



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE**

Metody výpočtu geometrických prvků a
vliv jejich volby na výsledky měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Patrik Fiala
Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fiala** Jméno: **Patrik** Osobní číslo: **501405**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací 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:

Metody výpočtu geometrických prvků a vliv jejich volby na výsledky měření

Název bakalářské práce anglicky:

Methods of calculating geometric elements in coordinate metrology and their influence on measurement results

Pokyny pro vypracování:

Princip souřadnicového měření a základní dělení technologií.
Strategie měření při kontrole dílů na CMM.
Metody výpočtu základních geometrických prvků v návaznosti na systém ISO GPS.
Vyhodnocení vlivu metody výpočtu základních geometrických prvků na výsledek měření.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek, 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: **31.03.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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 tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum:

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D., za jeho ochotný přístup a odborné vedení mé práce, dále také za sdílení poznatků z oblasti metrologické praxe a výpomoci s měřením na souřadnicovém měřicím stroji.

Anotace

Tato práce se zabývá vlivem volby metody filtrace a výpočtu geometrických prvků a jejím vlivem na výsledky měření. V prvních kapitolách je stručně popsán systém norem ISO GPS a přiblížena problematika geometrických tolerancí. V dalších kapitolách je popsán princip souřadnicového měření, typy souřadnicových měřicích strojů a typy měřicích senzorů a jejich konstrukce. Následuje popis jednotlivých vlivů na nejistotu měření a její kvantifikaci pomocí koeficientů způsobilosti. Dále je popsán postup měření na souřadnicovém měřicím stroji a blíže vysvětlena strategie měření a vliv volby jejích parametrů na měření, v této kapitole jsou popsány jednotlivé metody výpočtu geometrických prvků. V experimentální části je měřen ukázkový díl a je zpracován vliv filtrace a volby metody výpočtu geometrických prvků na měření průměru, kruhovitosti a geometrické tolerance polohy.

Klíčová slova

System ISO GPS, souřadnicové měřicí stroje, strategie měření na CMM, filtrování v ISO GPS, metody vyhodnocení, způsobilost měření

Annotation

This thesis deals with the influence of the choice of the filtering method and the calculation of geometrical elements and its effect on the measurement results. In the first chapters, the ISO GPS standards system is briefly described and geometric tolerances is introduced. The next chapters describe the principle of coordinate measurement, types of coordinate measuring machines and types of measuring sensors and their construction. This is followed by a description of the various influences on the measurement uncertainty and its quantification by capability coefficients. Furthermore, the procedure of measurement on a coordinate measuring machine is described. The measurement strategy and the influence of the choice of its parameters on the measurement is explained in more detail. In the experimental section, a sample part is measured and the influence of filtering and the choice of geometric element calculation method on the measurement of diameter, circularity and geometric position tolerance is discussed.

Keywords

ISO GPS system, coordinate measuring machines, CMM measurement strategy, filtration in ISO GPS, methods of evaluation, measuring capability

Seznam zkratek

ZKRATKA	VYSVĚTLENÍ
2D	Dvojměrný prostor
CEN	Evropský výbor pro normalizaci (z fr. Comité Européen de Normalisation)
CENELEC	Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice (z fr. Comité Européen de Normalisation Électrotechnique)
CMM	Souřadnicový měřicí stroj (Coordinate Measuring Machine)
ČAS	Česká agentura pro standardizaci
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma (původně československá státní norma)
EN	Evropská norma
GC	Metoda minimální zóny
GG	Metoda nejmenších čtverců
GPS	Geometrické specifikace produktu (Geometrical Product Specification)
GT	Geometrická tolerance
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci (International Organization for Standardization)
ITP	Metoda vnitřního tečného prvku (rovinný prvek) (Inner Tangential Plane)
LSC	Metoda nejmenších čtverců (kruhový prvek) (Least Squares Circle)
LSP	Metoda nejmenších čtverců (rovinný prvek) (Least Squares Plane)
MCC	Metoda minimálního opsaného rozměru (kruhový prvek) (Minimum Circumscribed Circle)
MES	Výrobní informační systém (Manufacturing Execution System)
MIC	Metoda maximálního vepsaného rozměru (kruhový prvek) (Maximum Inscribed Circle)
MZC	Metoda minimální zóny (kruhový prvek) (Minimum Zone Circle)
MZP	Metoda minimální zóny (rovinný prvek) (Minimum Zone Plane)
NC	Číslicové řízení (Numerical control)
OTP	Metoda vnějšího tečného prvku (rovinný prvek) (Outer Tangential Plane)
TC	Technická komise (Technical Committee)
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
UPR	Undulations per revolution
VD	Výkresová dokumentace

Seznam použité symboliky

SYMBOL	[JEDNOTKA]	VYSVĚTLENÍ
λ_c	[mm]	základní délka, parametr filtrace
μ	[mm]	střední hodnota procesu
σ	[mm]	směrodatná odchylka
C_p	[-]	koeficient způsobilosti procesu
C_{pk}	[-]	kritický koeficient způsobilosti procesu
USL	[mm]	horní mezní rozměr tolerance
LSL	[mm]	dolní mezní rozměr tolerance
T	[mm]	šířka tolerance
C_g	[-]	koeficient způsobilosti měření
C_{gk}	[-]	kritický koeficient způsobilosti měření
X_r	[mm]	referenční hodnota
\bar{x}	[mm]	aritmetický průměr naměřených hodnot

Obsah

1 Úvod	9
2 ISO GPS	10
2.1 Geometrické tolerance	11
3 Souřadnicové měřicí stroje	15
3.1 Princip souřadnicového měření	15
3.2 Rozdělení strojů	16
3.2.1 Kartézské	16
3.2.2 Nekartézské	18
3.3 Senzory	19
3.3.1 Kontaktní	19
3.3.2 Bezkontaktní	20
4 Variabilita měření	22
4.1 Parametry ovlivňující variabilitu měření	22
4.2 Hodnocení způsobilosti	24
5 Postup měření	27
5.1 Analýza výkresové dokumentace	27
5.2 Kvalifikace senzoru	27
5.3 Upnutí a vyrovnání součásti	28
5.4 Extrakce bodů a definování geometrických prvků	29
5.5 Publikace výsledků	29
6 Strategie měření	30
6.1 Dráha	30
6.2 Hustota bodů	31
6.3 Rychlost snímání	32
6.4 Filtrace naměřených bodů	33
6.5 Metody výpočtu	35
7 Experimentální část	38
7.1 Upnutí, vyrovnání, popis měření	39
7.2 Rozměr $\varnothing 35$ mm, $\varnothing 14$ mm	41
7.3 Kruhovitost	47
7.4 Poloha roviny	50
8 Závěr	53

1 Úvod

Vyráběné součásti nikdy nemohou odpovídat ideálním rozměrům a tvarům daným výkresovou dokumentací. Musí ale splňovat určité konstrukční požadavky na smontovatelnost, funkčnost atd. Pro kvantifikaci a možnost kontroly těchto požadavků se používají toleranční pole a tolerance. Tolerance mohou být délkové, úhlové, geometrické (úchylky tvaru, umístění a házení) a drsnosti povrchu.

Úkolem metrologie je zajistit kontrolu rozměrových a tvarových charakteristik vyrobené součásti, aby odpovídaly tolerancím ve výkresové dokumentaci. Princip spočívá v získávání co nejvíce matematických charakteristik o součásti a jejich následné vyhodnocení a porovnání s výkresovou dokumentací.

V první kapitole této práce bude popsán systém technické normalizace a systém norem ISO GPS. Přiblížena bude problematika geometrických tolerancí a blíže popsány geometrické tolerance kruhovitosti a polohy pro účely experimentální části práce. V další kapitole bude objasněn princip souřadnicového měření. Bude popsán potřebný hardware k provedení měření, tedy souřadnicový měřicí stroj a senzorika, stručně historie vývoje, jejich princip, typy, výhody, nevýhody a použití.

V dalších kapitolách se tato práce bude věnovat postupu měření, jednotlivým krokům a jejich provedení. Bude popsána problematika strategie měření, jejich parametrů a vliv volby těchto parametrů na variabilitu a výsledky měření, zejména vliv volby metody výpočtu geometrických prvků a vliv filtrace na výsledky. Vliv volby parametrů strategie měření na variabilitu měření bude reprezentován koeficienty způsobilosti C_g a C_{gk} , bude popsána jejich definice a výpočet.

V experimentální části práce bude měřen zvolený demonstrační díl, skládající se z několika geometrických prvků. Na dílu bude měřena soustružená vnější válcová plocha po kruhové dráze, dále stejným principem vrtaná díra. Na těchto kruhových prvcích bude vypočítán jejich rozměr a kruhovitost. Pro výpočet rozměru se použijí tři různé metody výpočtu, s filtrací a bez, s eliminací odlehlých hodnot a bez a bude demonstrován vliv metody výpočtu na výsledky měření. Při měření kruhovitosti bude demonstrován vliv filtrace na její výsledky. V neposlední řadě budou na šestihranném prvku měřeny dvě protilehlé roviny, jedna bude měřena po rastrové dráze a použita jako základna pro geometrickou toleranci polohy, která se bude hodnotit na protilehlé rovině měřené čtyřmi body. První rovina bude vypočítána pomocí dvou různých metod výpočtu, s použitím i nepoužitím filtrace a eliminace odlehlých hodnot.

Měření každého prvku bude provedeno desetkrát, výsledná hodnota bude aritmeticky zprůměrována. Vliv metod výpočtu a filtrace bude demonstrován na jednotlivých rozměrech, směrodatných odchylkách deseti měření a pomocí koeficientu způsobilosti C_g .

2 ISO GPS

Existují tři úrovně norem, normy mezinárodní (ISO), evropské (EN) a národní (ČSN). Většina českých státních norem je přejímána a překládána z norem EN a ISO.

ISO je mezinárodní nevládní organizace fungující od roku 1947 sídlící v Ženevě spravující mezinárodní technické normy. Organizace má 167 členů jimiž jsou zástupci jednotlivých státních normalizačních institucí. ISO se skládá z přibližně 250 technických komisí, která je každá zodpovědná za určitou oblast, pro kterou normy tvoří. Technická komise ISO se skládá z několika odborníků v daném oboru.[1]

Jedna z největších technických komisí je komise TC 213 (Dimensions and geometrical product specifications and verification). Spolupracují v ní odborníci z 26 zemí světa a hlavní sídlo má v Británii. Je zodpovědná za 144 zatím publikovaných norem a momentálně (2023) dalších 23 vyvíjí. Je zodpovědná za normy spadající do systému ISO GPS.

Na evropské úrovni spravuje technické normy Evropský výbor pro normalizaci (CEN), případně Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice (CENELEC).

V české republice dříve spravoval české státní normy Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), který je podřízen ministerstvu průmyslu, v roce 2017 zřídil státní příspěvkovou organizaci se jménem Česká agentura pro standardizaci a od roku 2018 tato organizace se zkratkou ČAS přebrala po ÚNMZ tvorbu, správu a distribuci ČSN norem.

Většina ČSN norem jsou přejaté ISO a EN normy, značené ČSN EN nebo ČSN EN ISO podle toho, jakou normu přejímají. Toto přejímání evropských a mezinárodních norem a jejich začleňování do ČSN se nazývá harmonizace norem. Čistě ČSN normy lze vytvářet jen v oblastech, ve kterých neexistují EN nebo ISO normy. Všichni členové EU a tedy i ČR mají povinnost přejímat evropské normy. Pro mezinárodní ISO normy tato povinnost neplatí.

ISO GPS nebo také Geometrical Product Specification je soubor norem zajišťující jak definici geometrických specifikací součástí při jejím návrhu a výrobě, tak i požadavky na metody jejich ověření.[2]

V normách ISO GPS existuje několik základních principů platných v celém systému a platí, že jakmile je ve výkresové dokumentaci použita jedna část ISO GPS, platí automaticky celý systém. Výjimkou mohou být specifické podnikové nebo národní normy, pokud jsou ve výkresové dokumentaci explicitně zapsány. Základní principy systému ISO GPS jsou popsány v normě ISO 8015.[3]

Princip hierarchie norem

Normy v systému ISO GPS jsou hierarchicky seřazeny do čtyř skupin: základní, globální, všeobecné a doplňkové. Pravidla norem spadajících do hierarchicky vyšší skupiny platí ve

všech normách všech skupin postavených níže. Výjimkou jsou pravidla v normách nižších úrovní specifikovaná přesněji, která si mohou rozporovat s pravidly ve výše postavené normě, poté mohou platit přesnější pravidla z normy spadající do níže postavené skupiny.[3]

Princip konečného výkresu

Tento princip zajišťuje, že všechny požadavky na součást uvedené ve výkresové dokumentaci musí být indikovány použitím symbolů platných a popsanych v ISO GPS, pak mohou být uplatněny. Požadavky neuvedené na výkrese nemohou být uplatněny. Také platí základní princip systému a to, že použitím části ISO GPS automaticky platí celý systém norem.[3]

Princip prvku

Princip prvku zajišťuje, že každá jedna specifikace použitá na prvek platí pro celý tento prvek a zároveň každá specifikace platí pouze pro jeden prvek nebo vztah mezi nimi. Prvkem se rozumí část součásti omezená hranami nebo náhlými změnami povrchu. V případě nutnosti popisu pouze části prvku je nutné tuto část přímo vymeziť danou specifikací.[3]

Princip nezávislosti

Podle tohoto principu musí být každá specifikace vyhodnocena nezávisle na ostatních specifikacích. Výjimku tvoří speciálně indikované specifikace popsane v daných normách.[3]

Výchozí princip

Tento princip stanovuje použití výchozích operátorů specifikace v případě, že není ve výkresové dokumentaci uveden speciální operátor specifikace.

Princip referenční podmínky

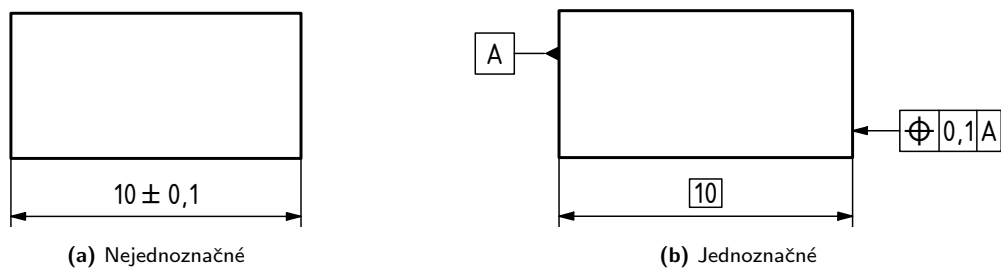
Všechny specifikace uvedené na výkrese platí za referenčních podmínek prostředí, což znamená za teploty 20 °C, jak je uvedeno v ISO 1. Dále stanovuje, že obrobek nesmí být znečištěn a případné odchylky od základních referenčních podmínek lze uvést na výkrese.[3]

2.1 Geometrické tolerance

Použití geometrických tolerancí je výhodné v případech, kdy stávající specifikaci prvku nelze jednoznačně interpretovat. V případě součásti tvaru kvádrů s předepsaným rozměrem pomocí délkové kóty, tento rozměr se vyhodnotí jako rozměr mezi dvěma body. Obě stěny kvádrů, pro které je rozměr předepsán, ale na reálné součásti nebudou dokonale rovinné, ani se sebou rovnoběžné. To může způsobit vyhodnocení rozměru za vyhovující i v případě,

že některé měření nepostihnuté body rozměru nevyhovují. Kótou není předepsáno kolik bodů měřit nebo kde je měřit.[4]




















V případě použití geometrických tolerancí bude jedna stěna jako základna, na druhou se předepíše geometrická tolerance polohy a rozměr mezi nimi jako teoreticky exaktní rozměr. V tomto případě je jasně specifikováno, že všechny naměřené body na stěně musí spadat do tolerančního pole vymezeného dvěma rovinami o dané délce a poloze. Rozměr je tedy jednoznačně specifikován a nemůže dojít k chybnému určení součásti jako vyhovující, ačkoli by v reálném provozu nemusela fungovat.[4]



Obr. 1: Příklad jednoznačného a nejednoznačného tolerování na výkrese

Geometrické tolerance se též označují jako geometrické specifikace, případně zkratkou GT. Geometrické tolerance se dělí na GT tvaru, GT orientace a umístění a GT házení.

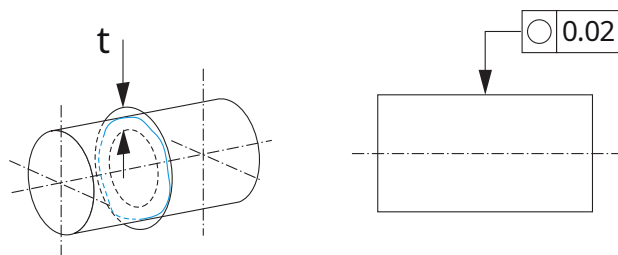
Tabulka 1: Geometrické tolerance přehled.[5][6]

TVAR	Přímost	
	Rovinnost	
	Kruhovitost	
	Válcovitost	
	Profil čáry	
	Profil povrchu	
ORIENTACE	Rovnoběžnost	
	Kolmost	
	Sklon	
	Profil čáry	
	Profil povrchu	
UMÍSTĚNÍ	Poloha	
	Soustřednost	
	Souosost	
	Souměrnost	
	Profil čáry	
	Profil povrchu	
HÁZENÍ	Kruhové	
	Celkové	

Pro účely experimentální části práce bude blíže popsána pouze GT kruhovitosti a GT polohy.

Geometrická tolerance kruhovitosti

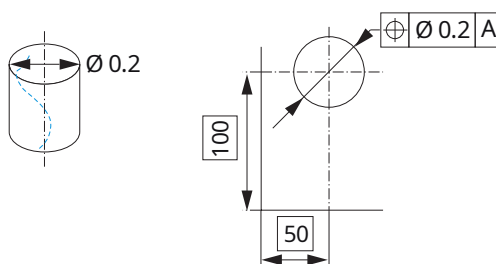
Geometrická tolerance kruhovitosti spadá do skupiny geometrických tolerancí tvaru. Tolerance tvaru specifikují úchytky rozměru prvku od jeho geometricky ideálního tvaru. U GT kruhovitosti je toleranční pole vymezeno mezikružím o šířce dané tolerance. Značí se jak je uvedeno na obrázku 2 a nepotřebuje, jako všechny GT tvaru, základnu.[5]



Obr. 2: Geometrická tolerance kruhovitosti.[6]

Geometrická tolerance polohy

Geometrická tolerance polohy spadá do skupiny GT umístění. GT polohy specifikuje polohu tolerovaného prvku vůči základně, případně soustavě základen. Vyžaduje tedy použití základny. Tolerovat lze polohu bodu v rovině nebo prostoru, polohu lineárních prvků, polohu rovinných prvků v prostoru i polohu obecně tvarových prvků. Toleranční pole má tvar podle tolerovaného prvku, v případě bodu v rovině je to kružnice o specifikovaném průměru, v případě přímky v prostoru válec, v případě roviny je to vzdálenost dvou geometricky ideálních rovin.[5]



Obr. 3: Geometrická tolerance polohy.[6]

3 Souřadnicové měřicí stroje

Pro rychlou a přesnou kontrolu specifikací stanovovaných zejména dle norem ISO GPS, v tolerančních polích velikosti řádově mikrometrů nelze používat konvenční měřidla z důvodu jejich produktivity a také zejména pro jejich neschopnost vůbec některé charakteristiky správně změřit. Z konvenčních měřidel a zejména měřících mikroskopů se postupně vyvinula souřadnicová měřicí technika.

První souřadnicové měřicí stroje byly vyvinuty v padesátých letech minulého století, následný rozvoj počítačových technologií v 60. a 70. letech významně ovlivnil i vývoj CMM a vedl ke konstrukci prvních číslicově řízených CMM, jako například jeden z prvních Zeiss UMM 550, představen v roce 1973. Možnost NC řízení vedla k vývoji skenovacích hlav a s postupným vývojem a zvyšováním výkonu počítačů i k zavádění kompenzací změny teploty nebo nedokonalé konstrukce, případně řízení stroje přímo do řídicího softwaru.[7]

Největší výhodou měření na CMM je jejich komplexnost resp. možnost měřit několik stovek charakteristik najednou, na které by jinak musela být použita spousta jiným měřících zařízení. Dále umožňuje měřit charakteristiky jako polohy jednotlivých prvků vůči sobě, vůči základnám atp., které jinými měřidly měřit nelze. Další výhodou mají v sériové výrobě, kde stačí jeden měřicí program a stroj pak může kontrolovat několik stovek součástí bez nutnosti zásahu obsluhy.[8]

Nevýhodou těchto strojů je jejich vysoká cena, hmotnost a rozměry. Nutnost kvalifikované obsluhy, tvorby měřících programů nebo potřeby metrologické laboratoře.[8]

3.1 Princip souřadnicového měření

Strojní součást se dá popsat jako soustava několika základních geometrických prvků, případně obecných křivek. Kontrolu konstrukčních požadavků na součást je pak možné provést určením a specifikováním charakteristik jednotlivých geometrických prvků, kterými je součást popsána.[8]

Možnost, jak toto udělat je definovat v prostoru souřadný systém a popsat prvky součásti body v tomto systému. Souřadných systémů existuje celá řada, nejjednodušší a pro člověka nejpřirozenější je kartézský souřadný systém tvořený třemi na sebe kolmými osami, obvykle značenými X, Y a Z.

Souřadnicový měřicí stroj je pak schopen pomocí svých senzorů zaznamenat tyto body v prostoru resp. souřadném systému. Následně se pomocí počítačového softwaru z jednotlivých bodů po filtraci a eliminaci odlehlých hodnot vytváří pomocí specifikovaných metod přiřazení geometrické prvky.

Z takto vytvořených prvků se skládá celá součást. U těchto prvků lze následně kontrolovat jejich rozměry, úchyly tvaru nebo polohy jednotlivých prvků vůči sobě a zkontrolovat

tak danou součást, vyhovuje-li specifikacím ve výkresové dokumentaci.

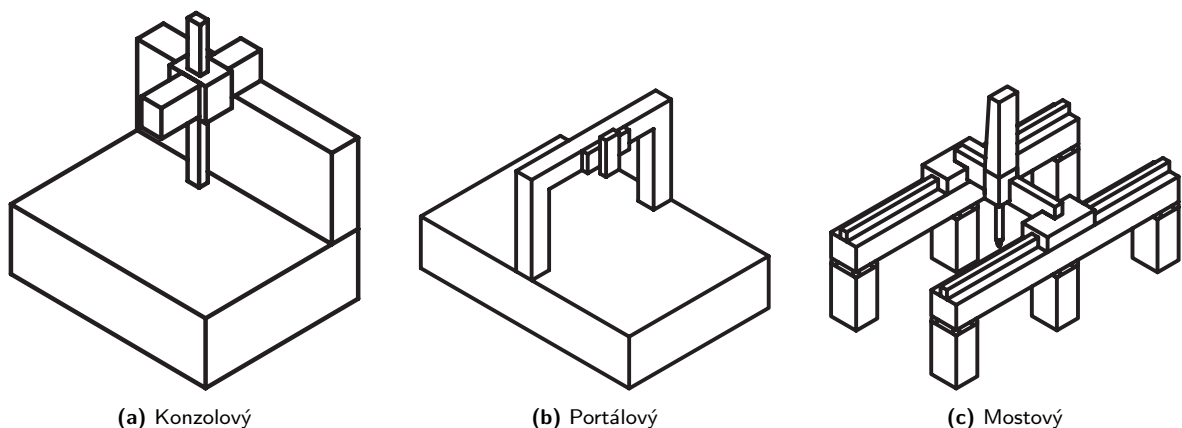
3.2 Rozdělení strojů

Souřadnicové měřicí stroje se dají dělit na přesné laboratorní a dílenské. Z hlediska vysoké přesnosti je nutné omezit, případně korigovat kolísání teploty v okolí měřicího stroje z důvodu teplotní roztažnosti měřeného dílce i měřicího stroje. Chvění, otřesy a emulze běžně se vyskytující v provozu mají na měření také nevhodný vliv. Z těchto důvodů se vyrábí přesné CMM určené do laboratoře s kontrolou teploty. Levnější dílenské řešení je vhodné do provozu pro okamžitou kontrolu součástí a výrobního procesu. Výhodou stroje přítomného přímo v provozu je absence nutnosti součásti převážet na jiné místo kvůli kontrole.[9][10]

Chvění způsobované mechanickým uložením pohyblivých částí na výrobních strojích je na souřadnicových měřicích strojích uzpůsobených pro přesnou kontrolu nepřijatelné. Proto bývají souřadnicové stroje uloženy na vzduchových ložiscích, které dále umožňují použití malých posouvajících sil a vyšší přesnosti.[11]

3.2.1 Kartézské

Měřicí stroje s kartézsky uspořádanými osami byly vůbec první. Výhoda kartézského systému, čili tří na sebe kolmých os jejichž průsečík je označován počátkem je, že do jednoho bodu se lze dostat jen jedním specifickým způsobem. Tento fakt umožňuje pro kartézsky uspořádané stroje vytvářet korekční mapy kompenzující chyby tvaru, montáže a řízení stroje. Proto lze kartézsky uspořádané souřadnicové měřicí stroje považovat za nejpřesnější.



Obr. 4: Schémata některých typů kartézských souřadnicových strojů.[8]

Konzolové

Méně rozměrný a nejlevnější stroj. Na stroji je vedení, po kterém se pohybuje konzola v jedné ose a na ní pinola s měřicím senzorem, reprezentující zbylé dvě osy. Nevýhodou je postupné prohýbání konzoly, čím dále od vedení se nachází pinola a tím způsobená

nepřesnost. Dále pak tento typ stroje má i vzhledem k tomuto efektu malý měřicí prostor a je tedy vhodný pro měření menších součástí.[8]

Portálové

Nejčastěji používaný typ souřadnicového měřicího stroje. Jeho konstrukce se skládá z portálu, který se pohybuje ve směru jedné osy, kolmo na něj respektive po něm se pohybuje suport reprezentující druhou osu a na suportu se nachází pinola s měřicím senzorem, která se pohybuje svisle ve směru poslední osy.[9]

Tento typ stroje disponuje relativně velkým měřicím prostorem při zachování velmi tuhé konstrukce. Bývají vybaveny stolem z granitu, který velice málo reaguje na změny teploty (viz tabulka 2, kapitola 4) a který je vybroušený tak, aby měl minimální úchytky rovinnosti.[11]

Na rozdíl od konzolového typu má značnou výhodu v podpěře portálu z obou stran, což snižuje jeho prohnutí a tudíž nepřesnost stroje. Na druhou stranu, obě podpěry se mohou pohybovat jinou rychlostí, což může způsobit ohnutí/zkosení stroje, které je nutno softwarově korigovat, aby nedocházelo k nepřesnostem.[8]

Tento typ stroje lze považovat za nej přesnější, obzvláště pokud se nachází v měřicí laboratoři, kde jsou přesně známy podmínky měření.

Pro experimentální část této práce byl zvolen souřadnicový měřicí stroj tohoto typu, konkrétně Carl Zeiss UPMC 850 Carat.



Obr. 5: Carl Zeiss UPMC 850 Carat.[12]

Mostové

Tento typ je vhodný pro měření součástí velkých rozměrů, v jedné ose může být dlouhý až 25 metrů. Jeho masivní konstrukce zajišťuje vysokou tuhost. Výhodou je také snadný přístup obsluhy do měřicího prostoru a k měřené součásti.[8]

Přesnost stroje je opět nižší, bývá ovlivněna hlavně seřízením stroje jelikož nemá pevné lože a sestavuje se z několika částí.

3.2.2 Nekartézské

Měřicí rameno

Pro měření velkých dílců, které by bylo obtížné kamkoli transportovat se využívají měřicí ramena. Jejich značnou výhodou je jejich portabilita, nevýhodou menší přesnost a nutnost kvalifikované obsluhy.

Nepracují v kartézském systému souřadnic, ale mají šest nebo sedm polárních systémů, z kterých se následně transformují souřadnice do systému kartézského z důvodu větší použitelnosti člověkem.

Ramena se vyrábějí z uhlíkových kompozitů, hlavně kvůli jejich vysoké pevnosti při nízké hmotnosti (ruční manipulace) a také nízké tepelné roztažnosti.



Obr. 6: Měřicí rameno

Laser tracker

Laser tracker je zařízení využívající pro měření laser. Zařízení vysílá laserový paprsek do koutového odražeče, ze kterého se odrazí zpět do sondy a odečte se vzdálenost a natočení sondy, z nich se následně pomocí softwaru opět přepočítávají do kartézského systému. Nevýhoda tohoto zařízení je, že je potřeba koutový odražeč a neustálý kontakt laserového paprsku s ním, který se nesmí přerušit. Výhoda je vysoká přesnost, portabilita a jednoduchost měření.

Laser radar

Laser radar též používá laserový paprsek, ale na rozdíl od laser trackeru nepotřebuje koutový odražeč, paprsek se odráží přímo od povrchu součásti. Tím stírá hlavní nevýhodu laser trackeru, ale jeho cena je mnohem vyšší.

3.3 Senzory

Ke změření polohy bodu na kontrolované součásti se používá celá řada senzorů, které se osazují na stroje. V základu se dělí na kontaktní a bezkontaktní.

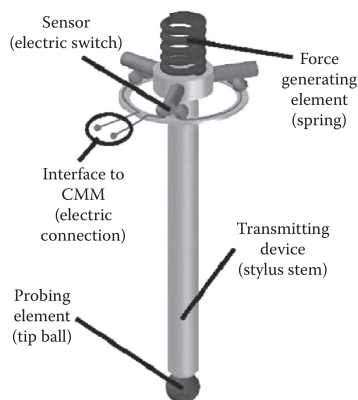
3.3.1 Kontaktní

Kontaktní senzory fungují na principu dotyku senzoru s měřeným objektem. V momentu dotyku senzoru měřicí software zaznamená polohy jednotlivých os a tím vzniknou souřadnice bodu v rámci definovaného souřadného systému. Měřené prvky součásti se z naměřených bodů dopočítávají pomocí metod výpočtu geometrických prvků.[8]

U strojů s kontaktními senzory se předem stanovují geometrické prvky, které bude stroj měřit, což znamená že se předem stanovuje trajektorie senzoru.

Spínací

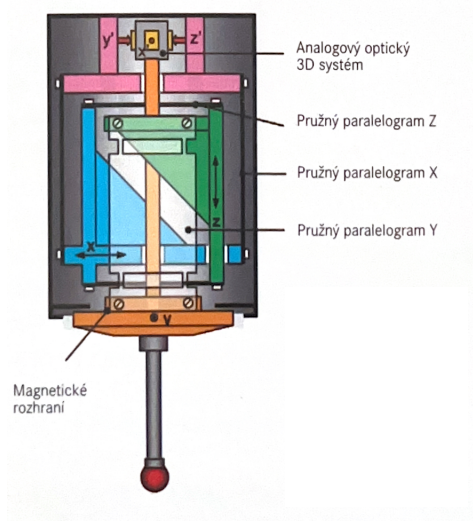
Senzor se skládá z měřicího doteku upevněném na dřívku a samotného mechanismu pro generování informace o zachycení doteku. Mechanismus sestává ze třech válců volně se pohybujících v uložení a pružiny v rovině dřívku generující měřicí sílu. Každý ze třech bodů v uložení funguje jako spínač a při vychýlení senzoru rozpojí jeden ze snímacích kontaktů a to je dále zpracováno jako signál k odečtu hodnot. V momentu dotyku senzoru se součástí se vyšle signál k zastavení a odečtu hodnot. Konstrukce senzoru tedy vyžaduje, aby při měření byl stroj v pohybu, aby došlo k vychýlení snímače, jedná se tedy o dynamický princip měření. Jejich nevýhoda je, že neumožňují spojitě snímání, musí se po kontaktu se součástí opět vzdálit a dostat do původní polohy, než lze měřit další bod. Další nevýhoda je, že díky trojbodovému mechanismu je snímání závislé na směru a obtížně korigovatelné.[9]



Obr. 7: Spínací senzor.[8]

Skenovací

Snímač, skládající se z pružných paralelogramů, lineárních motorů a elektrickým nebo optickým systémem odměřování má vlastní rozsah měření, možnost pohybu v něm a je schopen v něm měřit svoje vychýlení, ve všech třech osách. V okamžiku dotyku se tedy senzor vychýlí a překrytím souřadnic stroje a senzoru, které jsou známé, se získají souřadnice měřeného bodu. Díky vlastnímu měřicímu rozsahu senzory umožňují spojitě automatické skenování, pohyby stroje jsou softwarem řízeny tak, aby byl senzor neustále ve svém rozsahu v kontaktu se součástí.[9]



Obr. 8: Skenovací systém.[9]

3.3.2 Bezkontaktní

Bezkontaktní senzory fungují na principu přenosu informace pomocí světla.

Při měření bezkontaktními senzory se předem nespecifikují prvky, které je třeba měřit, ale senzor naměří tzv. mrak bodů a z něho se následně konstruuje jednotlivé geometrické

prvky, případně model celé součásti.

Bezkontaktní senzory měří mnohonásobně rychleji, ale jejich rychlost je vykoupena nižší přesností. Jsou výhodné do provozu pro rychlou kontrolu součástí, pro měření složitých součástí a pro měření součástí které nelze měřit kontaktně, jako například měkkých součástí, které by se při měření dotykem deformovaly a měření by pak nebylo relevantní.[8]

Triangulační senzory

Typ bezkontaktních senzorů pracujících pomocí metody triangulace, která funguje tím způsobem, že na měřicím zařízení je vysílač laseru a kamera, jejich vzdálenost mezi sebou je známá. Laser se vyšle na měřený bod, odrazí se a kamera ho zaznamená. Následně z jednotlivých úhlů vyslaného a odraženého paprsku lze vypočítat vzdálenost měřeného bodu.[9]

Nevýhodou tohoto typu senzorů je, že rozlišení senzorů je závislé na rozsahu měření, čím větší rozsah, tím horší rozlišení a dále jejich nepřesnost při měření lesklých povrchů.

Měřicích zařízení využívajících tento princip existuje několik:

- Laser scanner
Bodový laserový paprsek prochází čočkou, která vytváří paprsek liniový, naráz se měří celá linie. Rozlišení jednotlivých bodů v linii může být až 7 mikrometrů. Pro změření celé součásti je nutné se scannerem přejet celou součástí.[9]
- Pruhová projekce
Na součást se promítají pruhy, které se vyhodnocují stejným způsobem jako u liniového laserového paprsku. Naráz se měří větší množství bodů.[9]
- Fotogrametrie
Součást má dané kotvící body a zachycuje se kamerou z více směrů.

Chromatický senzor bílého světla

Soustava čoček rozlišujících vlnovou délku světla. Využití pro přesné měření vzdálenosti v jedné ose. Využívá se celé viditelné spektrum světla, které se vysílá na měřenou součást. Pouze určitá vlnová délka se dokonale odrazí a senzor ji zaznamená.

Výpočetní tomografie

Výpočetní tomografie s využitím rentgenového záření umožňuje kontrolu nejen vnějších charakteristik na součásti, ale i vnitřních vad.[9]

Součást se upne do stroje, otáčí se kolem osy a postupně se prozařuje rentgenovým zářením. Pomocí detektoru se záření zachytí a počítačový program poté vygeneruje prostoro-
vý model.[11]

4 Variabilita měření

V této kapitole bude objasněno jak vzniká variabilita měření, jaké parametry na ni mají vliv a jak lze měření nebo celý výrobní proces popsat pomocí koeficientů způsobilosti.

Výsledky měření jsou vždy zatíženy variabilitou způsobenou mnoha vlivy. Při měření je nutné zachovat určitou přesnost výsledků, minimalizovat variabilitu měření a zvýšit tak důvěryhodnost naměřených výsledků. Při teoreticky nekonečném počtu měření by výsledná hodnota byla na 100 % přesná, jelikož měření se vždy provádí konečný počet, jednotlivá měření se liší ať už vlivem systematických, či náhodných chyb. Pro kvantifikaci rozptylu naměřených hodnot slouží směrodatná odchylka, která popisuje jak moc je měření precizní, resp. jaký je rozptyl měřené hodnoty od střední hodnoty.[13]

4.1 Parametry ovlivňující variabilitu měření

Zdrojem variability měření na CMM je přesnost stroje, jeho konstrukce, seřízení a řízení. Vlivy okolního prostředí, zejména teploty. Vlastnosti měřené součásti, materiál, ze kterého je vyrobena nebo drsnost povrchu. V neposlední řadě také vliv operátora na upnutí dílů, volbu a upnutí snímačů a hlavně volbu strategie měření a jejích parametrů.[14]

Podrobnější popis jednotlivých vlivů nabídnou následující kapitoly.

Stroj

Stroj může vnášet do měření nejistoty způsobené jeho konstrukcí, uložením, smontováním, dynamikou. Dnes se velká část těchto vlivů, zejména u kartézsky konstruovaných CMM dá softwarově kompenzovat hlavně díky faktu, že v kartézském systému se do jednoho bodu dá dostat pouze jedním způsobem. Nejpřesnější stroje jsou schopny pracovat s chybou v řádu desetin mikrometru.[7]

Kartézský CMM má celkem 21 chyb měření. 9 translačních chyb v osách v každém ze tří směrů, v každé ose 3 rotační chyby ve třech směrech a 3 chyby v kolmosti jednotlivých os stroje na sebe.[7]

Vliv okolní teploty a roztažnosti dílů, kterou způsobuje lze velmi omezit ať už umístěním měřicího zařízení do laboratoře s přesnou kontrolou teploty, tak i umístěním teplotních čidel na součást a stroj a opět softwarovou kompenzací.[13]

Prostředí

Vliv prostředí, zejména teploty je dnes zásadní, protože tolerance měřených dílů se pohybují v setinách až tisícinách milimetru. Při zvýšení teploty nejen, že se díky teplotní roztažnosti změní rozměry dílu, ale i stroje nebo senzory. Norma ISO 1 stanovuje základní referenční teplotu pro kontrolu 20 °C, pokud lze vliv teploty softwarově kompenzovat, teplota

může být i vyšší nebo nižší, pro zajištění správnosti měření je hlavně důležité udržovat teplotu co nejvíce konstantní.

Existují materiály s menší teplotní roztažností než má ocel, jako zerodur, invar, keramika nebo kompozity, které mohou mít teplotní roztažnost v určitém směru i zápornou (viz tabulka 2). Tyto materiály jsou drahé, a proto se nepoužívají přímo pro konstrukci CMM, ale vyrábí se z nich například dřívky a držáky senzorů. Samotné CMM se často konstruují ze slitin hliníku, což přináší výhodu v podobě nízké hmotnosti a vysoké teplotní vodivosti, takže v případě změny teploty se teplota rychle změní v celém objemu materiálu. Vedení a stoly CMM se konstruují z granitu.

Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti vybraných materiálů.[15][16]

MATERIÁL	HUSTOTA [kg/m ³]	DÉLKOVÁ TEPLTNÍ ROZTAŽNOST [·10 ⁻⁶ m]	TEPLTNÍ VODIVOST [W/mK]
ocel	7850	11	47
hliník	2700	23,8	209
granit	3000	8	2,1
keramika	3200	6	60
invar	8100	1,5	12
uhlíkový kompozit	1900	-1,4	620

Měřená součást

Na měřenou součást mohou opět působit vlivy okolního prostředí jako teplota, v případě plastových dílů je rozhodující i vlhkost. Je důležité díl před provedením měření řádně očistit, zrnko prachu nebo vlas může při měření způsobit značně rozdílné hodnoty.

Tuhost samotné součásti může ovlivnit měření, v případě měkkých součástí ji měřicí dotyk zdeformuje a naměřený bod není relevantní. Řešení se nabízí v použití menších měřicích sil, případně zvolení jiného senzoru pro provedení měření.

Operátor

Vliv operátora zahrnuje volbu strategie upnutí a samotné upnutí součásti do stroje, její pozicování, volbu měřicích senzorů a jejich kvalifikaci.

Strategie měření

Volba parametrů strategie měření má na výslednou nejistotu měření největší vliv. Zejména z toho důvodu, že je plně v kompetenci metrologa, jež plánuje a provádí měření. Výsledná hodnota a i celkový čas měření tedy může být znatelně ovlivněn parametry vyhodnocení, které metrolog nastaví, proto měření na souřadnicových měřicích strojích vyžaduje kvalifikovanou a zkušenou obsluhu.

Pro každé měření je k dosažení jeho minimální variability nutné věnovat pozornost volbě vhodného stroje, prostředí, metrologů a operátorů souřadnicových strojů a volbě parametrů strategie měření.

4.2 Hodnocení způsobilosti

Přesnost měření lze popsat pomocí koeficientů způsobilosti, jež kvantifikují vztah variability měření a požadovaných výrobních tolerancí. Variabilita měření je pouze částí variability celého výrobního procesu, na který působí v čase několik vlivů, které způsobují změnu kvality vyráběných součástí. Tyto vlivy se dají v základu rozdělit na vlivy systematické a vlivy náhodné.

Výrobní proces lze charakterizovat dvěma hodnotami: střední hodnotou procesu μ a směrodatnou odchylkou σ . Z hodnot těchto veličin lze zjistit, zda je výrobní proces správně nastaven a je schopen si v určitém časovém horizontu udržet svoji kvalitu.

Způsobilost výrobního procesu lze charakterizovat jako schopnost výrobního procesu dodržet předepsanou přesnost výroby. Pro kvantifikaci způsobilosti procesu existuje koeficient způsobilosti C_p , pro který platí:

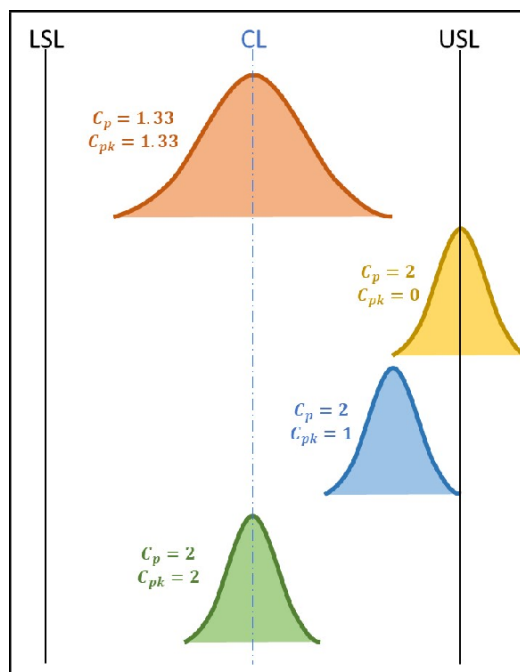
$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{T}{6\sigma},$$

kde USL a LSL jsou horní a dolní toleranční mez, tedy T představuje toleranční pole, σ značí směrodatnou odchylku. Čím větší je koeficient C_p , tím je „užší“ křivka rozptylu jednotlivých hodnot a výroba je preciznější. Pokud je $C_p < 1$, variabilita procesu je větší, než stanovené tolerance a proces je nezpůsobilý.

Koeficient C_p v sobě však nezahrnuje druhou veličinu a to střední hodnotu procesu μ , není-li tedy proces nastaven na střed tolerančního pole, bude i při vhodném C_p vyrábět vyšší procenta nevyhovujících výrobků. Proto existuje koeficient využití způsobilosti C_{pk} zahrnující i vliv nastavení výrobního procesu vůči středu tolerančního pole.[7]

$$C_{pk} = \min \left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right)$$

V případě nastavení procesu na střed tolerančního pole bude $C_p = C_{pk}$. Čím více se oba koeficienty budou od sebe lišit, tím více je střední hodnota procesu mimo požadovanou hodnotu.



Obr. 9: Vztah C_p a C_{pk} . [17]

Způsobilost měření

Pro popis měření lze použít tři termíny: preciznost, pravdivost a přesnost měření.

- **Preciznost** je těsnost shody mezi jednotlivými naměřenými hodnotami získaných za stejných podmínek měření. Dá se vyjádřit pomocí směrodatné odchylky, používá se k hodnocení opakovatelnosti měření. [18]
- **Pravdivost** je těsnost shody mezi aritmetickým průměrem teoreticky nekonečného počtu měření a referenční hodnotou. Je nepřímo vztažena k systematické chybě měření. [18]
- **Přesnost** je těsnost shody mezi naměřenou hodnotou a pravou hodnotou. [18]

Variabilita měření musí představovat pouze část variability celého výrobního procesu. Z toho důvodu se pro výpočet koeficientů způsobilosti používají konstanty zužující šířku pásma variability. Existují dvě metody výpočtu, jež se liší právě těmito konstantami, metoda podle firmy Bosch a metoda Ford.

Koeficient C_g

Koeficient C_g pracuje s tolerančním pásmem a směrodatnou odchylkou, hodnotí tedy preciznost měření. Nedává žádnou informaci o pravdivosti nebo přesnosti měření.

Metoda podle firmy Bosch používá šířku pásma 20 %.

$$C_g = 0,2 \cdot \frac{USL - LSL}{6\sigma} = 0,2 \cdot \frac{T}{6\sigma}$$

Podle této metody je měřidlo způsobilé, je-li koeficient $C_g > 1,33$.

Metoda podle Ford používá šířku pásma 15 %.

$$C_g = 0,15 \cdot \frac{T}{6\sigma}$$

Podle této metody je měřidlo způsobilé, je-li koeficient $C_g > 1$.

Metoda podle Ford stanovuje užší šířku pásma, zdá se tedy přísnější. Mezní hodnoty, kdy je měření způsobilé se ovšem také liší podle metody a tím pádem jsou si obě metody prakticky rovnocenné.[7]

Koeficient C_{gk}

Ukazatel způsobilosti C_g nedává žádnou informaci o poloze vůči střední hodnotě, pro tyto potřeby opět ukazatel C_{gk} , stejně jako C_{pk} . V následujících vzorcích se používá označení \bar{x} , které představuje aritmetický průměr z naměřených hodnot a X_r značí referenční hodnotu. T je opět šíře tolerančního pásma a σ směrodatná odchylka.[7]

Koeficient C_{gk} již bere v úvahu polohu vůči referenční hodnotě a lze tedy pomocí něho vyhodnotit, zda je měření pravdivé a přesné.

- Dle firmy Bosch se koeficient C_{gk} stanovuje následovně.

– Zprava

$$C_{gk} = \frac{(X_r + 0,1 \cdot T) - \bar{x}}{3\sigma}$$

– Zleva

$$C_{gk} = \frac{\bar{x} - (X_r - 0,1 \cdot T)}{3\sigma}$$

Měřidlo je způsobilé, pokud horší, resp. nižší z koeficientů C_g , C_{gk} je větší než 1,33.

- Dle firmy Ford se koeficient C_{gk} stanovuje následovně.

– Zprava

$$C_{gk} = \frac{(X_r + 0,075 \cdot T) - \bar{x}}{3\sigma}$$

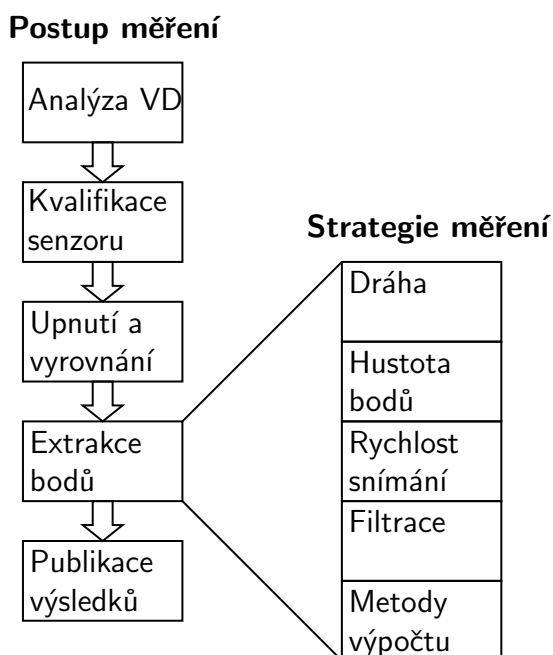
– Zleva

$$C_{gk} = \frac{\bar{x} - (X_r - 0,075 \cdot T)}{3\sigma}$$

Měřidlo je způsobilé, pokud horší, resp. nižší z koeficientů C_g , C_{gk} je větší než 1.

5 Postup měření

V této kapitole bude popsán postup měření na souřadnicových měřicích strojích. Pro kontrolu součásti na CMM je třeba provést pět kroků. Jen při jednom z nich souřadnicový stroj reálně pracuje, zbytek jsou přípravné úkony a analýza výsledků. Přípravné kroky zaberou mnohonásobně více času, než samotné měření, bez jejich provedení by však nebylo možné měření provést.



Obr. 10: Postup měření

5.1 Analýza výkresové dokumentace

Podle výkresové dokumentace, obzvlášť podle umístění základů jednotlivých tolerancí lze určit jak součást upnout, vyrovnat a měřit. Mimo rozměrů a tolerancí lze v ní s využitím norem ISO GPS specifikovat jednotlivé parametry filtrace, metodu měření nebo metody výpočtu. Tento krok obvykle zabere nejvíce času při měření nové součásti. Výhoda je, že k němu není potřeba fyzický přístup k souřadnicovému stroji, který může mezitím pracovat na jiném úkonu. Navíc při opakované kontrole té samé součásti již tento krok není třeba provádět.

5.2 Kvalifikace senzoru

Po výběru jednotlivých snímačů a jejich sestavení musí operátor dané snímače kvalifikovat. V překladu určit stroji kde se nachází a jaká je jejich velikost. Kvalifikace probíhá pomocí kalibrační koule a referenčního snímače. Operátor nasnímá referenčním snímačem kalibrační kouli a následně upne sadu snímačů, kterými se chystá měřit a opět nasnímá

daným postupem kalibrační kouli. Postupů snímání je několik, od snímání několika bodů až ke spojitému skenování zachycující i dynamiku stroje. Obecně platí čím více nasnímaných bodů, tím přesnější kvalifikace, ale také potřeba většího času pro její provedení. Následně díky známosti poloměru kalibrační koule a její polohy zjištěné referenčním snímačem si software dokáže dopočítat délku dříku a poloměr kuličky použitého snímače a jeho souřadnice v souřadném systému stroje.[8]

Je výhodné kvalifikovat všechny snímače, které se pro měření budou používat najednou, tím se minimalizují případné odchylky způsobené změnou teploty a teplotní roztažností dříků a celého stroje.[8]

Ačkoli se nejedná o kalibraci senzoru, ale kvalifikaci, v praxi se často nepřesně používá pojem kalibrace senzoru, tento termín však není úplně správný, je však široce užíván a chápán.[8]



Obr. 11: Kalibrační koule.

5.3 Upnutí a vyrovnání součásti

Pevné upnutí součásti je základním předpokladem ke správnému měření. Jednotlivé změřené body na součásti není výhodné mít popsané v souřadnicovém systému stroje, proto se provádí vyrovnání součásti čímž dojde k transformaci souřadného systému stroje do souřadného systému součásti. Těleso v prostoru má šest stupňů volnosti, 3 osy a 3 rotace kolem nich, cílem vyrovnání součásti je jí odebrat všechny stupně volnosti.

Vyrovnání se provádí jednou z několika metod popsaných níže. Prakticky jde o změření prvků potřebných k vyrovnání a navázání souřadného systému na tyto prvky.

- Standartní metoda (3,2,1 nebo rovina, přímka, bod). Postupné odebrání stupňů volnosti pomocí zdefinování prvku suplujícího rovinu odebírající 3 stupně volnosti, přímku odebírající 2 a bodu odebírajícího poslední stupeň volnosti.
- Best-fit nebo také 3D připasování. Iterační metoda.
- RPS - Určení polohy součásti vůči souřadnému systému celé sestavy. Často používané v automotive pro automobily.

- 6P používané pro trubky. První bod definuje počátek systému souřadnic, druhý bod hlavní osu a třetí otáčení kolem hlavní osy.

Prvky pro vyrovnání součásti lze specifikovat podle základů geometrických tolerancí zadaných ve výkresové dokumentaci. Prvek na kterém se specifikována základna může být prvkem teoretickým, jako například osa díry nebo hřídele, v tomto případě se nejdříve změní daný geometrický prvek, například díra, a z ní se pak konstruuje teoreticky její osa, která se použije pro vyrovnání a tedy určení souřadného systému.[19]

5.4 Extrakce bodů a definování geometrických prvků

Po upnutí a vyrovnání součásti přichází na řadu samotné měření bodů. Jediná část procesu měření, obvykle také nejméně časově náročná, při které souřadnicový stroj opravdu pracuje. Předchozí body jsou nezbytné k tomu, aby stroj mohl měření provést, neprodukují se při nich však žádné výsledky, ty vznikají až samotným měřením. Samotné výsledky měření poté silně závisí na strategii měření a jejích parametrech, které zvolí operátor. Problematika strategie měření a jejího vlivu na měření bude popsána v samostatné kapitole.

5.5 Publikace výsledků

Výsledky měření se využívají jednak pro kontrolu a ubezpečení zákazníka, že daná součást vyhovuje požadovaným specifikacím. Dále lze data z měření sbírat, a používat je jako kontrolní složku výroby při budování MES systému. V tomto případě výsledky kontroly přímo v reálném čase ovlivňují změnu výrobních parametrů, aby výroba byla co nejefektivnější.

6 Strategie měření

V této kapitole budou popsány parametry strategie měření a jejich vliv na variabilitu měření. Je důležité věnovat náležitě úsilí volbě parametrů strategie měření, neboť na samotnou přesnost a variabilitu měření bude mít největší vliv. Je třeba najít rovnováhu mezi ekonomickým hlediskem, tedy zejména rychlostí provedení měření a hlediskem důvěryhodnosti měření.

Problémem z hlediska ekonomického využití souřadnicového měřicího stroje je produktivita měření, kterou ovlivňuje zejména rychlost snímání bodů. Čím rychleji CMM snímá body, tím rychleji pracuje a čas potřebný pro měření je kratší, což může být pro mnoho firem důležitým faktorem. Variabilita výsledků může poté být ale vyšší a měření méně způsobilé. Z toho vychází, že je nutné pro každou aplikaci zvolit vhodnou strategii měření, aby měření bylo směrodatné a zároveň přípustně časově náročné.[20][21]

Při měření je vcelku běžné, že se na součásti kontrolují stovky charakteristik. Je tedy zcela zřejmé, že tvorba efektivního měřicího plánu může zkrátit celkovou dobu měření o značný čas a přitom mít na variabilitu výsledků minimální vliv. Je tedy výhodné měřit charakteristiky, které jsou blízko sebe po sobě a eliminovat zbytečné přejíždění stroje z jedné strany součásti na druhou. Také je výhodné měřit charakteristiky, které chceme měřit jedním senzorem po sobě a eliminovat nadměrné výměny senzorů, pokud jsou třeba.[8]

Jednotlivými parametry strategie měření jsou především:

- Dráha senzoru (kde se snímají body)
- Hustota snímaných bodů
- Rychlost snímání
- Filtrace nasnímaných bodů
- Metody výpočtu geometrických prvků

6.1 Dráha

Na každé součásti zanechává její výrobní proces stopy, ať už co se týče úchylek tvaru, tak drsnosti a vlnitosti povrchu. Drsnost povrchu závisí na kvalitě nástrojů a řezných podmínkách, vlnitost hlavně na tuhosti stroje a celé soustavy stroje, nástroje a obrobku a úchyly tvaru vycházejí ze samotných úchylek pojezdu stroje.

Rozdíly ve výsledcích měření při snímání bodů na jiných místech pak mohou být zásadní. Například při měření dílu, který byl hoblován budou znatelné stopy po této technologii a měření bodů ve směru, ve kterém byl hoblován a naopak napříč bude vycházet odlišné. Nápodobně na frézovaném dílu bude úchylka rovinnosti po celé délce určitě vyšší, než jen na prvních několika centimetrech, volba oblasti měření má klíčový vliv na výsledky.

Pro relevantní měření se doporučuje volit dráhu měření vždy kolmo na předpokládanou stopu výrobního procesu na součásti se vyskytující.

6.2 Hustota bodů

Pro definici prvku teoreticky stačí dané matematické minimum bodů, například přímku definují dva body, kružnici tři. Při změření daného prvku pouze tolika body, kolika ho lze matematicky definovat se však bude jevit jako tvarově dokonalý. Pro kontrolu součásti je tedy nezbytné změřit bodů mnohem více nejen pro přesnější změření rozměru, ale hlavně pro postihnutí úchylek tvaru.[13]

Čím více bodů se použije pro změření prvku, tím více bude měření důvěryhodné a hodnoty přesnější, na druhou stranu změření více bodů trvá delší čas. Je tedy nutné najít kompromis mezi časem měření a jeho přesností.[19]

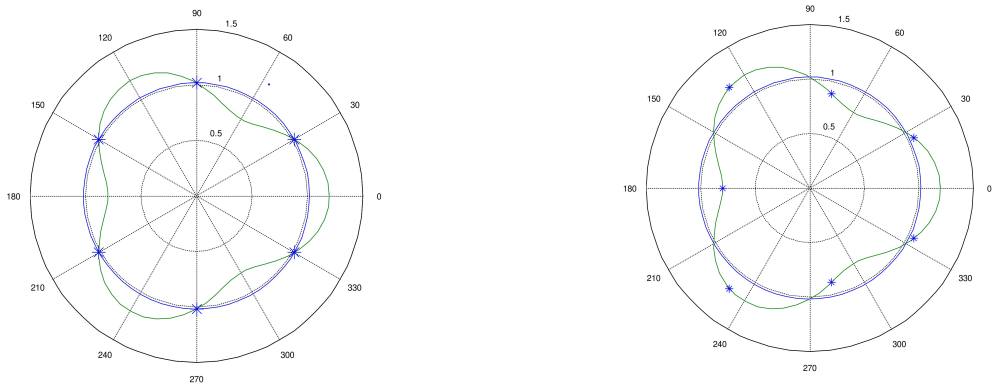
Tabulka 3: Příklad doporučeného počtu bodů pro měření geometrických prvků.[19]

Geometrický prvek	Matematické minimum	Doporučené minimum
Přímka	2	5
Rovina	3	9
Kruh	3	7
Koule	4	9

V tabulce 3 jsou uvedeny doporučená minima počtu bodů nutných pro měření daných prvků v případě použití spínacích senzorů. V současnosti je měření prováděno zejména skenovacími senzory. Pro jejich schopnost zaznamenávat spojitě stovky bodů se doporučené počty pohybují v řádech stovek až tisíců. Vysoký počet naměřených bodů napomáhá například metodě LSC, aby sama od sebe eliminovala odlehlé hodnoty.

Doporučený počet bodů pro vyhodnocení prvku se dále může lišit podle použité metody vyhodnocení, případně podle toho, jaká charakteristika je měřena. Pro změření rozměru prvku bude bodů potřeba méně, než pro změření jeho úchylky tvaru.[22]

Výrobní procesy často zanechávají periodické profily, proto při měření součástí malým počtem bodů je doporučeno nerozdělovat body souměrně, jelikož profil povrchu může být periodický a měření by nepostihlo všechny výchyly, jak lze vidět na obrázku 12. Při rozdělení bodů souměrně podél celého obvodu není vůbec zachycena úchylka tvaru daného prvku.[19]



(a) 6 bodů

(b) 7 bodů

Obr. 12: Rozdíl v počtu bodů a zachycení úchylky tvaru.[19]

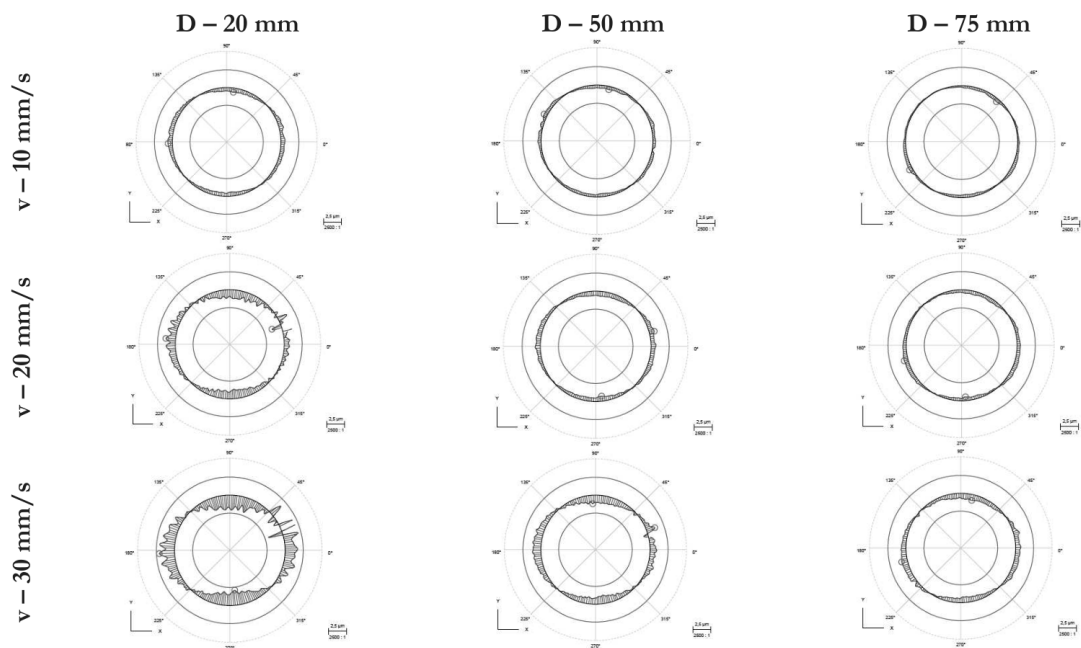
6.3 Rychlost snímání

Rychlost snímání má vliv jak na produktivitu měření, tak na přesnost a variabilitu. Při měření vyššími rychlostmi se variabilita měření zvyšuje.

Například při měření kruhové díry na kartézském stroji vstupuje do variability měření samotná dynamika stroje, kdy se software snaží řídit jednotlivé osy tak, aby interpolovaly kružnici přičemž v jedné ose se pohybuje pouze pinola, která je mnohem lehčí, než například celý portál v ose druhé. Rozdíly hmotností a setrvačnosti v obou osách mají obzvláště při vyšších rychlostech snímání na naměřené hodnoty vysoký vliv.[20]

Vliv rychlosti snímání na variabilitu není přímo jednoznačný, při měření kruhových děr se například mění i s rozměrem díry. Při měření malých děr se se zvyšující rychlostí variabilita zvyšuje násobně více, než při měření větších průměrů.[20]

Jak je vidět na obrázku 13, při měření díry o průměru 20 mm je znatelný vliv zvyšující se rychlosti snímání. Díra se postupně jeví jako oválná, ale s větším měřeným průměrem začíná být vliv rychlosti snímání méně znatelný. Při volbě rychlosti snímání je tedy nutné brát v úvahu parametry měřeného prvku, jako jeho průměr.[20]



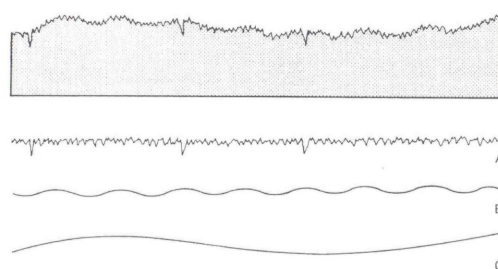
Obr. 13: Vliv rychlosti snímání na vyhodnocení.[20]

6.4 Filtrace naměřených bodů

Naměřené body nejsou přesnou reprezentací skutečné součásti, jsou zatíženy šumem vzniklým od chvění stroje nebo šumem samotných elektronických součástí. Také nečistoty na součásti způsobují v naměřených bodech odlehle hodnoty, které se na součásti přímo nevyskytují. Pro zpřesnění výsledků měření a odstranění odlehých hodnot a šumu se používají matematické filtry.

Při měření dotekovým senzorem už samotný dotyk a jeho velikost způsobuje určitou mechanickou filtraci. Tato filtrace není dostatečná pro vyhlazení naměřených bodů, za jistých okolností, například při použití velkého poloměru kuličky doteku nemusí sensor některé body vůbec zaznamenat.[23]

Šum se odstraňuje krátkovlnným filtrem, který potlačí krátkovlnné složky naměřeného prvku a po této filtraci tak vznikne základní profil. Základní profil je skutečný naměřený profil součásti, obsahuje v sobě drsnost povrchu, vlnitost a úchyly tvaru. Pro rozdělení základního profilu na jednotlivé profily drsnosti, vlnitosti a úchyly tvaru slouží další filtry.



Rozložení základního profilu:

A – drsnost

B – vlnitost

C – úchylka tvaru

Obr. 14: Rozdělení základního profilu na jednotlivé složky.[24]

Pro utlumení profilu drsnosti povrchu a získání profilu vlnitosti s úchylkou tvaru se používá filtr λ_c . Základní délka λ_c je klíčovým parametrem při filtrování. Její velikost se určuje podle tabulky 4, z normy ISO 12780-2, podle velikosti snímacího doteku. Dále je nutné dodržet maximální vzdálenost snímaných bodů, jinak by filtr přestal fungovat. Bodů je doporučeno snímat více, například eliminace odlehlých hodnot může nějaké zanedbat a filtr by pak nefungoval. Maximální vzdálenost vzorkových bodů vychází při vydělení základní délky λ_c číslem 7, pro zjednodušení v praxi lze tedy λ_c vydělit deseti a s bezpečností nastavit tento parametr.

Tabulka 4: Parametry pro určení základní délky.[25]

Základní délka λ_c [mm]	Max. vzdálenost vzorkových bodů [mm]	Max. poloměr snímacího doteku [mm]
8	1,14	5
2,5	0,357	1,5
0,8	0,114	0,5
0,25	0,0357	0,15
0,08	0,0114	0,05

Parametr λ_c je parametrem pro otevřené povrchy, v případě uzavřených povrchů, například kružnice, je základním parametrem UPR, neboli počet periodických sinusových vlnění na otáčku, anglicky undulations per revolution. Smysl a výhoda použití tohoto parametru tkví v tom, že při měření kruhových prvků závisí na průměru. Při použití základní délky jako parametru filtrace například při měření díry bude filtr zanedbávat výchyly o stejné velikosti při průměru díry 10 mm i 100 mm, což je nežádoucí. Výchylka například 0,1 mm nemusí být pro díru průměru 100 mm zásadní, pro menší díru 10 mm už však ano. Oproti tomu parametr UPR bude fungovat závisle na průměru a zanedbávat výchyly poměrově odpovídající velikosti díry.[23]

Tabulka 5: Parametry pro určení hodnoty UPR.[23]

UPR	Min. počet vzorkových bodů	Min. poměr $d : r$
15	105	5
50	350	15
150	1050	50
500	3500	150
1500	10500	500

Doporučená hodnota UPR se určuje podle normy ISO 12181-2, viz tabulka 5. Parametr d je průměr referenční kružnice, r je poloměr snímacího doteku. Pokud je poměr $d : r$ menší, než uvedená hodnota, filtrace je zkreslena vlivem snímacího doteku.[23]

Pro parametr λ_c platí, že čím menší je hodnota tohoto parametru, tím je filtr jemnější a dokáže rozlišit menší úchytky a méně ovlivňuje naměřená data. U parametru UPR toto platí naopak, čím vyšší je hodnota UPR, tím je filtr jemnější.

Při měření na kartézských CMM se nejčastěji používají filtry 50 UPR, případně 150 UPR. V případě nutnosti použití jemnějších filtrů jako například 500 UPR, či 1500 UPR je nutné zajistit k dispozici otočný stůl, případně se takové filtry používají při měření kruhoměry. Důvod je takový, že v řádech 500 UPR už jsou znatelné úchytky řízení stroje, snažícího se interpolovat kruhovou dráhu pomocí pojezdu ve dvou osách a tedy vnášení na součásti reálně neexistujících odchylek.

6.5 Metody výpočtu

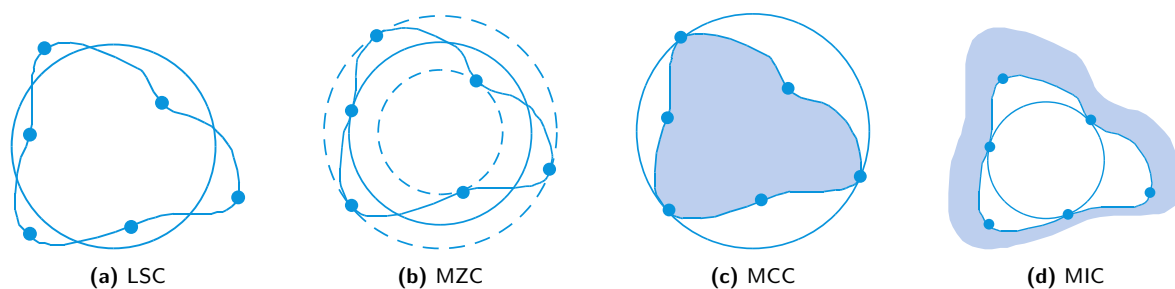
Strojní součásti se skládají ze základních geometrických prvků, jako rovina, kružnice, válec atd., případně obecných křivek. Vlastnosti součásti se pak dají popsat pomocí přiřazení daných geometrických prvků naměřeným bodům. Z nich se vypočítávají jejich jednotlivé rozměry, poloha a úchytky tvaru.[19]

Pro uzavřené prvky se v systému ISO GPS používají čtyři základní metody výpočtu. Obecně se pro ně používají zkratky vycházející z anglických názvů.[26]

Tabulka 6: Metody výpočtu.

NÁZEV	ANGLICKY	ZKRATKA
Metoda nejmenších čtverců	Least Squares Circle	LSC
Metoda minimální zóny	Minimum Zone Circle	MZC
Metoda nejmenšího opsaného rozměru	Minimum Circumscribed Circle	MCC
Metoda největšího vepsaného rozměru	Maximum Inscribed Circle	MIC

Následující obrázek ilustruje jednotlivé metody výpočtu.



Obr. 15: Metody výpočtu.[6]

V ISO GPS mají tyto čtyři metody svoje označení, pomocí něho lze na výkresu předepsat preferovanou metodu výpočtu při kontrole daného geometrického prvku.

Tabulka 7: Označení metod výpočtu ve výkresové dokumentaci

NÁZEV	ZNAČKA
Metoda nejmenších čtverců	GG
Metoda minimální zóny	GC
Metoda nejmenšího opsaného rozměru	GN
Metoda největšího vepsaného rozměru	GX

Na rovinných prvcích se používají následující metody, metoda nejmenších čtverců a metoda minimální zóny fungují stejně jako u kruhových prvků. Metody nejmenšího opsaného a největšího vepsaného rozměru se z principu nedají na rovinných prvcích použít. Existují však metody vnějšího tečného a vnitřního tečného prvku.

Tabulka 8: Metody výpočtu pro rovinné prvky.

NÁZEV	ANGLICKY	ZKRATKA
Metoda nejmenších čtverců	Least Squares Plane	LSP
Metoda minimální zóny	Minimum Zone Plane	MZP
Metoda vnějšího tečného prvku	Outer Tangential Plane	OTP
Metoda vnitřního tečného prvku	Inner Tangential Plane	ITP

Metoda nejmenších čtverců

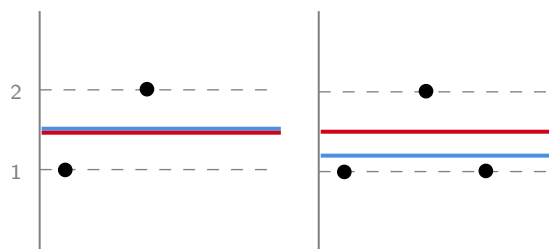
Tato metoda spočívá v proložení naměřených bodů křivkou pomocí Gaussovy metody nejmenších čtverců. Přírozeně eliminuje odlehle hodnoty a má stabilní polohu středu a dobrou opakovatelnost. Používá se jako výchozí metoda při vyhodnocení rozměrů.[26]

Výpočet pomocí této metody je ze všech čtyřech nejefektivnější a nejrychlejší, což obzvláště v dřívějších letech bylo pro nedostupnost tak výkonně výpočetní techniky jako dnes důležité kritérium. Je to jeden z důvodů proč je tato metoda většinou softwarů používaná jako základní, společně s její stabilitou.[27]

Metoda minimální zóny

Touto metodou se rozměr stanovuje pomocí Čebyševovy metody minimální zóny, která spočívá v minimalizování maximální hodnoty místních vzdáleností mezi naměřenými body a přiřazeným prvkem.[26]

Rozdíl mezi touto metodou a metodou nejmenších čtverců lze popsat na následujícím příkladě. Mějme ve 2D naměřené dva body s hodnotami 1 a 2, v tomto případě oběma metodami získáme stejný výsledek a to 1,5. Přidáme-li však třetí bod s hodnotou 1, metoda nejmenších čtverců změní svůj výsledek a vrátí hodnotu přibližně 1,33; metoda minimální zóny však vrátí opět 1,5, protože z hlediska krajních hodnot se kterými pracuje nedošlo k žádné změně.[8]



Obr. 16: Rozdíl mezi LSP (modře) a MZP (červeně)

Metoda nejmenšího opsaného a největšího vepsaného rozměru

Pro součásti, kde je potřebné mít jistotu smontovatelnosti s další součástí, například pro hřídel a díru v náboji, lze použít kombinaci metody nejmenšího opsaného a největšího vepsaného rozměru. Tato metoda zajistí jistou smontovatelnost, ovšem její opakovatelnost silně závisí na náhodných jevech, například zrnko prachu může znatelně ovlivnit rozměr připraveného ideálního prvku a tedy naměřenou hodnotu.

V případě nejmenšího opsaného rozměru se naměřené body opišou ideálním prvkem tak, aby se do něj všechny vešly a přitom rozměr daného prvku byl nejmenší možný. Používá se tedy u hřídelů a jím podobných součástí.[26]

Metoda největšího vepsaného rozměru spočívá ve vepsání co největšího ideálního prvku, který se vejde do oblasti naměřených bodů. Použití pro díry.[26]

Tuto metodu lze z jejího principu použít jen pro prvky typu kruh a válec.

Metoda tečného prvku

Pro otevřené prvky typu rovina nebo přímka existuje metoda přiřazení tečného prvku. Naměřenému profilu se přiřadí vnější nebo vnitřní tečna, podle specifikace. Použití této metody je obdobné, jako u metod MZC a MIC u uzavřených prvků.[26]

7 Experimentální část

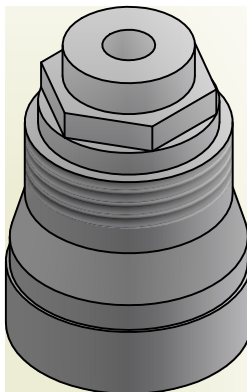
Pro demonstraci byl vybrán rotační díl s několika vnějšími válcovými soustruženými povrchy, kuželem, vrtanou dírou, vnějším šestihranem a závitem. Pro měření byly zvoleny jen některé prvky. Byl měřen vnější průměr válce po kružnici, vnitřní průměr díry též po kružnici a poloha dvou rovin na šestihranu.

Výřez z výrobního výkresu součásti s prvky, jež byly kontrolovány je na obrázku 19.

Prvním cílem práce je demonstrovat vliv filtrace hodnot, jeho výhody a nevýhody, prospěšnost v kombinaci s určitými metodami výpočtu a jeho schopnost ovlivnit výsledky. Vliv filtrace bude demonstrován zejména na měření kruhovitosti, dále jeho vliv při měření průměrů a geometrických tolerancí polohy dvou rovin.

Dalším cílem je demonstrovat vliv metody výpočtu geometrických prvků na výsledky měření. Rozdíly jednotlivých metod při výpočtu kruhových prvků, vliv filtrace a eliminace odlehlých hodnot na jejich fungování, rozdíly při měření rovinných prvků.

Způsobilst měření byla hodnocena pomocí koeficientu C_g , počítaného podle metody Bosch. Koeficient C_{gk} použit nebyl, z důvodu neznalosti referenční hodnoty a tedy nemožnosti daný koeficient spočítat. Dále cílem této práce je hodnotit preciznost měření, která se hodnotí právě koeficientem C_g , nikoli správnost měření hodnocenou koeficientem C_{gk} .



Obr. 17: Model měřené součásti

7.1 Upnutí, vyrovnání, popis měření



Obr. 18: Upnutí součásti ve stroji

Měření bylo provedeno v laboratoři Ústavu obrábění, projektování a metrologie na stroji Carl Zeiss UPMC 850 Carat. Použit byl snímač v konfiguraci -Z s průměrem snímacího doteku 1 mm.

Součást byla usazena do kruhového sklíčidla a upnuta ke stolu stroje pomocí upínek. Byla vyrovnána pomocí metody 3, 2, 1 s použitím osy zkonstruované ze dvou průměrů, přímky na šestihranu a bodu na vrchu součásti.

Měření bylo provedeno desetkrát bezprostředně za sebou. Z jednotlivých naměřených hodnot byl vypočten aritmetický průměr.

Jednotlivé průměry, jak vnější soustružený $\varnothing 35$ mm, tak vnitřní vrtaný $\varnothing 14$ mm byly vypočítány pomocí tří metod LSC, MIC a MCC, s filtrací 50 UPR a eliminací odlehlých hodnot a bez filtrace a eliminace.

Na kruhových prvcích se dále měřila kruhovitost, zejména vliv filtrace na její výsledky. Kruhovitost byla vypočítávána s filtry 150, 50, 15 a 5 UPR a bez filtru, postupně s použitím eliminace odlehlých hodnot i bez.

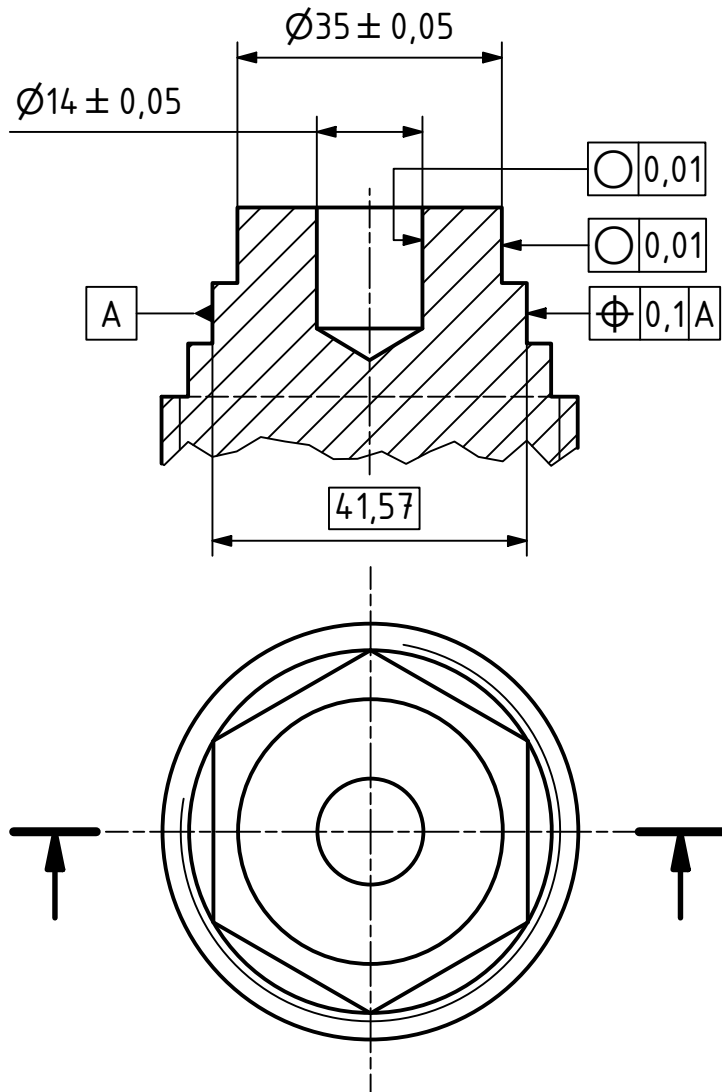
Jedna stěna šestihranu byla změřena po pravouhlé rastrové dráze a její poloha byla vypočítána pomocí metod LSP a MZP, s filtry $\lambda_c = 2,5$ mm, $\lambda_c = 0,8$ mm a bez filtrace, jednotlivě s eliminací odlehlých hodnot i bez. Tato rovina byla následně použita jako základna pro GT polohy. Na šestihranu se pomocí čtyř bodů změřila protilehlá rovina a následně byla vypočítána geometrická tolerance polohy této roviny vůči základně.

Parametry strategie měření, které zůstávaly neměnné jsou v tabulce 9. Byla zvolena rychlost snímání a délka kroku snímání jednotlivých bodů, z délky kroku a rozměru měřeného prvku software stoje dopočítal počet měřených bodů. Při měření se měnily pouze parametry vyhodnocení a to metody výpočtu geometrických prvků a parametry filtrace.

Naměřená a vypočítaná data jsou k dispozici v příloze 1.

Tabulka 9: Parametry strategie měření.

ELEMENT	RYCHLOST SNÍMÁNÍ	DÉLKA KROKU	POČET BODŮ
vnější $\varnothing 35$ mm	10 mm/s	0,05 mm	2322
vnitřní $\varnothing 14$ mm	4 mm/s	0,02 mm	2322
rovina	5 mm/s	0,1 mm	2014



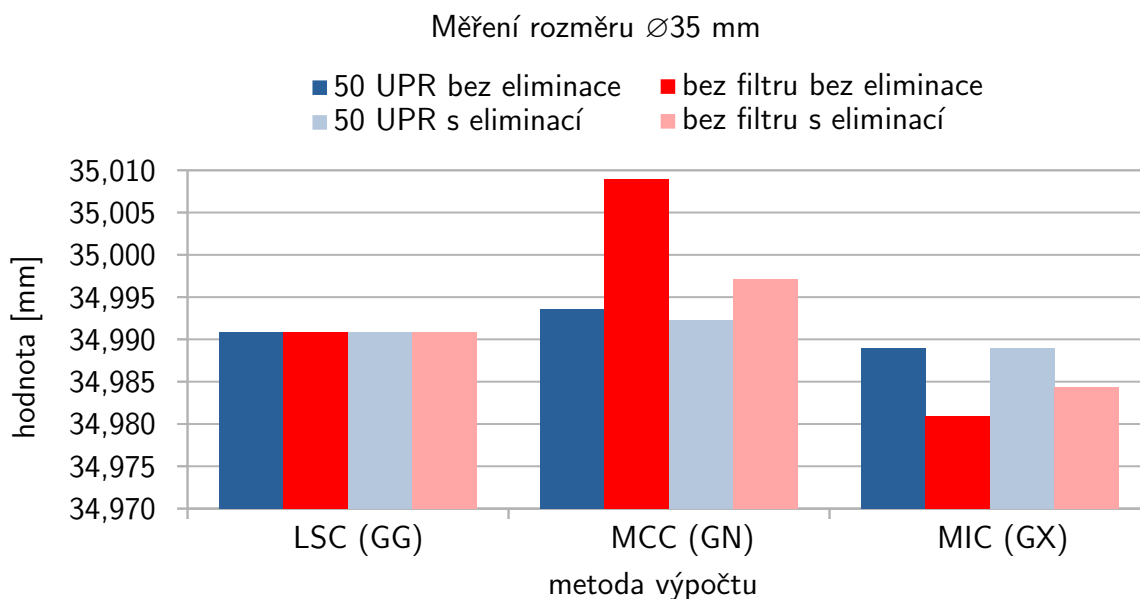
Obr. 19: Výřez součásti s měřnými charakteristikami

7.2 Rozměr $\varnothing 35$ mm, $\varnothing 14$ mm

Jednotlivé aritmetické průměry naměřených hodnot pro soustružený válec jmenovitého průměru 35 mm a vrtanou díru $\varnothing 14$ mm jsou v tabulce níže.

Tabulka 10: Měření rozměru $\varnothing 35$ mm, $\varnothing 14$ mm

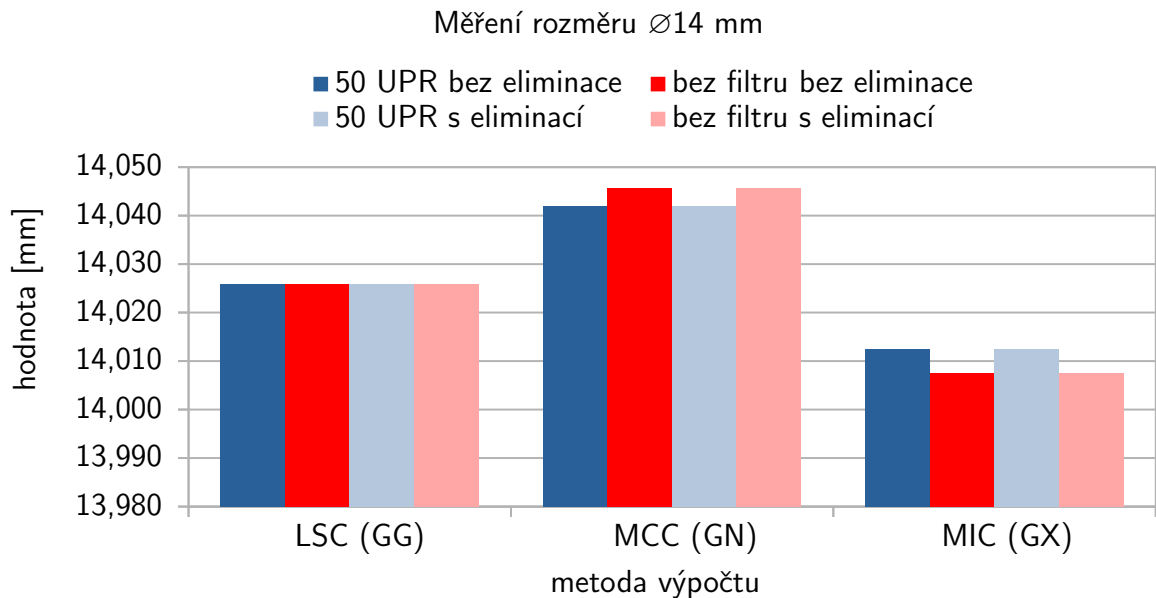
Naměřené hodnoty [mm]				
BEZ FILTRACE	BEZ ELIMINACE	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	34,9909	35,0090	34,9809
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	14,0260	14,0457	14,0075
	S ELIMINACÍ	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	34,9908	34,9971	34,9843
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	14,0260	14,0457	14,0075
FILTRACE 50 UPR	BEZ ELIMINACE	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	34,9909	34,9936	34,9890
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	14,0259	14,0421	14,0124
	S ELIMINACÍ	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	34,9908	34,9923	34,9890
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	14,0259	14,0421	14,0124



Graf. 1: Měření rozměru $\varnothing 35$ mm

Při měření vnějšího průměru se jmenovitou hodnotou 35 mm je z grafu zřetelné, že hodnota vypočítaná metodou MCC je největší, MIC nejmenší a LSC uprostřed. MCC je metoda nejmenší opsané kružnice, vrátí tedy logicky nejvyšší hodnotu, naopak metoda MIC nejnižší. Vliv filtrace a eliminace na metodu LSC je oproti ostatním dvěma metodám minimální, už sama metoda nejmenších čtverců potlačuje odlehlé hodnoty a vyhlazuje křivku, maximální rozdíl mezi použitím, či nepoužitím filtru a eliminace je 0,0001 mm.

U ostatních dvou metod jsou rozdíly o dva řády vyšší, 0,0167 mm u MCC respektive 0,0081 u MIC. Je velice znatelný rozdíl při použití filtrace a eliminace odlehlých hodnot, či bez použití.



Graf. 2: Měření rozměru $\varnothing 14$ mm

Vrtaná díra o průměru 14 mm má, kvůli její technologii výroby, vysoké úchytky tvaru. Tvar vrtané díry není kruhovitý, ale podobá se trojúhelníku. Rozdíly mezi jednotlivými metodami vyhodnocení jsou díky této skutečnosti znatelné a největší rozdíl dosahuje až 0,038 mm v případě nefiltrovaných hodnot, případně 0,03 mm s použitím filtrace. Filtrace hodnot se mnohem více projevuje při vyhodnocení metodami MCC a MIC, v případě vyhodnocení metodou nejmenších čtverců je její vliv opět minimální.

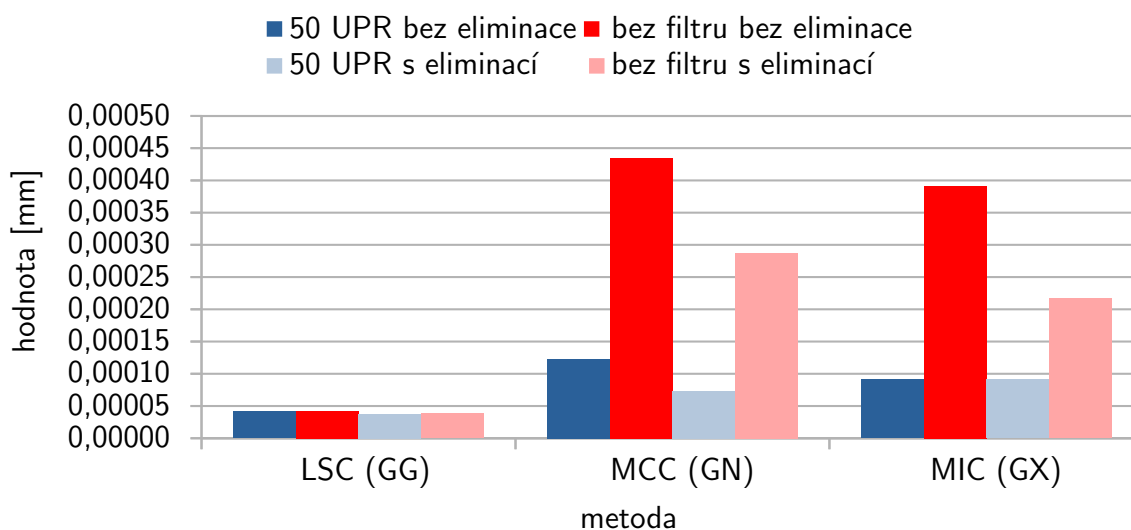
Směrodatné odchytky

Směrodatné odchytky jednotlivých deseti měření jsou v tabulce níže.

Tabulka 11: Měření rozměru $\varnothing 35$ mm, $\varnothing 14$ mm - směrodatné odchytky

Směrodatné odchytky [μm]				
BEZ FILTRACE	BEZ ELIMINACE	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	0,042	0,435	0,392
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	0,042	0,132	0,181
	S ELIMINACÍ	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	0,039	0,287	0,216
Vnitřní $\varnothing 14$ mm	0,042	0,132	0,181	
FILTRACE 50 UPR	BEZ ELIMINACE	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	0,041	0,123	0,091
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	0,043	0,049	0,045
	S ELIMINACÍ	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	0,037	0,073	0,091
Vnitřní $\varnothing 14$ mm	0,043	0,049	0,045	

Směrodatné odchytky $\varnothing 35$ mm



Graf. 3: Směrodatné odchytky $\varnothing 35$ mm

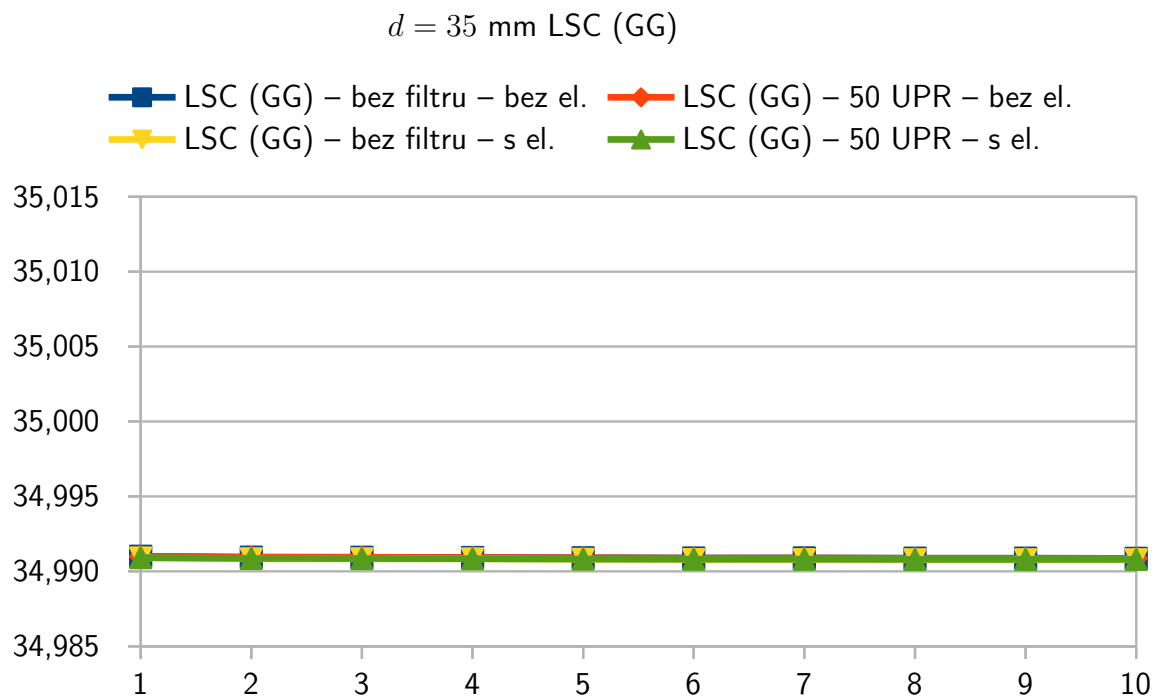
Rozdíl mezi jednotlivými metodami je též znatelný na rozptylu jednotlivých deseti měření, a tedy směrodatné odchytky měření.

V případě nijak nefiltrovaných hodnot je směrodatná odchytky měření vnějšího průměru $\varnothing 35$ mm vypočítaná metodou LSC 0,00004 mm, při použití filtrace téměř bez rozdílu 0,000037 mm, tedy v řádech statisícin. U metody MCC je to 0,00043 mm, tedy o řád vyšší. Při použití samotné eliminace odlehlých hodnot se sníží přibližně o třetinu na 0,00029 mm,

při použití filtrace 50 UPR a eliminace odlehlých hodnot na 0,00013 mm, což je čtvrtina původní hodnoty bez filtrace, a přibližně trojnásobek oproti metodě LSC.

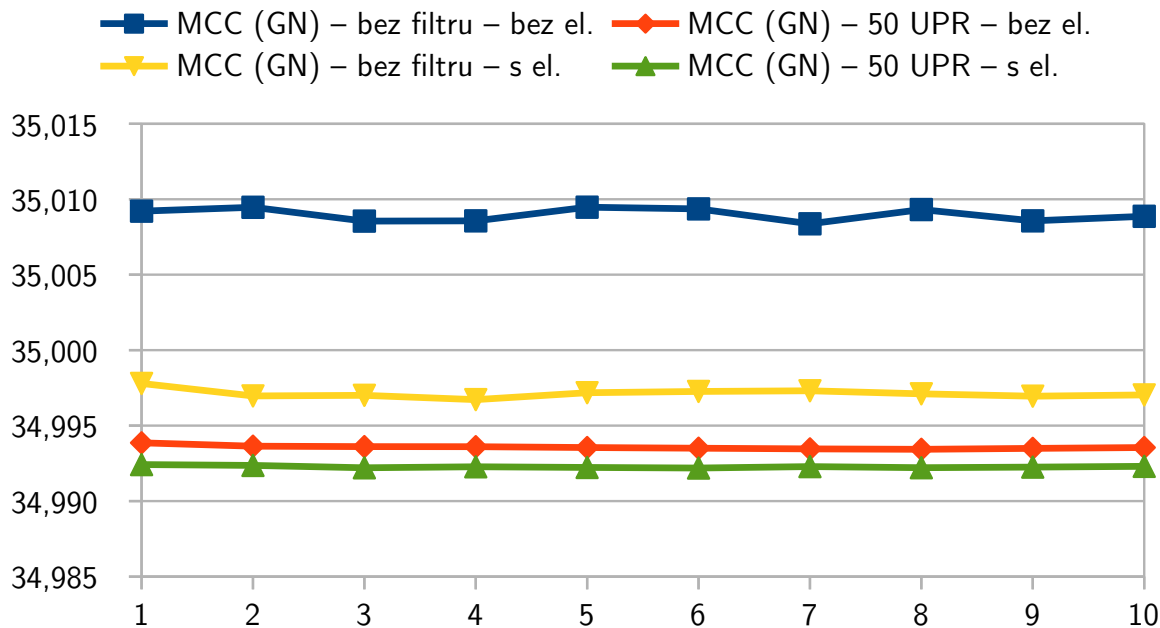
V případě použití metody LSC, které bylo v dřívějších dobách v podstatě výhradní nehraje použití filtrace a eliminace odlehlých hodnot tak zásadní rozdíl. Pokud je však dnes snaha o využití metod MCC, MIC a podobných, je třeba klást velký důraz na použití filtrace a eliminace odlehlých hodnot, protože bez těchto následných úprav mají tyto metody o jeden řád vyšší variabilitu.

Rozdíly v jednotlivých metodách jsou znatelné i na následujících grafech 4 a 5. Rozptyl hodnot vypočítaných metodou LSC je bez ohledu na použití filtrace, či eliminace výrazně menší, než rozptyl naměřených hodnot vypočítaných pomocí metody MCC.



Graf. 4: Naměřené hodnoty $\varnothing 35 \text{ mm}$ metoda LSC

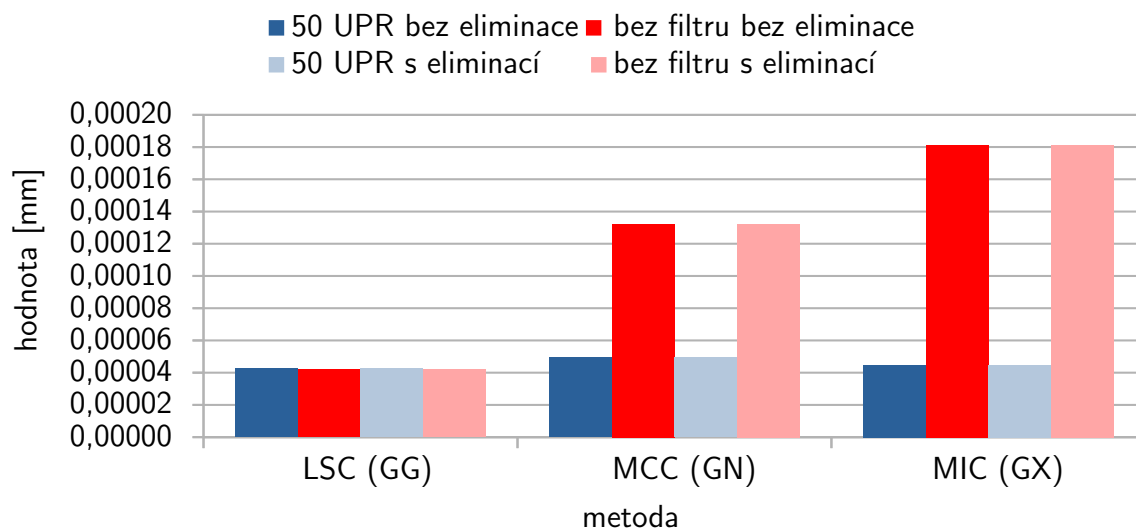
$d = 35 \text{ mm MCC (GN)}$



Graf. 5: Naměřené hodnoty $\varnothing 35 \text{ mm}$ metoda MCC

Samotná eliminace odlehlých hodnot u metody MCC značně změnila výsledek, v případě jejího nepoužití může jedna odlehlá hodnota způsobit rozdílné vyhodnocení rozměru o 0,0027 mm oproti metodě LSC.

Směrodatné odchytky $\varnothing 14 \text{ mm}$



Graf. 6: Směrodatné odchytky $\varnothing 14 \text{ mm}$

Při měření vrtané díry je variabilita měření při výpočtu metodou LSC stejná v případě

použití i nepoužití filtrace a eliminace. Je stejná jako variabilita při měření vnějšího průměru $\varnothing 35$ mm, též metodou LSC. Pro metody MCC a MIC je při použití filtrace poloviční, až třetinová, oproti nefiltrovaným hodnotám. V případě filtrovaných hodnot se navíc liší pouze v tisícinách mikrometru mezi jednotlivými metodami výpočtu.

Způsobilost měření

Pro hodnocení způsobilosti měření, respektive preciznosti byl vypočítán koeficient C_g podle metody Bosch. Jednotlivé vypočítané hodnoty jsou v tabulce 12

Tabulka 12: Měření rozměru $\varnothing 35$ mm, $\varnothing 14$ mm - Koeficient C_g

Koeficient C_g				
BEZ FILTRACE	BEZ ELIMINACE	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	79,36	7,67	8,51
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	79,51	25,21	13,38
	S ELIMINACÍ	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	86,34	11,60	15,40
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	79,51	25,21	18,38
FILTRACE 50 UPR	BEZ ELIMINACE	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	80,47	27,15	36,75
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	78,21	67,53	74,41
	S ELIMINACÍ	LSC (GG)	MCC (GN)	MIC (GX)
	Vnější $\varnothing 35$ mm	89,23	45,70	36,67
	Vnitřní $\varnothing 14$ mm	78,21	67,53	74,41

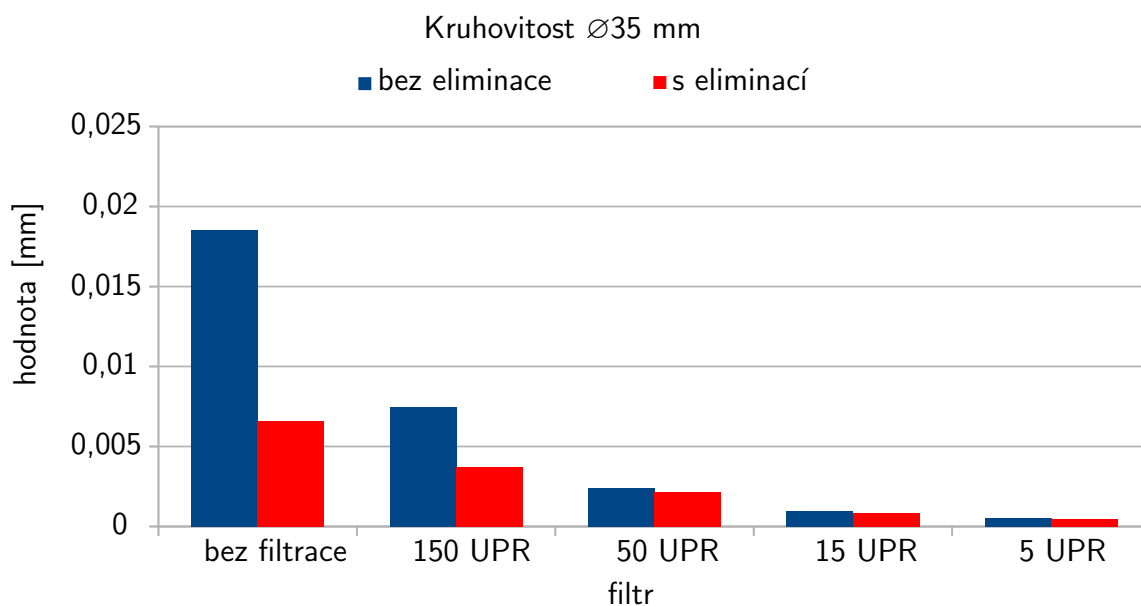
Koeficient způsobilosti pro všechny metody výpočtu roste při použití eliminace odlehlých hodnot, případně filtrace. Eliminace logicky preciznost zvyšuje, filtrace též.

Při měření soustruženého válce $\varnothing 35$ mm je znatelný rozdíl mezi metodou LSC a zbylými dvěma, při nepoužití filtrace a eliminace je způsobilost měření pomocí metod MCC a MIC téměř o řád nižší, než LSC. Při použití filtrace 50 UPR a eliminace je přibližně poloviční.

Při měření vrtané díry $\varnothing 14$ mm nemá eliminace odlehlých hodnot žádný vliv na koeficient způsobilosti. Při použití filtrace je způsobilost mezi jednotlivými metodami srovnatelná, při jejím nepoužití je pro metody MCC a MIC přibližně čtvrtinová oproti metodě LSC.

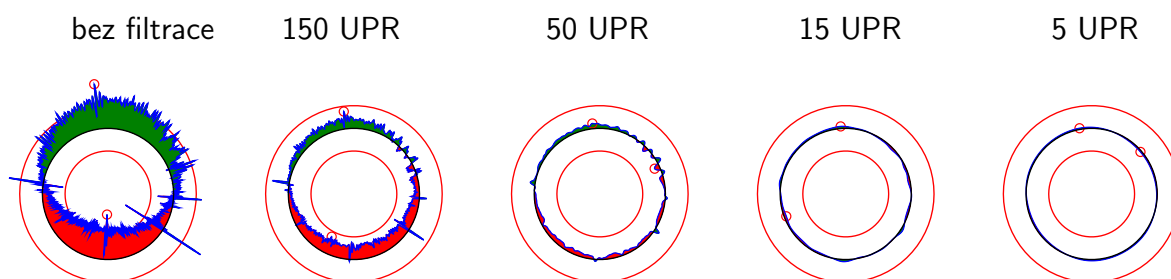
Hranice pro způsobilé měření je $C_g > 1,33$, měření tedy bylo způsobilé navzdory jednotlivým rozdílům pro všechny metody výpočtu i varianty filtrace a eliminace.

7.3 Kruhovitost

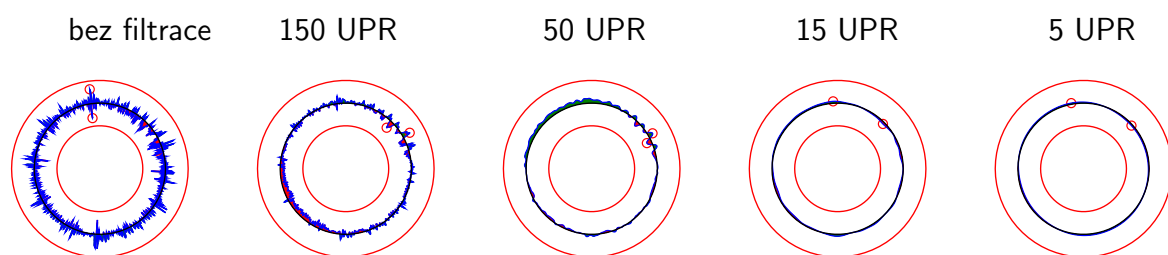


Graf. 7: Měření kruhovitosti $\varnothing 35$ mm

S většími hodnotami filtrace se snižuje vypočítaná hodnota kruhovitosti. Pokud se průměr daného kruhového prvku vydělí hodnotou UPR, filtr výchyly menší než bude tato hodnota zanedbá. Tím pádem křivku vyhladí a kruhovitost sníží. Je třeba znát parametry vyhodnocení a správně zvolit parametry filtrace, aby docházelo pouze k vyhlazení křivky od nežádoucích vlivů, a nikoli k značnému ovlivňování výsledných hodnot.

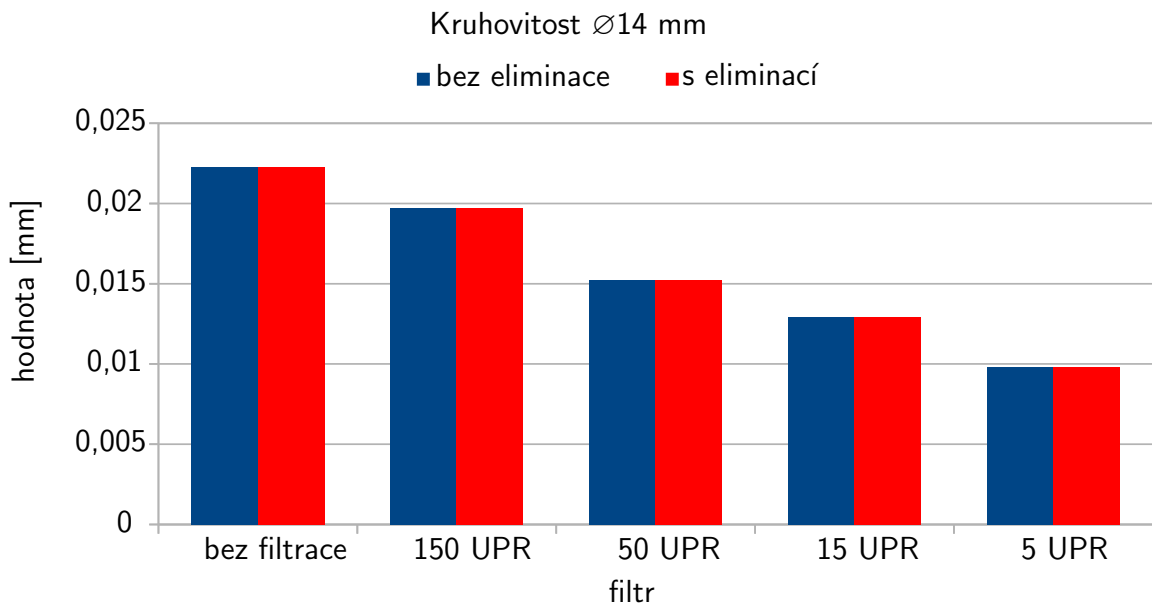


Obr. 20: Kruhovitost $\varnothing 35$ mm grafika, bez eliminace



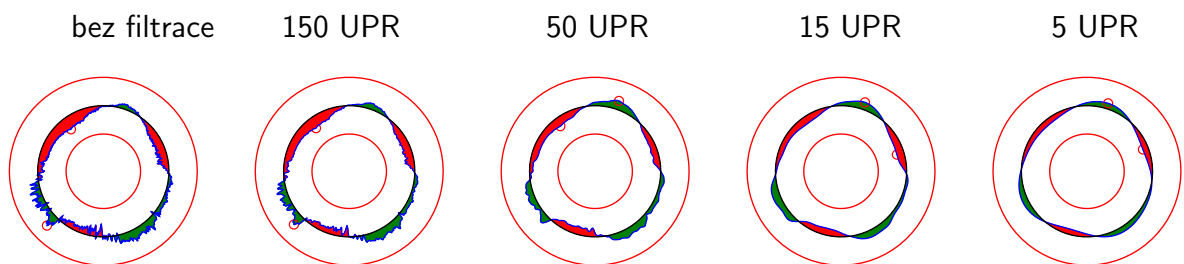
Obr. 21: Kruhovitost $\varnothing 35$ mm grafika, s eliminací

Na obrázcích 20 a 21 lze vidět schopnost filtru uměle vytvořit téměř ideální kruhovitou díru, při použití velice malých hodnot UPR. V praxi se na kartézských souřadnicových strojích používá hodnota 50 UPR nebo 150 UPR. Stále jsou rozeznatelné úchyly tvaru, ačkoli to při měřítku, které je pro tyto obrázky použité není zřetelné. Společně s filtrací se používá i eliminace odlehlých hodnot, která dokáže zanedbat vlivy například nečistot na povrchu a eliminovat viditelně nereálné bodové odchylky.



Graf. 8: Měření kruhovitosti $\varnothing 14$ mm

U vrtané díry $\varnothing 14$ mm eliminace odlehlých hodnot nemá žádný vliv na výsledné hodnoty, jak lze vidět z grafu. Co se týče filtrace, opět se zde vyskytuje klesající trend s nižšími hodnotami UPR. Rozdíl mezi kruhovitostí soustruženého válce a vrtané díry je 0,0131 mm (filtr 50 UPR s eliminací).



Obr. 22: Kruhovitost $\varnothing 14$ mm grafika

V grafickém zobrazení je zřejmý trojúhelníkový profil vrtané díry. S použitím i bez použití eliminace odlehlých hodnot jsou naměřené hodnoty a jejich grafické zpracování identické.

Směrodatné odchyly

Směrodatné odchyly jednotlivých deseti měření jsou v tabulce 13.

Tabulka 13: Směrodatné odchyly při měření kruhovitosti.

Směrodatné odchyly [μm]		
BEZ ELIMINACE	$\varnothing 35 \text{ mm}$	$\varnothing 14 \text{ mm}$
bez filtru	0,9406	0,2000
150 UPR	0,3723	0,0661
50 UPR	0,0692	0,0186
15 UPR	0,0321	0,0145
5 UPR	0,0080	0,0107
S ELIMINACÍ	$\varnothing 35 \text{ mm}$	$\varnothing 14 \text{ mm}$
bez filtru	0,2232	0,2000
150 UPR	0,1840	0,0661
50 UPR	0,1155	0,0186
15 UPR	0,0221	0,0145
5 UPR	0,0097	0,0107

S jemnějším filtrem a tedy více vyhlazenou křivkou logicky klesá i směrodatná odchylna měření. Také samotné použití eliminace odlehlých hodnot v případě soustružené díry $\varnothing 35 \text{ mm}$ bez filtru snižuje variabilitu a směrodatnou odchylnu téměř na čtvrtinu.

Způsobnost měření

Při měření kruhovitosti vychází koeficienty způsobnosti následujícím způsobem, viz tabulka 14. Červená čísla jsou z hlediska podmínek způsobnosti nevyhovující. Při použití jemnějších filtrů jsou koeficienty C_g vyšší a měření je tedy více precizní.

Tabulka 14: Koeficienty způsobnosti C_g pro měření kruhovitosti.

Koeficient C_g		
BEZ ELIMINACE	$\varnothing 35 \text{ mm}$	$\varnothing 14 \text{ mm}$
bez filtru	0,35	8,33
150 UPR	0,90	25,23
50 UPR	4,82	89,59
15 UPR	10,40	114,95
5 UPR	41,44	155,34
S ELIMINACÍ	$\varnothing 35 \text{ mm}$	$\varnothing 14 \text{ mm}$
bez filtru	1,49	8,33
150 UPR	1,81	25,23
50 UPR	2,89	89,59
15 UPR	15,11	114,95
5 UPR	34,29	155,34

7.4 Poloha roviny

Na šestihranu bylo provedeno měření dvou rovin. Jedna z nich, podle výkresové dokumentace základna pro geometrickou toleranci polohy, byla měřena spojitě po několika liniích. Její výpočet byl proveden metodou nejmenších čtverců (GG) a metodou minimální zóny (GC). Druhá rovina byla změřena čtyřmi body a následně byla vypočítána geometrická tolerance polohy těchto dvou rovin.

Výpočet byl proveden bez filtru, s filtrem se základní délkou $\lambda_c = 0,8$ mm a $\lambda_c = 2,5$ mm.

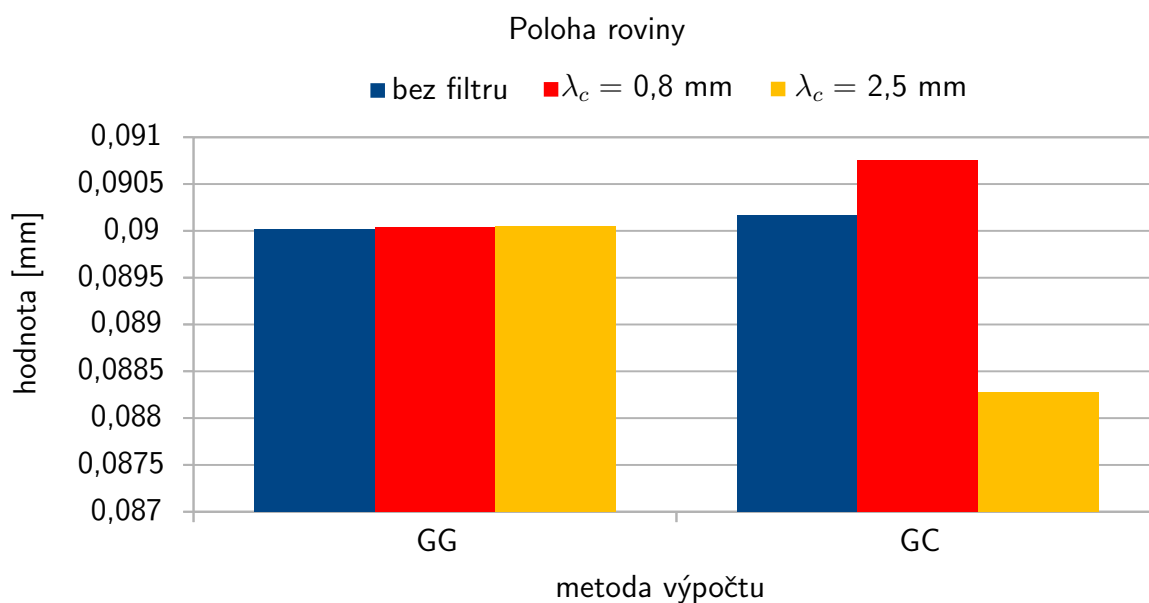
Naměřené hodnoty jsou v tabulce 15

Tabulka 15: Měření polohy roviny

Naměřené hodnoty [mm]		
	LSP (GG)	MZP (GC)
bez filtru	0,09002	0,09017
$\lambda_c = 0,8$ mm	0,09004	0,09075
$\lambda_c = 2,5$ mm	0,09005	0,08828

V případě výpočtu metodou nejmenších čtverců jsou znatelné zanedbatelné rozdíly mezi použitím, či nepoužitím filtrů, metoda se chová stejně jako v případě kruhových prvků a přirozeně eliminuje odlehlé hodnoty a vyhlazuje křivku.

V případě metody minimální zóny je znatelný rozdíl při použití, či nepoužití filtru, který dosahuje 0,0025 mm.



Graf. 9: Poloha roviny metoda GG a GC

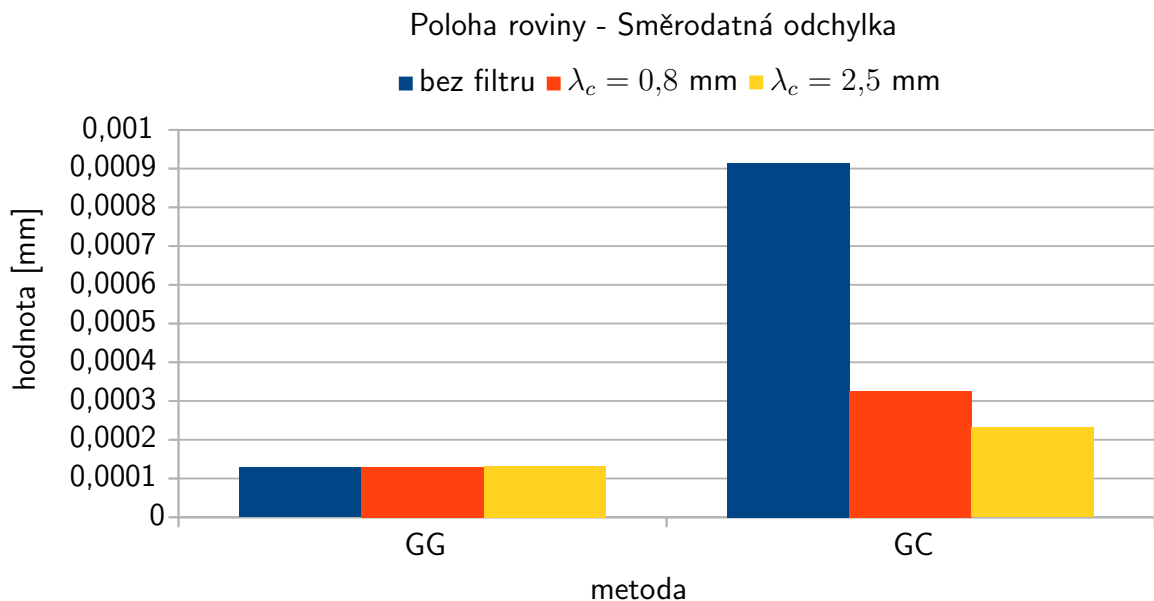
Směrodatné odchytky

Směrodatné odchytky deseti naměřených hodnot při měření polohy dvou rovin jsou v tabulce 16.

Tabulka 16: Poloha roviny - směrodatné odchytky

Směrodatné odchytky [μm]		
	LSP (GG)	MZP (GC)
bez filtru	0,129	0,915
$\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$	0,130	0,326
$\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$	0,132	0,232

Variabilita měření reprezentovaná směrodatnými odchytkami je při výpočtu metodou nejmenších čtverců (GG) ve stejných řádech. Při výpočtu metodou minimální zóny (GC) je znatelná téměř o řád vyšší směrodatná odchytky a tedy variabilita měření bez použití filtru. S použitím filtru se základní délkou $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ klesá směrodatná odchytky na třetinu, v případě použití filtru $\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$ na hodnotu 0,00023 mm, která je čtvrtinová oproti hodnotě bez filtru.



Graf. 10: Poloha roviny - směrodatné odchytky

Způsobnost měření

Tabulka 17: Způsobnost měření polohy roviny

Koeficient C_g		
	LSP (GG)	MZP (GC)
bez filtru	25,95	3,64
$\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$	25,57	10,23
$\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$	25,22	14,36

Při výpočtu metodou LSP je způsobnost měření stejná nezávisle na použití filtrace. U metody MZP dokáže filtrace zvýšit koeficient C_g až na čtyřnásobek. Jemnější filtr logicky zanedbá i menší odchylky a vyhladí křivku, sníží směrodatnou odchylku a tím se měření jeví více precizní a koeficient C_g větší.

8 Závěr

V teoretické části byl popsán systém technické normalizace, přiblížena problematika geometrického tolerování a systému norem ISO GPS. Byl vysvětlen princip souřadnicového měření, představeny jednotlivé typy souřadnicových měřicích strojů a senzorů. Byl popsán postup měření při měření na souřadnicových měřicích strojích, parametry strategie měření a jejich vliv na variabilitu měření. Na konec bylo vysvětleno hodnocení způsobilosti měření pomocí koeficientů C_g a C_{gk} .

Následovala experimentální část, měření a vyhodnocení. Součástí byla upnutí pomocí sklíčidla a upínek, vyrovnána standartní metodou a následně proběhlo deset měření za sebou. Následovalo vyhodnocení charakteristik a výpočet koeficientů způsobilosti.

Při vyhodnocení měření rozměru, respektive průměru soustružené díry $\varnothing 35$ mm, s tolerancí $\pm 0,05$ mm bylo měření způsobilé pro všechny varianty metod výpočtu. V případě metod MCC a MIC již byl vliv použití filtrace a eliminace zásadní. Bez použití filtrace a eliminace byly hodnoty C_g pro tyto metody 7,67/8,51 (MCC/MIC), v případě použití filtrace 50 UPR a eliminace odlehlých hodnot se koeficient C_g zvýšil na 45,70/36,67 (MCC/MIC). Oproti tomu metoda LSC si držela téměř stejný koeficient C_g v nezávislosti na tom, zda byla použita filtrace, či eliminace odlehlých hodnot, pro jednotlivé varianty vycházel mezi 79 a 90. Variabilita měření je znatelná na samotných směrodatných odchylkách, kde byly rozdíly mezi použitím a nepoužitím filtrace a eliminace u metod MCC a MIC v nejhorším případě čtyřnásobné. U metody LSC byly rozdíly minimální, v řádech tisícín mikrometru. Samotný rozměr vycházel největší při vyhodnocení metodou MCC, nejmenší při použití MIC a uprostřed mezi nimi metodou LSC, což souhlasí s teoretickou definicí těchto metod.

V případě měření vrtané díry o průměru 14 mm neměla samotná eliminace odlehlých hodnot žádný vliv. Z hlediska způsobilosti bylo měření opět způsobilé pro všechny varianty vyhodnocení, toleranční pole bylo též velikosti $\pm 0,05$ mm. Samotné směrodatné odchylky jsou v případě použití filtrace ve stejných řádech, liší se pouze v tisícínách mikrometru mezi jednotlivými metodami, při nepoužití filtrace jsou pro metody MCC a MIC poloviční až třetinové oproti metodě LSC. Koeficient C_g vychází tedy pro metody MCC a MIC 25,21 a 13,38 (bez filtrace bez eliminace), při použití eliminace odlehlých hodnot a filtrace 50 UPR vychází 67,53/74,41 (MCC/MIC), což už se blíží metodě LSC, u které v nezávislosti na použití filtrace vycházel přibližně 79.

Vliv volby velikosti parametru UPR při filtraci na výsledné hodnoty je demonstrován na měření kruhovitosti soustruženého válce $\varnothing 35$ mm a vrtané díry $\varnothing 14$ mm. Tolerance kruhovitosti byly v obou případech 0,01 mm. Při snižování parametru UPR se snižuje i vypočítaná hodnota kruhovitosti. Koeficient C_g s agresivnější filtrací roste a směrodatná odchylka se tedy snižuje a měření je vyhodnoceno jako preciznější. Samotné použití eliminace odlehlých hodnot při výpočtu kruhovitosti na $\varnothing 35$ mm má zásadní vliv, pro varianty bez

filtrace a s filtrací 150 UPR měření nesplňuje podmínky způsobilosti podle koeficientu C_g . Při použití eliminace už lze měření považovat za způsobilé.

Rovina, použitá jako základna GT polohy byla vypočítána dvěma metodami LSP a MZP, s filtry $\lambda_c = 2,5$ mm, $\lambda_c = 0,8$ mm a bez filtru. Druhá rovina byla změřena čtyřmi body a byla vypočtena její poloha vůči základně. Výsledky potvrzují teoretický předpoklad, metoda LSP oproti metodě MZP minimálně reaguje na použití filtru a naměřené hodnoty měly stále stejné směrodatné odchylky zaokrouhleně 0,13 mikrometrů, koeficient C_g se držel mezi hodnotami 25 a 26. Při použití metody MZP je vliv filtrace znatelný a rozdíl naměřené GT polohy mezi použitím filtru $\lambda_c = 2,5$ mm a nepoužitím filtru je 0,0025 mm. Směrodatná odchylka deseti měření při použití filtru $\lambda_c = 2,5$ mm je čtyřikrát menší, než v případě hodnot bez filtrace. Koeficient C_g má při nepoužití filtru hodnotu 3,64, v případě filtrace $\lambda_c = 2,5$ mm je jeho hodnota přibližně čtyřikrát větší a to 14,36. V porovnání s metodou LSP je však stále skoro poloviční.

Výsledky měření potvrzují předpoklady, že metoda LSC, případně LSP je při použití dostatečného počtu měřených bodů stabilní a minimálně reaguje na použití filtrace, či eliminace odlehlých hodnot. Naproti tomu výsledky při použití metod typu MCC a MIC u kruhových prvků a MZP na rovinných jsou použitými filtry, či eliminací výrazně více ovlivněny. Dříve bylo na souřadnicových měřicích strojích téměř výhradní používání k výpočtu metody nejmenších čtverců. Pouze změna metody výpočtu na MCC, MIC a podobné v tomto případě může zvýšit variabilitu měření v nejhorších případech až o řád, proto je společně s výpočtem pomocí těchto metod nutnost používat filtrace naměřených dat. Použití filtrace a eliminace odlehlých hodnot je z hlediska jejich vlivu na variabilitu měření zásadní, je ale nutné volit parametry filtrace s rozvahou, aby docházelo pouze k chtěnému vyhlazení křivky od nežádoucích vlivů, a nikoli k značnému ovlivňování výsledných hodnot. Bylo by vhodné ve výsledných protokolech uvádět, jaké byly parametry filtrace a výpočtu, zlepší to interpretaci výsledků mezi smluvními stranami. V případě provádění měření několika subjekty přispěje co nejvíce informací o provedeném měření jeho reprodukovatelnosti.

Odkazy

1. ISO - *Structure and governance* [online]. [cit. 2023-03-17]. Dostupné také z: <https://www.iso.org/structure.html>.
2. ČSN EN ISO 14638. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Maticový model*. Česká agentura pro standardizaci, 2021.
3. ČSN EN ISO 8015. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Základy - Pojmy, principy a pravidla*. Česká agentura pro standardizaci, 2012.
4. ČSN EN ISO 14405-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 2: Rozměry jiné než lineární a úhlové rozměry*. Česká agentura pro standardizaci, 2022.
5. ČSN EN ISO 1101. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Česká agentura pro standardizaci, 2020.
6. METROLOGY, ZEISS ACADEMY. *GPS – Geometrické specifikace produktu*. 2023.
7. SLADEK, Jerzy A. *Coordinate metrology: accuracy of systems and measurements*. London: Springer, 2016. ISBN 2195-9862.
8. HOCKEN, Robert J.; PEREIRA, Paulo H. *Coordinate measuring machines and systems: Second edition*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. ISBN 9780429114229.
9. CHRISTOPH, Ralf; NEUMANN, Hans J. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografií*. 4. přeprac. a rozš. vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčák, 2008.
10. NENÁHLO, Čeněk. Souřadnicová měřicí technika. *MM Průmyslové spektrum*. [B.r.], roč. Březen 2011, č. 3, s. 42–44. ISSN 1212-2572.
11. *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. Katedra výrobních strojů a automatizace - Technická univerzita v Liberci, [cit. 2022-11-22]. Dostupné také z: <http://ksa.tul.cz/getFile/id:2552>.
12. *3D Coordinate Measuring Machines* [online]. ACCRETECH, [cit. 2023-07-06]. Dostupné také z: <https://www.hi-top.com.tw/TSK/UPMC.pdf>.
13. BOUKEBBAB, S.; GHERIBI, H. The influence of the strategy of acquisition on uncertainties of measurement of a machined surface. *MECHANIKA*. 2017, roč. 23, č. 3, s. 441–448. ISSN 1392-1207.
14. WECKENMANN, A.; KNAUER, M.; KUNZMANN, H. The Influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM-Measurements. *CIRP Annals*. 1998, roč. 47, č. 1, s. 451–454. ISSN 0007-8506.

15. LEINVEBER, Jiří; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Sedmé vydání. Úvaly: Albra, 2021. ISBN 8073611244;9788073611248;
16. *Invar - Nickel Iron Alloy* [online]. AZO MATERIALS, [cit. 2023-07-06]. Dostupné také z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=515>.
17. FARRAG, Abdelrahman; HESHMAT, Mahmoud; EL-SHARIEF, Mahmoud; EL-SEBAIE, Mohamed. Identifying Sources of Variations in Cement Bags Company: A Case Study. In: 2019, s. 154–158. Dostupné z DOI: 10.1109/IEA.2019.8715220.
18. *Výkladový slovník metrologie* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, [cit. 2023-07-24]. Dostupné také z: <https://aplikace.unmz.cz/urad/term.asp>.
19. FLACK, David. *Measurement Good Practice Guide No. 41*. Engineering Measurement Division, National Physical Laboratory, Queen's Printer and Controller of HMSO, 2014. ISSN 1368-6550. Dostupné také z: <https://www.npl.co.uk/gpgs/cmm-measurement-strategies>.
20. URBAN, J.; BERANEK, L.; KOPTIŠ, M.; ŠIMOTA, J.; KOŠŤÁK, O. Influence of CMM Scanning Speed and Inspected Feature Size on an Accuracy of Size and Form Measurement. *Manufacturing Technology*. 2020, roč. 20, č. 4, s. 538–544. ISSN 1213-2489.
21. RAGHUNANDAN, R.; VENKATESWARA RAO, P. Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, roč. 202, č. 1-3, s. 240–245.
22. GAPINSKI, Bartosz; RUCKI, Mirosław. The roundness deviation measurement with CMM. In: *2008 IEEE International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement*. 2008, s. 108–111. Dostupné z DOI: 10.1109/AMUEM.2008.4589944.
23. ČSN EN ISO 12181-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Kruhovitost - Část 2: Operátory specifikace*. Česká agentura pro standardizaci, 2012.
24. BERÁNEK, Libor. *Strojírenská metrologie*. 2023.
25. ČSN EN ISO 12780-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přímost - Část 2: Operátory specifikace*. Česká agentura pro standardizaci, 2012.
26. ČSN EN ISO 14405-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 1: Lineární rozměry*. Česká agentura pro standardizaci, 2017.
27. SRINIVASAN, Vijay; SHAKARJI, Craig M.; MORSE, Edward P. On the Enduring Appeal of Least-Squares Fitting in Computational Coordinate Metrology. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2011, roč. 12, č. 1. ISSN 1530-9827. Dostupné z DOI: 10.1115/1.3647877.

Seznam obrázků

1	Příklad jednoznačného a nejednoznačného tolerování na výkrese	12
2	Geometrická tolerance kruhovitosti.[6]	14
3	Geometrická tolerance polohy.[6]	14
4	Schéματα některých typů kartézských souřadnicových strojů.[8]	16
5	Carl Zeiss UPMC 850 Carat.[12]	17
6	Měřicí rameno	18
7	Spínací senzor.[8]	20
8	Skenovací systém.[9]	20
9	Vztah C_p a C_{pk} . [17]	25
10	Postup měření	27
11	Kalibrační koule.	28
12	Rozdíl v počtu bodů a zachycení úchylky tvaru.[19]	32
13	Vliv rychlosti snímání na vyhodnocení.[20]	33
14	Rozdělení základního profilu na jednotlivé složky.[24]	34
15	Metody výpočtu.[6]	36
16	Rozdíl mezi LSP (modře) a MZP (červeně)	37
17	Model měřené součásti	38
18	Upnutí součásti ve stroji	39
19	Výřez součásti s měřenými charakteristikami	40
20	Kruhovitost $\varnothing 35$ mm grafika, bez eliminace	47
21	Kruhovitost $\varnothing 35$ mm grafika, s eliminací	47
22	Kruhovitost $\varnothing 14$ mm grafika	48

Seznam grafů

1	Měření rozměru $\varnothing 35$ mm	41
2	Měření rozměru $\varnothing 14$ mm	42
3	Směrodatné odchyly $\varnothing 35$ mm	43
4	Naměřené hodnoty $\varnothing 35$ mm metoda LSC	44
5	Naměřené hodnoty $\varnothing 35$ mm metoda MCC	45
6	Směrodatné odchyly $\varnothing 14$ mm	45
7	Měření kruhovitosti $\varnothing 35$ mm	47
8	Měření kruhovitosti $\varnothing 14$ mm	48
9	Poloha roviny metoda GG a GC	50
10	Poloha roviny - směrodatné odchyly	51

Seznam tabulek

1	Geometrické tolerance přehled.[5][6]	13
2	Fyzikální vlastnosti vybraných materiálů.[15][16]	23
3	Příklad doporučeného počtu bodů pro měření geometrických prvků.[19]	31
4	Parametry pro určení základní délky.[25]	34
5	Parametry pro určení hodnoty UPR.[23]	35
6	Metody výpočtu.	35
7	Označení metod výpočtu ve výkresové dokumentaci	36
8	Metody výpočtu pro rovinné prvky.	36
9	Parametry strategie měření.	40
10	Měření rozměru $\varnothing 35$ mm, $\varnothing 14$ mm	41
11	Měření rozměru $\varnothing 35$ mm, $\varnothing 14$ mm - směrodatné odchylky	43
12	Měření rozměru $\varnothing 35$ mm, $\varnothing 14$ mm - Koeficient C_g	46
13	Směrodatné odchylky při měření kruhovitosti.	49
14	Koeficienty způsobilosti C_g pro měření kruhovitosti.	49
15	Měření polohy roviny	50
16	Poloha roviny - směrodatné odchylky	51
17	Způsobilost měření polohy roviny	52

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1

Naměřená data