti na ohniskové vzdálenosti a použitém objektivu. V dnešní době se na mapování nepřístupných lokalit používají například drony s kamerou.

### 3.2.3 Chromatický senzor bílého světla

Chromatický senzor bílého světla, v angličtině Chromatic White Light Sensor, je bodový senzor vzdálenosti. Pro získání dat z měřeného povrchu se využívá chromatické aberace polychromatického bílého světla, ke které dochází na čočkách uvnitř objektivu. Aberace znamená chyba nebo odchylka, v tomto případě se ale jedná o úmyslnou odchylku v lomu světla. Chceme totiž, aby došlo k rozkladu bílého světla. Princip fungování tohoto bodového senzoru je možné pochopit z Obr. 15. Bílé světlo je od zdroje přiváděno do snímací hlavy a pomocí vícečočkového optického systému fokusováno na měřený povrch. Čočky jsou v tomto systému uzpůsobeny tak, aby podél optické osy došlo k rozkladu polychromatického bílého světla na celé spektrum jednotlivých vlnových délek patřících jednotlivým monochromatickým zářením, viz Obr.17. Každá vlnová délka odpovídá jednomu bodu, kdy je maximálně zaostřen podél optické osy vyjadřující specifickou hodnotu ve směru osy Z. Odražené záření je poté nasměrováno zpět přes čočky do spektrometru, kde počítač vyhodnotí odražené

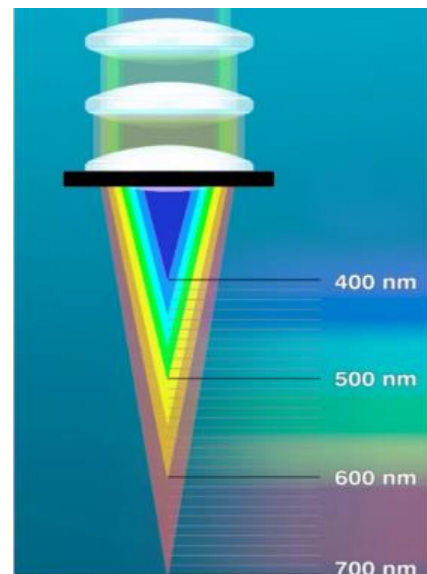
světelné spektrum a podle maxima intenzity příslušící konkrétní vlnové délce určí rozměr ve směru osy Z. [18]



Obr. 15 Schéma chromatického senzoru bílého světla [19]



Obr. 16 Zeiss DotScan [20]



Obr. 17 Rozklad bílého světla [19]

Příkladem senzoru využívajícího tuto technologii je například DotScan od firmy Zeiss. Výhoda této technologie a senzoru spočívá v přesnosti, jež se pohybuje okolo 1  $\mu\text{m}$ , vysoké rychlosti snímání bodů a možnosti snímání matných a reflexních povrchů, jako je například sklo nebo zrcadlo.

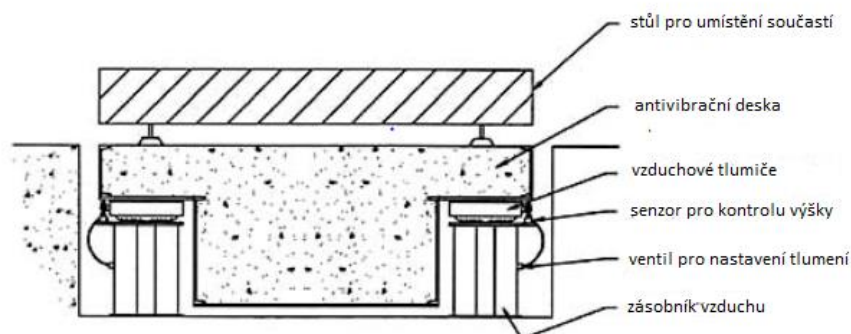
## 4. Faktory ovlivňující přesnost měření

Faktory, jež ovlivňují nejistotu a přesnost souřadnicových měřicích strojů, lze rozdělit do 4 kategorií:

- přístrojová technika,
- prostředí,
- obrobek,
- operátor.

K vlivům nepřesnosti přístrojové techniky řadíme například druh používaného snímače nebo také hlavy, skutečnost, zda se jedná o dotykový, nebo bezdotykový snímač, jestli používáme pevnou, nebo otočnou hlavu. Důležité rovněž je, jaký souřadnicový měřicí stroj používáme. [21]

Do vlivů prostředí zahrnujeme odchylku od referenční teploty, kolísání teploty, teplotního gradientu nebo také vibrace. Teplotní odchylku lze kompenzovat pomocí výpočtu a do určité míry správným výběrem materiálu. To znamená použít materiál obrobku takový, aby měl nízký koeficient teplotní roztažnosti. Také vhodnou regulací teploty lze do určité míry ovlivnit kolísání teploty a teplotní gradient. Vibrace se minimalizují pomocí umístění stroje na betonové základy. Ty totiž přenos vibrací minimalizují. Často se používají také vzduchové tlumiče. [22]



Obr. 18 Schéma uložení CMM [16]

Dalším důležitým faktorem, který nám ovlivňuje měření, je měřený dílec. Tím se myslí prostorové odchylky dílce, kam řadíme odchylky tvarů, drsnost nebo také vlnitost. Pro určení těchto odchylek se používají speciální evaluační algoritmy například pro určení minima, ohraničeného minima, ohraničeného maxima nebo také užití tangenciální podmínky. Pro užití těchto algoritmů je třeba nasnímat celý povrch, nejlépe skenovací metodou. Pokud bychom měli ideální obrobek, šlo by určit rozměry teoreticky nezbytným minimálním počtem bodů pro daný geometrický tvar. Kolik je potřeba naměřených bodů na to, abychom spolehlivě určili rozměrové a geometrické odchylky, důležité pro určení funkčnosti součásti, je doposud stále nevyřešený problém. Můžeme se řídit například podle knihy: „Cookbook Measuring strategies for tactile Coordinate Metrology“ [23], ale ani to není vhodná metoda, a to z důvodu rozdílnosti měřených součástí a různosti postupu při jednotlivých měřeních. [21]

Posledním důležitým faktorem je samotný operátor. Ten má za úkol správně uchytit a napolohovat měřený obrobek, vybrat a zkalibrovat jednotlivé snímače tak, aby se žádný z nich nezničil nebo nepoškodil. Také musí vybrat vhodnou strategii měření. Zde je například rozhodující, jestli měříme bodovou snímací metodou, nebo skenovací metodou. V případě užití skenovací metody je potřeba použít filtraci. Výběr špatné strategie může mít fatální dopad na výsledek měření.

[21]

## 5. Přehled měřených elementů v Calypso

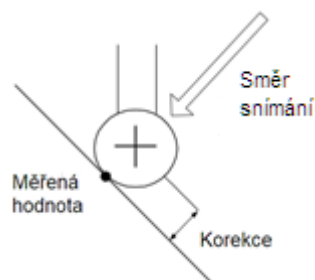
Měřené úseky na obrobku je potřeba definovat, a to pomocí elementů. Dále se budu zabývat pouze standardními elementy. Těmi jsou: bod, kružnice, rovina, 2D přímka, 3D přímka, válec a kužel. Pak zde máme tzv. speciální elementy: elipsa, podélný otvor, obdélník, torus, offset-rovina, bod symetrie, rovina symetrie, stupňový válec, radius-bod, bod koule a mnoho dalších. Těmi se nadále nebudu zabývat. [24]

Element	Minimální počet snížení:
bod	1
2D přímka	2
rovina	3
bod symetrie	2
kružnice	3
válec	5
kužel	6
koule	4
torus	7
rovina symetrie	4
elipsa	5
obdélník	5
podélný otvor	5

Obr. 19 Minimum potřebných bodů pro sestavení geometrického elementu [24]

### 5.1 Element bod

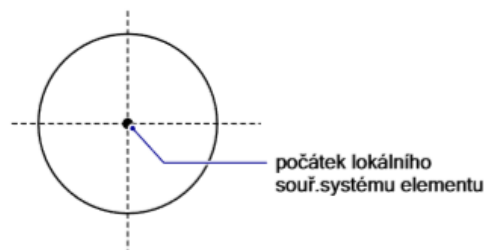
Pomocí elementu bod lze na součásti změřit souřadnice jednotlivých bodů, aby byly například určeny rozměry součásti. Je zde potřeba korekce o poloměr kuličky ve směru souřadného systému (Obr. 20). Korekci lze upravit, a to buď ručně, nebo podle režimu prostorového bodu. [24]



Obr. 20 Schéma korekce

## 5.2 Element kružnice

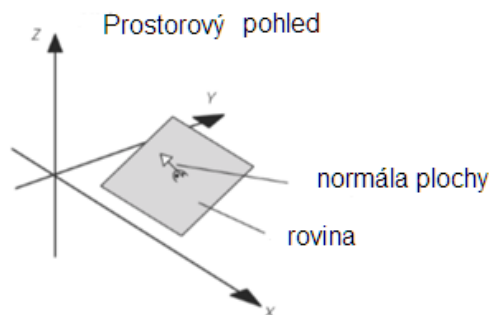
Element kružnice se využívá v případě, že je zapotřebí měřit kruhové průřezy nebo také kruhové oblouky. Calypso na základě naměřených bodů určí a vypočte kružnici či oblouk. Při snímání je potřeba, aby byly všechny snímané body v přibližně stejné výšce. Pokud by byl výškový rozdíl daných bodů příliš velký, Calypso ho může vyhodnotit jako válec. V případě zapnuté automatické identifikace elementů může dojít ke špatnému určení elementů. Počátek lokálního souřadného systému elementu se nachází ve středu měřeného kruhového řezu.



Obr. 21 Schéma elementu kružnice [24]

## 5.3 Element rovina

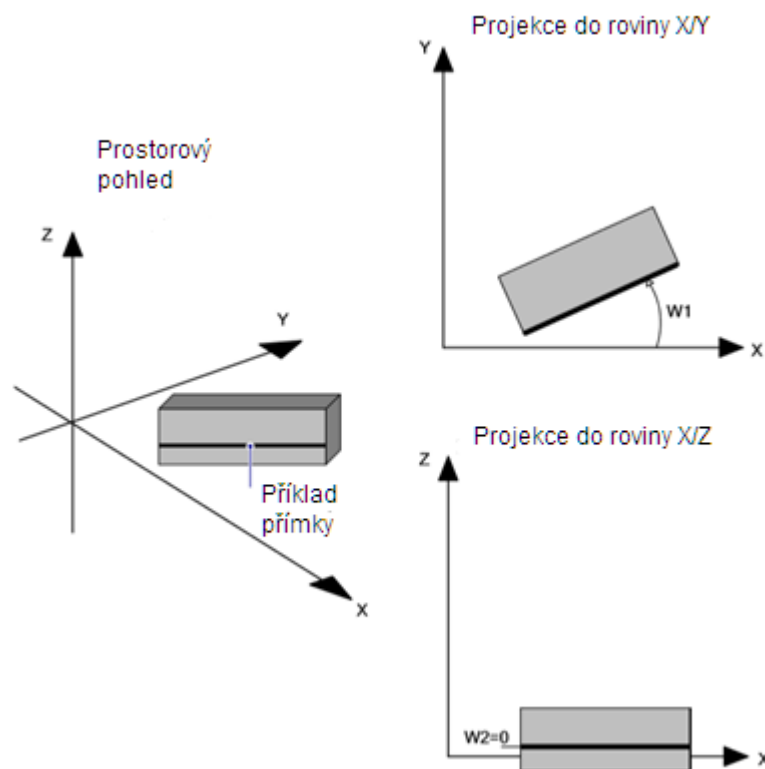
V případě, že je zapotřebí zachytit rovinnou plochu součástky, použije se element rovina. Pomocí tohoto elementu je možné určit polohu nebo sklon roviny. Pokud nasnímáme alespoň 3 body v jedné linii, může se stát, že Calypso tento element automaticky identifikuje jako přímku. Opět lze ručně přenastavit tento element přímkou na element roviny. [24]



Obr. 22 Schéma elementu rovina [24]

## 5.4 Element 2D přímka

Element 2D přímka se používá pro zachycení linií a přímek v libovolné rovině na ploše součásti. Tento element funguje tak, že se nasnímají minimálně 2 body, kterými se poté proloží přímka. 2D přímku lze definovat dvěma způsoby, a to: pomocí hodnoty X, Y a Z pro počáteční a koncový bod přímky, nebo pomocí bodu (X, Y, Z) přímky, její délky a jednotlivých úhlů W1 a W2. Stejně jako v případě roviny je možné, že se pomocí automatické identifikace elementu vytvoří rovina místo požadované přímky. [24]



Obr. 23 Schéma elementu 2D přímky[24]

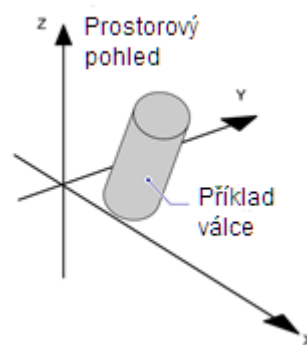
## 5.5 Element 3D přímka

Tento element se vypočítává pomocí jiných měřených elementů. Pro vytvoření 3D přímky jsou potřeba nejméně dva jiné elementy. Například jím můžeme zobrazit osu hřídele tak, že nadefinujeme několik kružnic a jejich středy proložíme přímkou. [24]



## 5.6 Element válec

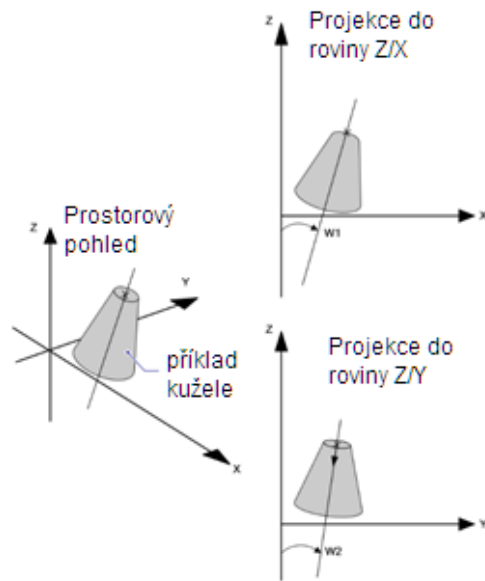
Pomocí tohoto elementu se dají měřit otvory, hřídele nebo čepy. Snímání probíhá tak, že se nejprve nasnímá kružnice kolmo k ose válce, a to alespoň ze 3 bodů. Poté se musí provést totéž, ale v jiné výšce než v případě předchozí kružnice. Calypso si z těchto kruhových řezů v různých výškách vypočte data o válci. Má-li válec moc velkou úchylku tvaru nebo kružnice leží příliš blízko u sebe, vypočte Calypso kužel místo požadovaného válce. Počátek lokálního souřadného systému u válce leží ve výšce nejnižší ležícího snímaného bodu.[24]



Obr. 24 Schéma elementu válce[24]

## 5.7 Element kužel

Pomocí elementu kužel lze určit umístění a polohu vnějších i vnitřních kuželů, směr osy kužele a jeho vrcholový úhel. Kužel má tyto určující složky: střed a průměr kružnice, polohu a orientaci osy kužele W1, W2 a také vrcholový úhel. Při snímání je potřeba postupovat jako u válce, a to tak, že se nejprve nasnímá kružnice kolmá na osu a totéž se zopakuje ještě jednou o nějaký úsek níže nebo výše. V případě, že je vrcholový úhel příliš malý, může Calypso vyhodnotit naměřené hodnoty jako válec. Počátek lokálního souřadného systému leží ve středu kružnice s menším průměrem. Osa má směr menší k větší kružnici. [24]



Obr. 25 Schéma elementu kužel [24]

## 5.8 Element koule

Pomocí tohoto měřeného elementu lze určit průměr a souřadnice středu koule, kulový vrchlík nebo také kulovou výseč. První dva body se snímají v okolí pólů koule a další po rovníku koule. [24]

## 6. Strategie měření

Jednou z nejdůležitějších částí při tvorbě plánu měření je zvolení vhodné strategie, která nám umožní dosažení optimálního výsledku měření. Strategie nám udává, jak vybraný element měřit a vyhodnocovat.

Do strategie měření spadá nastavení následujících parametrů:

- polohy a orientace součástí,
- výběru snímačů,
- měřicí metody,
- metody vyhodnocení,
- filtrace a eliminace naměřených hodnot.

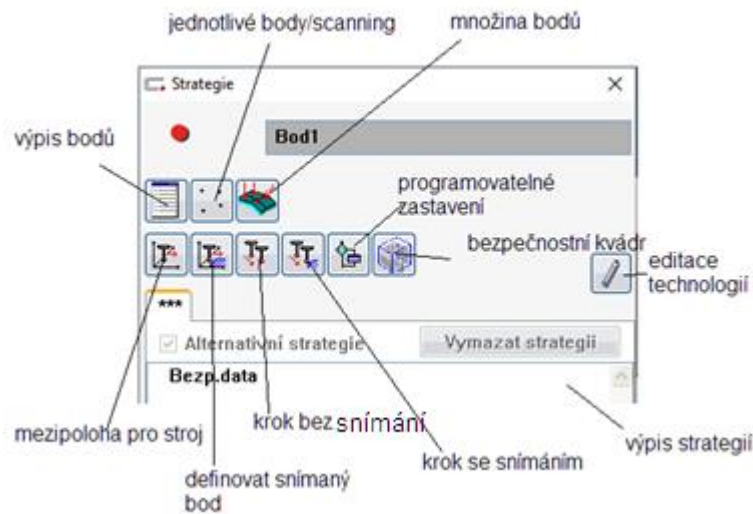
[25]

Podrobněji se zaměříme pouze na měřicí metodu, metodu vyhodnocení a filtraci naměřených hodnot.

### 6.1 Měřicí metoda

Do měřicí metody se řadí dostupné strategie snímání bodů pro jednotlivé elementy. Aby bylo možné použít strategii, je nutné znát typ měřeného elementu a místo měření. Měřený element může mít jednu nebo několik strategií měření. Dále následuje přehled dostupných strategií pro standardní elementy v softwaru Calypso.

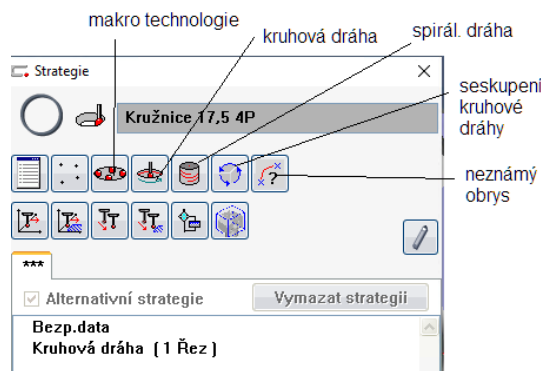
## 6.1.1 Strategie pro bod



Obr. 26 Schéma strategií pro bod v Calypso

U každého elementu je třeba zvolit druh snímání, tedy zda budeme snímat bodově, nebo scannigem (Obr. 26). V řádku začínajícím výpisem bodů volíme dráhu a způsob, jakým se budou body snímat. V dolním řádku máme nastavení například bezpečnostního kvádru, jehož hlavním úkolem je zabránit kolizi. Sem spadá například směr, z něhož má snímač najet na měřený element.

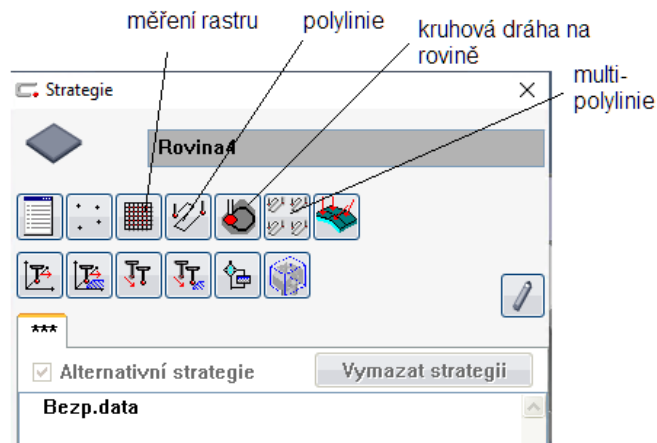
## 6.1.2 Strategie pro kružnice



Obr. 27 Schéma strategií kružnice v Calypso

Dostupné strategie pro kružnici jsou makro technologie, kruhová dráha a spirál. dráha (Obr. 27). Přesný název makro technologie v Calypso je kružnice-makro ze 4 bodů. Strategie spirálové dráhy se používá například při měření závitu.

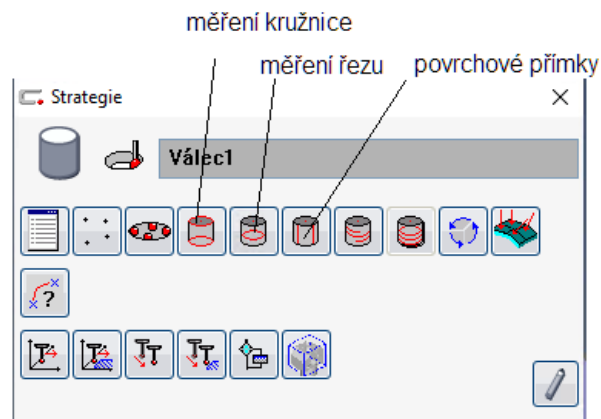
### 6.1.3 Strategie pro rovinu



Obr. 28 Schéma strategií pro rovinu

Strategie pro rovinu jsou měření rastru, polylinie, kruhová dráha na rovině a multi – polylinie (Obr. 28). Měření rastru slouží k detailnímu popisu rozměrných pravidelných ploch. Polylinii použijeme v případě, že je potřeba měřit na tvarově složitých rovinných elementech.

### 6.1.4 Strategie pro válec



Obr. 29 Schéma strategie pro válec

Z Obr. 29 lze vidět dostupné strategie pro válec, a to jsou makro technologie, měření kružnice, měření řezu, povrchové přímky a spirál dráha. Měření válce pomocí povrchových křivek funguje tak, že se na válci vygenerují alespoň 4 svislé přímky a ty se poté proměří. Měření kružnice probíhá tak, že se na válci vytvoří 2 kruhové řezy, které se proměří.

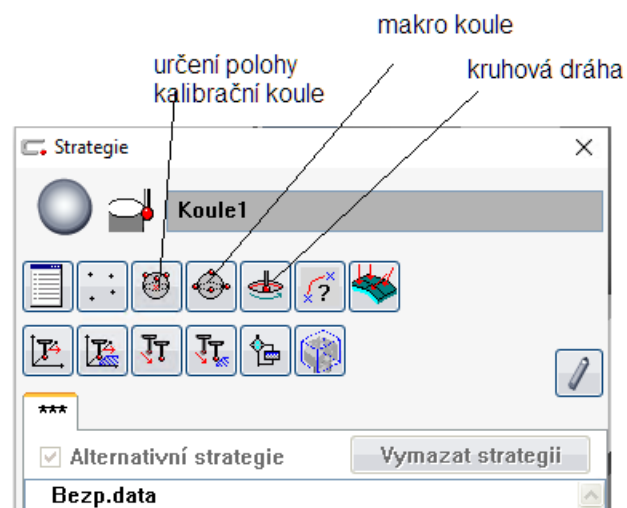
## 6.1.5 Strategie pro kužel



Obr. 30 Schéma strategií pro kužel

Strategie pro kužel jsou makro technologie, měření kružnice, měření rezu, spirál. dráha a povrchové přímky. Jsou v podstatě stejné jako pro element válec, ovšem s tím rozdílem, že například při použití metody měření kružnice musí mít jedna kružnice menší poloměr než druhá.

## 6.1.6 Strategie pro kouli



Obr. 31 Schéma strategií pro kouli

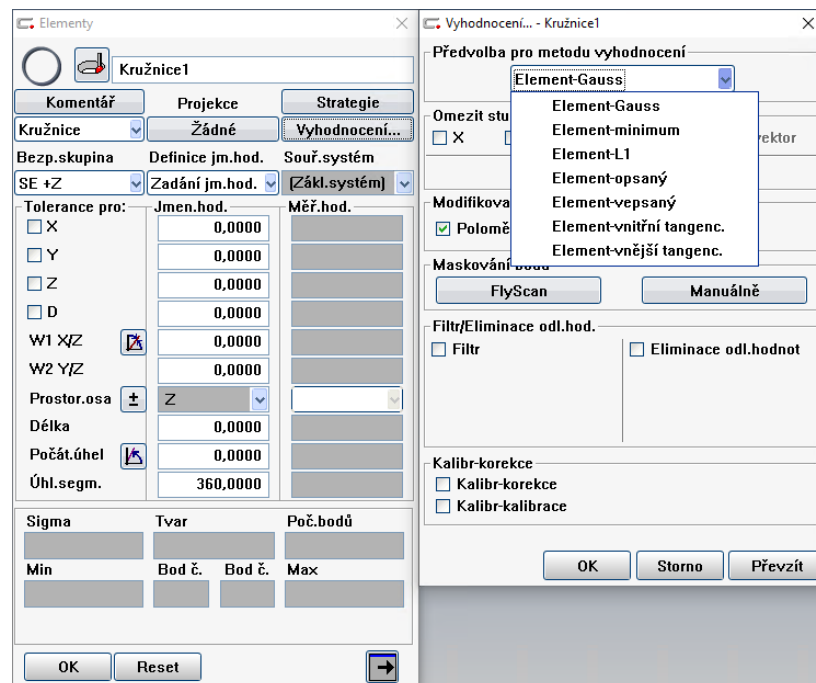
Pro kouli jsou dostupné strategie makro koule a kruhová dráha. Určení polohy kalibrační koule slouží k tomu, abychom mohli kalibrovat snímač. Správně se ale snímač kvalifikuje, nikoli kalibruje.

## 6.2 Metoda vyhodnocení

Metody vyhodnocení nebo také metody přizpůsobování jsou matematické metody výpočtu, jež nám umožňují vybrat vhodnou metodu pro zvolenou strategii měření a tím dosáhnout nejlepšího možného výsledku měření. Ukázku metod vyhodnocení v Calypso si ukážeme na kružnici (Obr. 32). U elementu kružnice lze celkově použít 5 metod:

- Gaussova,
- Čebyšev (Kritérium minima),
- Element L1,
- Výpočet jako minimálně opsaný, respektive maximálně vepsaný element,
- Výpočet jako tangenciální element (vnější/vnitřní).

[26]



Obr. 32 Schéma metody vyhodnocení v softwaru Calypso u elementu kružnice

### **6.2.1 Gaussova vyhodnocovací metoda**

Gaussova vyhodnocovací metoda nebo také metoda střední kružnice nejmenších čtverců, v angličtině LSC-last squares mean circle, je metodou využívající kružnici s tou podmínkou, že součet čtverců odchylek této kružnice od snímaného nebo zpracovaného profilu je nejmenší. Tento druh vyhodnocování je minimálně ovlivněn odlehlými hodnotami a nevykazuje příliš velkou náročnost na výpočty. Používáme jej v případě, že máme k dispozici pouze malé množství bodů, často rovněž pro statistické účely.

### **6.2.2 Čebyšev (kritérium minima)**

V tomto případě máme dvě soustředné kružnice obklopující vybraný profil, zároveň mají nejmenší radiální vzdálenost. Kritérium minima nám zaručuje získání nejmenší maximální odchylky mezi vypočtenou ideální a skutečnou sejmutou konturou. Tato metoda je značně citlivá na odlehlé hodnoty. Pro správné vyhodnocení je doporučen vysoký náměr bodů a filtrace odlehlých hodnot pomocí nízkopásmového filtru. [26]

### **6.2.3 Element L1**

Principem výpočtu geometrického elementu je minimální součet absolutních hodnot odchylek. Vyhodnocení je nenáročné a výsledky jsou jednoznačné. Metoda element L1 není citlivá na odlehlé hodnoty. [24]

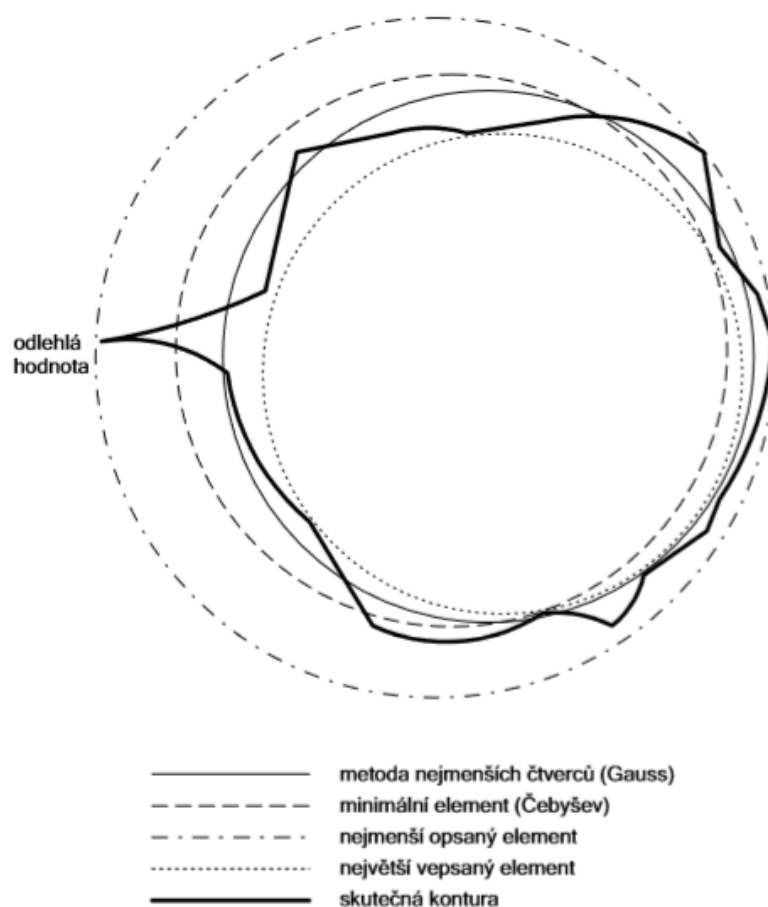
### **6.2.4 Výpočet jako min. opsaný / max. vepsaný element**

Při výpočtu jako nejmenší opsaný element je element umístěn tak, že se žádný z nasnímaných bodů nenachází mimo něj. Naopak při výpočtu jako největší vepsaný element je element tak velký, aby žádný nasnímaný bod neležel uvnitř elementu. Předpokladem pro tuto metodu je vysoký náměr bodů se zapnutou eliminací odlehlých hodnot.



## 6.2.5 Výpočet jako tangenciální element (vnější/vnitřní)

Tangenciální element leží mimo snímaný materiál. Principem této metody je, že všechny nasnímané body leží mimo největší možný element (největší vepsaný), nebo všechny body leží uvnitř nejmenšího opsaného elementu. K použití této metody je zapotřebí vysoký náměr bodů. Také je dobré použít eliminaci odlehlých hodnot nebo filtrování nízkopásmovým filtrem.



Obr. 33 Metody vyhodnocení [24]

## 6.3 Filtrace naměřených hodnot

Jednou z dalších důležitých věcí při výběru strategie je výběr filtru. Filtr jako takový nám umožňuje vyjmout nevhodná naměřená data, jež by mohla silně ovlivnit dané měření, a to nežádoucím způsobem. Máme k dispozici celkem

3 typy filtrů – Gauss (ISO 16610-21/28), Spline (ISO 16610-22) a 2 RC (ISO 4291) – a druhy filtrů podle propustnosti: nízkopásmový (dolní propust), pásmová propust a vysokopásmový (horní propust). Filtry se používají v případě, že máme vysoký počet bodů, tedy pouze pro elementy naměřené scanováním.

[27]

Tab. 1 Směrné hodnoty pro nastavení filtru a počet bodů pro kontrolu kruhovitosti

Průměr součásti [mm]	Jen tvar, standardní měření tvaru		Tvar a vlnitost, tvar včetně stop po chvění		Jen vlnitost, periodické složky profilu, např. velikost stop po chvění	
	Mezní vlnové číslo [vln/ot]	Měř. body po obvodu	Mezní vlnové číslo [vln/ot]	Měř. body po obvodu	Mezní vlnové číslo [vln/ot]	Měř. body po obvodu
až 8	15	>105	50	>350	15–150	>1050
>8 až 25						
>25 až 80	50	>350	150	>1050	50–500	>3500
>80 až 250	150	>1050	500	>3500		
>250	500	>3500	1500	>10500	150–1500	>10500

### 6.3.1 Nízkopásmový filtr (dolní propust)

Při nízkopásmovém filtrování se odbourávají vysoké frekvence a nízké projdou filtrem. Ve vyhodnocení poté získáme parametry vlnitosti a jiné dlouhovlnné složky. Vlivy drsnosti povrchu jsou potlačeny.

[24, 28]

### 6.3.2 Vysokopásmový filtr (horní propustnost)

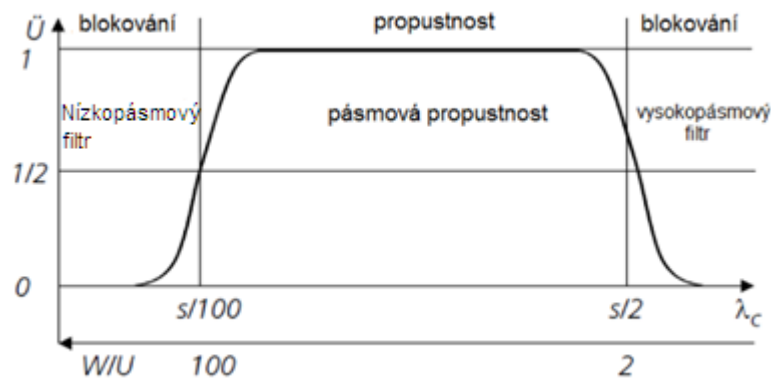
Vysokopásmový filtr odbourává vlnitosti vyskytující se ve vysoké frekvenci a nízké frekvence neprojdou. Vlivy vlnitosti jsou potlačeny, ale jsou zde přítomny vlivy drsnosti povrchu. Ve vyhodnocení je tedy znatelná drsnost povrchu součásti.

[24, 28]

### 6.3.3 Pásmová propust

Pásmová propust vznikne kombinací předchozích dvou filtrů. Při použití tohoto filtru dojde k potlačení profilu vlnitosti a drsnosti povrchu, jež přesahují rozhraní uvedené na jednotlivých úsecích.

[24, 28]



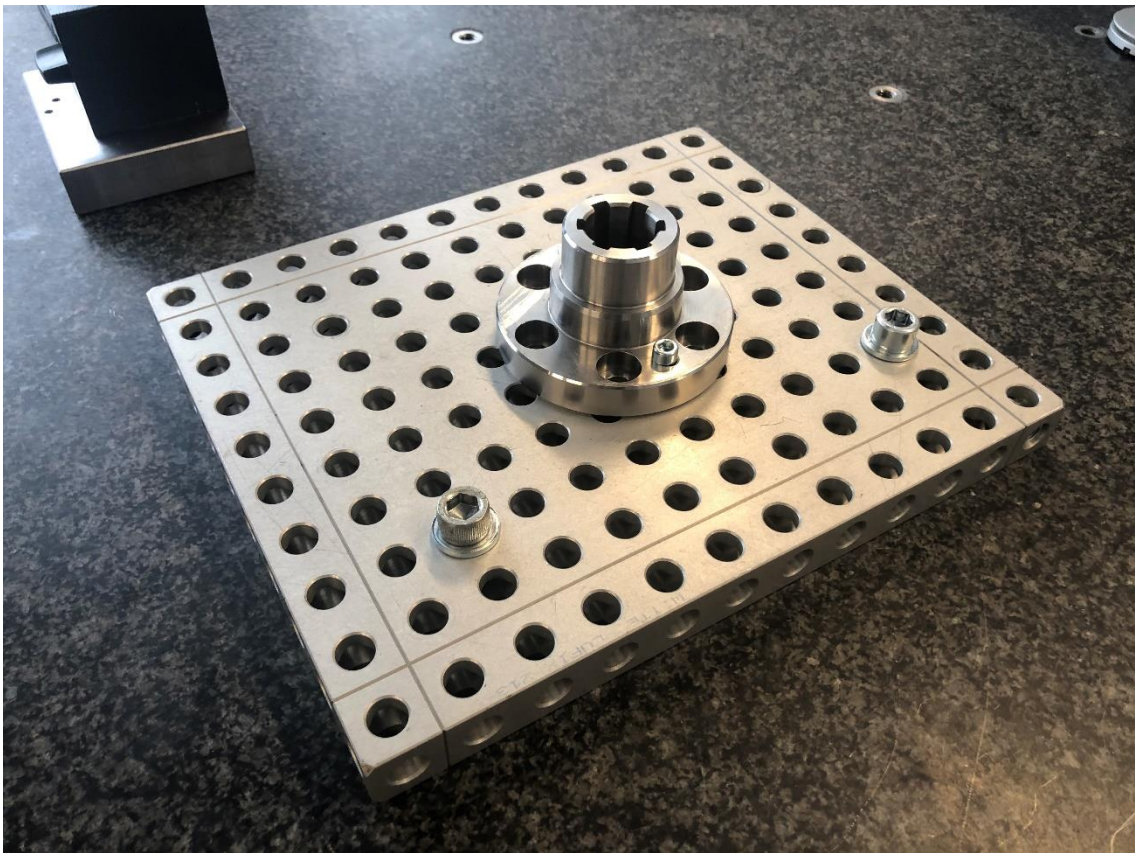
Obr. 34 Propustnost filtrů [24]

## 6.4 Eliminace odlehlých hodnot

V závislosti na vyhodnocované charakteristice, způsobu výpočtu posuzované veličiny, počtu nasnímaných bodů a mnoha dalších faktorech mohou odlehlé hodnoty výrazně ovlivnit výsledek měření. Proto používáme funkci eliminace odlehlých hodnot, kdy – pokud vzdálenost k vypočtenému Gaussovu elementu překračuje definovanou prahovou hodnotu – odstraní daný bod. Nedoporučuje se používat tuto funkci v případě malého počtu naměřených bodů. [29]

## 7. Modelová úloha

Za účelem demonstrace vlivu strategie měření a metodiky vyhodnocení byla navržena modelová úloha. Měřila se rovinnost a kruhovitost na součásti typu příruba. Všechna měření proběhla na stroji ZEISS UPMC 850 CARAT s MPE  $\pm 0,7+L/600$   $\mu\text{m}$ . MPE znamená Maximum Permitted Error, do češtiny přeloženo maximální dovolená chyba.



*Obr. 35 Upnutí součásti typu příruba na Alufix od firmy Witte*

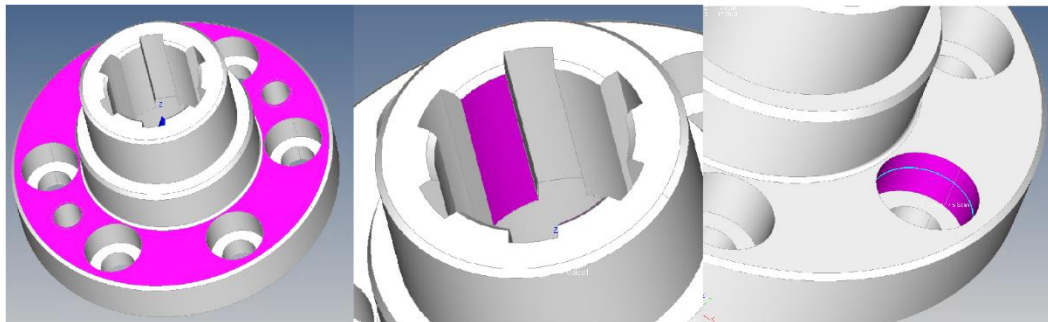
### 7.1 Příprava měření

Pro přesné změření součásti, je třeba ji vhodným způsobem upevnit ke stolu stroje. To bylo provedeno pomocí modulárního upínacího systému Alufix od firmy Witte. Před měřením byl udělána „kalibrace“ nebo lépe kvalifikace snímače. To se provede pomocí kalibrační koule. Nejdříve bylo potřeba ji zaměřit pomocí referenčního snímače. Po dokončení zaměření kalibrační koule se musel referenční snímač ručně vyměnit za snímač, jímž se měřilo, aby byl také

„zkalibrován“ pomocí již zaměřené kalibrační koule. U obou kalibrací je potřeba najet ve směru dířku nad střed referenční koule a dotknout se. Zbytek už stroj doměří sám.

## 7.2 Plán měření

Prvním krokem při tvorbě plánu měření je určení počátku souřadnicového systému, definování bezpečnostního kvádru a nastavení teplotní kompenzace. Bezpečnostní kvádr byl převzat z CAD modelu. Pro vytvoření souřadnicového systému byl použit válec, kružnice a rovina (Obr. 36). Tyto elementy bylo potřeba nejdříve ručně naměřit z důvodu, aby stroj znal polohu součásti na pracovním stole stroje. Počátek souřadnicového systému byl nastaven na střed této rotační součásti a v ose Z byl nastaven na stejnou výšku, jako je vyznačená rovina na Obr. 37. Dalším krokem bylo navolení elementů. Ty byly zvoleny přímo z výběru v Calypso a poté proměřeny. Pro vyhodnocení kruhovitosti bylo zapotřebí zvolit kruhovitost ze záložky Tvar-Poloha a vybrat odpovídající element. Totéž s rovinností.



Obr. 36 Elementy použité k vyrovnání vyznačené fialově

## 7.3 Rovinnost

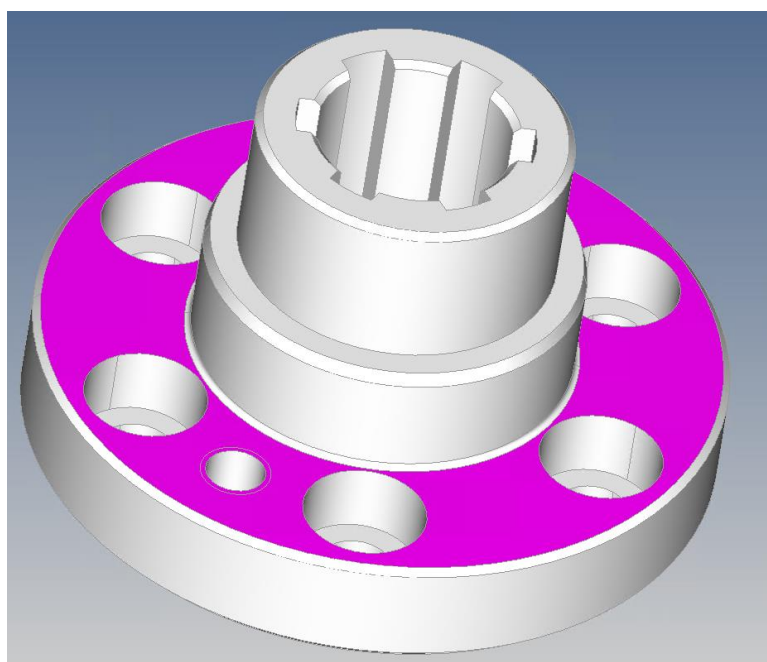
Plochu považujeme za rovinnou v daném rozsahu měření, jestliže všechny její naměřené body leží mezi dvěma rovinami vzájemně rovnoběžnými a vzdálenými o určenou hodnotu „t“. Říká se jí toleranční pole rovinnosti a je vymezena dvěma vzájemně rovnoběžnými rovinami.



Obr. 37 Zobrazení tolerančního pole u rovinnosti [30]

## 7.4 Měření rovinnosti na součásti

Celkově proběhla tři měření roviny s různými strategiemi. Tato tři měření byla opakována pětkrát. Měření rovinnosti probíhalo na fialově vyznačené části Obr. 38



Obr. 38 Model součásti + fialově vyznačena část, kde se měřila rovinnost

## Nastavení jednotlivých měření:

### a) Scanování bodů, strategie kruhová dráha:

1. Metoda vyhodnocení element-gauss, filtr žádný, eliminace odlehlých bodů vypnuta,
2. Metoda vyhodnocení element-vnější tangenciální, nízkopásmový filtr spline 2.5 na mm, eliminace odlehlých bodů vypnuta;

### b) Scanování bodů, strategie polylinie:

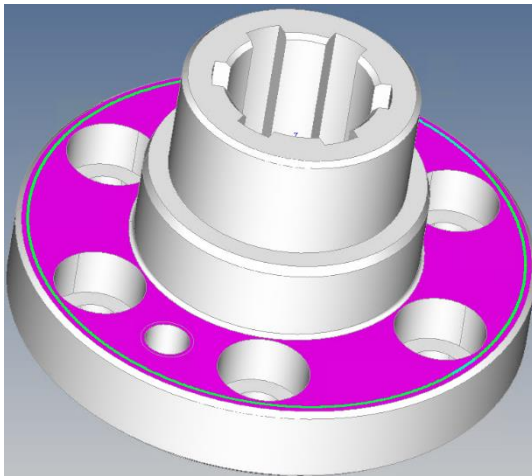
1. Metoda vyhodnocení element-gauss, nízkopásmový filtr spline 2.5 na mm, eliminace odlehlých hodnot vypnuta,
2. Metoda vyhodnocení element-vnější tangenciální, nízkopásmový filtr spline 2.5 na mm, eliminace odlehlých hodnot vypnuta;

### c) Snímání jednotlivých bodů, celkově 12 bodů:

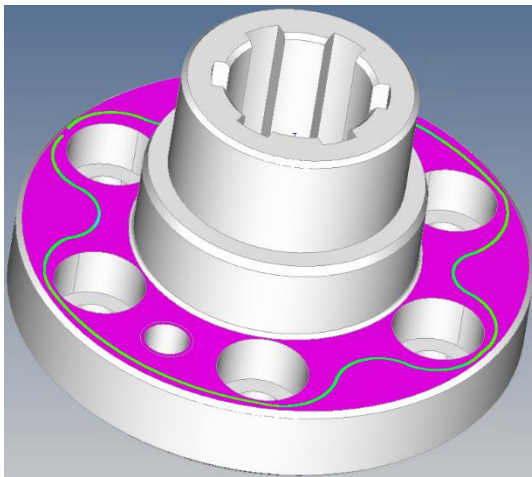
1. Metoda vyhodnocení element-gauss, nízkopásmový filtr spline 2.5 na mm, eliminace odlehlých hodnot vypnuta,
2. Metoda vyhodnocení element-vnější tangenciální, nízkopásmový filtr spline 2.5 na mm, eliminace odlehlých hodnot vypnuta.



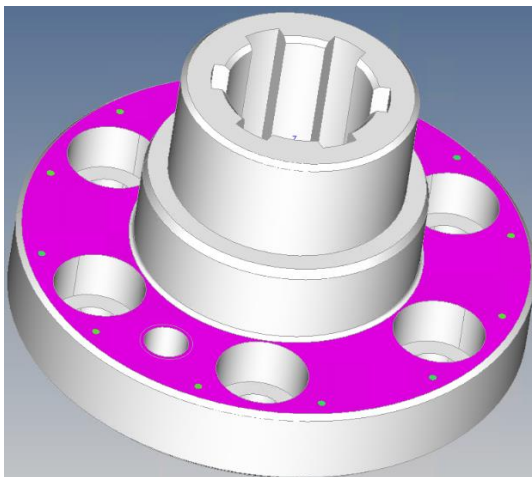
Dráha snímače při jednotlivých měření:



Obr. 39 Schéma měření scanningem, strategie kruhovou dráhou



Obr. 40 Schéma měření scanningem, strategie polylinie

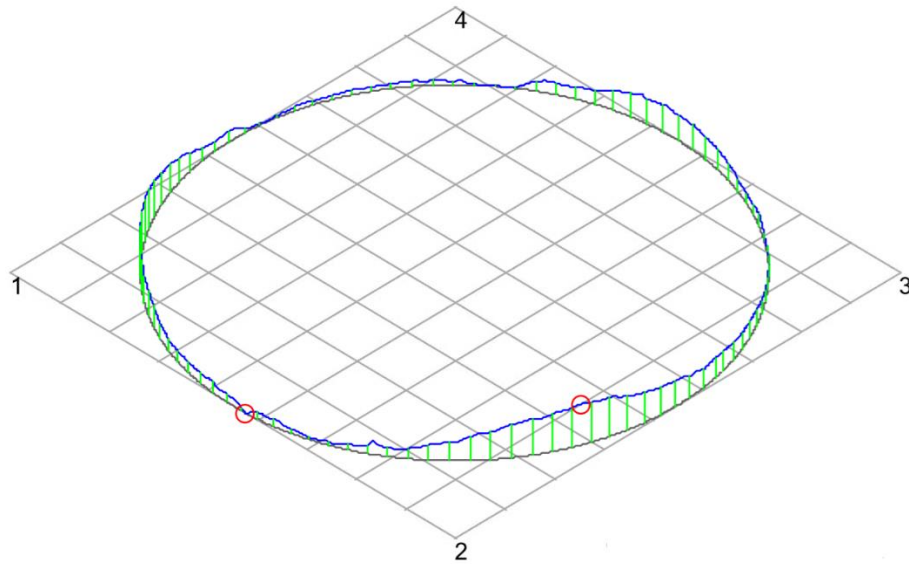


Obr. 41 Schéma měření bodově, strategie kruhová dráha



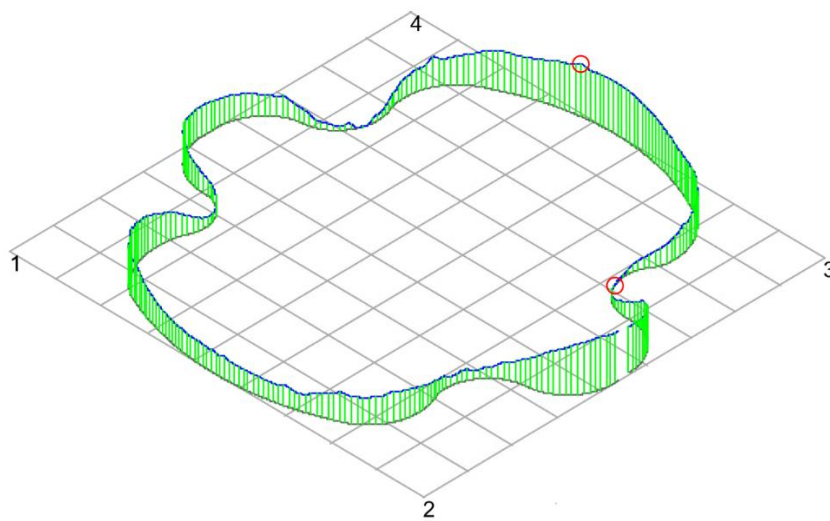
## 7.5 Grafické výsledky z měření rovinnosti

1. Grafické vyhodnocení z měření scanningem za použití strategie kruhová dráha a metody vyhodnocení element-minimum.



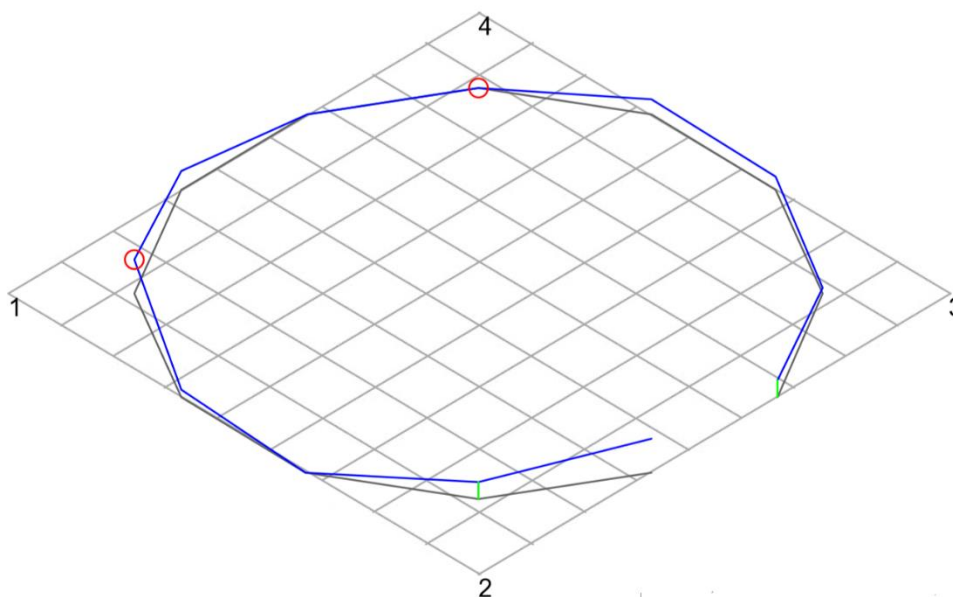
Obr. 42 Grafické vyhodnocení z měření scanningem

2. Grafické vyhodnocení z měření scanningem strategií polylinie a metodou vyhodnocení element minimum.



Obr. 43 Grafické vyhodnocení z měření polylinie

3. Grafické vyhodnocení z měření 12 body za použití strategie kruhové dráhy a metody vyhodnocení elementem minimum.



Obr. 44 Grafické vyhodnocení z měření 12 body

Číselné hodnoty z jednotlivých měření rovinnosti jsem vložil do Tab. 2. Hodnota, která ukazuje vliv jednotlivých strategií měření, je měřená hodnota a počet bodů. V tomto případě není ani tak důležitá tolerance jako to, jak moc se liší výsledky při použití různého počtu bodů. V případě použití malého počtu bodů a bodové metody měření je možné, že jsme nenarazili na maximální nebo minimální hodnotu měření a jako taková je tato strategie nevhodná pro měření rovinnosti. V případě měření Č. 1 a Č. 2 byla použita scannigová metoda a v případě měření Č. 3 bodová metoda měření. Vyhodnocovací metoda je pro všechna tři měření stejná, jedná se o metodu element-minimum. Sloupec  $V_{\text{měř}}$  v Tab. 2 ukazuje hodnotu rychlosti snímače při snímání v mm/s.

Tab. 2 Naměřené hodnoty ke grafickým vyhodnocením z měření rovinnosti (mm)

Č.	Měř. hod.	Tolerance	Počet bodů	$V_{\text{měř}}$	Poloměr sním.	Filtr	L-C
1	0,0161	0,0500	946	5	2,4998	Spline	2,5
2	0,0228	0,0500	3100	3	2,4998	Spline	2,5
3	0,0125	0,0500	12	-	2,4998	-	-

## 7.6 Číselné výsledky z měření rovinnosti

Protokol z měření rovinnosti za použití různých strategií a filtrů (označení jednotlivých strategií a měření viz Kapitola 6.3)

		Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylna
a)	1) 	Z Rovina Scan 0.0000	0.0000	0.0500	-0.0500	 0.0000
	2) 	Z Rovina Scan Tan 0.0080	0.0000	0.0500	-0.0500	- 0.0080
		Rovinnost Scan Filtr 2,5 0.0162	0.0000	0.0500		-- 0.0162
b)	1) 	Z Rovina Polylinie -0.0050	0.0000	0.0500	-0.0500	-  -0.0050
	2) 	Z Rovina Polylinie Tan 0.0050	0.0000	0.0500	-0.0500	- 0.0050
		Rovinnost Polylinie filtr 2,5 0.0228	0.0000	0.0500		-- 0.0228
c)	1) 	Z Rovina 12 bodu -0.0033	0.0000	0.0500	-0.0500	-  -0.0033
	2) 	Z Rovina 12 bodu Tan 0.0075	0.0000	0.0500	-0.0500	- 0.0075
		Rovinnost 12 bodu 0.0228	0.0000	0.0500		-- 0.0228

Obr. 45 Ukázka protokolu měření rovinnosti (mm)

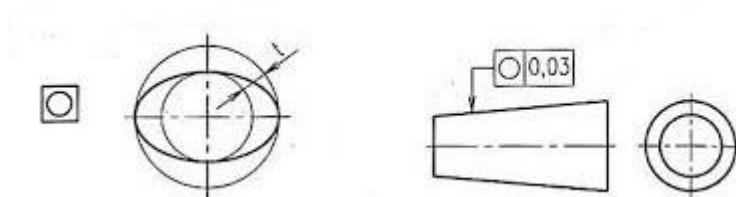
Při měření rovin byla zvolena jedna nulová rovina. To znamená, že byla zvolena jako tzv. „základní rovina“, od níž se určuje odchylka ostatních rovin. Tato nulová rovina je v Tab. 3 zapsána v prvním sloupci s číselnými hodnotami 0,00. Počet bodů při scannigu kruhové dráhy byl 946, při polylinii 3100 a při měření jednotlivými body 12 bodů. Použity byly vyhodnocovací metody element-gauss a element-vnější tangenciální. Z naměřených hodnot vyplývá, ačkoli máme stejná data například pro polylinii, výsledek se mění, a to na základě použité vyhodnocovací metody.

Tab. 3 Naměřené hodnoty roviny s tolerancí  $\pm 0,05$  (mm)

Strategie	Scanning, kruhové dráhy		Scanning, polylinie		Jednotlivé body, 12 bodů	
	Element-gauss	Vnější tangenciální	Element-gauss	Vnější tangenciální	Element-gauss	Vnější tangenciální
Max. naměřená hodnota	0,00	0,007960	-0,005019	0,005233	-0,003226	0,008138
Min. naměřená hodnota	0,00	0,007923	-0,005079	0,004831	-0,003354	0,007172
Průměrná hodnota	0,00	0,007945	-0,005038	0,005041	-0,003300	0,007633

## 7.7 Kruhovitost

Toleranční pole je v dané rovině průřezu omezeno dvěma soustřednými kružnicemi vzdálenými od sebe o šířku mezikružjí rovnou toleranci kruhovitosti.



Obr. 46 Toleranční pole kruhovitosti [30]

## 7.8 Měření kruhovitosti na součásti

### 7.8.1 Měření kruhovitosti na vnitřním průměru

Nastavení jednotlivých měření

a) Scanování bodů, strategie kruhová dráha:

1. metoda vyhodnocení gauss, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta,
2. metoda vyhodnocení element-vepsaný, nízkopásmový filtr spline 50 v/ot, eliminace odlehlých hodnot vypnuta;

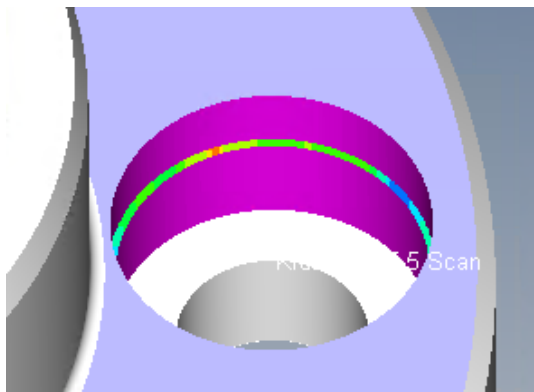
b) Snímání jednotlivých bodů, celkově 4 body, strategie kruhová dráha:

1. metoda vyhodnocení element-gauss, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta,
2. metoda vyhodnocení element-vepsaný, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta;

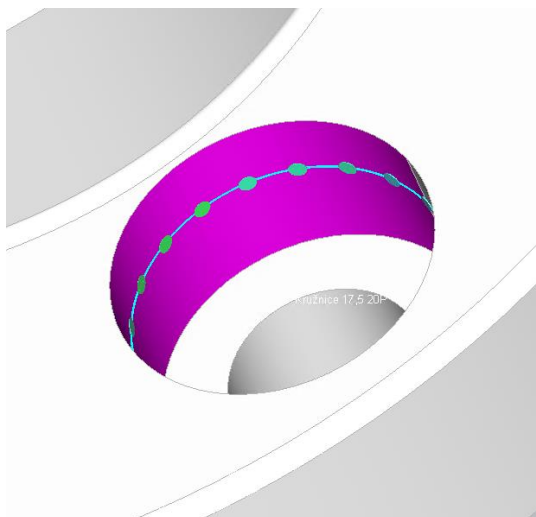
c) Snímání jednotlivých bodů, celkově 20 bodů, strategie kruhová dráha:

1. metoda vyhodnocení element-gauss, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta,
2. metoda vyhodnocení element-vepsaný, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta.

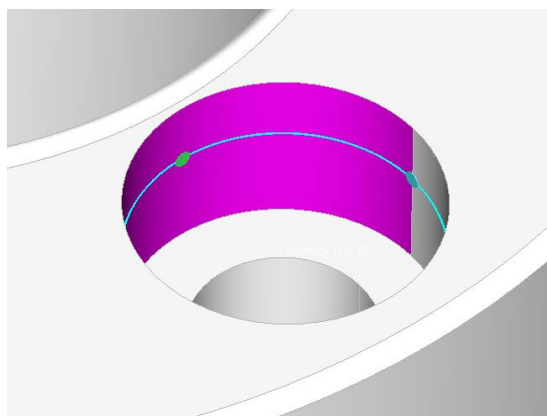
Dráha snímače při jednotlivých měření:



Obr. 47 Schéma měření scanningem



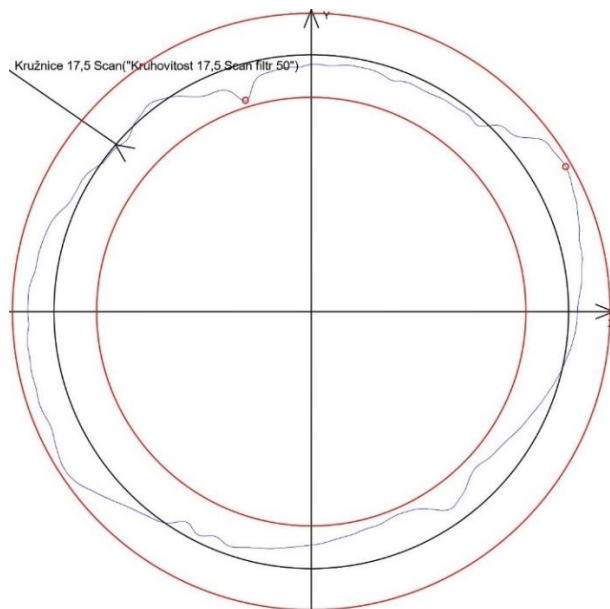
Obr. 48 Schéma měření bodově, 20 bodů



Obr. 49 Schéma měření bodově, 4 body

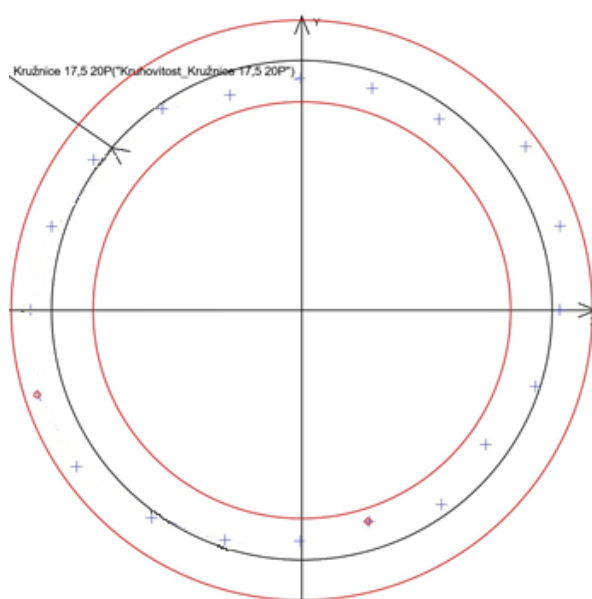
## 7.8.2 Grafické vyhodnocení kruhovitosti vnitřního průměru

1. Grafické vyhodnocení z měření scanningem při použití metody vyhodnocení element-minimum.



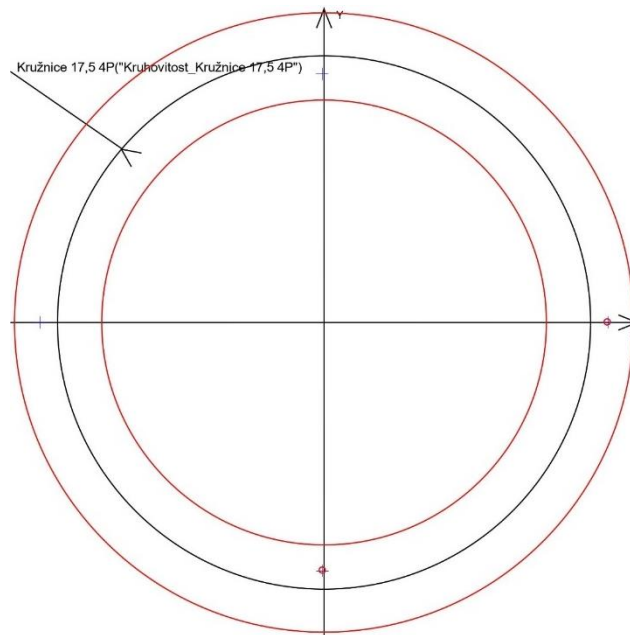
Obr. 50 Grafické vyhodnocení scanningem

2. Grafické vyhodnocení z měření 20 body a metody vyhodnocení element-minimum.



Obr. 51 Grafické vyhodnocení z 20 bodů

3. Grafické vyhodnocení z bodového měření při použití celkově 4 bodů a metody vyhodnocení element-minimum.



Obr. 52 Grafické vyhodnocení 4 body

Hodnoty vycházející z měření kruhovitosti vnitřního průměru jsou uvedeny v Tab. 4. Opět lze vidět rozdíl mezi naměřenými hodnotami a počtem bodů, kdy se snímač v případě bodových měření nemusel trefit do maximálních hodnot, a tudíž je nemohl zaznamenat. Při všech třech měřeních byla použita vyhodnocovací metoda element-minimum. Vměř v Tab. 4 opět znamená rychlost snímače při snímání bodu v mm/s.

Tab. 4 Naměřené hodnoty ke grafickým vyhodnocením (mm)

Č.	Měř. hod.	Tolerance	Počet bodů	Vměř	Poloměr sním.	Filtr	v/o
1	0,0429	0,0500	978	3	2,4998	Spline	50
2	0,0338	0,0500	20	-	2,4998	-	-
3	0,0204	0,0500	4	-	2,4998	-	-



### 7.8.3 Číselné výsledky z měření kruhovitosti vnitřního průměru

Protokol z měření kruhovitosti díry za použití různých strategií (označení jednotlivých strategií a měření viz Kapitola 6.6.1.)

		Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
a)	1)	 Prumer_17,5 Scan 17.4099	17.5000	0.1000	-0.1000	----  -0.0901
	2)	 Prumer_17,5 Scan Vepsana 17.3685	17.5000	0.1000	-0.1000	-0.0315 -0.1315
		 Kruhovitost 17,5 Scan filtr 50 0.0429	0.0000	0.0500		--- 0.0429
b)	1)	 Průměr_Kružnice 17,5 20P 17.4120	17.5000	0.1000	-0.1000	----  -0.0880
	2)	 Průměr_Kružnice 17,5 20P Vepsana 17.3799	17.5000	0.1000	-0.1000	-0.0201 -0.1201
		 Kruhovitost_Kružnice 17,5 20P 0.0338	0.0000	0.0500		--- 0.0338
c)	1)	 Průměr_Kružnice 17,5 4P 17.4118	17.5000	0.1000	-0.1000	----  -0.0882
	2)	 Průměr_Kružnice 17,5 4P Vepsana 17.3917	17.5000	0.1000	-0.1000	-0.0083 -0.1083
		 Kruhovitost_Kružnice 17,5 4P 0.0204	0.0000	0.0500		--- 0.0204

Obr. 53 Ukázka protokolu z měření kruhovitosti vnitřního průměru

Naměřené odchylky vnitřního průměru o velikosti 17,5 mm jsou zapsány v

Tab. 5. Byly použity strategie kruhová dráha a měření jednotlivých bodů. Vyhodnocovací metody byly element-gauss a element-vepsaný. Jmenovitý rozměr, od kterého se měřila odchylka byl průměr 17,5 mm.

Tab. 5 Naměřené hodnoty na kružnici s poloměrem 17,5 mm a tolerancí  $\pm 0,1$  (mm)

Strategie	Scanning, kruhová dráha		Jednotlivé body, 20 bodů		Jednotlivé body, 4 body	
	Element-gauss	Element-vepsaný	Element-gauss	Element-vepsaný	Element-gauss	Element-vepsaný
Max. naměřená odchylka	-0,08921	-0,12155	-0,08739	-0,11905	-0,0881	-0,10812
Min. naměřená odchylka	-0,08997	-0,1249	-0,08841	-0,11921	-0,09063	-0,10829
Průměrná odchylka	-0,08952	-0,12226	-0,08783	-0,11913	-0,0891	-0,10819

## 7.8.4 Měření kruhovitosti na vnějším průměru

Nastavení jednotlivých měření

a) Scanování bodů, strategie kruhová dráha:

1. metoda vyhodnocení element-gauss, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta,
2. metoda vyhodnocení element-opsaný, nízkopásmový filtr spline 50 v/ot, eliminace odlehlých hodnot vypnuta;

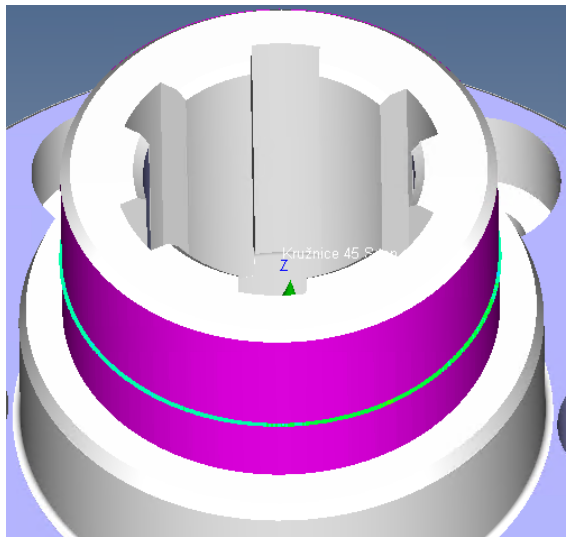
b) Snímání jednotlivých bodů, celkově 20 bodů, strategie kruhová dráha:

1. metoda vyhodnocení element-gauss, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta,
2. metoda vyhodnocení element-opsaný, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta;

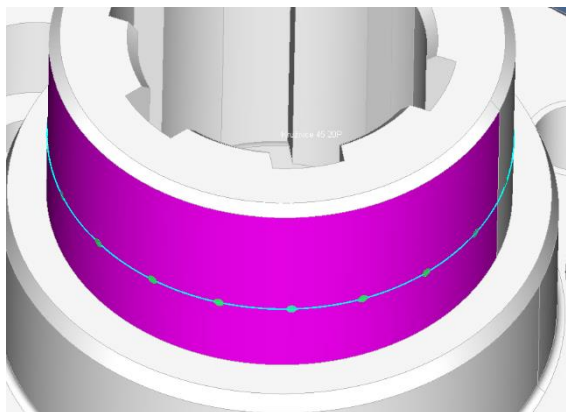
c) Snímání jednotlivých bodů, celkově 4 body, strategie kruhová dráha:

1. metoda vyhodnocení element-gauss, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta,
2. metoda vyhodnocení element-opsaný, filtr žádný, eliminace odlehlých hodnot vypnuta.

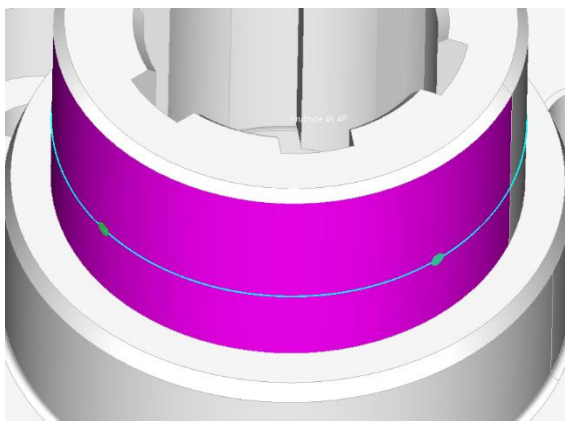
Dráha snímače při jednotlivých měření:



Obr. 54 Schéma dráhy měření scanningem



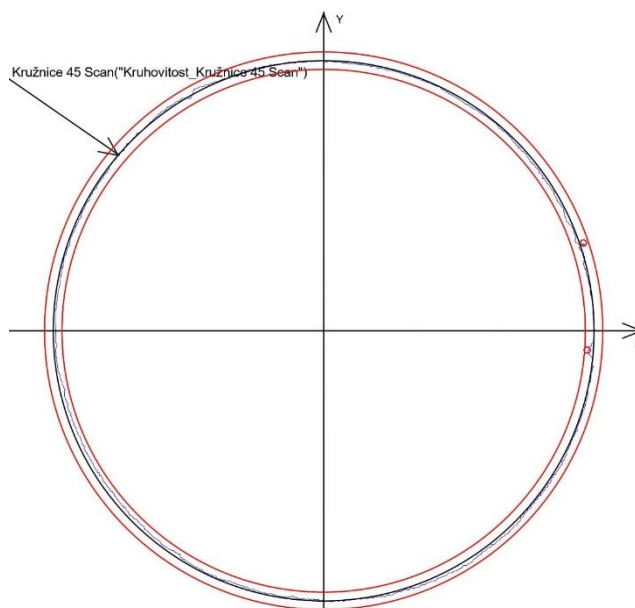
Obr. 55 Schéma měření dráhy bodově, 20 bodů



Obr. 56 Schéma měření dráhy bodově, 4 body

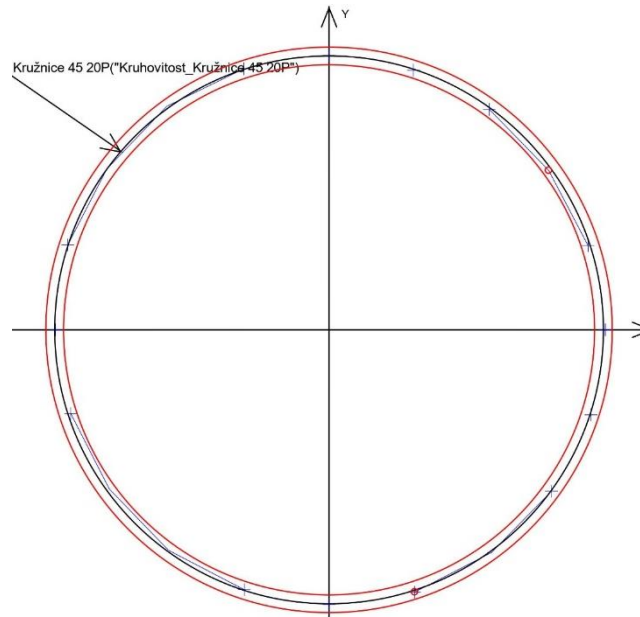
### 7.8.5 Grafické vyhodnocení kruhovitosti na vnějším průměru

1. Grafické vyhodnocení z měření scanningem při použití metody vyhodnocení element-minimum.



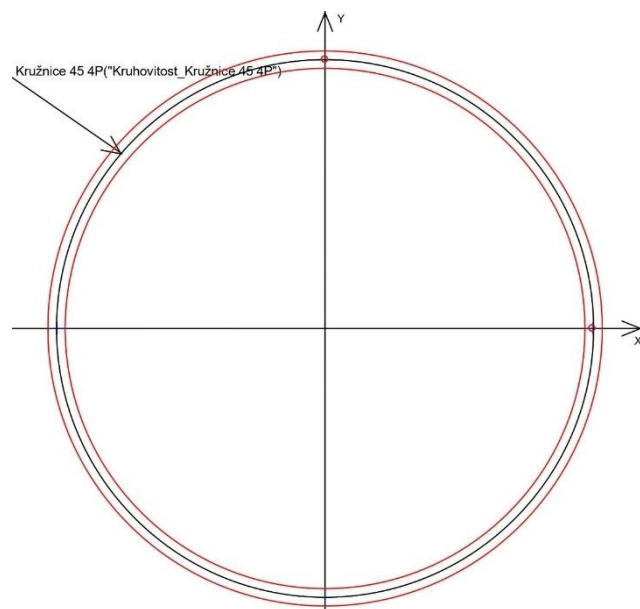
Obr. 57 Grafické vyhodnocení scanningem

2. Grafické vyhodnocení z bodového měření 20 body za použití vyhodnocovací metody element-minimum.



Obr. 58 Grafické vyhodnocení 20 body

3. Grafické vyhodnocení z bodového měření 4 body a použití vyhodnocovací metody element-minimum.



Obr. 59 Grafické vyhodnocení 4 body

Naměřené hodnoty z kruhovitosti vnějšího průměru jsou zapsány do Tab. 6. V tomto případě lze vidět velký číselný rozdíl mezi měřeními Č. 1 a Č. 3. Příčinou je počet bodů, kdy při malém počtu bodů opět neměl snímač příliš velkou šanci zaznamenat maximální nebo minimální hodnotu na daném průměru.

Tab. 6 Naměřené hodnoty ke grafickému vyhodnocení (mm)

Č.	Měř. hod.	Tolerance	Počet bodů	Vměř	Poloměr sním.	Filtr	v/o
1	0,0057	0,0100	985	5	2,4998	Spline	50
2	0,0028	0,0100	20	-	2,4998	-	-
3	0,0006	0,0100	4	-	2,4998	-	-

## 7.8.6 Číselné výsledky z měření kruhovitosti vnějšího rozměru

Protokol z měření kruhovitosti válce za použití různých strategií (označení jednotlivých strategií a měření viz Kapitola 6.6.4)

		Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchyška
1)	a)	 Průměr_Kružnice 45 Scan 45.0154	45.0000	0.0180	0.0020	--- 0.0154
	b)	 Průměr_Kružnice 45 Scan Opsana 45.0198	45.0000	0.0180	0.0020	0.0018 0.0198
		 Kruhovitost_Kružnice 45 Scan 0.0057	0.0000	0.0100		--- 0.0057
2)	a)	 Průměr_Kružnice 45 20P 45.0155	45.0000	0.0180	0.0020	--- 0.0155
	b)	 Průměr_Kružnice 45 20P Opsana 45.0180	45.0000	0.0180	0.0020	--- 0.0180
		 Kruhovitost_Kružnice 45 20P 0.0028	0.0000	0.0100		-- 0.0028
3)	a)	 Průměr_Kružnice 45 4P 45.0158	45.0000	0.0180	0.0020	--- 0.0158
	b)	 Průměr_Kružnice 45 4P Opsana 45.0164	45.0000	0.0180	0.0020	--- 0.0164
		 Kruhovitost_Kružnice 45 4P 0.0006	0.0000	0.0100		- 0.0006

Obr. 60 Ukázka protokolu z měření kruhovitosti vnějšího průměru

Naměřené odchylky z měření kruhovitosti vnějšího průměru jsou zapsány v Tab. 7. V tomto případě byly použity vyhodnocovací metody element-gauss a element-opsaný. Rozměr od, kterého se měřila odchylka byl průměr 45 mm.

Tab. 7 Naměřené hodnoty na kružnici s průměrem 45 mm s horní tolerancí 0,018 a dolní tolerancí 0,002 (mm)

Strategie	Scanning, kruhová dráha		Jednotlivé body, 20 bodů		Jednotlivé body, 4 body	
	Element-gauss	Element-opsaný	Element-gauss	Element-vepsaný	Element-opsaný	Element-opsaný
Max. naměřená odchylka	0,015493	0,019702	0,015691	0,018368	0,015894	0,016467
Min. naměřená odchylka	0,015454	0,019641	0,015458	0,017874	0,015771	0,016441
Průměrná odchylka	0,01547	0,019669	0,015532	0,017996	0,015837	0,016454

## 7.9 Vyhodnocení výsledků

Z výsledků měření vyplynulo, jak moc strategie ovlivnila měření. Nejpatrnější je to z grafických protokolů, kde v závislosti na počtu bodů můžeme vidět rovinnost plochy. Nebo v případě vnitřního, vnějšího průměru kruhovitosti. V případě malého počtu bodů nelze ani vhodně posoudit, zda daná plocha vyhovuje předepsaným tolerancím. Je to z toho důvodu, že jsme při měření nemuseli narazit na maximum nebo minimum, nevíme tudíž, jestli je tam skutečně nějaká část, která nevyhovuje předepsaným rozměrům. Konkrétním číselným příkladem je měření kruhovitosti vnějšího průměru při použití metody vyhodnocení element-minimum, kdy nám vyšla pro 4 body měřená hodnota 0,0006 mm a pro 985 bodů 0,0057 mm.

Dalším důležitým poznatkem z měření je zvolená metoda vyhodnocení. Jak jsem již psal v předchozích kapitolách, použili jsme celkově pět metod vyhodnocení, a to element-gauss, vepsaný, opsaný, vnější tangenciální a element-minimum, který jsem použil v případě grafických protokolů. V případě měření kruhovitosti můžeme pozorovat, že daný element při použití gausse vyhovuje tolerancím, zatímco v případech použití element-vepsaný anebo element-opsaný předepsaným tolerancím naopak nevyhovuje.

Aby bylo možné určit správnou vyhodnocovací metodu a vhodnou strategii měření, je třeba vědět, k čemu bude měřená součást sloužit a jak vlastně funguje. Také je zapotřebí znát, jak jednotlivé vyhodnocovací metody fungují, a v případě potřeby zapnout eliminaci odlehlých hodnot.



## 8. Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na strategie extrahovaných bodů a jejich vlivy na výsledek měření. V první části této práce jsem se zabýval souřadnicovou měřicí technikou a jejím rozdělením dle různých kritérií, konkrétně podle snímacího systému, a to na dotykové a bezdotykové snímací systémy. Ty jsem poté hlouběji popsal a dále rozčlenil na další možné kategorie. Následně jsem obecně popsal faktory ovlivňující přesnost měření. V navazující kapitole, o strategiích měření, jsem popsal měřené elementy a dostupné strategie pro měřené elementy v softwaru Calypso. Dále jsem detailněji rozebral možné metody vyhodnocení a filtry.

Ve druhé části této práce jsem popsal, jak jsem postupoval při měření na souřadnicovém měřicím stroji a co vše je třeba udělat před začátkem měření. Dále jsem definoval kruhovitost a rovinnost pro lepší pochopení praktické části. Také jsem vypsals použité strategie při měření a číselně i graficky vyhodnotil výsledky měření.

Z praktické části plyne zásadní poznatek, že strategie je mnohem důležitější než samotná měřicí technika. To můžeme vidět například na grafických výsledcích, kde je například odchylka minimální, a to z důvodu zvolení malého počtu bodů. Dalším faktorem zásadně ovlivňujícím výsledek měření je metoda vyhodnocení. Vyplývá to z číselných výsledků měření kruhovitosti na vnějším průměru, kdy při použití určité metody vyhodnocení vyšly hodnoty v předepsané toleranci, ale při použití jiné metody už ne.

## Použité informační zdroje:

- [1] BERÁNEK, Libor. Úvod do metrologie. In: *Strojírenská metrologie*. ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE.
- [2] FLACK, David. *Measurement Good Practice Guide No. 43* [online]. 2014. Dostupné z: [https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg43\\_cmm](https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg43_cmm)
- [3] WECKENMANN, A., T. ESTLER, G. PEGGS a D. MCMURTRY. Probing Systems in Dimensional Metrology. *CIRP Annals* [online]. 2004, **53**(2), 657–684. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60034-1
- [4] KOPTIŠ, Michal. *Využití snímacího systému laserscanneru pro aplikace reverzního inženýrství* [online]. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Strojní fakulta. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66290/F2-DP-2016-Koptis-Michal-diplomovaprace\\_MichalKoptis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66290/F2-DP-2016-Koptis-Michal-diplomovaprace_MichalKoptis.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [5] *Contact and optical sensors* [online]. B.m.: ZEISS. Dostupné z: [https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/E906E71D828B06FEC1257A45002E8D95/\\$FILE/ZEISS\\_Metrology\\_Sensors\\_EN\\_60\\_020\\_0001II.pdf](https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/E906E71D828B06FEC1257A45002E8D95/$FILE/ZEISS_Metrology_Sensors_EN_60_020_0001II.pdf)
- [6] PURKART, Martin. *Využití souřadnicové měřicí techniky v oblasti kontroly kvality* [online]. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Strojní fakulta. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80465/F2-BP-2018-Purkart-Martin-Bakalarska%20prace%20-%20Martin%20Purkart.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [7] HP-C-VE Vision Sensor. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. [vid. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/multisensor-and-optical-cmms/hpcve-vision-sensor>
- [8] *08 - Pasivní triangulace* [online]. Dostupné z: [http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Exercise08/08\\_Pasivni%20triangulace.pdf](http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Exercise08/08_Pasivni%20triangulace.pdf)
- [9] *02 - Aktivní triangulace* [online]. Dostupné z: [http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Exercise02/02\\_Aktivni\\_triangulace.pdf](http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Exercise02/02_Aktivni_triangulace.pdf)
- [10] LI, Baoshun, Qixin CAO, Lei ZHANG, Jay LEE, Chuntao LENG a Yaoliang LI. 3D Surface Modeling and Measuring System for Pneumatic Caisson. *Journal of Computing in Civil Engineering* [online]. 2010, **24**(3), 223–240. ISSN 0887-3801, 1943-5487. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000023

- [11] *Digitalizace - její princip a rozdělení* [online]. [vid. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [12] *Senzor pro přesnou a komplexní inspekci či reverzní inženýrství* [online]. [vid. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/senzor-pro-presnou-a-komplexni-inspekci-ci-reverzni-inzenyrstvi.html>
- [13] *ZEISS T-SCAN* [online]. [vid. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/optical-systems/3d-scanning/zeiss-t-scan.html>
- [14] SKOUPÝ, Pavel. *3D OPTICKÉ MĚŘÍCÍ A SKENOVACÍ SYSTÉMY PROSTROJÍRENSTVÍ* [online]. Brno, nedatováno. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: [http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/118/Bakalarska\\_prace\\_Skoupy\\_Pavel.pdf/](http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/118/Bakalarska_prace_Skoupy_Pavel.pdf/)
- [15] PALÁSEK, Vítězslav. *SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE (CMM) S OPTICKÝM SNÍMACÍM SYSTÉMEM A OPTICKÉ CMM* [online]. Brno, nedatováno [vid. 2020-07-06]. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/30306448>
- [16] *ZEISS COMET* [online]. [vid. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/optical-systems/3d-scanning/zeiss-comet.html>
- [17] *UMK 1318* [online]. 2018 [vid. 2020-07-24]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=UMK\\_1318&oldid=16738639](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=UMK_1318&oldid=16738639)
- [18] SMUTNÝ, Dominik. *Možnosti využití chromatického senzoru bílého světla při rozměrové kontrole kvality* [online]. Praha, nedatováno. ČVUT v Praze, Strojní fakulta. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80862/F2-BP-2018-Smutny-Dominik-BP-Smutny.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [19] KOTRČ, Jiří. *VYUŽITÍ CHROMATICKÉHO SENZORU BÍLÉHO SVĚTLA V RÁMCI KONTROLY KVALITY* [online]. Praha, nedatováno. ČVUT v Praze, Strojní fakulta. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80546/F2-DP-2018-Kotrc-Jiri-Vyuziti%20chromatickeho%20senzoru%20bileho%20svetla%20v%20ramci%20kontroly%20kvality.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [20] *ZEISS DotScan - More light on the subject* [online]. [vid. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/optical-sensors-cmm/dotscan.html#recommendations>
- [21] WECKENMANN a M. KNAUER. *doi:10.1016/S0007-8506(07)62872-8 | Elsevier Enhanced Reader* [online]. [vid. 2020-07-09]. Dostupné z: [doi:10.1016/S0007-8506\(07\)62872-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62872-8)

- [22] MEREDITH, David R a Irelan PLACE. *VIBRATION ISOLATION TREATMENTS FOR COORDINATE MEASURING MACHINES* [online]. Dostupné z: <https://kineticsnoise.com/downloads/analysis/vitcmm.pdf>
- [23] METROLOGY, ZEISS Academy. *Cookbook Measuring Strategies for tactile Coordinate Metrology* [online]. B.m.: Carl Zeiss AG, 2017. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=igUmDwAAQBAJ&printsec=copyright&redir\\_esc=y#v=onepage&q=strategy&f=false](https://books.google.cz/books?id=igUmDwAAQBAJ&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q=strategy&f=false)
- [24] *Calypso Basics-Operatin Instructions* [online]. 24. květen 2013. Dostupné z: <https://www.ysao.fi/loader.aspx?id=954424c0-cf40-45f2-8a94-c0ee145de2f6>
- [25] PETŘÍKA, Milan. *Analýza použití vybraných upínacích systémů pro měření na CMM* [online]. Praha, nedatováno. ČVUT v Praze, Strojní fakulta. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63667/F2-DP-2015-Petrik-Milan-Diplomova%20prace\\_Milan\\_Petrik\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63667/F2-DP-2015-Petrik-Milan-Diplomova%20prace_Milan_Petrik_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [26] MIZERA, Ondřej. *Vliv vybraných parametrů měření na odchylku kruhovitosti* [online]. V Ostravě, nedatováno. VŠB Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: [http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117524/MIZ0011\\_FS\\_N2301\\_2303T002\\_20\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117524/MIZ0011_FS_N2301_2303T002_20_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [27] KUBÁTOVÁ, Dana. *Softwarové filtry drsnosti povrchu* [online]. V Plzni, nedatováno. Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/33626/1/Dis.%20P.%20final%20Kubatova.pdf>
- [28] ZELINKA, Jan. *Vliv velikosti dotyku na hodnocení odchylky kruhovitosti pro odlišné drsnosti povrchu* [online]. V ostravě, nedatováno. Vysoká škola Báňská –Technická univerzita OstravaFakulta strojní. Dostupné z: [http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129461/ZEL0065\\_FS\\_N2301\\_2303T002\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=n](http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129461/ZEL0065_FS_N2301_2303T002_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=n)
- [29] TOMÁŠEK, Vít. *Hodnocení geometrie součástí hřídelového typu* [online]. V Ostravě, nedatováno. Technická univerzita OstravaFakulta strojní. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117491/TOM179\\_FS\\_N2301\\_2303T002\\_20\\_2017.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117491/TOM179_FS_N2301_2303T002_20_2017.pdf?sequence=1)
- [30] *ISO 1101:2017, Geometrical product specifications (GPS)— Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://geo-dim-tol.ir/files/iso1101.pdf>

## Seznam obrázků:

Obr. 1 Portálové CMM UPMC 850 .....	11
Obr. 2 Rozdělení CMM.....	11
Obr. 3 Rozdělení snímacích systémů [1] .....	12
Obr. 4 Konstrukce snímacího systému [4] .....	13
Obr. 5 Schéma snímacího systému [2].....	13
Obr. 6 Porovnání výstupů systému [3].....	14
Obr. 7 Skenovací snímací systém Zeiss [2].....	14
Obr. 8 Otočná hlava VAST XXT [5] .....	15
Obr. 9 HP-C-VE Vision Sensor [7].....	16
Obr. 10 Schéma měření laser scannerem [10] .....	17
Obr. 11 T-SCAN [13].....	18
Obr. 12 Schéma měření pruhovou projekcí [15] .....	18
Obr. 13 Zeiss COMET [16] .....	19
Obr. 14 Fotogrammetrická kamera UMK 1318 [17] .....	20
Obr. 15 Schéma chromatického senzoru bílého světla [19].....	21
Obr. 16 Zeiss DotScan [20] .....	21
Obr. 17 Rozklad bílého světla [19].....	21
Obr. 18 Schéma uložení CMM [16] .....	22
Obr. 19 Minimum potřebných bodů pro sestavení geometrického elementu [24].....	24
Obr. 20 Schéma korekce.....	24
Obr. 21 Schéma elementu kružnice [24].....	25
Obr. 22 Schéma elementu rovina [24] .....	25
Obr. 23 Schéma elementu 2D přímky[24].....	26
Obr. 24 Schéma elementu válce[24].....	27
Obr. 25 Schéma elementu kužel [24].....	28
Obr. 26 Schéma strategie pro bod v Calypso .....	30
Obr. 27 Schéma strategie kružnice v Calypso .....	30
Obr. 28 Schéma strategie pro rovinu.....	31
Obr. 29 Schéma strategie pro válec .....	31
Obr. 30 Schéma strategie pro kužel .....	32
Obr. 31 Schéma strategie pro kouli .....	32
Obr. 32 Schéma metody vyhodnocení v softwaru Calypso u elementu kružnice .....	33
Obr. 33 Metody vyhodnocení [24].....	35
Obr. 34 Propustnost filtrů [24].....	37
Obr. 35 Upnutí součásti typu příruba na Alufix od firmy Witte .....	38
Obr. 36 Elementy použité k vyrovnání vyznačené fialově .....	39
Obr. 37 Zobrazení tolerančního pole u rovinnosti [30] .....	40
Obr. 38 Model součásti + fialově vyznačena část, kde se měřila rovinnost.....	40
Obr. 39 Schéma měření scanningem, strategie kruhovou dráhou .....	42
Obr. 40 Schéma měření scanningem, strategie polylinie .....	42
Obr. 41 Schéma měření bodově, strategie kruhová dráha.....	42
Obr. 42 Grafické vyhodnocení z měření scanningem .....	43
Obr. 43 Grafické vyhodnocení z měření polylinie .....	43
Obr. 44 Grafické vyhodnocení z měření 12 body.....	44
Obr. 45 Ukázka protokolu měření rovinnosti (mm).....	45
Obr. 46 Toleranční pole kruhovitosti [30] .....	46
Obr. 47 Schéma měření scanningem .....	47
Obr. 48 Schéma měření bodově, 20 bodů .....	48

Obr. 49 Schéma měření bodově, 4 body .....	48
Obr. 50 Grafické vyhodnocení scanningem .....	49
Obr. 51 Grafické vyhodnocení z 20 bodů .....	49
Obr. 52 Grafické vyhodnocení 4 body .....	50
Obr. 53 Ukázka protokolu z měření kruhovitosti vnitřního průměru.....	51
Obr. 54 Schéma dráhy měření scanningem .....	53
Obr. 55 Schéma měření dráhy bodově, 20 bodů .....	53
Obr. 56 Schéma měření dráhy bodově, 4 body .....	54
Obr. 57 Grafické vyhodnocení scanningem .....	54
Obr. 58 Grafické vyhodnocení 20 body .....	55
Obr. 59 Grafické vyhodnocení 4 body .....	55
Obr. 60 Ukázka protokolu z měření kruhovitosti vnějšího průměru .....	56

## **Seznam tabulek**

Tab. 1 Směrné hodnoty pro nastavení filtru a počet bodů pro kontrolu kruhovitosti .....	36
Tab. 2 Naměřené hodnoty ke grafickým vyhodnocením z měření rovinnosti (mm) .....	44
Tab. 3 Naměřené hodnoty roviny s tolerancí $\pm 0,05$ (mm) .....	46
Tab. 4 Naměřené hodnoty ke grafickým vyhodnocením (mm).....	50
Tab. 5 Naměřené hodnoty na kružnici s poloměrem 17,5 a tolerancí $\pm 0,1$ (mm) .....	52
Tab. 6 Naměřené hodnoty ke grafickému vyhodnocení (mm).....	56
Tab. 7 Naměřené hodnoty na kružnici s průměrem 45 mm s horní tolerancí 0,018 a dolní tolerancí 0,002 (mm).....	57