

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**TOMÁŠ
SOBEK**



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Hodnocení vývoje laser skenerů
z hlediska přesnosti a opakovatelnosti**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Tomáš Sobek

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Michal Koptiš

STUDIJNÍ PROGRAM: N0715A270001 Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: N071TVIN Bez specializace

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sobek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **411148**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hodnocení vývoje laser skenerů z hlediska přesnosti a opakovatelnosti měření

Název diplomové práce anglicky:

Laser scanners development evaluation of accuracy and repeatability

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled CMM a jejich snímacích systémů
2. Technologie dotykového měření a laserového skenování
3. Hodnocení moderních laser skenerů na základě opakovaného měření
4. Návrh metodiky pro práci s laser skenery

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Koptiš ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **17.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Michal Koptiš
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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a odborných konzultantů, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

V Praze dne: 26.07.2022

.....

Bc. Tomáš Sobek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalovi Koptišovi za poskytnuté materiály, cenné informace, vedení diplomového projektu. Poděkování patří rovněž všem, kteří mě po celou dobu studia podporovali, vedení společnosti Hexagon Metrology s.r.o. za možnost práci realizovat za pomoci jejich vybavení, rodině a mé ženě Jessice.

Anotace

Diplomová práce se zabývá hodnocením vývoje laser skenerů z hlediska přesnosti a opakovatelnosti na stacionárních souřadnicových měřicích strojích. V teoretické části práce je popsán základní princip měření, typy souřadnicových měřicích strojů a druhy snímacích senzorů. Praktická část je věnována podrobné analýze laser skenerů z hlediska jejich přesnosti a opakovatelnosti dle provedených experimentů. Pozornost je rovněž zaměřena na správnou techniku skenování a zdůraznění její důležitosti.

Název diplomové práce: Hodnocení vývoje laser skenerů z hlediska přesnosti a opakovatelnosti

Autor práce: Bc. Tomáš Sobek

Vedoucí práce: Ing. Michal Koptiš

Konzultant: Klikněte nebo klepněte sem a zadejte text.

Akademický rok: 2022

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí ústavu: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Rozsah práce: 74 stránek, 17 tabulek, 65 obrázků

Klíčová slova: laserové skenování, souřadnicový měřicí stroj, bez – kontaktní měření, způsobilost měřidla

Annotation

The diploma thesis deals with the evaluation of the development of laser scanners in terms of accuracy and repeatability on stationary coordinate measuring machines. The theoretical part of the thesis describes the basic principle of measurement, types of coordinate measuring machines and types of sensors. The practical part is devoted to a detailed analysis of laser scanners in terms of their accuracy and repeatability according to the experiments. Attention is also focused on the correct scanning technique and emphasizing its importance.

Title of the final thesis:	Laser scanners development evaluation of accuracy and repeatability
Author:	Bc. Tomáš Sobek
Supervisor:	Ing. Michal Koptiš
Consultant:	Klikněte nebo klepněte sem a zadejte text.
Academic year:	2022
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12134 – Department of Machining, Process Planning, Metrology
Head of department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Extent:	74 pages, 17 tables, 65 pictures
Keywords:	laser scanning, coordinate measuring machine, non – contact measurement, machine capability

Obsah

1. ÚVOD.....	1
2. ÚVOD DO SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ TECHNIKY	2
2.1. Historie.....	2
2.2. Princip souřadnicových měřicích strojů	4
2.2.1. Souřadnicový systém	5
2.2.2. Dělení souřadnicového systému	6
3. STACIONÁRNÍ CMM.....	7
3.1. Portálový typ.....	8
3.2. Sloupový typ s horizontálním ramenem.....	9
3.3. Mostový typ	10
3.4. Výložníkový typ.....	11
4. KONSTRUKCE CMM	12
5. SNÍMACÍ SYSTÉM CMM.....	13
5.1. Pevné hlavy	13
5.2. Otočné hlavy	14
5.2.1. Indexovatelné hlavy.....	15
5.2.2. Kontinuální hlavy	16
5.3. Snímací systém	16
5.3.1. Dotykový.....	17
5.3.1.1. Spínací systémy	18
5.3.1.2. Analogové systémy:	20
5.3.2. Bezdotykový	22
5.3.2.1. Laserové skenery.....	22
5.3.2.2. Kamerové skenery	24
5.3.2.3. Chromatický senzor bílého světla.....	25

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
6.1. Charakteristika zařízení	28
6.1.1. Popis stroje	28
6.1.2. Popis skenerů	28
6.1.2.1. HP-L-10.6	29
6.1.2.2. HP-L-10.10	30
6.1.2.3. Porovnání technických specifikací	31
6.2. Kvalifikace skeneru	33
6.3. Verifikace skeneru	33
6.3.1. Obecně	34
6.3.2. Test na kouli	35
6.3.2.1. Průběh	36
6.3.2.2. Vyhodnocení	36
6.3.3. Test na desce	37
6.3.3.1. Průběh	38
6.3.3.2. Vyhodnocení	39
6.3.4. Dosažené poznatky	39
6.4. Experimentální měření	40
6.4.1. Hustota	40
6.4.1.1. Popis experimentu	40
6.4.1.2. Dosažené poznatky	41
6.4.2. Kompletnost	41
6.4.3. Šum	42
6.4.3.1. Popis experimentu	42
6.4.3.2. Dosažené poznatky	44
6.4.4. Přesnost / opakovatelnost	44
6.4.4.1. Určení $T_{\min}(C_g)$ a $T_{\min}(C_{gk})$ – etalon	46

6.4.4.2. Určení $T_{\min}(C_g)$ a $T_{\min}(C_{gk})$ – reálná součást.....	49
6.4.4.3. Odhad nejistoty měření	57
7. DOPORUČENÁ TECHNIKA SKENOVÁNÍ.....	58
7.1. Měření hran a speciálních geometrií.....	58
7.2. Sekundární odrazy	59
7.3. Přímé odrazy	60
7.4. Přerušování odrazu paprsku.....	61
7.5. Nepřekrývající se skeny.....	62
7.6. Chyby v důsledku znečištění.....	62
8. ZÁVĚR.....	64
Seznam použitých literárních zdrojů	66
Seznam tabulek	72
Seznam obrázků	72
Přílohy	74

Seznam zkratek

CMM	- Anglicky Coordinate Measuring Machine (Souřadnicový měřicí stroj)
SW	- Anglicky Software (Programové vybavení počítače)
3D	- Trojrozměrný. Označuje prostor, který lze popsat pomocí 3 rozměrů
CCD	- Anglicky Charge-coupled device (elektronická součástka pro snímání obrazové informace)
GPS	- Geometrické požadavky na výrobky
ODS	- Anglicky Optical distance sensor (optický snímač vzdálenosti)
ISO	- Anglicky International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro normalizaci)
ČSN	- Česká technická norma

1. ÚVOD

Obor metrologie byl vždy nedílnou součástí kteréhokoli průmyslového podniku, protože právě kontrola jakosti výrobků se stala nutnou složkou výrobního procesu. S rostoucími požadavky na rychlost a přesnost v oblasti sledování jakosti vyráběných dílů se v posledních letech stále více prosazují bezkontaktní metody měření. Vývoj v této oblasti značně pokročil a stále více se na trhu objevují řešení, které jsou schopny do určité míry konkurovat kontaktním metodám měření. Určitým standardem jsou dnes souřadnicové měřicí stroje (anglická zkratka CMM), které poskytují vysokou úroveň na poli rozměrové kontroly. Tyto stroje disponují především kontaktními systémy, ale vzhledem k rostoucí oblibě právě bezdotykové technologie se trend pomalu mění.

Teoretická část práce, která mimo nezbytného seznámení se základní terminologií ve světě souřadnicové měřicí techniky přináší podrobný přehled základních typů stacionárních CMM včetně typů systému snímání. Jsou zde vysvětleny rozdíly mezi jednotlivými typy konstrukcí stojů a jejich vhodnost použití v praxi. Pozornost je především věnována dostupným snímacím systémům pro stacionární stroje. Jsou zde popsány a vysvětleny rozdíly mezi spínacím a analogovým mechanismem dotykového systému, rovněž je zde vysvětlen princip laser skenerů a optických kamer.

V navazující praktické části práce je pozornost soustředěna poslední generaci laser skeneru v porovnání s jeho předchůdcem. Na základně stanovených a navržených postupů byla provedena experimentální studie, jejímž úkolem bylo zjistit úroveň vývoje laser skenerů z hlediska přesnosti a opakovatelnosti. Praktická část obsahuje řadu experimentálních měření s cílem dokázat a potvrdit úroveň pokroku laserových skenerů na stacionárních souřadnicových měřicích strojích nejen za ideálních podmínek, ale zejména v reálných situacích.

2. ÚVOD DO SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ TECHNIKY

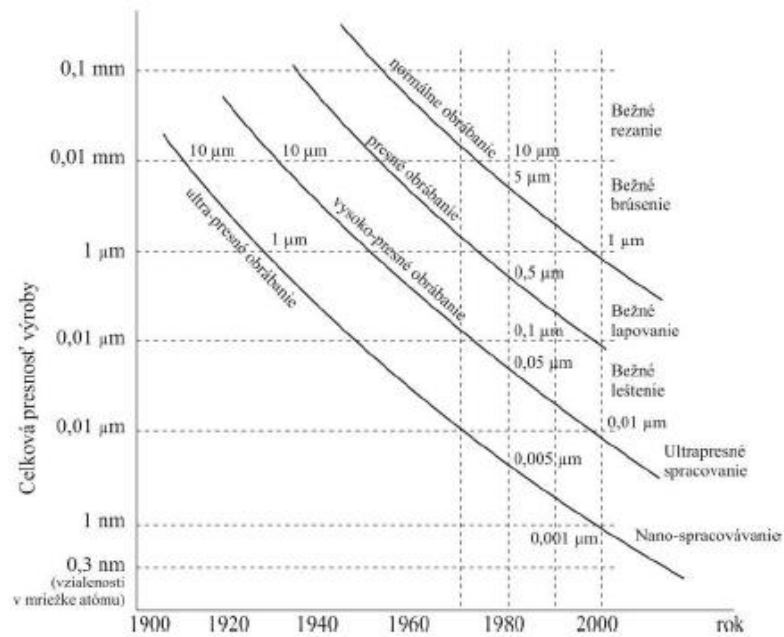
S příchodem číslicově řízených obráběcích strojů vzrostla poptávka po prostředcích na podporu těchto zařízení. Rostla potřeba mít stroj, který dokáže zrychlit následnou kontrolu. Při výrobě prototypů nebo skutečných dílů všech produktů jsou rozměry dílu a geometrické charakteristiky stěžejními parametry. Chyby způsobené nepřesnostmi rozměrů mohou ohrozit celý výrobní proces. Aby se těmto situacím předcházelo, byl vynalezen měřicí stroj s vysokou přesností. [1]

Souřadnicové měřicí stroje představují jednu z nejvýznamnějších pokroků v oblasti měření a svým vstupem na trh sehrály důležitou roli v oblasti průmyslových odvětvích včetně automobilového průmyslu, letectví, elektroniky, zdravotnictví, výzkumu, rozvoje polovodičů a staly se neoddělitelnou součástí výrobního procesu. Vývoj a inovace v oblasti souřadnicové měřicí techniky je především způsoben vývojem obráběcích strojů a nárůstem požadavků na výslednou přesnost výrobku. Svě dominantní postavení si souřadnicová měřicí technika získala především kvůli své flexibilitě a univerzálnosti a spadá tak k nejrychleji se vyvíjejícím měřicím prostředkům. Svoje uplatnění našly nejen v laboratorních podmínkách, ale i v oblasti strojírenské výroby, kde díky své konstrukci dokážou fungovat i v těch nejpřísnějších podmínkách [3]

2.1. Historie

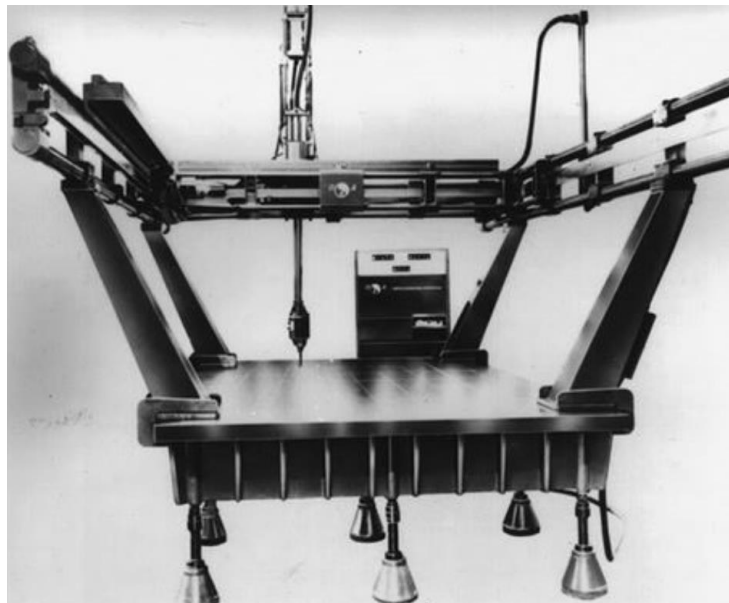
Za první průkopníky v oblasti metrologie lze považovat C. E. Johanssona a F.H.Rolta, kteří se podíleli na publikacích o strojích, které dovedou měřit v kartézské soustavě. Zhruba v 60. letech se využití CMM začalo navyšovat už kvůli rostoucí popularitě mikroprocesorů, které začaly získávat sílu v počítačových technologiích. Právě schopnost zpracování dat počítačem dovolilo využívat CMM nejefektivnějším možným způsobem a využití měřicí techniky bylo čím dál tím prospěšnější.

Postupem času rostl tlak na přesnost měření a roku 1983 Taniguchi ve své práci odhadl trend výrobní přesnosti. [3]



Obr. 1: Trendy výrobní přesnosti [3]

První modely tříosých CMM byly k vidění již v 60. letech 20. století, krátce po prvotním zavedení této technologie. O prvním vynalezeném tříosém stroji však stále vede spor společnost Ferranti ze Skotska a společnost DEA z Itálie. [17]



Obr. 2: Prototyp DEA souřadnicového stroje [18]

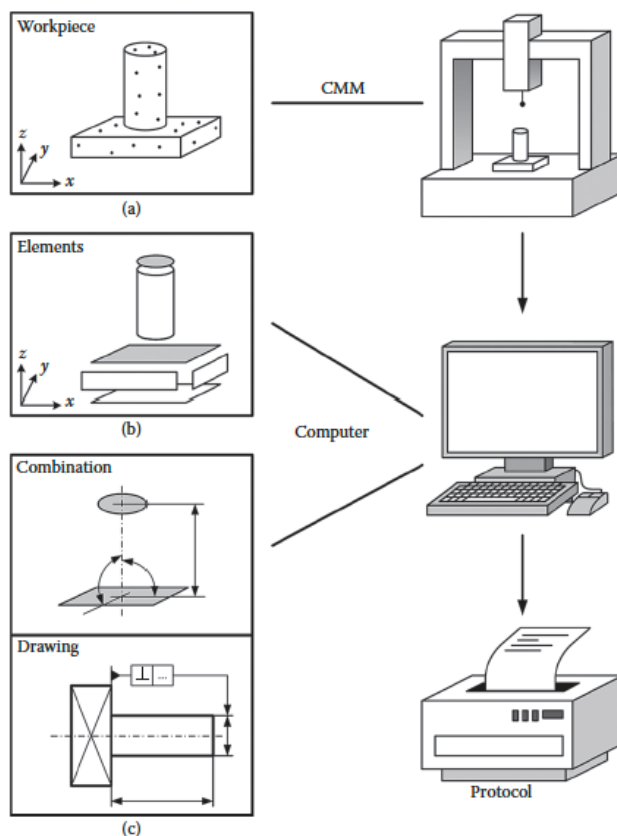
2.2. Princip souřadnicových měřicích strojů

CMM je měřicí zařízení se schopností určit prostorové souřadnice bodů, které jsou snímány na povrchu součásti pomocí snímacího systému, který se pohybuje v definovaném měřicím objemu. Pojem CMM se používá pro označení všech měřicích zařízení, které mají schopnost určit prostorové souřadnice na povrchu součásti. Základním principem měření na těchto strojích je určení výchozího bodu v prostoru a definovat polohu měřených bodů za pomoci kartézského souřadnicového systému. Informace o měřicích bodech jsou zaznamenávány jako souřadnice v 3D prostoru (X, Y, Z). Číselné hodnoty těchto bodů jsou zpracovány počítačovými daty a po matematických výpočtech jsou získána přesná data tvaru, polohové tolerance a dalších geometrických veličin. [16, 19]

Jedná se o jednu z neúčinnějších metod měření a získávání rozměrových dat, protože může nahradit různé nástroje pro měření povrchu, drahá kombinovaná měřidla a zkrátit čas potřebný pro složité měřicí úlohy z hodin na minuty. To jsou aspekty, které nelze dosáhnout jinými stroji. [20] Výhodou CMM je schopnost měřit s vysokou přesností geometrické veličiny, které se jinými měřicími zařízeními kontrolují velice obtížně. Příkladem může být měření těžiště otvoru vůči virtuálnímu počátku. Kontrolní operace tohoto typu jsou obtížně měřitelné komunálními měřidly jako jsou posuvná měřítka a mikrometry. To je důvod, proč jsou CMM považovány za všestranné měřicí stroje, protože umožňují měřit širokou škálu geometrických veličin v 3D prostoru. [19]

Primární funkcí CMM je kontrola skutečného tvaru součásti, porovnávat jej s požadovaným tvarem a vyhodnocovat metrologické informace. Skutečný tvar obrobku je získán sběrem dat snímacím systémem stroje, a to kontaktně nebo bezkontaktně. Každý změřený bod je vyjádřen pomocí jeho naměřených souřadnic. Obr. 4 znázorňuje pracovní postup při použití CMM:

- a) Sběr dat na měřené součásti
- b) Zpracování naměřených dat a tvorba geometrických prvků z hlediska parametrů určujících jejich tvar, velikost, umístění a orientaci
- c) Vyhodnocení požadovaných geometrií součásti ve vztahu k výkresové dokumentaci

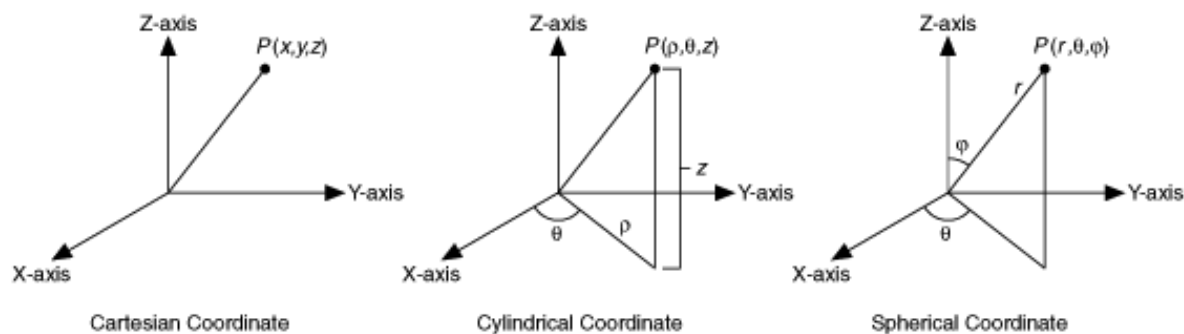


Obr. 3: Pracovní postup na CMM [4]

2.2.1. Souřadnicový systém

Princip souřadnicového systému je jednoznačně poskytnout popis polohy objektu v prostoru a následně matematicky objekt vyjádřit. U většiny nyní dostupných CMM probíhá měření v kartézském souřadnicovém systému. Tento systém se skládá ze tří, vzájemně na sebe kolmých os. Kartézská sestava souřadnic, která byla vynalezena francouzským matematikem a filozofem René Descartes na počátku 17. století, nám umožňuje lokalizovat prvky ve vztahu k jiným prvkům na součásti nebo ve vztahu k výchozímu bodu systému. [4]

Souřadnicová metrologická zařízení běžně pracují ve třech různých typech souřadnic:



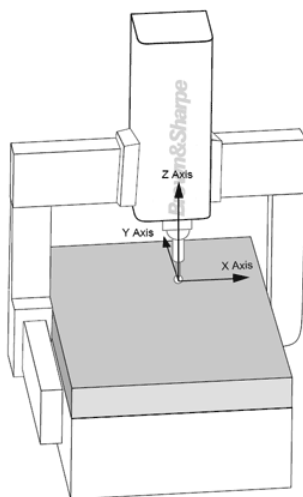
Obr. 4: Typy souřadnicového systému [21]

2.2.2. Dělení souřadnicového systému

Souřadnicový systém stroje:

Jedná se o pozice X, Y, Z na souřadnicovém měřicím stroji vzhledem k výchozí pozici stroje. Osy jsou na sebe navzájem kolmé a rovnoběžné s pohybem stroje. Většina manuálních strojů nemá výchozí polohu, proto je výchozí polohou umístění stroje v bodě spuštění systému. Některé manuální stroje nabízejí výchozí polohu, která vyžaduje, aby operátor ručně pohyboval strojem přes referenční značky, vždy jednotlivě po jedné ose. U automatických strojů se při spuštění vyžaduje najetí stroje do výchozí polohy, kde vytvoří nulový bod X, Y, Z.

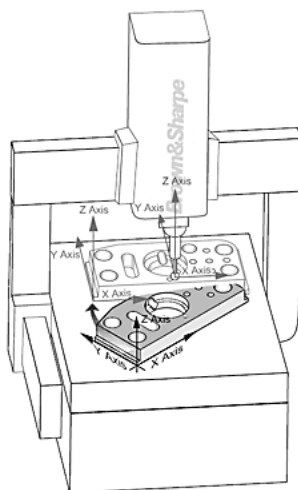
Souřadnicový systém stroje tedy není platným systémem pro získání spolehlivých naměřených hodnot o měřeném dílu, a proto se převádí na měřenou součást. [22]



Obr. 5: Souřadnicový systém stroje [22]

Souřadnicový systém součásti:

Za pomoci CMM a měřicího softwaru se změří části dílu určené výkresovou dokumentací a vytvoří se systém, který se matematicky vztáhne k souřadnicovému systému stroje. Jedná se o nově vytvořený systém, který lokalizuje umístění a natočení dílu v prostoru stroje. [22]



Obr. 6: Souřadnicový systém součásti [22]

3. STACIONÁRNÍ CMM

Samotná konstrukce CMM hraje důležitou roli v jeho výkonnostních aspektech, což je zpravidla přesnost, tuhost a životnost spojená s náklady na používání. Vzhledem k potřebám zákazníků měřit širokou škálu tvarově a rozměrově odlišných výrobků se kladl důraz nejen na vývoj nových technologií ve výrobě, ale rovněž na vývoj CMM. Z pohledu potřeby můžeme rozdělit stroje do skupin na základě různých hledisek. Dle normy ČSN EN ISO 10360 – 1 se CMM rozdělují těchto základních geometrických skupin: [23]

- Portálové
- Sloupové (stojanové)
- Mostové
- Výložníkové (konzolové)

S přihlédnutím na celkovou váhu měřených dílů se CMM dále mohou dělit:

- S pevným stolem
- S pevnou deskou na úrovni podlahy
- S pohyblivým stolem

3.1. Portálový typ

Patří k nejrozšířenějším CMM pro střední a velké rozsahy měření. Portál zajišťuje velkou tuhost stroje a přesnost měření. Nevýhodou může být vzhledem ke konstrukci ztížený přístup k měřené součásti. Pohyb stroje je veden na vzduchových ložiskách, které jsou náchylné na čistotu, a tak se tento typ nehodí do dílenského prostředí. Stroje tohoto typu lze rozlišovat dle dvojího provedení:

a) S pohyblivým portálem

Tento typ konstrukce disponuje pohyblivým portálem a pevným stolem, v oblasti měření na CMM se jedná o nejrozšířenější druh. Za hlavní nevýhodu tohoto typu konstrukce je považováno možné natáčení se, a to z důvodu pohybu dvou sloupů rozdílnou rychlostí, které může zapříčinit zkroucení portálu. [1, 3]



Obr. 7: Portálový CMM Global S Chrome 7.10.7 [24]

b) S pevným portálem

Konstrukce s pevným portálem vyžaduje pohyblivý stůl, který se zpravidla pohybuje po delší ose. Tento typ konstrukce je považován za nejpresnější a kvůli

tuhosti konstrukce se snižuje Abbeho chyba. Rychlost je zde v porovnání s pohyblivým portálem nižší, protože dochází k pohybu stolu, na kterém je měřený díl upnutý. Zároveň je zde omezení celkové hmotnosti měřené součásti. Kvůli nepohyblivému portálu se eliminuje možný problém s kroucením, který se vyskytuje u konstrukcí s pohyblivým portálem. [1, 3]



Obr. 8: Portálový CMM Leitz PMM-C 8.10.6 [25]

3.2. Sloupový typ s horizontálním ramenem

Základem konstrukce je nosný sloup, na kterém je upevněné pohyblivé rameno ve vodorovné pozici, na jehož konci je umístěna snímací hlava se snímačem. Vzhledem k typu konstrukce se tento typ stroje využívá zejména v automobilovém průmyslu při měření automobilových karoserií, nebo v jiných odvětví (letectví, lodářství, železniční průmysl), kde je potřeba měřit dlouhé součásti. Kvůli modulární otevřené konstrukci lze stroj snadno integrovat do výrobních linek a nakonfigurovat do buněk s více rameny, tzv. dvouramenné provedení, kdy proces měření probíhá zároveň oběma rameny v rámci společného souřadnicového systému, která jsou zrcadlově naproti sobě. Pracovní stůl u tohoto typu stroje může být zapuštěn do země, to umožňuje přístup do prostoru stroje ze všech stran, a tím pádem snadnější manipulaci při nakládání přípravků a dílů do prostoru stroje. U strojů tohoto typu je běžné, že jedna osa je výrazně delší než osy ostatní, menší dynamická tuhost kvůli pohyblivému horizontálnímu rameni a poměrně velké offsetové chyby. [1, 3]



Obr. 9: Sloupový CMM TORO s horizontálním ramenem [26]

3.3. Mostový typ

Jedná se o nejpoužívanější typ stroje pro měření nadrozměrných součástí. Měřicí rozsah v nejdelší ose může dosahovat 25 m a více. Kvůli charakteru konstrukce se využívá zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Tuhost konstrukce je zaručena mohutně dimenzovanými nosníky a sloupy. Přístupnost k měřené součásti v operačním prostoru stroje je dobrá, přesnost je v porovnání s portálovým typem horší. Ovšem i při konstrukci tohoto typu lze dosáhnout vysokých přesností, rychlostí a akcelerace. Stroj má stacionární stůl a pohyblivý můstek, díky němu je účinek ohybu horizontální části stroje snížen, protože konstrukce obsahuje dva nosné sloupy. [1, 3, 4]



Obr. 10: Mostový CMM LAMBDA SP [27]

3.4. Výložníkový typ

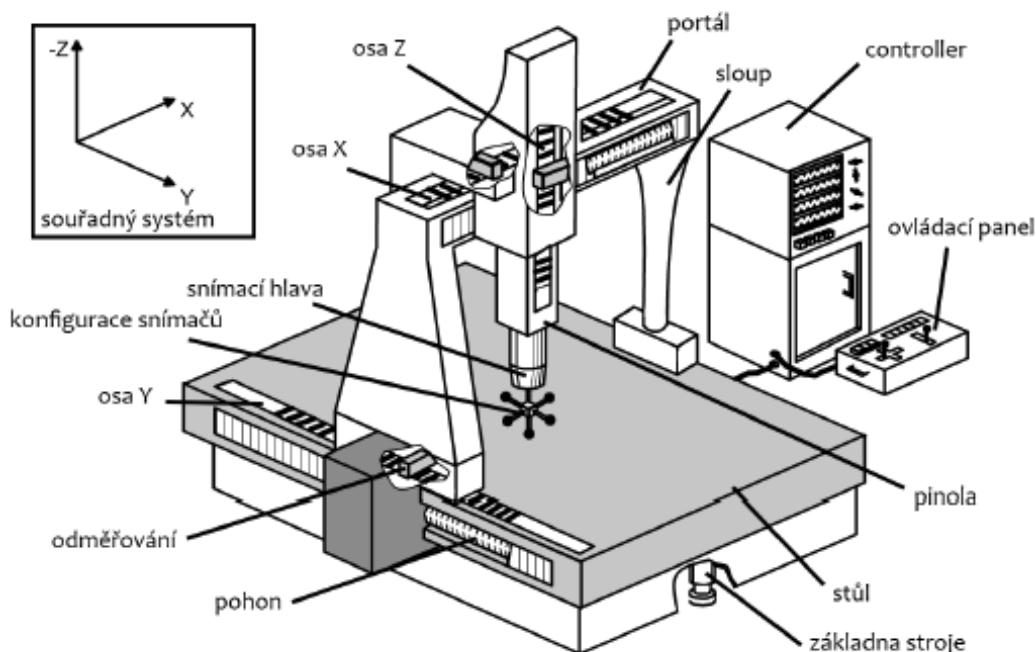
Základem konstrukce je pohyblivé konzolové rameno, na kterém je umístěný pojezd s pinolou, na jejímž konci je snímací hlava. Přístup do měřicího prostoru stroje je ze třech stran a lze tak využít potenciál stroje pro rychlé a efektivní měření, často ve spolupráci s robotickým systémem, který zajišťuje umístění měřené součásti do prostoru stroje. Stroje nepoužívají vzduchová ložiska ale valivá, jsou tedy rezistentnější proti znečištění a vhodné do výrobního provozu. Pro použití stroje v dílenském prostředí je konstrukce stroje plně chráněna ochrannými měchy a kryty, které brání kontaminaci pohyblivých částí stroje. Nevýhodou konstrukce tohoto typu je ohýbání způsobené výložníkovou konstrukcí stroje. Při posunu supportu do krajní vnější polohy může časem docházet ke zvětšení nejistoty měření v důsledku ohybu. Právě kvůli zajištění tuhosti stroje je osa rovnoběžná na konzolové ramena krátká. [27]



Obr. 11: Výložníkový CMM [27]

4. KONSTRUKCE CMM

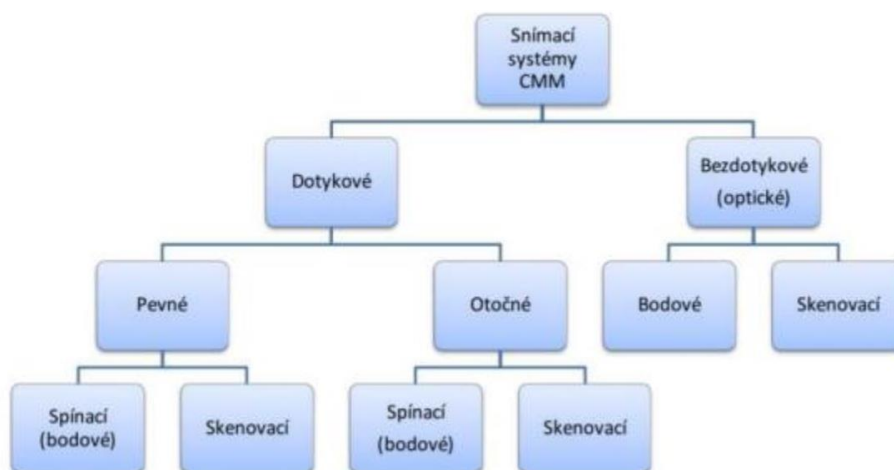
Konstrukční prvky slouží jako páteř stroje a v zásadě se CMM skládá ze čtyř hlavních funkčních součástí, které mohou být vyvíjeny odlišně v závislosti na konfiguraci souřadnicového měřicího stroje, na typu snímacího systému a na úrovni automatizace. Nejdůležitější vlastnosti konstrukčních prvků jsou tuhost, vysoká tepelná vodivost, nízký koeficient teplotní roztažnosti a vysoká schopnost tlumení. Žádný materiál nemůže dokonale splňovat všechny uvedené vlastnosti. Znalost žadoucích vlastností a jejich vlivů napomáhá při výběru materiálu pro konstrukční prvky během fáze návrhu. Rozměrová stabilita je jednou z nejdůležitějších vlastností konstrukčních prvků i přesto, že stroje jsou již vybaveny softwarovou kompenzací, která tyto chyby limituje.



Obr. 12: Schéma CMM [44]

5. SNÍMACÍ SYSTÉM CMM

Výběr snímací hlavy může výrazně ovlivnit celkový výkon systému. Jedním z důležitých faktorů, který je potřeba brát v úvahu při výběru vhodné hlavy, je charakter měřené součásti a požadavky měření. V současné době rozlišujeme v zásadě dva typy snímacích hlav pro CMM, a to pevné a otočné.



Obr. 13: Schéma rozdělení snímacího systému CMM [15]

5.1. Pevné hlavy

Poloha pevné snímací hlavy směřuje svisle dolů ve směru Z(-) a snímání probíhá v jednom nastavení orientace hlavy. Nabízí neekonomičtější přístup ke snímání, zejména pokud je potřeba měřit méně tvarově složité součásti, které vyžadují pouze přiblížení kolmo k rovině XY. I přes statickou polohu hlavy lze měřit i složitější geometrické tvary, a to díky několika způsobům, jak rozšířit její působnost. Pro rozšíření funkčnosti pevné hlavy je možné implementovat až 5 samostatných nástrojů do snímacího systému, nebo využívat výměnu snímače za použití zásobníku sond. Předností pevné polohy hlavy je zejména vysoká tuhost a velká přesnost. [1]



Obr. 14: Zeiss VAST Gold [28]

5.2. Otočné hlavy

Otočné hlavy umožňujú natočenie snímacieho systému do mnoha rôznych smérov a vyznačujú sa veľkou flexibilitou snímání. To umožňuje mérénie i v ťažko dostupných miestach, ktorá by jiným spôsobom šla zmériť velice obtížně, a to za pomoci speciální konfigurace snímače. V porovnaní s pevnou pozicí hlavy je zde riziko vnesení nepřesnosti mérénie v důsledku natočení. Rozlišujeme ruční a motorizované otočné hlavy. [31]

U ručně natáčených systémů je natočenie prováděno operátorem, který rovněž zodpovídá za správné natočenie a kvalifikaci natočeného systému vůči referenčnímu artefaktu. [31]



Obr. 15: Manuální snímací hlava Hexagon HH-MI [29]

Automatické nebo motorizované natáčení umožňuje změnu úhlu v partprogramu, bez zásahu operátora. I zde je potřeba provést kvalifikaci natočení vůči referenčnímu artefaktu. Volba mezi manuální nebo motorizovanou možností natáčení se volí vzhledem k využití. [31]



Obr. 16: Indexovatelná snímací hlava Renishaw PH10 PLUS [30]

Každá otočná hlava má určený maximální rozsah, na který se může polohovat. Rozsah natočení se může lišit od výrobce, stejně tak riziko chyby měření spojené s natáčením. [31]

5.2.1. Indexovatelné hlavy

Měřicí hlavy s indexovatelným snímacím systémem lze natočit dle potřeby do různých poloh natočení, které umožní měření potřebných geometrií. Na trhu jsou dostupné indexovatelné hlavy manuální, které mohou vyžadovat nutnost kalibrace při každém natočení, nebo motorizované bez nutnosti kalibrace. Posun natočení je daný krokem hlavy, který zpravidla bývá od 2.5 stupně a výš. [4]

5.2.2. Kontinuální hlavy

Na rozdíl od měřicích systémů založených na otočných indexovatelných nebo pevných hlavách umožňují neindexovatelné, často označované jako kontinuální, rychlé a přesné měření bez kompromisů v přesnosti. Hlava umožňuje natočení v prostoru do prakticky nekonečných počet poloh a v praxi šetří čas programátorovi. Není totiž nutné provádět kvalifikaci všech používaných pozic natočení, ale pouze některých.

Pohyb doteku s povrchem součásti je veden nepřetržitě okolo složitých dílců bez nutnosti opustit povrch kvůli indexování hlavy. Algoritmus řídicího systému, které ovládají pohyb souřadnicového měřicího stroje a pohyb hlavy vytvářejí optimální dráhu doteku a snižují dynamické chyby stroje. [45, 46]

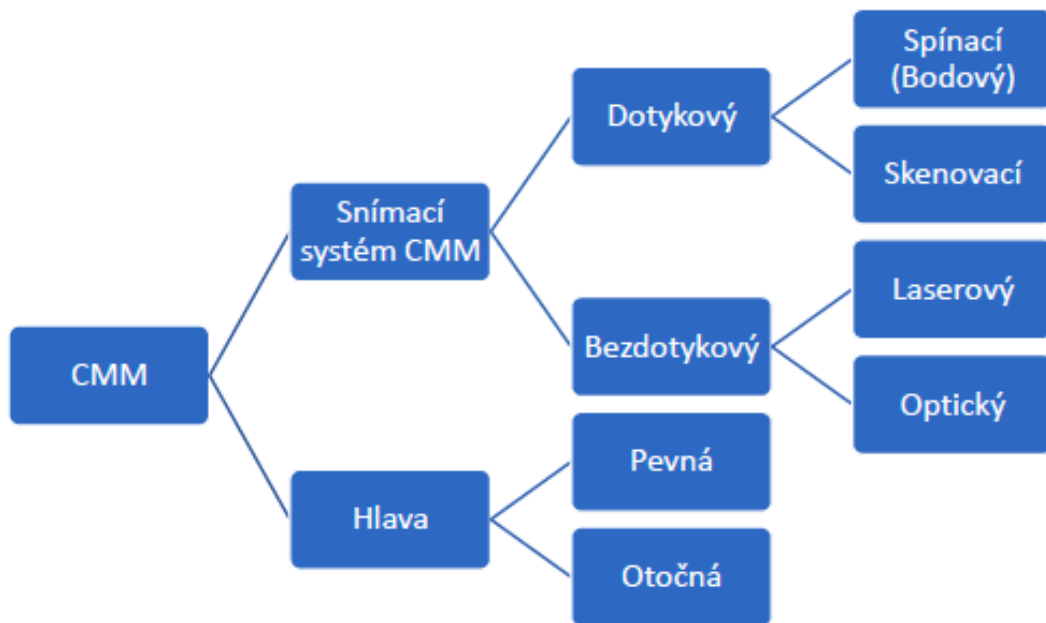


Obr. 17: Kontinuální snímací hlava HH-ACW-43MW [45]

5.3. Snímací systém

Účelem snímacího systému je detekovat povrch součásti, který má být měřen. V závislosti na charakteru měřené součásti a požadavkům na měření je volen daný typ systému. Volba vhodného systému ovlivňuje časovou náročnost

měřicí operace, kvalitu získaných dat, náročnost ovládání a ekonomickou stránku. Rozdělujeme dva základní typy snímacích systémů, a to dotykové a bezdotykové.



Obr. 18: Schéma rozdělení snímacího systému CMM

5.3.1. Dotykový

Snímací systémy jsou dnes kategorizovány podle druhu kontaktu s měřenou součástí. V současné době jsou nejrozšířenější dotykové snímací systémy, které využívají silové interakce mezi snímacím mechanismem a součástí. Jejich výhodou je vysoká přesnost a velmi dobré výsledky v opakovatelnosti měření. Princip činnosti všech kontaktních systémů je založen na mechanickém kontaktu snímače s předmětem měření. Kontakt se součástí je detekován, jakmile snímací síla překročí elektronicky nebo mechanicky řízenou hodnotu. [4, 32]

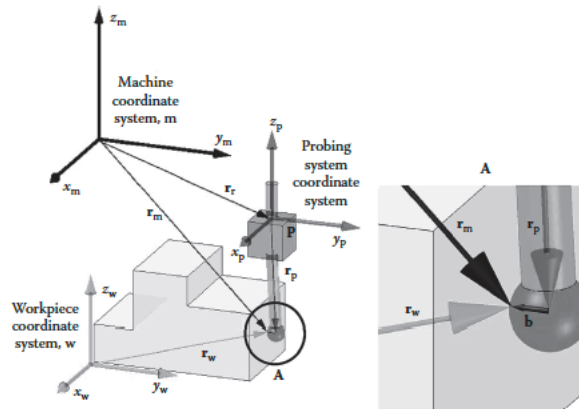


FIGURE 6.1 Vector diagram for measuring a surface point on a workpiece, where x_w, y_w, z_w : Coordinates in workpiece coordinate system; x_m, y_m, z_m : Coordinates in CMM coordinate system; x_p, y_p, z_p : Coordinates in probing system coordinate system; r_m, r_w : Position vector of probing point; r_r : Position vector of probing system reference point; r_p : Position vector of tip ball center point; b : Tip ball correction vector.

Obr. 19: Princip dotykového měření [4]

Dotykové systémy jsou tvořeny snímacím elementem, který je v přímém kontaktu s měřeným dílem, mezikusem (nejčastěji dříkem nebo prodloužením) a snímacím mechanismem, který zajišťuje zaznamenání polohy při vychýlení.

Kontaktní senzory se dělí na spínací a analogové (skenovací):

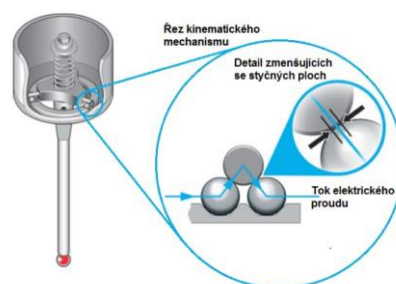
5.3.1.1. Spínací systémy

Princip spínacího systému spočívá v rozpojení elektrických kontaktů při vychýlení doteku. Jakmile dojde k přerušení elektrického obvodu, je odeslán signál pro odečtení souřadnic v poloze rozpojení. Dané rozpojení představuje binární signál pro odečtení souřadnic, který rozlišuje pouze dva stavy, a to jestli je obvod sepnutý (0) nebo rozepnutý (1). Jedná se o systémy, kterými nelze kontinuálně snímat po povrchu součásti, ale pouze bodově. Nejčastěji využívané spínací systémy jsou založeny na kinematickém a tenzometrickém principu. [4]

Kinematický princip:

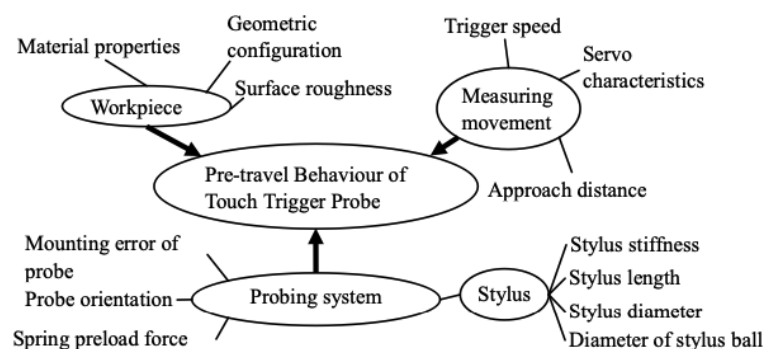
Mechanismus kinematického principu je založen na uložení trojice kinematických hnízd složených ze třech přesných válečků a třech párů kuliček, které jsou k sobě přitlačovány tlakem pružiny. Kontaktní elementy jsou vyrobeny z karbidu wolframu, který zajišťuje dostatečnou odolnost proti působení plastických deformací, které by mohly být způsobeny tlakem přítlačné pružiny.

Kontaktní body jsou navrženy jako elektromechanické spínače v sérii, které jsou rovnoměrně rozmístěny po 120°. Kontakt snímače sondy a součásti je doprovázen vznikem tlakových sil, které v kinematickém mechanismu způsobují změnu velikosti styčných ploch a nastává zvětšování elektrického odporu těchto prvků mechanismu. Po dosažení hraniční úrovně elektrického odporu nastává rozpojení kontaktu a informace o poloze snímače je odeslána do řídicího systému stroje. Po vychýlení je mechanismus zatlačen zpět tlakem pružiny do výchozí polohy s tolerancí 1 μm a kontakt se opět sepne. [33, 34]



Obr. 20: Detail kinematického mechanismu [35]

Přesnost měření při použití kinematického snímacího systému může ovlivnit celá řada faktorů. Jeden z nich je označován názvem Pretravel variation. Jedná se o chybu měření vzniklou zpožděním mezi momentem doteku snímače s povrchem měřené součásti a momentem, kdy dochází k zaznamenání souřadnic z odměřovacích pravítek. Hlavní faktory ovlivňující Pretravel variation můžeme rozdělit do třech základních skupin, které jsou zobrazeny na Obr. 21. Vzhledem k tomu, že tato chyba není žádoucí, snažíme se o její eliminaci, například pravidelnou kalibrací snímače. [33]

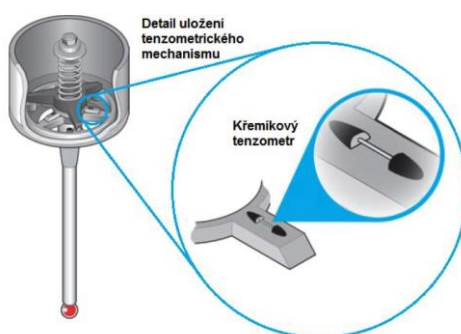


Obr. 21: Ovlivňující faktory [36]

Tenzometrický princip:

Tenzometrický snímací systém využívá částečně kinematický mechanismus, ale síla doteku je detekována elektronicky za pomoci tenzometrů, které představují sadu čidel citlivých na mechanickou změnu povrchových napětí rozmístěných po 120°. Daná čidla zaznamenávají kontaktní sílu vyvinutou na snímač sondy a generují spínací signál v momentě, kdy povrchové napětí přesáhne stanovenou hranici. V porovnání s kinematickým snímacím systémem je mechanismus tenzometrů přesnější, spínací signál je zaznamenán při mnohem menších silách, což může vést k nechtěnému sejmutí bodu například vlivem vibrace rychloposuvu v kombinaci s příliš dlouhou konfigurací snímače. K eliminaci těchto nepříznivých vlivů slouží elektronický obvod, který porovnává změny napětí snímaných tenzometrickými čidly a určuje, zda jsou následkem skutečného vychýlení nebo něčeho jiného.

Čidla tenzometrického systému jsou usazena na velmi přesně vyrobených žebrech navržených tak, aby maximalizovala citlivost sondy bez snížení její odolnosti proti poškození. Na rozdíl od kinematického mechanismu jsou uspořádány tak, aby snímaly veškeré působící síly, a to ze všech směrů. [37]



Obr. 22: Detail kinematického mechanismu [35]

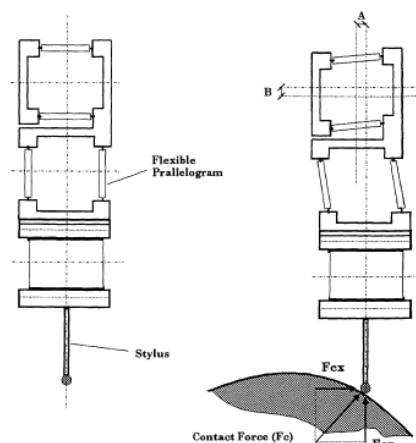
5.3.1.2. Analogové systémy:

Mechanismus skenovacího systému je z hlediska konstrukce složitější oproti systémům spínacího typu. Analogový (rovněž známý jako skenovací) systém je opatřen třemi navzájem na sebe kolmými pružinovými paralelogramy sesouhlasenými s osami stroje. Každý z paralelogramů představuje jednu osu,

kteřá má svůj vlastní odměřovací systém, pomocí kterého se určuje vychýlení. Na rozdíl od spínacích systémů, které umožňují měřit bodově, skenovací systémy dokážou udržovat nepřetržitý kontakt s povrchem součásti a snímat body nepřetržitě. Výsledkem je násobně větší počet bodů získaných ze skenu za velice krátký časový úsek. Skenovací systémy jsou mimořádně užitečné pro sběr naměřených dat pro složité tvary, jako jsou lopatky turbínových motorů, karoserie automobilů nebo jiné tvarově náročné součásti.

Samotný měřicí proces spočívá v neustálém kontaktu snímače s povrchem měřené součásti. Jakmile řídicí systém zaznamená kontakt s měřeným objektem, vypne přítlak, který vyvozuje nastavenou měřicí sílu a zapne pohony příslušné osy. To zaručuje bezpečný a trvalý kontakt snímače s měřenou součástí. Skenovací snímací systém může pracovat v režimu statickém, kdy vždy dojde ke stavu, kdy je indukční systém v nulové pozici, ve které je možno snímat správné hodnoty souřadnic, nebo v režimu dynamickém, ve kterém dochází ke spojitému snímání – skenování.

Skenování je metoda, kdy měřicí snímač nepřetržitě snímá povrch součásti se známou konstantní kontaktní silou a přenáší naměřená data po dlouhé nepřetržité sekvenci. Korekci poloměru snímače lze provést pro každý jednotlivý bod měření, protože se zaznamenává i směr normály ke každému měřenému bodu. Měření v režimu skenování jsou méně přesná než v režimu jednobodového snímání, a to kvůli vzniku tření mezi povrchem snímače a snímané součástí. V případě nesprávně zvolené rychlosti skenování, snímací síly a typu snímače může dojít k nesprávnému měření a k vibracím v systému sondy. [1, 3]



Obr. 23: Detail analogového systému [4]

5.3.2. Bezdotykový

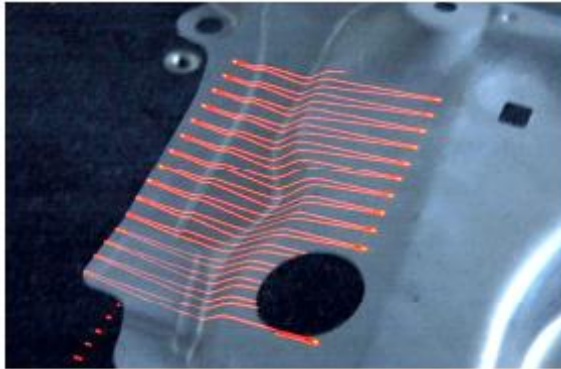
Přirozeným vývojem schopností CMM je rostoucí počet senzorů, které jsou k dispozici. S cílem snížit náklady na standardní měření je novým trendem v oblasti rozměrové metrologie vybavit CMM různými typy snímačů, aby bylo možné využít různé výhody, které každý z těchto systémů má. S neustálým vývojem těchto strojů přichází i nové pokročilé měřicí technologie, které nabízejí nové funkce a možnosti pro stále složitější metrologické potřeby. Jedním z nejnovějších a nejvýznamnějších pokroků ve vývoji systémů měření je koncepce bezdotykového měření, která se vyznačuje unikátní schopností měřit objekty bez nutnosti přímého doteku. Tato technologie umožňuje dynamický, důkladný a efektivní způsob měření geometrie křehkých nebo tvarově složitých objektů. Popularita koncepce bezdotykového měření neustále roste kvůli schopnosti získat podrobná a přesná data za zlomek času. [38]

Protože bezkontaktní senzory snímají povrch s nulovým fyzickým kontaktem, umožňuje to měřicímu stroji měřit jemné nebo tvárné předměty pro velkoobjemové aplikace. Bezkontaktní metody dokážou shromáždit tisíce datových bodů za sekundu, což umožňuje výrobcům lépe si představit, jak komponenta vyhovuje specifikaci. Oproti metodě kontaktního měření, která je založena na principu odečtu souřadnic v jednom bodě pro jeden časový úsek, jsou metody bezkontaktního měření schopné odečíst souřadnice velkého množství bodů v jeden časový úsek. Vzhledem k tomu, že využití bezdotykových metod měření je široké, existují tři běžně používané senzory pro stacionární souřadnicovou měřicí techniku. [9, 38, 39]

5.3.2.1. Laserové skenery

Technologie trojrozměrného laserového skenování je bezkontaktní a nedestruktivní technologie získávání prostorových dat, která je považována za jednu z nejpoužívanějších metod bezdotykového měření. Laserové skenování se zakládá na principu triangulace a řadíme je mezi aktivní metody digitalizace. U aktivní triangulace je základem zdroj laserového záření, povrch měřené součásti

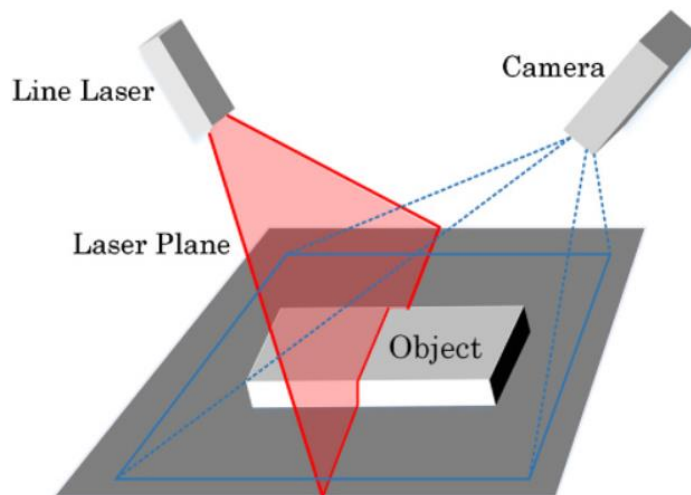
a optický detektor (digitální kamera, která snímá deformovaný vzor na skenovaném objektu). Laserový skener vysílá světlo ve formě paprsku, který je rozmítán oscilujícím reflektorem. Paprsek, který dopadá na povrch ve tvaru čáry, je přijímán CCD kamerou. Obrazy přijaté kamerou jsou transformovány do mračna bodů, které se skládá z několik tisíců naskenovaných dat. [4]



Obr. 24: Příklad řádkového laserového skenování [48]

Triangulace:

Laserový senzor využívá principu optické triangulace, což zjednodušeně znamená měření vzdálenosti pomocí výpočtu úhlu. Triangulační princip vychází ze situace, že pokud se paprsek odráží od detekovaného povrchu pod neměnným úhlem, je vzdálenost dopadu odraženého paprsku na čelo senzoru úměrná vzdálenosti detekovaného předmětu od čela senzoru. Nevýhodnocuje se tedy doba letu paprsku nebo jeho intenzita, ale pozice dopadu odraženého paprsku. To zajišťuje mnohem spolehlivější detekci, protože podmínka zachytit odražený paprsek je dána pouze schopností optického přijímače senzoru zaznamenat dopad odraženého paprsku, bez ohledu na jeho intenzitu. Samotná intenzita paprsku je ale důležitým faktorem pro přesné určení měřených objektů. Při nízké intenzitě začíná být pro CCD snímač objekt špatně viditelný, naopak při příliš vysoké intenzitě může docházet k chybným vyhodnocením nasnímaných dat. [40] Touto problematikou se zabývá Kap. 7.3.

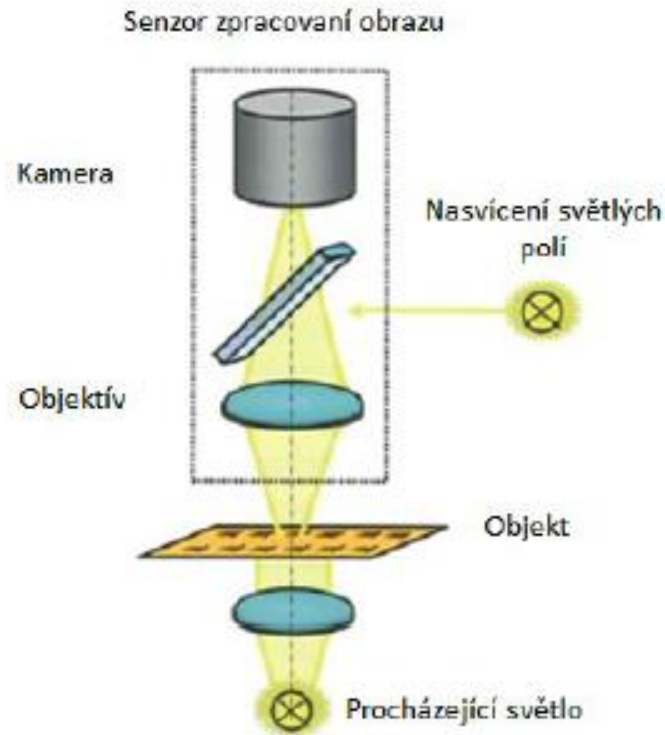


Obr. 25: Princip triangulace [41]

U senzorů s triangulačním principem všeobecně platí, že s rostoucí měřicí vzdáleností se snižuje hodnota linearit a rozlišení měření. Proto značné množství výrobců zařízení udává více hodnot rozlišení pro různé rozsahy vzdálenosti měření. [40]

5.3.2.2. Kamerové skenery

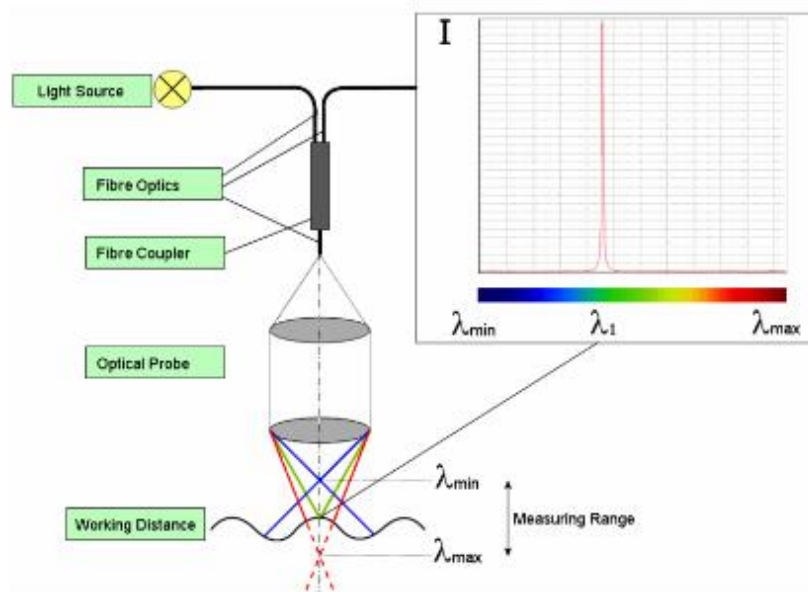
Optické kamerové snímače pro CMM poskytují bezkontaktní měřicí schopnost, která umožňuje měření velmi malých nebo dvourozměrných geometrií a dílů z měkkých a pružných materiálu jako je pryž, plech nebo plast. Princip použití spočívá v tvorbě několika dvourozměrných snímků v různých úhlech natočení senzoru, které vytváří dostatečné množství dat pro digitalizaci potřebné části součásti. Senzor může být upevněn na otočné hlavě nebo je ve statické poloze, kde rotační pohyb součásti zajišťuje rotační stůl. Vliv na výkonost senzoru mají především jednotlivé součásti optického systému (optika, osvětlení, elektronika, čip senzoru a algoritmus výpočtu snímaných dat). [4]



Obr. 26: Schéma konstrukce senzoru na zpracování obrazu s osvětlením procházejícím a dopadajícím světlem [4]

5.3.2.3. Chromatický senzor bílého světla

Chromatický senzor bílého světla je vysoce přesný bezkontaktní bodový senzor pro měření vzdálenosti a tloušťky. Tato technologie využívá speciální čočku, která láme bílé světlo rozdílně v závislosti na jeho vlnové délce, aby bylo možné provádět měření vzdálenosti. Senzor promítá paprsky světla o různých vlnových délkách na měřenou součást, které se následně odráží zpět do spektrometru, kde dochází k jejich vyhodnocení. Na základě největší intenzity vlnové délky se vyhodnocuje přesná vzdálenost a směr v dané ose.



Obr. 27: Princip měření senzoru chromatického bílého světla [42]

Při chromatickém měření konfokální vzdálenosti je světlo emitované ze světelného zdroje přenášeno přes optické vlákno a optický rozdělovač do sondy. Během toho se světlo s širokým spektrálním rozsahem zaostřuje na povrch součásti pomocí čočky s výraznou chromatickou aberací. Světlo odražené od povrchu součásti je následně analyzováno spektrometrem.

Jednou z výhod této technologie je možnost využití při měření různých druhů materiálů, tedy i materiálů lesklého povrchu. V případě transparentních materiálů lze tento princip použít rovněž na měření tloušťky, protože lze současně detekovat několik vrcholů intenzity. [43]



Obr. 28: Otočný senzor s bílým světlem Zeiss DotScan [42]

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V oblasti přesného měření je důležité porozumět různým aspektům, které mají vliv na celkový výstup z měření. Cílem této práce je prokázání vývoje technologie laserového skenování na stacionárních CMM a zároveň upozornit na úskalí této bezdotykové techniky snímání. V první části této experimentální kapitoly budou představeny laserové skenery, které budou předmětem studie. Bude proveden rozbor z pohledu technických údajů skenerů pro získání představy o vlastnostech, rozměrech, deklarovaných přesnostech a provozních podmínkách zařízení. Ve strojírenské praxi jsme často odkázáni na technické dokumentace produktů, které často neodpovídají reálným podmínkám. Z pohledu přesnosti jsou výrobci nuceni provádět testy v souladu s normami pro deklarování přesnosti zařízení, ovšem tyto testy jsou často lokálního charakteru a probíhají za ideálních podmínek. Proto v této části práce bude proveden test obou skenerů, který provádí sám výrobce pro určení stavu zařízení vůči deklarované přesnosti a testům, které odhalují chování skenerů v reálném prostředí. Vzhledem k tomu, že cílem práce je prokázat vývoj technologie laserového skenování z hlediska přesnosti a opakovatelnosti, bude provedeno opakované měření různých typů materiálu a různých typů geometrií, pro získání komplexního pohledu na skutečný stav. Dále se práce zabývá případy, kdy dochází k nevhodně zvolené technice skenování. Protože právě vhodná technika je úspěchem pro získání správných dat a ve srovnání s dotykovou technologií je důležité být s těmito doporučeními seznámeni.

Cílem této práce je:

- Představení laser skenerů a jejich podrobný popis
- Provedení testu dle normy ČSN EN ISO 10360-8 se všemi náležitostmi
- Určení minimální tolerance pro ukazatele způsobilosti na základě opakovaného měření artefaktu o různém povrchu
- Určení minimální tolerance pro ukazatele způsobilosti na základě opakovaného měření reálné součásti s ohledem na typ vyhodnocení
- Seznámení se s riziky laserového skenování a doporučení vhodné techniky skenování

6.1. Charakteristika zařízení

6.1.1. Popis stroje

Měření proběhlo na CMM Global S 7.10.7 řady Chrome, který disponuje indexovatelnou hlavou HH-AS8-T2.5 s krokem 2,5 stupně. Součástí konfigurace stroje je rovněž analogová skenovací sonda HP-S-H1 a automaticky vyhřívaný zásobník pro laserové senzory, který umožňuje okamžité použití senzoru bez čekání na zahřátí na pracovní teplotu. Optické senzory využití v této práci jsou HP-L-10.6 a HP-L-10.10. Použitý metrologický SW byl PC-DMIS 2022.1 a Polyworks 2022.



Obr. 29: Global S Chrome 7.10.7

6.1.2. Popis skenerů

První generace laserových liniových skenerů vyžadovala, aby měl skener nastavení optické expozice definované a ručně fixované uživatelem pro typ nebo barvu měřeného materiálu. Pokud tedy došlo k měření součásti, která měla dvě

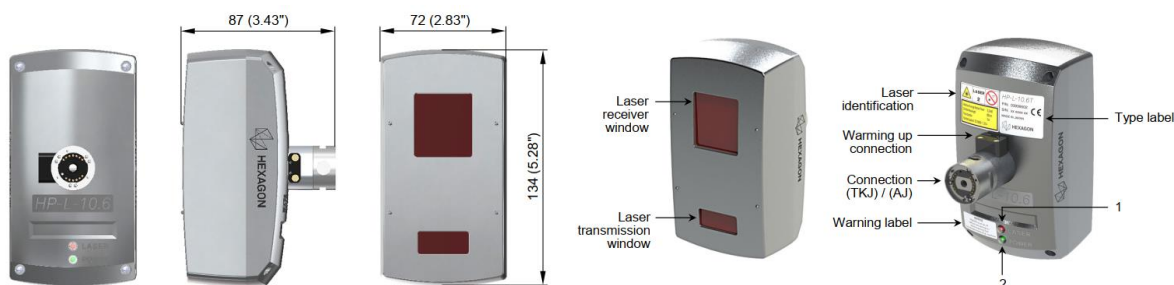
rozdílně barevné plochy, skener dokázal naskenovat pouze jednu nebo druhou barevnou plochu, ale nikdy ne obě najednou.

Další generace skenerů nabízela automatickou expozici, která umožňuje pro každou skenovací linii nalézt nejlepší nastavení automaticky podle barvy povrchu, kterou kamera skeneru vnímá. V tomto případě musela být celá skenovací linie na stejné barvě povrchu, protože každý bod na skenovací lince byl měřen při stejném nastavení expozice. To bylo určitě zlepšení a se správnou orientací skeneru to byla technologie, která byla užitečná, ale stále to nebylo dokonalé.

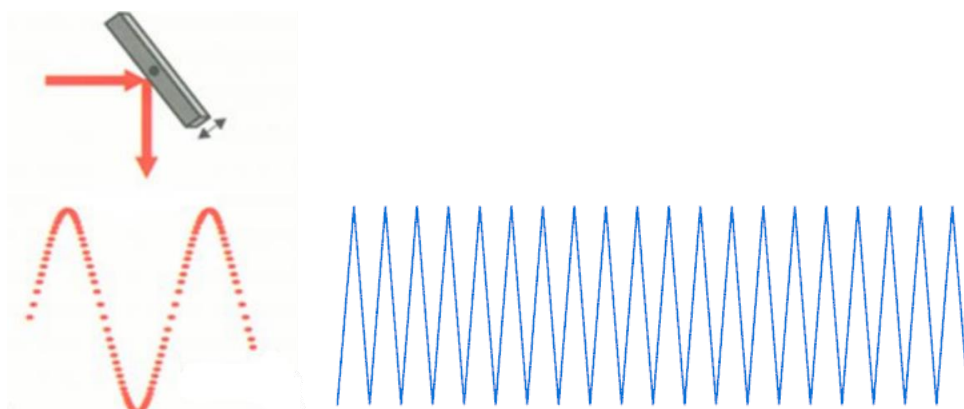
V praktické části práce dojde k podrobení dvou typů senzorů testům na základě stanovených cílů v úvodní části této práce. Testování probíhá za použití dvou typů senzorů od jednoho výrobce Hexagon MI. Představitelem staršího typu skeneru je senzor pod názvem HP-L-10.6. a novějšího typu HP-L-10.10.

6.1.2.1. HP-L-10.6

Jedná se o laserový skener využívající koncept „flying dot“ (česky: létající tečky). Laserový skener o této technologii bylo možné využít kromě přenosných souřadných systémů zejména i pro stacionární souřadnicové měřicí stroje. Skenery založené na technologii „flying dot“ umožnily upravit nastavení expozice v každém jednotlivém bodě podél laserové čáry, a proto skenovat jakýkoli materiál v jakékoli orientaci. Skener funguje na principu triangulační metody, kdy dochází k rozmítání laserového svazku pomocí kmitajícího zrcátka (Obr. 31), který dopadá na povrch měřené součásti, od které se odráží do kamery. Výkon laseru se vypočítává pro každý bod zvlášť tak, že sesbírá 10 krát stejný bod, aby se vybral ten nejlepší, a pak se přesune k dalšímu bodu. Dochází k měření bodu po bodu v linii. Skenery využívající tuto technologii mají využití i v přenosné měřicí technice, ale nedoporučuje se implementace do automatizace, a to z důvodu kmitající mechanické části, která paprsek rozmítává. Právě vysoké rychlosti mohou ovlivnit mechanickou část natolik, že může být ohrožena přesnost měření. Na Obr. 31 je zobrazen schematicky princip konceptu rozmítané tečky a zobrazení v praxi. [8, 48]



Obr. 30: Rozměry HP-L-10.6 [48]

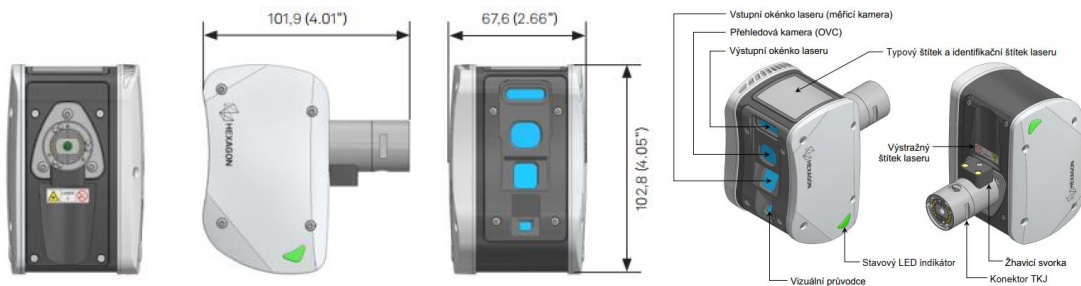


Obr. 31: Schéma rozmítání paprsku a zobrazení dráhy paprsku v praxi [2]

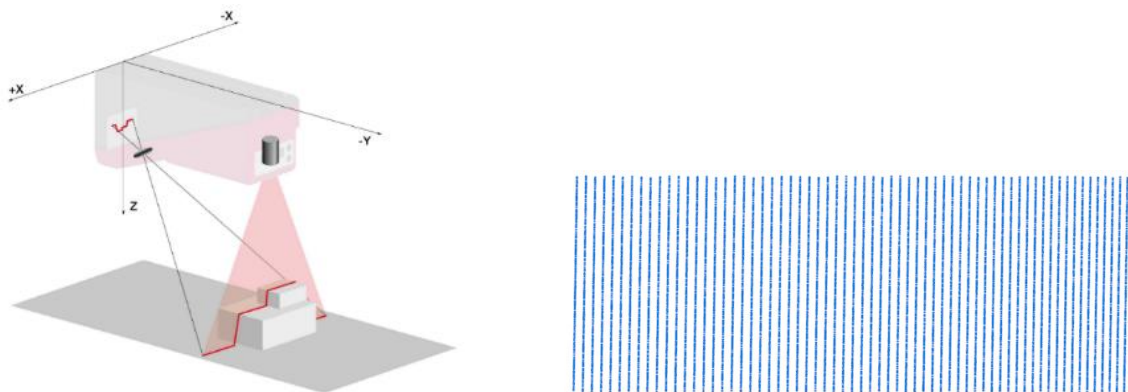
6.1.2.2. HP-L-10.10

Současný představitel nejnovějšího typu skeneru od stejného výrobce má oproti předchozímu typu skeneru pevný řádek, kde je aplikována sada optických algoritmů, která umožňuje skenování náročných materiálů jako je například lesklá černá, chrom nebo vícebarevné povrchy tím, že filtruje odlehlé hodnoty skenovaných dat, aniž by došlo ke snížení výkonu a přesnosti skeneru. Jeden řádek skenu obsahuje tři na sobě ležící řádky s různým nastavením expozice, kde jednotlivé body skenu na řádku využijí ten řádek, který je nejvíce vhodný pro daný typ materiálu. To umožňuje skenovat barevně odlišné materiály bez negativního vlivu na výsledek měření. Oproti skeneru z kapitoly 6.1.1.1 tento typ skeneru nalezne využití i pro přenosné měřicí systémy a je vhodný do automatizace, a to

z důvodu chybějící mechanické části, která je nahrazena cylindrickou čočkou. [7, 47]



Obr. 32: Rozměry HP-L-10.10 [47]



Obr. 33: Schéma vysílání paprsku a zobrazení dráhy paprsku v praxi [5]

6.1.2.3. Porovnání technických specifikací

Dle znázorněných informací na Obr. 33 je zřejmé, že vývoj laserové techniky je značný, a to jak z pohledu počtu nasbíraných dat, tak i ze samotné přesnosti zařízení. Jeden z výrazných parametrů je schopnost skeneru nasbírat až 600 000 tis. bodů za sekundu, tato hodnota se řadí mezi špičku v porovnání s ostatními skenery na trhu. Stejně hodnoty dosahuje i skener jiného výrobce Kreon Zephyr III 150. [13] Z pohledu přesnosti je vidět znatelné zlepšení a významný pokrok z pohledu praxe spatřuji v čase potřebného na zahřátí skeneru na pracovní teplotu. Dlouhý čas potřebný na zahřátí v praxi způsobuje časté nedodržení této podmínky, a to vede k chybnému měření.



HP-L-10.10



HP-L 10.6

Technická data		
Počet bodů (max.)	600'000	30'000
Skenovací frekvence(max.)	300 Hz	53 Hz
Pracovní vzdálenost (střední pole)	90 mm	170 mm
Pracovní rozsah	- 30 / +60 mm	± 30 mm
Šířka řádku	80 mm	24/60/123 mm
Rozteč bodů	40 μm	30 μm
Bodů na řádek	2000	variabilní
Třída laseru	2 (EN / IEC 60825-1:2014)	2 (IEC 60825-1:2014)
Vyzařovaná vlnová délka	450 nm (viditelná modrá)	690 nm (viditelná červená)
Hmotnost	427 g	360-379 g
Přesnost		
Chyba snímání tvaru ¹⁾	8 μm ³⁾	22 μm
Rozptyl snímání ²⁾	12 μm ³⁾	34 μm
Celková chyba snímání rozměru	14 μm ³⁾	25 μm
Hodnota polohování natočením	24 μm ³⁾	45 μm
Rozptyl snímání PLN ²⁾	12 μm ³⁾	34 μm
L[Dia.2x25::MPS]	18 μm ³⁾	N/A
Provozní podmínky		
Pracovní teplota	0 - 50°C	5 - 45°C
Deklarovaný rozsah teplot přesnosti	16 - 26°C	15 - 32°C
Relativní vlhkost	95% nekondenzující	95% nekondenzující
Imunita vůči okolnímu světlu	10 000 lux	40 000 lux
Ochrana proti vniknutí prachu a vody	IP51	IP64
Skladovací teplota	- 30° C / + 70° C	- 25° C / + 70° C
Čas zahřátí	6 minut	30 minut

1) PForm.Sph.1x25:Tr:ODS (MPE) Probing form error

2) PForm.Sph.D95%:Tr:ODS (MPL) Probing dispersion value

3) MPE specifikace se týká středního zorného pole. Specifikace pro rozptyl se v rozlišeném zorném poli snižuje faktorem 2

Obr. 34: Technické údaje [7, 8, 47, 48]

6.2. Kvalifikace skeneru

Kvalifikace skeneru se zakládá na měření kvalifikačního artefaktu o známé skutečné hodnotě. Samotnému měření předchází zaměření polohy koule referenčním nástrojem. Referenčním nástrojem je nejčastěji dotyková sonda. Zaměřením polohy kvalifikačního artefaktu se rozumí provést kvalifikaci daného nástroje. Proces probíhá na kalibračním artefaktu ve tvaru koule, který je dříkem spojený s měřicím stolem a má zpravidla matný povrch.

Před samotným testováním došlo ke kvalifikaci skenerů ve všech použitých polohách natočení v průběhu testování. Kvalifikační nástroj byl nejdříve zaměřen dotykovým referenčním nástrojem, poté následovala samotná kvalifikace skenerů. Na Obr. 35 je zobrazeno vyhodnocení kvalifikace skeneru v základním natočení A0B0.

T1A0B0		T1A0B0
Offset		Offset
25.54276 -0.69467 290.72327		41.84829 -2.32377 377.77992
Maximum Error 0.00949		Maximum Error 0.02369
Average Error 0.00294		Average Error 0.00560
Error Standard Deviation 0.00366		Error Standard Deviation 0.00695

Obr. 35: Výsledky kvalifikace skeneru (HP-L-10.10 / HP-L-10.6)

Důležitým parametrem u kvalifikace skenerů je maximální chyba, průměrná chyba a hodnota směrodatné odchylky. Tyto parametry jsou získány během opakovaného měření kvalifikačního artefaktu v jedné pozici natočení. Maximální chyba by měla být pod 100 tisícín. Průměrná a standardní odchylka by měla být pod 20 tisícín.

6.3. Verifikace skeneru

Test je proveden v souladu s normou ČSN EN ISO 10360-8 (Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích systémů (CMS) - Část 8: Souřadnicové měřicí stroje s optickými snímači vzdálenosti). Účelem ověřování jednotlivých vlastností skenerů zkouškami

specifikovanými v dané normě dává uživateli informaci o tom, zda je zařízení v souladu se specifikací výrobcem, tedy zda je v dobré kondici a je zachována dobrá reprodukovatelnost výsledků. V této práci je praktické znázornění daných testů, které jsou důležité pro další fázi experimentální části práce.

6.3.1. Obecně

Všechny zkoušené systémy musí být kvalifikovány v souladu s běžným provozním postupem výrobce CMM. Uživatel si může zvolit polohu zkušební koule nebo zkušební desky uvnitř mezí specifikovaných výrobcem vyjma místa, kde má být použita referenční koule pro kvalifikaci snímacího systému. Zkušební deska nebo koule se dostatečně upevní, aby nedošlo k chybám způsobených vibracemi. Specifikace přesnosti pro testy podle normy ČSN EN ISO 10360-8 každého ze skenerů jsou určena vždy výrobcem.

Před a během testu je důležité dodržet následující podmínky pro platné prezentování výsledků:

- Dodržení standardních podmínek (rozsah teplot a stabilita, vlhkost, úroveň a typ vibrací)
- CMM je geometricky a tepelně kompenzován
- Každý akceptační test je vykonán krátce po kvalifikaci nástrojů používaných v rámci programu
- Dostatečné zahřátí senzoru
- Použití doporučených artefaktů [6]

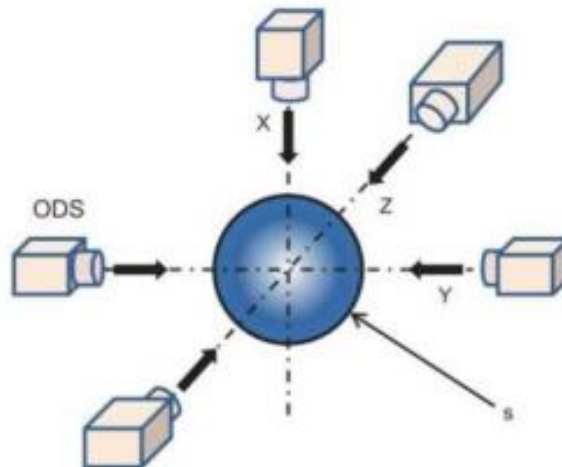
Důležitost použití vhodných artefaktů je vysoká, a to zejména z důvodu citlivosti skenerů na lesklé povrchy. Právě proto nelze použít jako artefakt kovové koncové měrky nebo jiné artefakty s lesklým povrchem, které jsou doporučovány v normách pro ověřování vlastností dotykových CMM. Nejčastěji mají artefakty matný povrch. Jsou vyrobeny z keramiky nebo slinutých karbidů, nebo také z oceli s nánosem laku.



Obr. 36: Verifikační artefakty [48]

6.3.2. Test na kouli

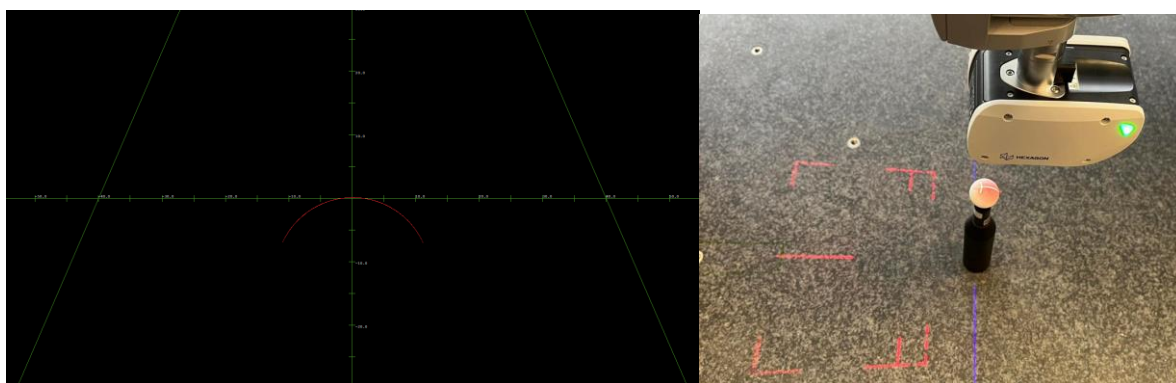
U souřadnicových měřicích strojů s otočnou hlavou s optickými snímači je důležité definovat hodnotu polohování natočením a maximální dovolenou mez hodnoty polohování natočením. Tato část práce specifikuje, jakým způsobem může být použita přejímací zkouška k ověření provedení natočení sondy, v souladu se specifikovanými maximálními dovolenými mezemi, jak bylo dohodnuto s výrobcem a uživatelem. V průběhu testu dojde ke změření zkušební koule, kde oblast měření by měla pokrýt vrchlík koule, jehož velikost je dána výrobcem. Na Obr 37 je zobrazena doporučená kombinace úhlových poloh, pokud je použit vyrovnávací snímací systém s dvěma stupni volnosti. [6]



Obr. 37: Doporučené polohy snímače pro test na kouli [6]

6.3.2.1. Průběh

Před daným testem je potřeba kvalifikovat natočení použité v tomto testu. Samotný test začíná umístěním senzoru do základní polohy natočení ($A=0^\circ$ $B=0^\circ$) tak, aby byl paprsek vystředěn v ideální vzdálenosti od povrchu koule. Na Obr 38 je zobrazena ideální poloha paprsku na kouli. Poté probíhá snímání koule v automatickém režimu a následuje snímání koule v ostatních úhlech natočení. V tomto testu byla použita natočení hlavy A0B0, A90B0, A90B90, A90B180, A90B90. Celý proces je automatický.

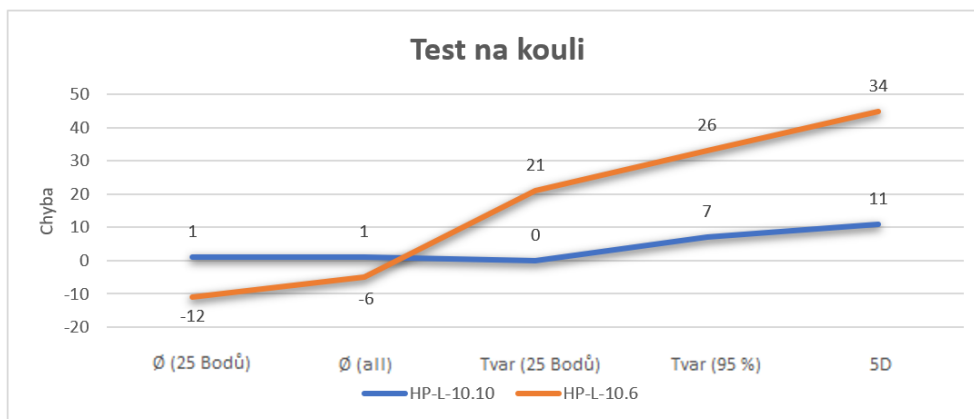


Obr. 38: Úvodní pozice skeneru při začátku testu

6.3.2.2. Vyhodnocení

Tab. 1: Výsledky ISO testu na kouli

ISO označení	Symbol	Význam	HP-L-10.10		HP-L-10.6	
			MPE/MPL	Chyba	MPE/MPL	Chyba
P[Size.Sph.1x25:Tr:ODS]	∅ (25 Bodů)	Chyba snímání rozměru	12	1	30	-12
P[Size.Sph.All:Tr:ODS]	∅ (all)	Celková chyba snímání rozměru	8	1	25	-6
P[Form.Sph.1x25:Tr:ODS]	Tvar (25 Bodů)	Chyba snímání tvaru	8	0	22	21
P[Form.Sph.D95%:Tr:ODS]	Tvar (95 %)	Rozptyl snímání	12	7	34	26
L[Dia.5x25:Art:ODS]	5D	Hodnota polohování natočením	15	11	45	34

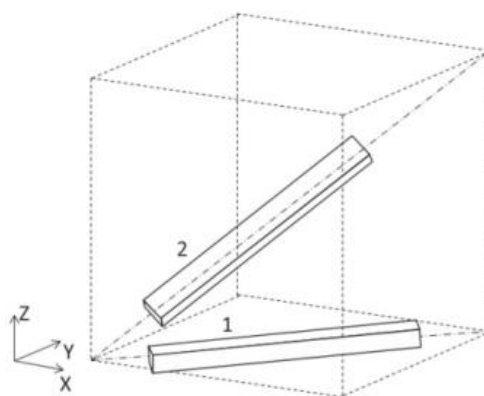


Obr. 39: Graf porovnání výsledku

Z výsledků je patrný rozdíl v přesnosti obou skenerů, který byl již v Kap. 6.1.1.3. zmíněn. Vzhledem k tomu, že u skeneru HP.L-10.6 se hodnota „Chyby snímání tvaru“ blíží povolené chybě, byl test opakován. Opakovaný test neodhalil žádné pochybení.

6.3.3. Test na desce

Zkušební deska se umísťuje do dvou poloh na pracovní desce stroje. Doporučené umístění je zobrazeno na obrázku níže. Naměření musí obsahovat nejméně 25 bodů, které musí být přibližně stejně rozmístěny po zkušební ploše. Pokud má software automatickou funkci odebrání bodů patřící na jiný povrch, tato funkce může být použita. Automaticky nebo ručně vybraná data nesmí být zneužita k eliminaci hluku nebo odlehlých hodnot. [6]



Obr. 40: Doporučené polohy dle ISO 10360-8 [6]

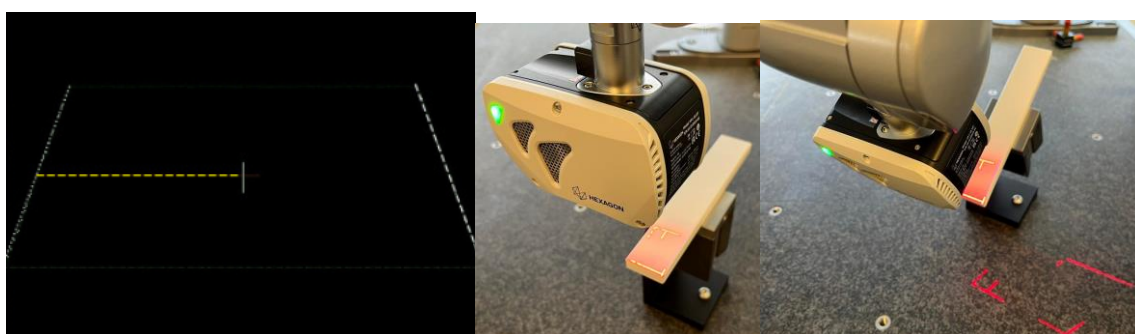
Tab. 2: Orientace v měřicím objemu

Číslo polohy	Orientace v měřicím objemu
1	Podél diagonály v x-y ploše z bodu (0, 0, 0) do (1, 1, 0)
2	Podél diagonály v prostoru z bodu (0, 0, 0) do (1, 1, 1)

POZNÁMKA Pro specifikace v této tabulce, jsou opačné rohy měřicího objemu předpokládány v (0, 0, 0) a (1, 1, 1) v souřadnicích (X, Y, Z).

6.3.3.1. Průběh

Na pracovní desku stroje se umístí zkušební deska. Zde je rovněž důležité mít kvalifikované dané úhly natočení. Test probíhá ve dvou polohách, kdy před každou polohou je důležité umístit senzor a desku do správné pozice tak, jak je zobrazeno na Obr 41. První částí testu je snímání desky v natočení hlavy do vertikální pozice (osy $A=0^\circ$ $B=150^\circ$), deska je natočená diagonálně. Dle zobrazeného paprsku na Obr 41 je operátor schopen desku natočit a naklonit do přesné pozice, tak aby vyhovovala požadavkům měřicího programu. V druhé části testu se natočí hlava do šikmé pozice ($A=30^\circ$ $B=150^\circ$) zároveň s deskou. Paprsek laseru se umísťuje k hraně desky v obou případech. Po umístění senzoru do správné pozice probíhá v obou případech měření desky automaticky. Jediný nutný zásah uživatele je tedy správné umístění senzoru vůči správnému natočení desky.

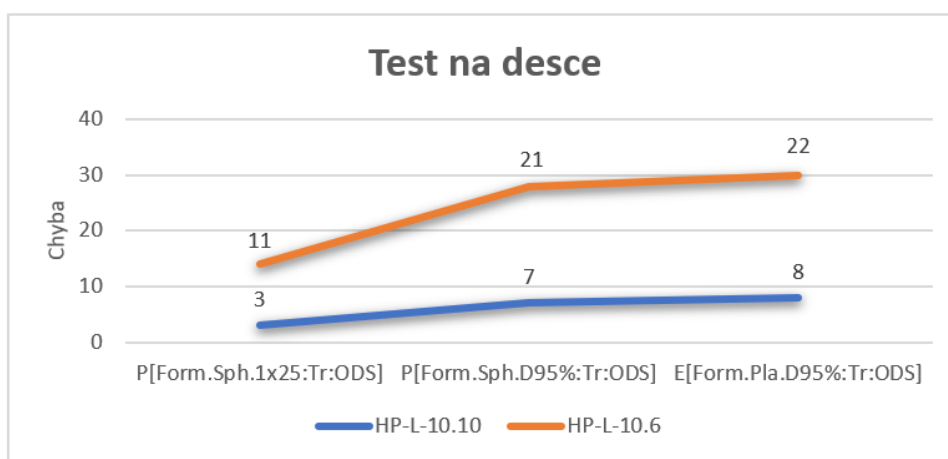


Obr. 41: Úvodní pozice skeneru při začátku testu

6.3.3.2. Vyhodnocení

Tab. 3: Výsledky ISO testu na desce

Symbol	Význam	HP-L-10.10		HP-L-10.6	
		MPE	Chyba	MPE	Chyba
P[Form.Sph.1x25:Tr:ODS]	Chyba snímání tvaru	8	3	22	11
P[Form.Sph.D95%:Tr:ODS]	Rozptyl snímání	15	7	34	21
E[Form.Pla.D95%:Tr:ODS]	Chyba měření tvaru desky	16	8	40	22



Obr. 42: Graf porovnání výsledku

Z výsledků je patrný rozdíl v přesnosti obou skenerů, který byl již v Kap. 6.1.1.3. zmíněn. Výsledky obou skenerů jsou vyhovující a v souladu s maximální povolenou chybou udávanou výrobcem.

6.3.4. Dosažené poznatky

Z výsledku je patrné, že dle předpokladů z úvodní části práce, kde došlo k porovnání technických dat obou senzorů, je rozdíl v přesnosti novějšího představitele s jeho předchůdcem značný. Verifikace senzorů probíhala ve stejném období za stejných okolních podmínek, při parametrech daných výrobcem vůči danému typu senzoru (rychlost skenování pro skener HP-L-10.6 byla 10 mm/s, pro HP-L-10.10 25 mm/s). Je důležité zmínit stáří senzorů, které nijak zásadně neovlivnilo výsledky verifikace.

6.4. Experimentální měření

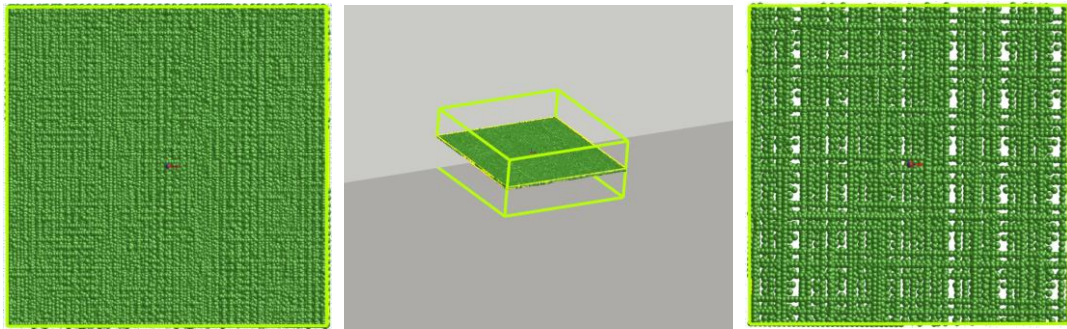
Ze zjištěných poznatků z předchozí části můžeme s určitostí říct, že oba skenery vyhovují specifikaci výrobce. Tato skutečnost je klíčová pro pokračování v následujících testech, kdy dojde k posouzení kvality nasnímaných dat při rozdílných modelových situacích. Kvalita mračna bodů se posuzuje dle čtyř parametrů, a to **hustoty, kompletnosti, šumu a přesnosti**. [9] V experimentu bude měřen kvalifikační artefakt o různém povrchu a reálné součásti. Vyhodnocení bude vždy přizpůsobeno vyhodnocovanému parametru.

6.4.1. Hustota

Data mračna bodů se skládají z milionů souřadnic shromážděných z povrchů součástí během laserového skenování. Hustota mračna bodů se týká počtu souřadnic shromážděných na jednotku plochy. Čím větší je hustota mračna bodů, tím jasnější a přesnější máme informaci o skenované součásti. Jedním z ovlivňujících faktorů hustoty mračna bodů je frekvence laserového skeneru, tedy kolik snímků je kamera skeneru schopná zachytit. Dalším faktorem může být vzdálenost jednotlivých bodů na jedné linii laserového paprsku. [9]

6.4.1.1. Popis experimentu

Pro zjištění hustoty mračna bodů byl povrch součásti nasnímán oběma skenery při parametrech doporučených pro jejich verifikaci. Během skenování bylo veškeré filtrování vypnuto, abychom získali data v nejvyšším možném počtu. Pro určení kvantity dat byla vymezena zóna extrakce na měřeném díle o velikosti 4 x 4 mm s vertikálním parametrem 1 mm, která je zobrazena na Obr. 44. Velikost zóny extrakce byla zvolena s ohledem na softwarovou limitaci pro počet bodů, které lze zahrnout do extrakce prvku. Tato hodnota je dle výchozího nastavení stanovena na 20 000 bodů.



Obr. 43: Zóna extrakce prvku (vlevo body z HP-L-10.10, vpravo HP-L-10.6)

Tab. 4: Tabulka určující počet bodů na extrahované zóně

	HP-L-10.10	HP-L-10.6
Rychlost skenování [mm/s]	25	10
Počet bodů	19746	6006

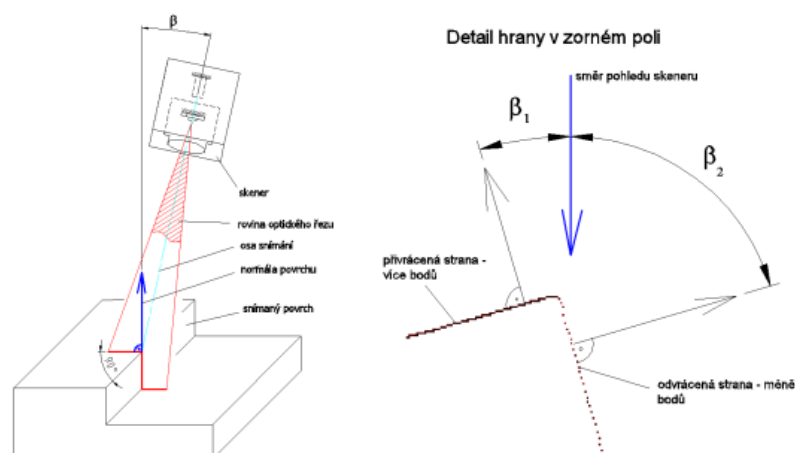
6.4.1.2. Dosažené poznatky

Rozdíl v hustotě bodů je v tomto experimentu značný již z vizuálního hlediska. Novější skener byl schopen získat více jak trojnásobně vyšší počet dat než skener starší generace. Při laserové inspekci je rovněž důležité brát na vědomí, že některé metrologické softwary mají stanoven maximální počet bodů pro extrakci jednoho geometrického prvku, a tak v praxi nejsou všechna data použita. Jsou ale oblasti, kde má hustota bodů zásadní význam, a to při reverzním inženýrství, tedy metoda zpětného inženýrství, kdy dochází získání dat za účelem tvorby 3D modelu ze stávající fyzické součásti. Čím hustší je datová síť, tím detailněji dokážeme zachytit reálný stav součásti.

6.4.2. Komplettnost

Komplettnost dat závisí zejména na tvarové složitosti součásti a přímo ovlivňuje vyhodnocení. Na méně tvarově složitých plochách je možné získat souvislý mrak bodů, zatímco na členitém povrchu s hlubokými otvory, žebrováním nebo uzavřenými hranami, není možné naskenovat povrch kompletně. [9]

Vliv na kompletnost dat má rovněž zvolená technika snímání. Otázkou vhodně zvolené techniky snímání se věnuje Kap. 7.



Obr. 44: Příklad vlivu techniky snímání na kompletnost dat [9]

6.4.3. Šum

Šumem se rozumí chybně nebo nechtěně změřené body, které jsou nežádoucí. Obecně lze tvrdit, že šum má povahu náhodné chyby pohybující se okolo střední hodnoty, o které předpokládáme, že odpovídá náležité poloze bodu na povrchu měřené součásti. Přítomnost šumu přímo ovlivňuje přesnost celkového měření, a proto musí být co nejvíce redukován. Obecně se šum nejčastěji vyskytuje u skenování lesklých povrchů a je dán citlivostí kamery snímače. [9]

6.4.3.1. Popis experimentu

V následujícím experimentu byl změřen kalibrační artefakt lesklého a matného povrchu, kde sledujeme hodnotu rozpětí dat pomocí vyhodnocení průměru koule za použití dvou různých metod výpočtu. Pro zjištění rozdílu a vyjádření rozpětí z naskenovaných dat bude vyhodnocena koule dle metody připasování:

- maximální opsaný element
- minimální vepsaný element

Data, která jsou podrobena tomuto experimentu byla získána z opakovaného měření, které je popisováno v Kap. 6.4.4.1. Pro účely tohoto experimentu byla náhodně vybrána data pouze z jednoho měření, a to u každého z artefaktů.

Matná koule:



Obr. 45: Získaná data ze skenování matné koule (HP-L-10.10 / HP-L-10.6)

Tab. 5: Vyhodnocení rozpětí ze skenu obou skenerů

Matná k.		HP-L-10.10		HP-L-10.6	
Výpočet	Nominální h.	Změřená h.	Odchylka	Změřená h.	Odchylka
Gauss	24.957	24.955	-0.002	24.965	0.008
MAX	24.957	24.969	0.012	24.999	0.042
MIN	24.957	24.942	-0.015	24.933	-0.024

Rozpětí:	0.027	Rozpětí:	0.066
-----------------	--------------	-----------------	--------------

Lesklá koule:



Obr. 46: Získaná data ze skenování lesklé koule (HP-L-10.10 / HP-L-10.6)

Tab. 6: Vyhodnocení rozpětí ze skenu obou skenerů

Lesklá k.		HP-L-10.10		HP-L-10.6	
Výpočet	Nominální h.	Změřená h.	Odchylka	Změřená h.	Odchylka
Gauss	25.400	25.403	0.003	25.367	-0.033
MAX	25.400	25.475	0.075	25.532	0.132
MIN	25.400	25.331	-0.069	25.200	-0.200

Rozpětí:	0.144	Rozpětí:	0.332
----------	-------	----------	-------

6.4.3.2. Dosažené poznatky

Získaná data byla podrobena třem typům vyhodnocení. Metoda Gauss představuje výchozí metodu výpočtu většiny metrologických softwarů a v tomto experimentu je zde pouze informativní. Pro získání nejvíce odlehlých dat ze skenu byla provedena extrakce prvku koule za pomoci metody výpočtu Maximální opsaný element. Tato metoda zaručuje, že žádný z bodů pro vyhodnocení neleží vně extrahované geometrie a udává největší možnou výslednou geometrii. Pro získání nejméně odlehlých dat ze skenu byla provedena extrakce prvku koule za pomoci metody výpočtu Minimální opsaný element. Tato metoda zaručuje, že žádný z bodů pro vyhodnocení neleží uvnitř extrahované geometrie a udává nejmenší možnou výslednou geometrii. Z vyhodnocení je zřejmé, že skener HP-L-10.10 vykazuje menší hodnotu rozpětí bodů při skenování obou typů povrchů a potvrzuje se tak lepší chování novějšího skeneru při skenování různých povrchů.

6.4.4. Přesnost / opakovatelnost

V této části experimentu dojde k vyhodnocení způsobilosti měřidla pomocí ukazatelů C_g a C_{gk} . Ukazatelé C_g a C_{gk} slouží k posuzování způsobilosti systému měření, kde C_g umožňuje posoudit opakovatelnost a C_{gk} strannost měřidla. Postup pro získání potřebných dat z měření pro hodnocení způsobilosti systému měření spočívá v opakovaném měření kontrolního etalonu o zjištěné referenční hodnotě. Pro výpočet ukazatelů způsobilosti lze použít několik způsobů. V tomto experimentu bude studie provedena podle firmy Bosch.

Způsob podle firmy Bosch uvažuje 20% šířky tolerance měřeného rozměru a požadovaná hodnota na ukazatel C_g je 1,33 a více. Vzhledem k tomu, že není známá směrodatná odchylka procesu, pro výpočet C_g byla zvolena rovnice pro výpočet vztažený šíři pole specifikace T. [10, 11]

Výpočtové vztahy:

- **Průměr naměřených hodnot**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

\bar{x}	průměr hodnot	[mm]
x_i	soubor hodnot	[mm]
n	počet hodnot souboru	[-]

- **Směrodatná odchylka naměřených hodnota**

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

s	výběr. směrodatná odchylka souboru	[mm]
\bar{x}	soubor hodnot	[mm]
x_i	počet hodnot souboru	[mm]
n	počet hodnot souboru	[-]

- **Tolerance rozměru**

$$T = USL - LSL \quad (3)$$

T	celková hodnota tolerančního pásma	[mm]
USL	horní mezní tolerance měřené hodnoty	[mm]
USL	spodní mezní tolerance měřené hodnoty	[mm]

- **Ukazatel způsobilosti**

$$C_g = \frac{0.2 \cdot T}{6 \cdot s} \quad (4)$$

C_g	opakovatelnost	[-]
-------	----------------	-----

- **Kritický ukazatel způsobilosti**

$$C_{gk} = \frac{0.1 \cdot T - |\bar{x} - x_m|}{3 \cdot s} \quad (5)$$

C_{gk} strannost [-]

6.4.4.1. Určení $T_{\min}(C_g)$ a $T_{\min}(C_{gk})$ – etalon

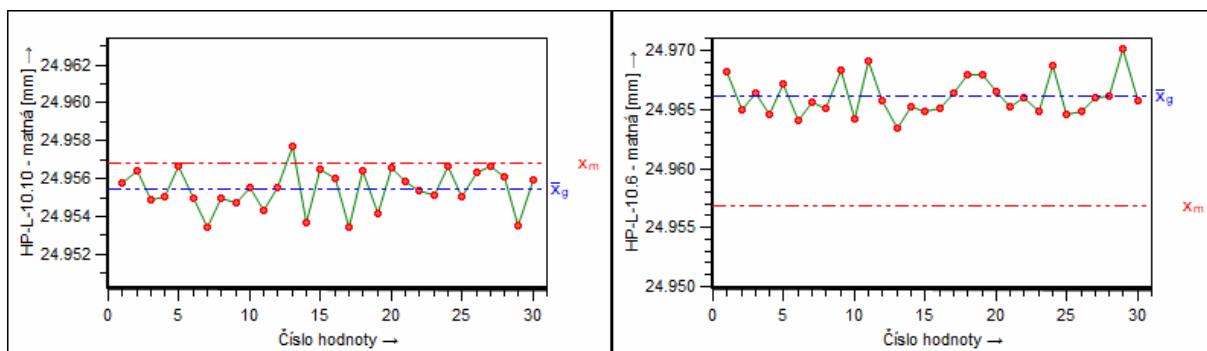
V následujícím experimentu byl změřen kalibrační artefakt lesklého a matného povrchu, opakovaně za sebou pro získání dostatečného počtu dat pro vyhodnocení způsobilosti měřidel, tak jak stanovuje příručka Bosch [10]. Celkem bylo provedeno 30 měření každého z artefaktů.

Vzhledem k tomu, že předmětem experimentu jsou dva skenery o rozdílné přesnosti, ze vzorce pro výpočet ukazatelů způsobilosti (4, 5) lze vyjádřit minimální možnou toleranci $T_{\min}(C_g)$ a $T_{\min}(C_{gk})$. Tato tolerance je nejmenší možná, pro kterou bude ukazatel způsobilosti ještě vyhovující a v tomto experimentu bude představovat hlavní rozdíl v přesnosti a strannosti. Veškeré hodnoty budou zaokrouhleny na tři desetinná místa mimo výběrové směrodatné odchylky.

Matná koule:

Tab. 7: Tabulka naměřených hodnot (HP-L-10.10 / HP-L-10.6)

Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota
1	24.956	11	24.954	21	24.956	1	24.968	11	24.969	21	24.965
2	24.956	12	24.956	22	24.955	2	24.965	12	24.966	22	24.966
3	24.955	13	24.958	23	24.955	3	24.966	13	24.963	23	24.965
4	24.955	14	24.954	24	24.957	4	24.965	14	24.965	24	24.969
5	24.957	15	24.957	25	24.955	5	24.967	15	24.965	25	24.965
6	24.955	16	24.956	26	24.956	6	24.964	16	24.965	26	24.965
7	24.953	17	24.953	27	24.957	7	24.966	17	24.966	27	24.966
8	24.955	18	24.956	28	24.956	8	24.965	18	24.968	28	24.966
9	24.955	19	24.954	29	24.954	9	24.968	19	24.968	29	24.970
10	24.956	20	24.957	30	24.956	10	24.964	20	24.967	30	24.966



Obr. 47: Graf: Průběh naměřených hodnot

Pro zjištění minimální hodnoty ukazatelů způsobilosti je nutné vyjádřit směrodatnou odchylku (2) a aritmetický průměr (1). Skutečná hodnota artefaktu dle kalibračního listu je 24.95682 mm.

Tab. 8: Vyhodnocení min. hodnoty tolerance pro indexy způsobilosti –matná koule

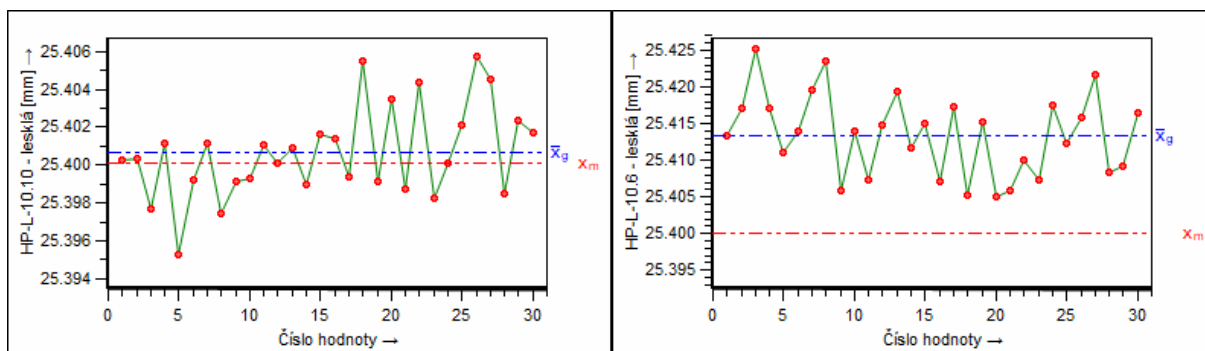
		HP-L-10.10	HP-L-10.6
Průměr hodnot [mm]	\bar{x}	24.955	24.966
Výběr. směrodatná odchylka [mm]	s	0.0011	0.00165
Rozpětí naměřených dat	R _g	0.004	0.007
Minimální tolerance pro index C_g	T _{min} (C _g)	0.0438	0.0654
Minimální tolerance pro index C_{gk}	T _{min} (C _{gk})	0.0576	0.159

Lesklá koule:

Tab. 9: Tabulka naměřených hodnot (HP-L-10.10 / HP-L-10.6)

Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota
1	25.400	11	25.401	21	25.399
2	25.400	12	25.400	22	25.404
3	25.398	13	25.401	23	25.398
4	25.401	14	25.399	24	25.400
5	25.395	15	25.402	25	25.402
6	25.399	16	25.401	26	25.406
7	25.401	17	25.399	27	25.405
8	25.397	18	25.406	28	25.398
9	25.399	19	25.399	29	25.402
10	25.399	20	25.403	30	25.402

Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota	Pořadí	Hodnota
1	25.413	11	25.407	21	25.406
2	25.417	12	25.415	22	25.410
3	25.425	13	25.419	23	25.407
4	25.417	14	25.412	24	25.417
5	25.411	15	25.415	25	25.412
6	25.414	16	25.407	26	25.416
7	25.420	17	25.417	27	25.422
8	25.424	18	25.405	28	25.408
9	25.406	19	25.415	29	25.409
10	25.414	20	25.405	30	25.416



Obr. 48: Graf: Průběh naměřených hodnot

Pro zjištění minimální hodnoty ukazatelů způsobilosti je nutné vyjádřit směrodatnou odchylku (2) a aritmetický průměr (1). Skutečná hodnota artefaktu dle kalibračního listu je 25.4001 mm.

Tab. 10: Vyhodnocení min. hodnoty tolerance pro indexy způsobilosti –lesklá koule

		HP-L-10.10	HP-L-10.6
Průměr hodnot [mm]	\bar{x}	25.400	25.41343
Výběr. směrodatná odchylka [mm]	s	0.00243	0.00554
Rozpětí naměřených dat	R _g	0.010	0.020
Minimální tolerance pro index C_g	T _{min} (C _g)	0.0973	0.222
Minimální tolerance pro index C_{gk}	T _{min} (C _{gk})	0.102	0.354

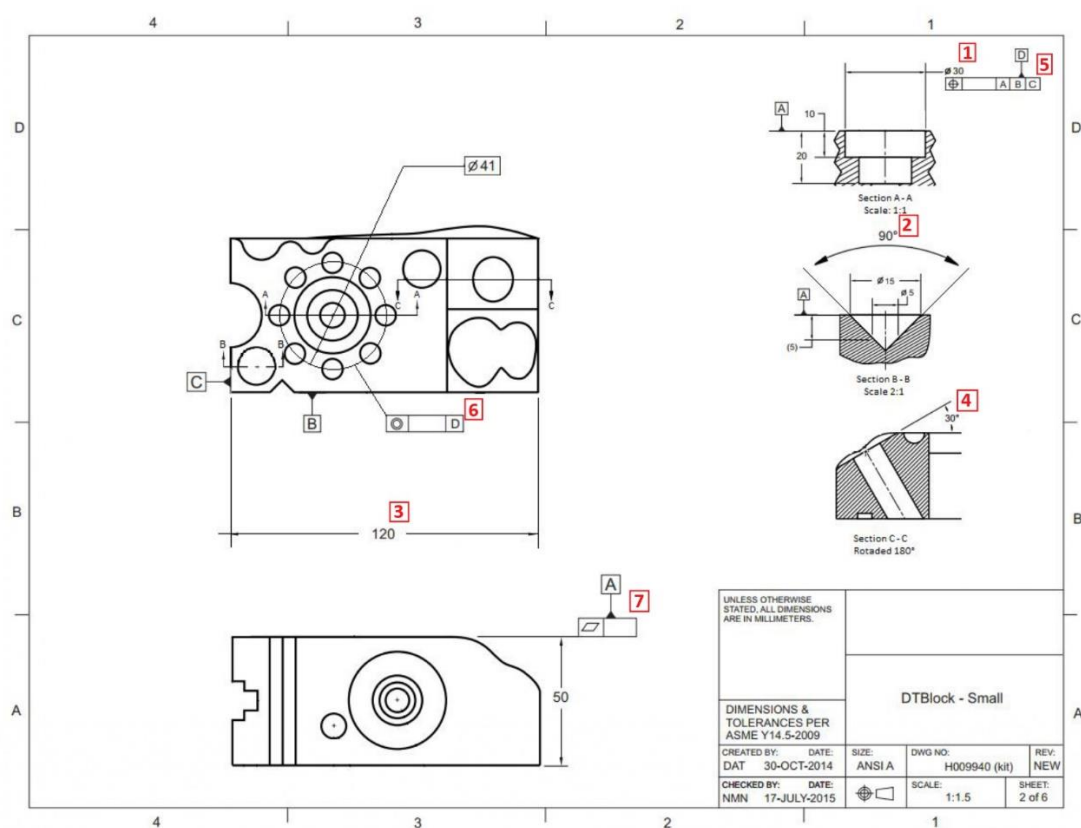
Dosažené poznatky:

Výsledkem tohoto experimentu je hodnota minimální tolerance, pro kterou je dle naměřených dat měřidlo ještě způsobilé. Tento postup se ve strojírenské praxi rovněž používá pro zjištění, zda je určené měřidlo vůbec vhodné pro danou měřicí operaci. Jak je z výsledků patrné, skener HP-L-10.10 vykazuje způsobilost při násobně nižších tolerancích v porovnání se skenerem HP-L-10.6. Při pohledu na vliv povrchu materiálu na výsledek měření je zřejmé zhoršení minimální tolerance u obou skenerů, které je zhruba dvojnásobné. Při pohledu na grafy naměřených hodnot je zřejmé větší rozpětí dat u staršího skeneru, které je v případě skenování lesklé koule prokazatelně horší.

6.4.4.2. Určení $T_{\min}(C_g)$ a $T_{\min}(C_{gk})$ – reálná součást

V běžné praxi jsou předmětem měření reálné díly, nikoli kalibrační artefakty. Proto bude v následující metodické části provedeno měření reálného dílu za účelem zjištění minimální tolerance pro způsobilost měřidla. Pro tuto část bylo vybráno několik typů vyhodnocení za účelem zjištění chování skenerů v reálném prostředí. Na Obr. 48 je zobrazen výkres součásti s vyznačeným vyhodnocením, kterým se následující část bude zabývat. Vyhodnocení jsou značena čísla pro lepší orientaci. Záměrně nejsou daná vyhodnocení tolerována, protože cílem tohoto měření bude zjistit minimální toleranci, pro kterou jsou ukazatele způsobilosti vyhovující. Jednotlivé geometrie byly skenovány v celém rozsahu tak, aby byla zachována správná technika snímání. Měření proběhlo za stejných podmínek a ve stejném časovém období.

Veškeré hodnoty budou zaokrouhleny na tři desetinná místa mimo výběrové směrodatné odchytky.



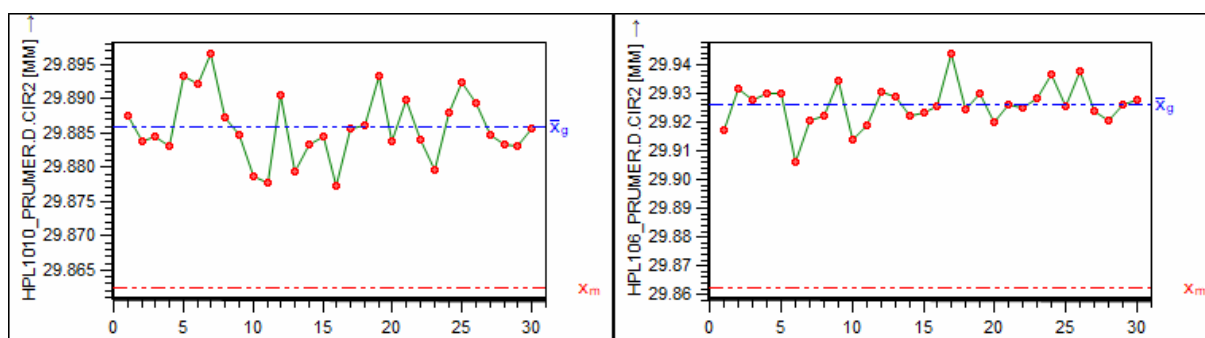
Obr. 49: Výkresová dokumentace měřené součásti

Průměr otvoru [1]:

Při měření jakýchkoli geometrií v dutinách je důležité zohlednit technologii skeneru a zajistit, aby paprsek skeneru nebyl ničím blokován. Tato problematika je více rozebrána v Kap. 7. Zároveň je důležitý parametr rychlost skenování. Existuje nepsané pravidlo: *~rychlost skenování <= velikost prvku*

Tab. 11: Tabulka naměřených hodnot

HP-L-10.10				HP-L-10.6			
1.-3.	29.887	29.884	29.884	1.-3.	29.917	29.932	29.928
4.-6.	29.883	29.893	29.892	4.-6.	29.930	29.930	29.906
7.-9	29.897	29.887	29.885	7.-9	29.921	29.922	29.935
10.-12.	29.879	29.878	29.890	10.-12.	29.914	29.919	29.931
13.-15.	29.880	29.883	29.884	13.-15.	29.929	29.922	29.924
16.-18	29.877	29.886	29.886	16.-18	29.925	29.944	29.925
19.-21.	29.893	29.884	29.890	19.-21.	29.930	29.920	29.926
22.-24.	29.884	29.880	29.888	22.-24.	29.925	29.928	29.937
25.-27.	29.892	29.889	29.885	25.-27.	29.926	29.938	29.924
28.-30.	29.883	29.883	29.886	28.-30.	29.920	29.926	29.928
Reference	29.862			Reference	29.862		
\bar{x}	29.886			\bar{x}	29.926		
s	0.00484			s	0.00733		
Rg	0.019			Rg	0.037		
$T_{\min}(c_g)$	0.193			$T_{\min}(c_g)$	0.29		
$T_{\min}(c_{gk})$	0.427			$T_{\min}(c_{gk})$	0.927		



Obr. 50: Graf: Průběh naměřených hodnot

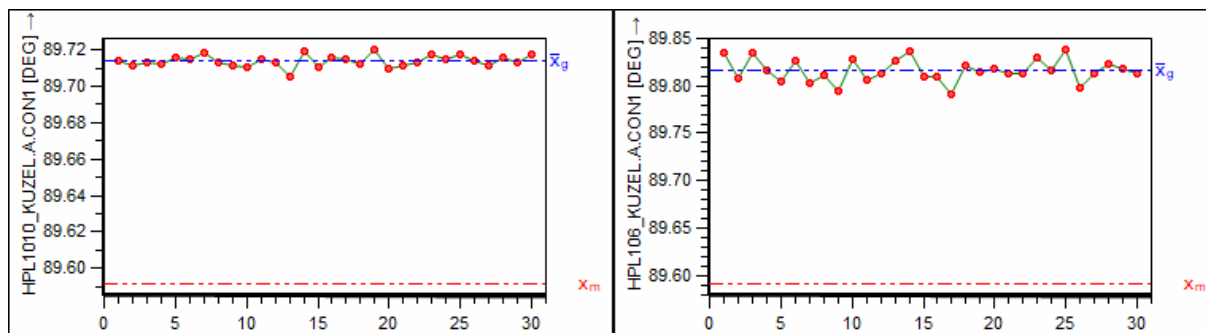
Z tabulky naměřených hodnot je patrné menší rozpětí dat u skeneru HP-L-10.10, které zároveň odráží nižší toleranci potřebnou pro vyhovující ukazatel C_g . Rozdíl v toleranci potřebné pro vyhovující ukazatel C_{gk} je téměř dvojnásobný a potvrzuje se tak zlepšení v oblasti přesnosti, které bylo již v práci několikrát potvrzeno. Z grafu naměřených hodnot není patrné žádné abnormální chování.

Úhel kužele [2]:

Vzhledem k tomu, že se jedná o vnitřní prvek, jsou doporučována stejná pravidla snímání, jako v případě otvoru.

Tab. 12: Tabulka naměřených hodnot

HP-L-10.10				HP-L-10.6			
1.-3.	89.714	89.711	89.713	1.-3.	89.836	89.808	89.835
4.-6.	89.712	89.715	89.714	4.-6.	89.816	89.805	89.826
7.-9	89.718	89.713	89.711	7.-9	89.804	89.811	89.795
10.-12.	89.711	89.715	89.713	10.-12.	89.827	89.807	89.813
13.-15.	89.705	89.719	89.711	13.-15.	89.826	89.837	89.809
16.-18	89.716	89.715	89.712	16.-18	89.810	89.791	89.821
19.-21.	89.720	89.710	89.711	19.-21.	89.814	89.819	89.813
22.-24.	89.713	89.717	89.715	22.-24.	89.813	89.830	89.817
25.-27.	89.718	89.714	89.711	25.-27.	89.838	89.797	89.813
28.-30.	89.715	89.713	89.717	28.-30.	89.823	89.818	89.813
Reference	89.592			Reference	89.592		
\bar{x}	89.714			\bar{x}	89.816		
s	0.00314			s	0.01210		
Rg	0.015			Rg	0.047		
$T_{\min}(C_g)$	0.125			$T_{\min}(C_g)$	0.482		
$T_{\min}(C_{gk})$	1.345			$T_{\min}(C_{gk})$	2.725		



Obr. 51: Graf: Průběh naměřených hodnot

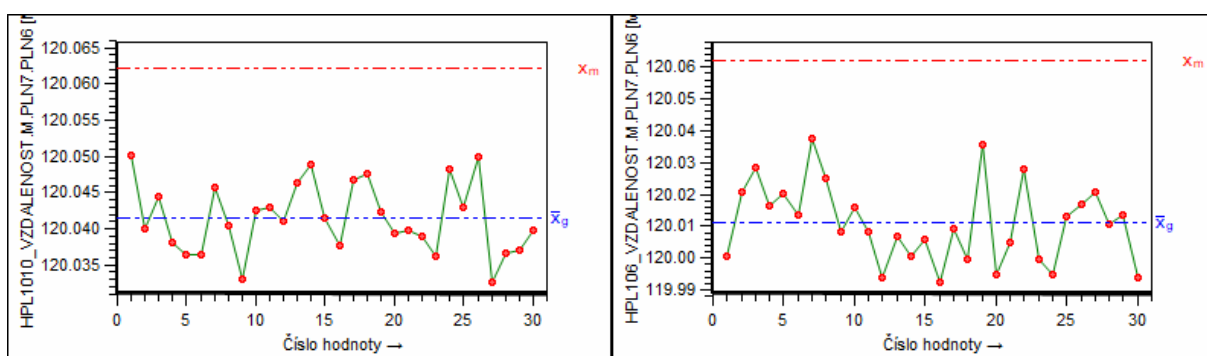
Při porovnání vyhodnocených parametrů je patrný rozdíl mezi oběma skenery, kdy největší rozdíl je v opakovatelnosti měření. Tuto skutečnost lze sledovat na Obr. 50. Minimální tolerance u indexu C_g pro skener HP-L-10.10 dosahuje hodnoty 0.125. Vzhledem k tomu, že se jedná o bezdotykovou technologii měření, je tento výsledek vynikající. V praxi by to znamenalo, že senzor lze použít na měření charakteristik v tolerancích řádů několika stovek milimetrů.

Vzdálenost [3]:

V tomto případě došlo k měření dvou rovin a následnému vyhodnocení vzdálenosti mezi oběma prvky. Při vyhodnocení se vždy vyhodnocuje vzdálenost těžišť obou rovin.

Tab. 13: Tabulka naměřených hodnot

HP-L-10.10			HP-L-10.6				
1.-3.	120.050	120.040	120.044	1.-3.	120.000	120.021	120.029
4.-6.	120.038	120.036	120.036	4.-6.	120.016	120.020	120.014
7.-9.	120.046	120.040	120.033	7.-9.	120.038	120.025	120.008
10.-12.	120.043	120.043	120.041	10.-12.	120.016	120.008	119.994
13.-15.	120.046	120.049	120.041	13.-15.	120.007	120.001	120.006
16.-18.	120.038	120.047	120.048	16.-18.	119.993	120.009	120.000
19.-21.	120.042	120.039	120.040	19.-21.	120.036	119.995	120.005
22.-24.	120.039	120.036	120.048	22.-24.	120.028	120.000	119.995
25.-27.	120.043	120.050	120.033	25.-27.	120.013	120.017	120.021
28.-30.	120.037	120.037	120.040	28.-30.	120.011	120.014	119.994
Reference	120.062		Reference	120.062			
\bar{x}	120.041		\bar{x}	120.011			
s	0.00487		s	0.01250			
Rg	0.017		Rg	0.045			
$T_{\min}(\text{cg})$	0.190		$T_{\min}(\text{cg})$	0.532			
$T_{\min}(\text{cgk})$	0.402		$T_{\min}(\text{cgk})$	1.009			



Obr. 52: Graf: Průběh naměřených hodnot

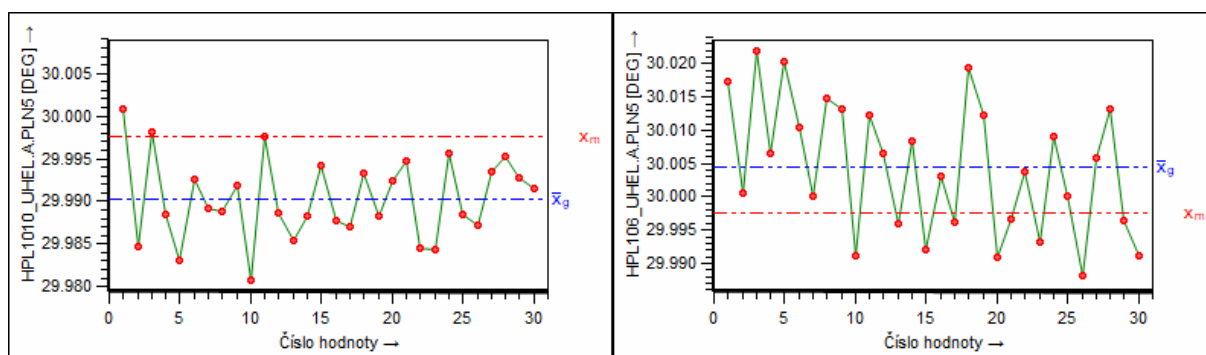
Výrazným rozdílem mezi oběma skenery je rozpětí získaných náměrů. Vzhledem k tomu, že skener novější generace má pokročilejší algoritmy pro automatickou expozici paprsku a skener byl při měření v ideální poloze vůči měřené geometrii (kolmo) usuzují, že to mělo kladný vliv na konečný výsledek. U skeneru HP-L-10.10 lze pozorovat výrazně menší hodnotu minimální tolerance obou indexů způsobilosti a lze je považovat za účinnější prostředek kontroly.

Úhel rovin [4]:

Měření rovin probíhalo v ideálním natočení vůči měřené geometrii (kolmo).

Tab. 14: Tabulka naměřených hodnot

HP-L-10.10				HP-L-10.6			
1.-3.	30.001	29.985	29.998	1.-3.	30.017	30.005	30.022
4.-6.	29.988	29.983	29.993	4.-6.	30.006	30.02	30.01
7.-9	29.989	29.989	29.992	7.-9	30.001	30.015	30.013
10.-12.	29.981	29.998	29.989	10.-12.	29.991	30.012	30.007
13.-15.	29.986	29.988	29.994	13.-15.	29.996	30.008	29.992
16.-18	29.988	29.987	29.993	16.-18	30.003	29.996	30.02
19.-21.	29.988	29.992	29.995	19.-21.	30.012	29.991	29.997
22.-24.	29.984	29.984	29.996	22.-24.	30.004	29.993	30.009
25.-27.	29.988	29.987	29.994	25.-27.	30.002	29.988	30.006
28.-30.	29.995	29.993	29.991	28.-30.	30.013	29.997	29.991
Reference	29.998			Reference	29.998		
\bar{x}	29.990			\bar{x}	30.004		
s	0.00480			s	0.00986		
Rg	0.020			Rg	0.034		
$T_{\min}(C_g)$	0.193			$T_{\min}(C_g)$	0.391		
$T_{\min}(C_{gk})$	0.264			$T_{\min}(C_{gk})$	0.462		



Obr. 53: Graf: Průběh naměřených hodnot

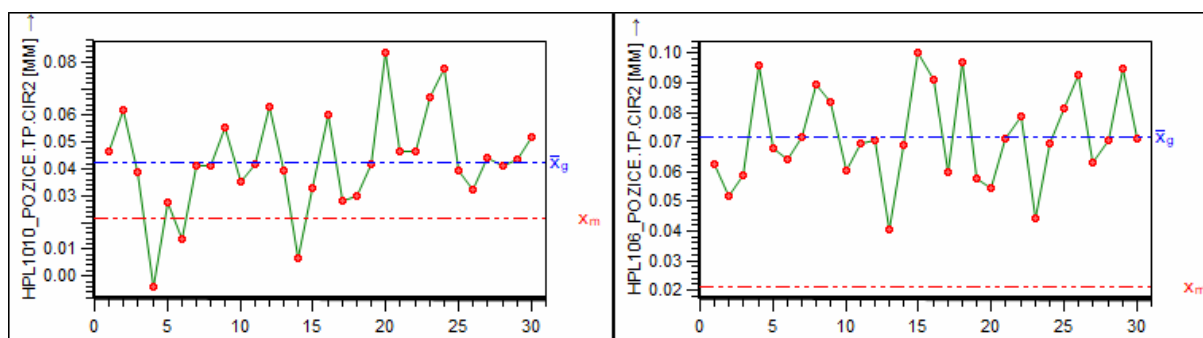
Při pohledu na tabulku naměřených hodnot je zajímavé, že hodnoty získané od každého ze skenerů jsou umístěné na opačných stranách od skutečné hodnoty x_m . Vzhledem k tomu, že si tento jev nedokážu vysvětlit, měření proto proběhlo opakovaně, které ovšem neodhalilo jiný závěr. Z naměřených dat je prokazatelné, že novější typ skeneru je způsobilý v nižších tolerancích. Velikost minimálních tolerancí C_g a C_{gk} jsou zhruba dvojnásobně horší u skeneru staršího typu.

Umístění otvoru [5]:

Tento typ vyhodnocení (anglicky True Position) určuje skutečnou polohu prvku. Tolerance polohy je obecně aplikována na prvky důležité pro smontovatelnost, jakou jsou například díry nebo drážky.

Tab. 15: Tabulka naměřených hodnot

HP-L-10.10			HP-L-10.6				
1.-3.	0.047	0.062	0.039	1.-3.	0.063	0.052	0.059
4.-6.	0.004	0.027	0.014	4.-6.	0.096	0.068	0.064
7.-9	0.041	0.041	0.055	7.-9	0.072	0.090	0.083
10.-12.	0.035	0.042	0.063	10.-12.	0.061	0.070	0.070
13.-15.	0.040	0.007	0.033	13.-15.	0.040	0.069	0.100
16.-18	0.060	0.028	0.030	16.-18	0.091	0.060	0.097
19.-21.	0.042	0.083	0.047	19.-21.	0.058	0.054	0.071
22.-24.	0.046	0.067	0.078	22.-24.	0.079	0.044	0.070
25.-27.	0.039	0.033	0.044	25.-27.	0.081	0.093	0.063
28.-30.	0.041	0.043	0.052	28.-30.	0.070	0.095	0.071
Reference	0.021			Reference	0.021		
\bar{x}	0.043			\bar{x}	0.072		
s	0.01870			s	0.01580		
Rg	0.087			Rg	0.060		
$T_{\min}(c_g)$	0.743			$T_{\min}(c_g)$	0.630		
$T_{\min}(c_{gk})$	0.957			$T_{\min}(c_{gk})$	1.135		



Obr. 54: Graf: Průběh naměřených hodnot

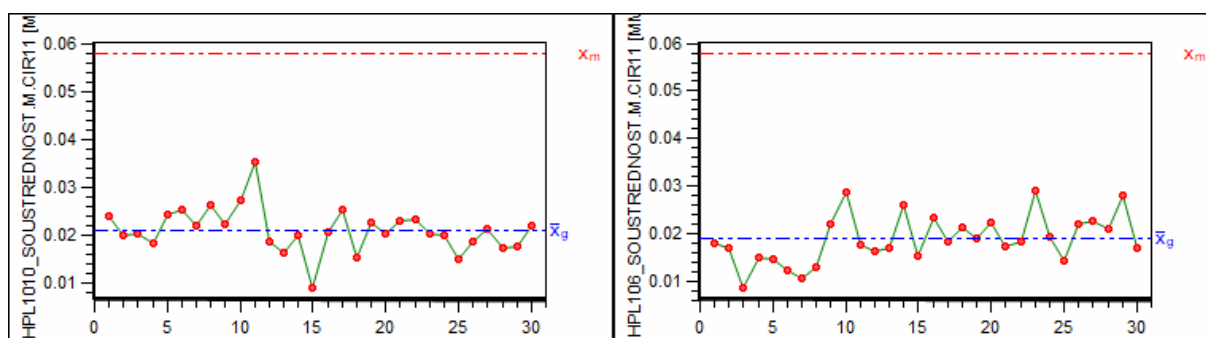
Dle tabulky naměřených dat můžeme sledovat zhoršení minimální tolerance pro oba ukazatele způsobilosti v porovnání s předchozími typy vyhodnocení. Tento výsledek si vysvětlují tím, že vyhodnocovaná geometrie je ovlivňována typem vyhodnocení, do kterého vstupují ostatní geometrie, které jsou zároveň ovlivňovány pravidly normy. Z naměřených dat lze pozorovat horší opakovatelnost měření novějšího skeneru, ale lepší strannost.

Soustřednost [6]:

V tomto případě dochází k vyhodnocení soustředné kružnice vůči základně D. Soustředná kružnice vznikla změřením otvorů, jejichž středy prochází. Pomocí konstrukční metody byla vytvořena výsledná geometrie. Střed této kružnice je tedy ovlivněn všemi kružnicemi, které byly použity pro danou konstrukci.

Tab. 16: Tabulka naměřených hodnot

HP-L-10.10				HP-L-10.6			
1.-3.	0.024	0.020	0.020	1.-3.	0.018	0.017	0.009
4.-6.	0.018	0.024	0.026	4.-6.	0.015	0.015	0.012
7.-9	0.022	0.026	0.022	7.-9	0.011	0.013	0.022
10.-12.	0.027	0.035	0.019	10.-12.	0.029	0.018	0.016
13.-15.	0.016	0.020	0.009	13.-15.	0.017	0.026	0.015
16.-18	0.021	0.025	0.016	16.-18	0.023	0.018	0.021
19.-21.	0.023	0.021	0.023	19.-21.	0.019	0.022	0.017
22.-24.	0.023	0.021	0.020	22.-24.	0.018	0.029	0.019
25.-27.	0.015	0.019	0.021	25.-27.	0.014	0.022	0.023
28.-30.	0.017	0.018	0.022	28.-30.	0.021	0.028	0.017
Reference	0.058			Reference	0.058		
\bar{x}	0.021			\bar{x}	0.019		
s	0.00462			s	0.00507		
Rg	0.026			Rg	0.020		
$T_{\min}(C_g)$	0.184			$T_{\min}(C_g)$	0.202		
$T_{\min}(C_{gk})$	0.551			$T_{\min}(C_{gk})$	0.591		



Obr. 55: Graf: Průběh naměřených hodnot

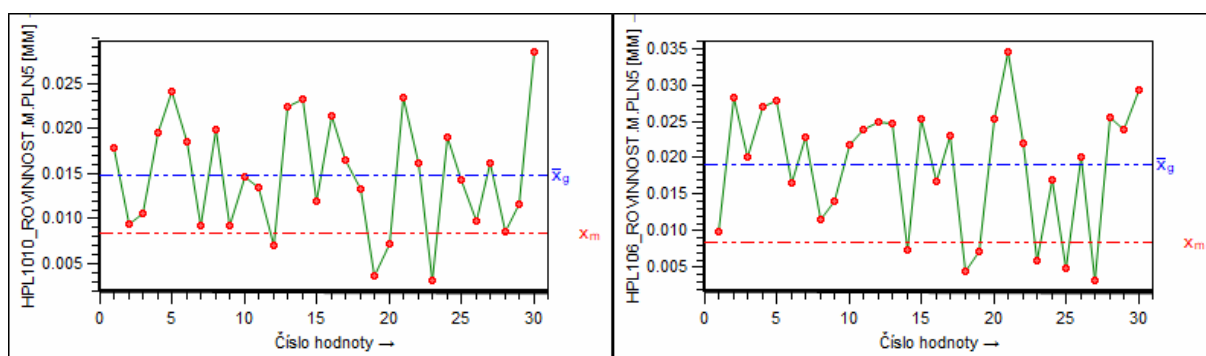
Z tabulky naměřených hodnot je patrná podobnost výsledků u obou skenerů. Vzhledem k samotné chybě skeneru je rozdíl zanedbatelný. Na Obr. 55 lze pozorovat u skeneru HP-L-10.10 menší vychýlení, které negativně ovlivnilo rozpětí dat a celkový výsledek minimální tolerance pro index opakovatelnosti C_g . Výsledek tohoto měření neodhalil žádné velké odlišnosti.

Rovinnost [7]:

Pro vyhodnocení rovinnosti byla zvolena rovina, která je rovněž základnou.

Tab. 17: Tabulka naměřených hodnot

HP-L-10.10				HP-L-10.6			
1.-3.	0.018	0.009	0.011	1.-3.	0.010	0.028	0.020
4.-6.	0.020	0.024	0.019	4.-6.	0.027	0.028	0.017
7.-9	0.009	0.020	0.009	7.-9	0.023	0.012	0.014
10.-12.	0.015	0.013	0.007	10.-12.	0.022	0.024	0.025
13.-15.	0.022	0.023	0.012	13.-15.	0.025	0.007	0.025
16.-18	0.021	0.017	0.013	16.-18	0.017	0.023	0.005
19.-21.	0.004	0.007	0.023	19.-21.	0.007	0.025	0.034
22.-24.	0.016	0.003	0.019	22.-24.	0.022	0.006	0.017
25.-27.	0.014	0.010	0.016	25.-27.	0.005	0.020	0.003
28.-30.	0.009	0.012	0.028	28.-30.	0.026	0.024	0.029
Reference	0.008			Reference	0.008		
\bar{x}	0.015			\bar{x}	0.019		
s	0.00639			s	0.00859		
Rg	0.025			Rg	0.031		
$T_{\min}(C_g)$	0.256			$T_{\min}(C_g)$	0.350		
$T_{\min}(C_{gk})$	0.319			$T_{\min}(C_{gk})$	0.449		



Obr. 56: Graf: Průběh naměřených hodnot

Jak již bylo v předchozím měření zjištěno, hodnota rozpětí náměrů je u rovin velice nízká, to se odráží i ve velikosti minimální tolerance pro ukazatel C_g . Z pohledu ukazatele strannosti C_{gk} je patrné, že skutečné hodnotě se více blíží novější typ skeneru a lze ho považovat za přesnější. Výsledky obou skenerů jsou ovšem velice podobné, a tak nelze považovat tento výsledek měření za faktor prokazující zlepšení na poli přesnosti a opakovatelnosti.

6.4.4.3. Odhad nejistoty měření

Nejistota měření je hodnota přiřazená k výsledku měření, udávající interval hodnot měřené veličiny kolem výsledků měření, který obsahuje skutečnou hodnotu x_m měřené veličiny. Nejistoty se dělí podle zdrojů, ze kterých vznikají a dělíme je na nejistoty typu A a nejistoty typu B.

Za nejistotu typu A považujeme směrodatnou výběrovou odchylku, která je v každém experimentu vyjádřena. Do nejistoty B zahrnujeme vliv teploty a vliv měřicího zařízení. [14]

Odhad nejistoty B bude proveden následovně:

U_{BtCMM} – vliv teploty prostřední na měřicí (laboratoř společnosti Hexagon Metrology s.r.o.) – stroj byl kalibrován 16.12.2021 při teplotě 23.5 °C, teplota během měření byla 24.5 °C, koeficient teplotní roztažnosti materiálu stroje (CTE) je 11.5 $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Odhad $U_{BtCMM} = 1.38 \mu\text{m}$.

U_{BCMM} – specifikace stroje se skenerem určuje maximální přípustnou chybu systému jako celku. Vzhledem k tomu, že maximální přípustná chyba skeneru (PForm.Sph.1x25:Tr:ODS) je 8 μm a maximální přípustná chyba měření délky stroje je $1.4 + L/333$ uvažují, že nejistota $U_{BCMM} = 8 + L/333$.

Celková nejistota měření je dána vztahem:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_{BtCMM}^2 + U_{BCMM}^2} \quad (6)$$

7. DOPORUČENÁ TECHNIKA SKENOVÁNÍ

Veškerá měření, ať už se jedná o dotyková nebo bezdotyková, jsou vystavena určitým typům chyb. Zapříčiňuje to několik hledisek, jako je např. nedodržení jednotných podmínek při měření, nedostatečná přesnost zařízení nebo špatně volená technika snímání. Všeobecně lze chyby při skenování rozdělit do dvou hlavních skupin, a to na chyby systematické a náhodné. [12]

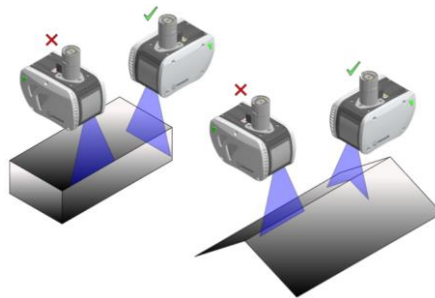
Chyby systematické se objevují u každého měření. Jsou atributem samotného systému a jeho kalibrace, jako důsledek jeho nedokonalosti nebo chyby. Mohou rovněž vzniknout nevhodně zvolenou metodou snímání nebo vyhodnocení či vlivem prostředí (osvětlení, teplota, křídový nástrík). Tyto chyby se systematicky opakují a při podobných podmínkách snímání vykazují stejné hodnoty. Právě proto je lze do určité míry eliminovat. V praxi se může jednat o chyby vzniklé v důsledku neodborně provedené kalibrace skenovacího senzoru, nevhodně zvolené skenovací vzdálenosti či nedostatečného zahřátí samotného skeneru.

Chyby náhodné je velmi obtížné kontrolovat a eliminovat, často pocházejí z mnoha zdrojů. Důvodem jejich vzniku mohou být jak okolní podmínky, tak i charakter skenovaného povrchu (barva, rozptyl světla, odlesky). Chyby tohoto typu jsou úměrné rozptylu souboru opakovaného měření a jinak, než opakovaným měřením je s určitostí nelze určit. [12]

7.1. Měření hran a speciálních geometrií

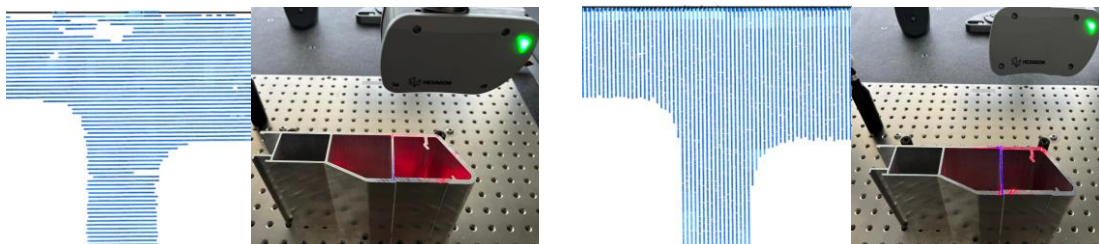
Pro přesné měření hran a speciálních geometrií musí být senzor natočen přes měřené oblasti. Pokud je paprsek senzoru natočen rovnoběžně vůči takovým geometriím, vzniká riziko nepřesného měření. U řádkových skenerů hrozí absence dat nutných pro přesné vyhodnocení. Zejména při vysokých

rychlostech skenování dochází k prodloužení hustoty řádků skenu na snímané součásti, a tak k absenci tolik potřebných dat pro vyhodnocení daného místa.



Obr. 57: Měření hran a speciálních geometrií [47]

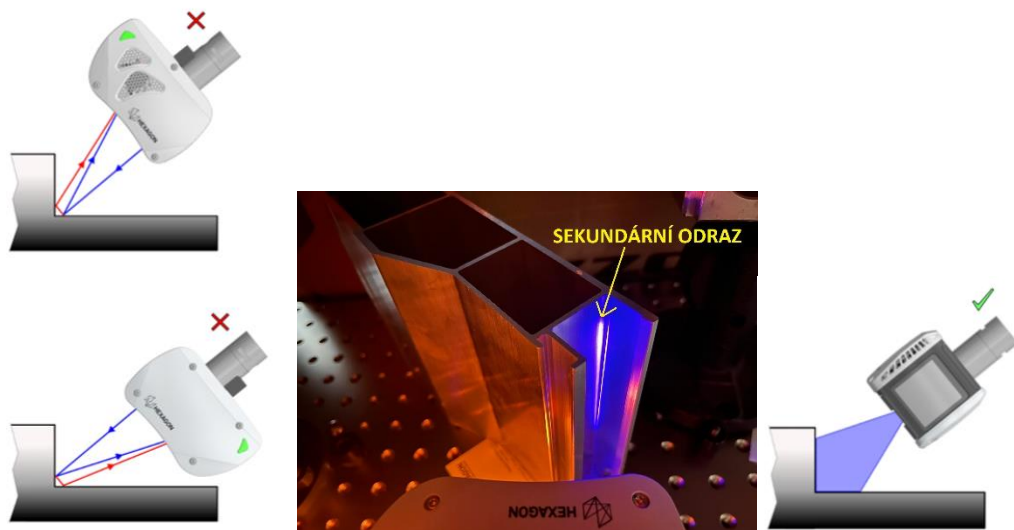
Na Obr. 58 je znázorněno mračno bodů získané pomocí skenování se špatným a správným natočením. Snímání této části dílu proběhlo při stejných parametrech, pouze s různým natočením skeneru. Je patrné, že pouhým natočením senzoru do správné polohy vede k získání kvalitnějších dat.



Obr. 58: Získaná data při natočení skeneru do A0B0 (vlevo) a A45B0 (vpravo)

7.2. Sekundární odrazy

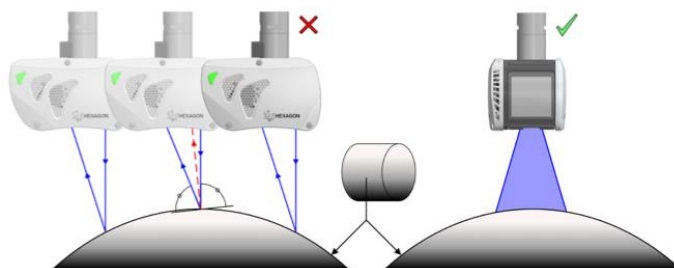
V závislosti stavu povrchu měřeného objektu, zejména v případě lesklých povrchů může docházet k sekundárním odrazům. To může způsobit ovlivnění naměřených dat. Pro měření těchto oblastí je nutné senzor správně natočit.



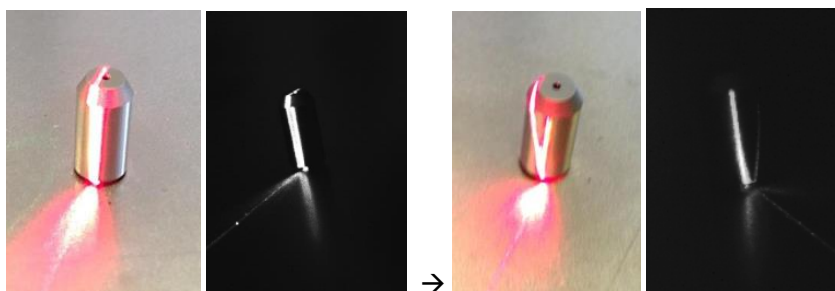
Obr. 59: Sekundární odraz [47]

7.3. Přímé odrazy

Při určitém profilu a textuře povrchu měřeného objektu může zvláště u lesklých povrchů dojít k odrazu laserového paprsku, který přímo dopadne do vysílacího okénka laserového skeneru. Pokud se linie laseru a její projekce překrývají, senzor není schopen rozpoznat, která je skutečná skenovací čára – vzniká šum. Již při mírném naklonění senzoru zůstává laserová linie ostrá a odraz se rozmaže.



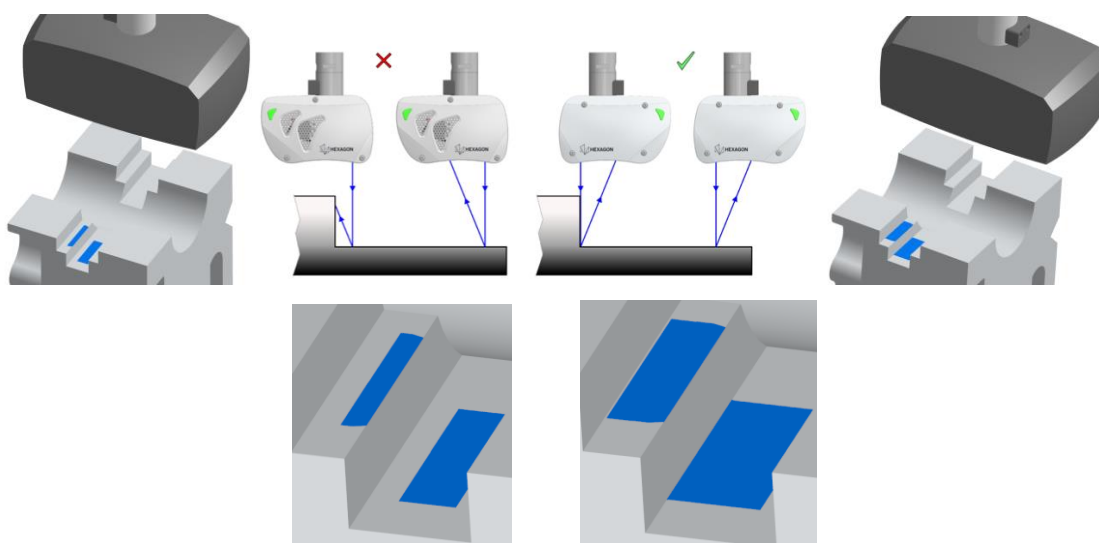
Obr. 60: Natočení senzoru vůči povrchu [47]



Obr. 61: Zobrazení přímého odrazu

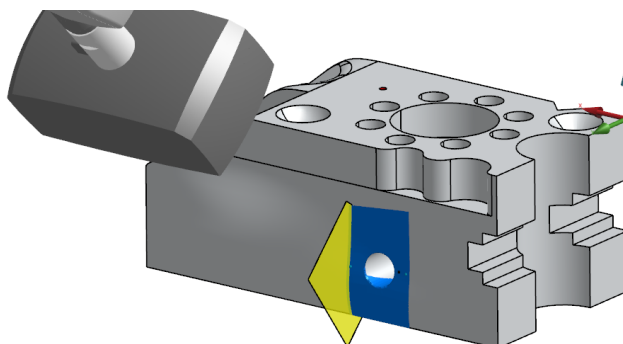
7.4. Přerušení odrazu paprsku

Během měření může v závislosti na profilu měřeného objektu dojít k zablokování paprsků a přerušení jeho dráhy, například hranami objektů. Abych dosáhli optimálních výsledků měření, je nutné natočit snímač tak, aby dráhy paprsku nebyly ničím blokovány. Tuto skutečnost je nutné zohlednit u všech senzorů pracujících na principu triangulace.



Obr. 62: Přerušení odrazu paprsku [47]

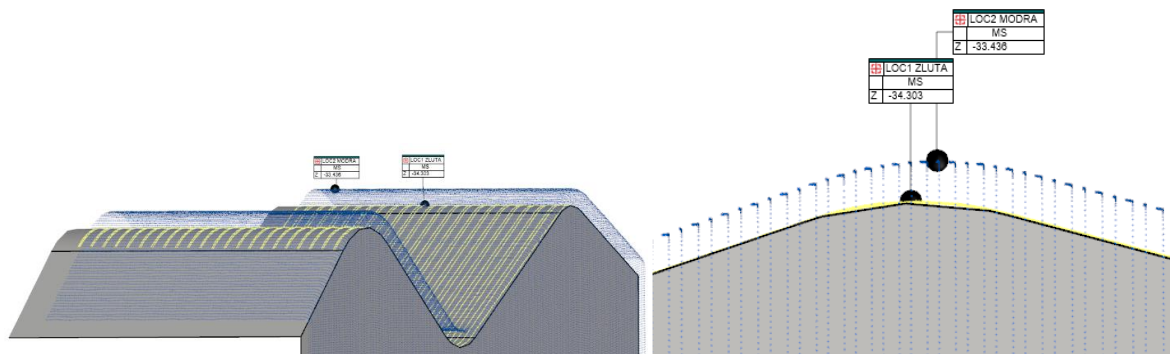
V případě měření částí dílů, kde hrozí přerušení paprsku laseru je důležité zajistit, aby paprsek skeneru zasahoval do daných míst inspekce. Příkladem může být měření vnitřního otvoru a požadavku na vyhodnocení tvaru dané geometrie. V takovéto situaci je nutné natočit laserový skener do poloh, které umožní danou inspekci provést.



Obr. 63: Doporučené natočení skeneru pro snímání otvoru, natočení A45B0

7.5. Nepřekrývající se skeny

Během skenování stejného povrchu může docházet k nepřekrytí jednotlivých skenů, kdy nedochází k napojení skenů svými hranicemi. Tento jev je vnímán jako chyba a nejčastější příčinou je nesprávně provedená kvalifikace daných natočení skeneru použitých při měření. Výsledkem jsou skeny ležící nad sebou, které znemožňují přesné vyhodnocení.



Obr. 64: Žlutá data – kalibrovaný úhel, Modrá data – nekalibrovaný úhel

7.6. Chyby v důsledku znečištění

Kontaminace kvalifikačního nástroje může vést ke zhoršeným výsledkům kvalifikace skeneru. Doporučuje provést základní očištění pomocí měkkého hadříku z mikrovlákna, který nepouští vlákna (Obr. 65). Nikdy bychom neměli používat rozpouštědla ani čisticí prostředky, které mohou povrch koule poškodit.

Příkladem kontaminace můžou být mastné fleky, prach či jiné nečistoty ovlivňující povrch koule.



Obr. 65: Příklad čištění kalibrační koule [47]

8. ZÁVĚR

Předložená diplomová práce na téma *Hodnocení vývoje laser skenerů z hlediska přesnosti a opakovatelnosti* přináší podrobný a komplexní pohled na vývoj v oblasti bezdotykového laserového měření pro kontrolu rozměrové a tvarové kvality součástí.

V úvodní části práce je popsána historie souřadnicové měřicí techniky a popis obecného principu měření. Jsou zde definovány rozdíly mezi souřadnicovými systémy, které představují základní systém orientace a jsou tak důležitým prvkem v této oblasti měření. Následuje rozdělení souřadnicové měřicí techniky, kde se zaměřuji zejména na stacionární stroje, a to z důvodu navazujícího experimentu v metodické části práce, který probíhá právě na stacionárním CMM. Hlavní přínos z hlediska teoretického charakteru je popsán v kapitole zabývající se snímacími systémy. Touto kapitolou teoretické části práce podrobně popisují technologie dotykového a bezdotykového měření. Mimo poskytnutí teoretického základu pro experimentální praktickou část, považuji informace zmíněné v této části za velice edukativní a přínosné pro veřejnost zabývající se touto tematikou.

Praktická část je zaměřena na experimentální měření prokazující vývoj laser skenerů na poli přesnosti a opakovatelnosti. V úvodu této části práce jsou podrobně popsány skenery, které jsou předmětem toho experimentu. Bylo navrženo a použito několik postupů, které lze analogicky použít při posuzování systémů jiných výrobců. Byl popsán postup kvalifikace a provedena verifikace skenerů, kdy výsledky této zkoušky byly odrazovým můstkem pro další části práce. V souvislosti s dosažením cíle této práce, bylo provedeno opakované měření artefaktu o různém povrchu, kde byla vyjádřena minimální potřebná tolerance pro vyhovující indexy způsobilosti C_g a C_{gk} dle firmy Bosch. Zároveň byla opakovaně měřena reálná součást, kde cílem bylo zjistit velikost vlivu daného vyhodnocení na velikost minimální tolerance indexů způsobilosti C_g a C_{gk} . Výsledky testů potvrdili dominanci představitele novější generace skeneru, který byl ve většině experimentů úspěšnější a zvolená metodika splnila stanovené cíle práce. Překvapivé zjištění spatřuji v opakovatelnosti měření a rozpětí naměřených dat, kdy novější typ skeneru vykazoval lepší výsledky, a to jak

v závislosti na typu materiálu, tak na typu vyhodnocení. Výsledky těchto testů mohou být pro řadu zájemců rozhodovacím faktorem při volbě této technologie. V závěru praktické části jsou shrnuta základní doporučení v oblasti laserového skenování a jsou představeny situace, kterých by si měl být uživatel vědom nebo se jim vyvarovat. Správně zvolená technika v oblasti bezdotykového měření je potřebná na cestě k úspěšnému zvládnutí této metody měření.

Popsané, zjištěné a vyhodnocené poznatky mají přínos jak z edukativního, tak pedagogického charakteru a umožňují komplexní pohled na chování zařízení v reálném prostředí oproti informacím uvedených v technických specifikacích produktu. Ve spojitosti se současným trendem a tendencí více implementovat bezdotykové měření je pravděpodobné, že budou tato zařízení stále více expandovat do mnoha dalších průmyslových odvětví a oblastí lidské činnosti.

Seznam použitých literárních zdrojů

- [1] TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie část 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-2480-671-1
- [2] Remote Sensing | Free Full-Text | Fast Ground Filtering of Airborne LiDAR Data Based on Iterative Scan-Line Spline Interpolation | HTML. MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. Copyright © 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/19/2256/html>
- [3] Čepová, L., Petřkovská, L. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch. Ostrava : VŠB – TUO, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4
- [4] Hocken, R. J., Pereira, P. H. Coordinate Measuring Machines and Systems. Boca Raton : CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3
- [5] Displacement - Laser Profile Scanning (2D/3D) by Bestech Environmental XPRT - The Environmental Industry Online [online]. Dostupné z: <https://www.environmental-expert.com/products/laser-profile-scanning-2d-3d-419236>
- [6] ČSN EN ISO 10360-8. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích systémů (CMS) - Část 8: Souřadnicové měřicí stroje s optickými snímači vzdálenosti. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [7] Laserový skener HP-L-10.10 | Hexagon Manufacturing Intelligence. Object moved [online]. Copyright © 2022 [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/3d-laser-scanners/hp-l-10-10-laser-scanning-sensor>
- [8] Retecon Metalworking South Africa – Retecon Metalworking South Africa [online]. Copyright © [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: https://www.retecon.co.za/wp-content/uploads/2018/03/Hexagon_MI_HP_L_Laser_Scanner_Brochure_A4_EN.pdf

- [9] MACHÁČEK, Pavel. 2014. Návrh metodiky měření geometrických specifikací výrobků pomocí prostorového skenování. Praha. Disertační práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Rudolf DVOŘÁK, CSc.
- [10] Capability of Measurement and Test Processes. Quality Management in the Bosch Group Technical Statistics: Capability of Measurement and Test Processes [online]. Robert Bosch GmbH: BOSCH - Booklet No. 10, Edition November 2019 [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/purchasing_and_logistics/information_for_business_partners/downloads/quality_docs/general_regulations/bosch_publications/booklet-no10-capability-of-measurement-and-test-processes_en.pdf
- [11] What does Sigma really mean?. Canadian Metalworking - Metal Fabricating News, Products, Articles, and More [online]. Copyright © 2022 FMA Communications Canada, Inc. All rights reserved. [cit. 18.06.2022]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/what-does-sigma-really-mean>
- [12] BOEHLER, Wolfgang, M. Bordas VINCENT a Andreas MARBS. Investigating laser scanner accuracy. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2003, 34(part5), 696-701.
- [13] Advanced 3D scanners for CMM -Zephyr III - Kreon Technologies. Kreon Technologies - Measuring arms and 3D laser scanners [online]. Copyright © 2015 [cit. 28.06.2022]. Dostupné z: <https://kreon3d.com/3d-scanners/zephyr-iii/>
- [14] Fakulta stavební VUT v Brně [online]. Copyright ©C [cit. 29.06.2022]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/tst/rada.v/TMaR/t-mar-2015-p2p-tm3-nejist1.pdf>
- [15] BERÁNEK, Libor. Úvod do metrologie. In: Strojírenská metrologie. ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE
- [16] What Is CMM Machine: Components, Uses, and Benefits | RapidDirect Blog. Online Rapid Prototyping & Prototype Manufacturing Service | RapidDirect

- [online]. Dostupné z: <https://www.rapidirect.com/blog/what-is-cmm-machine/>
- [17] The History of Coordinate Measuring Machines | CMMXYZ. [online]. Copyright © 2021 CMMXYZ [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://blog.cmmxyz.com/blog/the-history-of-coordinate-measuring-machines>
- [18] History of the CMM. [online]. Copyright © 2021 CMMXYZ [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://blog.cmmxyz.com/blog/history-of-the-cmm>
- [19] CMM Services - Definition, Working Principle, Advantages, Application | IPQCCO.COM. Quality Inspection Services Supplier & Company - Quality Survey, Control & Management | Dora Test [online]. Copyright © 2021 ipqcco Quality Focus. All Rights Reserved. [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.ipqcco.com/cmm-services>
- [20] The working principle of three coordinate measuring machine - Jinan Horizon. Packaging testing equipment and digital torque tester manufacturers - Jinan Horizon [online]. Dostupné z: <https://www.horizontester.com/the-working-principle-of-three-coordinate-measuring-machine-a.html>
- [21] Product Documentation - NI. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/gmath/3d_coordinate_conversion.html
- [22] Quality 101: Understanding Coordinate Metrology | Quality Magazine. Quality Magazine | Quality Assurance & Process Improvement News [online]. Copyright ©2022. All Rights Reserved BNP Media. [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/84600-quality-101-understanding-coordinate-metrology>
- [23] ČSN EN ISO 10360-1, Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM): Část 1: Slovník, 2001.
- [24] Global S. APK Метрология - Измервателни машини [online]. Dostupné z: <https://www.arc-bg.com/en/7-global-s>
- [25] Leitz PMM-C | Hexagon Manufacturing Intelligence. Object moved [online]. Copyright © 2022 [cit. 16.06.2022]. Dostupné z:

- <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/leitz-pmmc>
- [26] TORO | Hexagon Manufacturing Intelligence. Object moved [online]. Copyright © 2022 [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/horizontal-arm-cmms/dea-toro>
- [27] LAMBDA SP | Hexagon Manufacturing Intelligence. Object moved [online]. Copyright © 2022 [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/dea-lambda-sp>
- [28] ZEISS VAST gold - Peak scanning performance guaranteed. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/tactile-scanning-probe/vast-gold.html>
- [29] HH-MI Manuální snímací hlava | Hexagon Manufacturing Intelligence. Object moved [online]. Copyright © 2022 [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/probe-heads/hhmi-manual-probe-head>
- [30] PH10 PLUS motoricky indexovatelné hlavice. Object moved [online]. Copyright © [cit. 03.07.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/ph10-plus-motoricky-indexovatelné-hlavice--6684>
- [31] CMM Probe Heads | Motorized & Automated Probe Heads | CMMXYZ. CMM Machine | Coordinate Measuring Machine | CMMXYZ [online]. Copyright © 2022 CMMXYZ [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.cmmxyz.com/new-cmms/probing-and-accessories/cmm-probe-heads/>
- [32] 5osá technologie. Object moved [online]. Copyright © [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/5osa-technologie--13413>
- [33] Spínací dotekové sondy. Object moved [online]. Copyright © [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/spinaci-dotekove-sondy--6652>

- [34] CMM touch trigger probes testing using a reference axis. Share and Discover Knowledge - DOKUMEN.TIPS [online]. Dostupné z: <https://dokumen.tips/documents/cmm-touch-trigger-probes-testing-using-a-reference-axis.html>
- [35] Obrobkové sondy pro obráběcí stroje. Object moved [online]. Copyright © [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/obrobkove-sondy-pro-obrabeci-stroje--6075>
- [36] BOHAN, Zhao, Gao FENG a Li YAN. Study on Pre-travel Behaviour of Touch Trigger Probe under Actual Measuring Conditions. Volume 27. ScienceDirect: Procedia CIRP, 2015. ISBN 2212-8271. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115003054#bibl0005>
- [37] Technické poznámky: OMP400 - Tenzometrická sonda. Object moved [online]. Copyright © [cit. 16.06.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/resourcecentre/en/details/technicky-clanek-omp400-tenzometricka-sonda--19529?lang=cs>
- [38] What You Need To Know About Non-Contact CMMs - Everything About Metrology. Everything About Metrology - [online]. Dostupné z: <https://metrologicallyspeaking.com/what-you-need-to-know-about-non-contact-cmms/>
- [39] KOPTIŠ, Michal. Využití snímacího systému laserscanneru pro aplikace reverzního inženýrství [online]. Praha, 2016 [cit. 2022-06-16]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Ing. Libor Beránek, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/66290>.
- [40] Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření | Automatizace.HW.cz. Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci [online]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [41] laser triangulation sensor - cz.onlinecheap.ru. Shop Now, Save Now - Huge Selection & Great Prices — Millions of Items - Fast delivery [online]. Copyright ©2020 cz.onlinecheap.ru [cit. 16.06.2022]. Dostupné z:

- <https://cz.onlinecheap.ru/category?name=laser%20triangulation%20sensor>
- [42] 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/handle/10467/80546>
- [43] ZEISS DotScan - Otočný senzor s bílým světlem. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/optical-sensors-cmm/zeiss-dotscan.html>
- [44] AUKOM AUSBILDUNG KOORDINATENMESSTECHNIK e. V. Školení AUKOM - Level 1. Obsah přednášek. 2016
- [45] HH-ACW-43MW Kontinuální hlava | Hexagon Manufacturing Intelligence. Object moved [online]. Copyright © 2022 [cit. 03.07.2022]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/probe-heads/hhacw43mw-continuous-wrist>
- [46] Renishaw Dreh-/Schwenkköpfe - WENZEL Group. WENZEL Group - Industrielle Messtechnik [online]. Copyright © 2022 [cit. 03.07.2022]. Dostupné z: <https://en.wenzel-group.com/products/renishaw-heads#datenblatt>
- [47] LASER SCANNER SYSTEM. HP-L-10.10. Operating instructions. Hexagon. V01.00-REV01.00. 2021-07-30, Dostupné z: interní dokument
- [48] LASER SCANNER SYSTEM. HP-L-10.6T/HP-L10.6A. Operating instructions. Hexagon. V04.00-REVV01.01. 2018-07-10, Dostupné z: interní dokument

Seznam tabulek

Tab. 1: Výsledky ISO testu na kouli.....	36
Tab. 2: Orientace v měřicím objemu.....	38
Tab. 3: Výsledky ISO testu na desce	39
Tab. 4: Tabulka určující počet bodů na extrahované zóně.....	41
Tab. 5: Vyhodnocení rozpětí ze skenu obou skenerů	43
Tab. 6: Vyhodnocení rozpětí ze skenu obou skenerů	44
Tab. 7: Tabulka naměřených hodnot (HP-L-10.10 / HP-L-10.6).....	46
Tab. 8: Vyhodnocení min. hodnoty tolerance pro indexy způsobilosti –matná koule	47
Tab. 9: Tabulka naměřených hodnot (HP-L-10.10 / HP-L-10.6).....	47
Tab. 10: Vyhodnocení min. hodnoty tolerance pro indexy způsobilosti –lesklá koule	48
Tab. 11: Tabulka naměřených hodnot.....	50
Tab. 12: Tabulka naměřených hodnot.....	51
Tab. 13: Tabulka naměřených hodnot.....	52
Tab. 14: Tabulka naměřených hodnot.....	53
Tab. 15: Tabulka naměřených hodnot.....	54
Tab. 16: Tabulka naměřených hodnot.....	55
Tab. 17: Tabulka naměřených hodnot.....	56

Seznam obrázků

Obr. 1: Trendy výrobní přesnosti [3].....	3
Obr. 2: Prototyp DEA souřadnicového stroje [18].....	3
Obr. 3: Pracovní postup na CMM [4].....	5
Obr. 4: Typy souřadnicového systému [21].....	6
Obr. 5: Souřadnicový systém stroje [22].....	6
Obr. 6: Souřadnicový systém součásti [22].....	7
Obr. 7: Portálový CMM Global S Chrome 7.10.7 [24].....	8
Obr. 8: Portálový CMM Leitz PMM-C 8.10.6 [25].....	9
Obr. 9: Sloupový CMM TORO s horizontálním ramenem [26].....	10

Obr. 10: Mostový CMM LAMBDA SP [27].....	10
Obr. 11: Výložníkový CMM [27].....	11
Obr. 12: Schéma CMM [44].....	12
Obr. 13: Schéma rozdělení snímacího systému CMM [15]	13
Obr. 14: Zeiss VAST Gold [28].....	14
Obr. 15: Manuální snímací hlava Hexagon HH-MI [29].....	14
Obr. 16: Indexovatelná snímací hlava Renishaw PH10 PLUS [30].....	15
Obr. 17: Kontinuální snímací hlava HH-ACW-43MW [45]	16
Obr. 18: Schéma rozdělení snímacího systému CMM	17
Obr. 19: Princip dotykového měření [4]	18
Obr. 20: Detail kinematického mechanismu [35]	19
Obr. 21: Ovlivňující faktory [36]	19
Obr. 22: Detail kinematického mechanismu [35]	20
Obr. 23: Detail analogového systému [4].....	21
Obr. 24: Příklad řádkového laserového skenování [48]	23
Obr. 25: Princip triangulace [41].....	24
Obr. 26: Schéma konstrukce senzoru na zpracování obrazu s osvětlením procházejícím a dopadajícím světlem [4].....	25
Obr. 27: Princip měření senzoru chromatického bílého světla [42].....	26
Obr. 28: Otočný senzor s bílým světlem Zeiss DotScan [42]	26
Obr. 29: Global S Chrome 7.10.7.....	28
Obr. 30: Rozměry HP-L-10.6 [48].....	30
Obr. 31: Schéma rozmítání paprsku a zobrazení dráhy paprsku v praxi [2]	30
Obr. 32: Rozměry HP-L-10.10 [47]	31
Obr. 33: Schéma vysílání paprsku a zobrazení dráhy paprsku v praxi [5]	31
Obr. 34: Technické údaje [7, 8, 47, 48].....	32
Obr. 35: Výsledky kvalifikace skeneru (HP-L-10.10 / HP-L-10.6)	33
Obr. 36: Verifikační artefakty [48]	35
Obr. 37: Doporučené polohy snímače pro test na kouli [6].....	35
Obr. 38: Úvodní pozice skeneru při začátku testu	36
Obr. 39: Graf porovnání výsledku	37
Obr. 40: Doporučené polohy dle ISO 10360-8 [6]	37
Obr. 41: Úvodní pozice skeneru při začátku testu	38

Obr. 42: Graf porovnání výsledku	39
Obr. 43: Zóna extrakce prvku (vlevo body z HP-L-10.10, vpravo HP-L-10.6)	41
Obr. 44: Příklad vlivu techniky snímání na kompletnost dat [9]	42
Obr. 45: Získaná data ze skenování matné koule (HP-L-10.10 / HP-L-10.6)	43
Obr. 46: Získaná data ze skenování lesklé koule (HP-L-10.10 / HP-L-10.6).....	43
Obr. 47: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	47
Obr. 48: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	48
Obr. 49: Výkresová dokumentace měřené součásti.....	49
Obr. 50: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	50
Obr. 51: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	51
Obr. 52: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	52
Obr. 53: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	53
Obr. 54: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	54
Obr. 55: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	55
Obr. 56: Graf: Průběh naměřených hodnot.....	56
Obr. 57: Měření hran a speciálních geometrií [47].....	59
Obr. 58: Získaná data při natočení skeneru do A0B0 (vlevo) a A45B0 (vpravo)...	59
Obr. 59: Sekundární odraz [47]	60
Obr. 60: Natočení senzoru vůči povrchu [47]	60
Obr. 61: Zobrazení přímého odrazu	61
Obr. 62: Přerušení odrazu paprsku [47]	61
Obr. 63: Doporučené natočení skeneru pro snímání otvoru, natočení A45B0	62
Obr. 64: Žlutá data – kalibrovaný úhel, Modrá data – nekalibrovaný úhel	62
Obr. 65: Příklad čištění kalibrační koule [47]	63

Přílohy

Příloha 1: Certifikát matné kalibrační koule	75
Příloha 2: Certifikát lesklé kalibrační koule	76
Příloha 3: Verifikace skeneru HP-L-10.10 na desce	77
Příloha 4: Verifikace skeneru HP-L-10.6 na desce	78
Příloha 5: Verifikace skeneru HP-L-10.6 na kouli	79
Příloha 6: Verifikace skeneru HP-L-10.10 na kouli	80



saphirwerk ●
swiss precision in ceramics

Calibration Laboratory accredited
by Swiss Accreditation Service
SCS No 0073
Accreditation to ISO/IEC 17025



Certificate of Calibration

No. G-05808-01

Serial No.	G-05808	Type of calibration	SCS
Origin / old Serial No.	n/a		
Object	508062 Kalibrierkugel SH62.5 TW_V2 DK25 SCS		
Material	TW		
Nominal diameter [mm]	25		
Order / Number	Calibration of diameter and roundness deviation	1109890	
Article No.	n/a		
Fabricant	Saphirwerk AG, Switzerland		

Measures

Diameter	24.95682 mm	Measurement uncertainty U_D	0.00030 mm	
Roundness deviation equatorial RON_t	0.292 μm	Measurement uncertainty $URON_t$	0.04 μm	
Roundness deviation, other planes RON_t	0.348 μm	0.322 μm		

References

Temperature	20° ± 0.5°C
Roundness Probe	Ruby ball Ø 2.0 mm
Filter	1-150 W/U, Gaussian
Reference ball	N-25-1-ST-02
Length measuring instrument	PM 18/002
Form measuring instrument	PM 20/001

Remarks

n/a

Date	04.08.2021	City	2555 Brügg-Biel
For the measurements		Responsible of the lab	



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz



Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

Pracoviště: Laboratoře primární metrologie Praha, V Botanice 4, Praha 5, 150 72
Oddělení technické délky, tel. +420 257 288 387, fax +420 257 328 077

KALIBRAČNÍ LIST

8015-KL-S0343-21

Datum vystavení: 29. prosince 2021 List 1 z 1 listů
Zákazník: Hexagon Metrology s.r.o.
Litvínovská 609/3
190 00 Praha 9
Měřidlo: Kalibrační koule
Výrobní číslo: 4151-20
Metrologická návaznost: Třísouřadnicový měřicí stroj SIP CMM5, kalibrační list č: 8015-KL-X0002-20
Měření jsou metrologicky navázaná na (mezi)národní etalony.
Kalibrační postup: Kalibrace byla provedena dle metodiky číslo 815-MP-C503. Průměr byl definován rovnoměrně rozloženými měřicími body a vyhodnocen metodou nejmenších čtverců.
Místo kalibrace: Laboratoře primární metrologie Praha, V Botanice 4, 150 72 Praha 5
Podmínky prostředí: Teplota v laboratoři: $(20,0 \pm 0,2)^{\circ}\text{C}$

Výsledky kalibrace:

Měřená veličina	Naměřená hodnota	Nejistota měření U	Jednotky
Průměr koule	25,4001	0,0008	[mm]

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace: 29. prosince 2021

Kalibraci provedl:


Vedoucí oddělení:


Pavel Skalník





doc. Ing. Vít Zelený, CSc.

Příloha 3: Verifikace skeneru HP-L-10.10 na desce


				
Acceptance report for 3D CMMs ISO 10360 - 8 :2013 CMM with optical distance sensors				
Customer	DIPLOMOV PRÁCE	Operator	TOMAS SOBEK	
CMM Type	GLOBAL_S	Inspection Date	května 01 2022	
CMM Serial Number	GLOB001625IA			
CMM Size	7.10.07	Plate Number	1110710-0010	
CMM Controller Type	DC800	Certificate Number	21-3225-101	
CMM Controller Firmware	V 11	Calibration Date	01.10.2021	
Probe Head	HH-AS8-T2.5			
		Sensor Type	P-L-10.10T	
PC DMIS Version	2022.1	Sensor Serial Number	0.10-00510-GE	
ISO Program Version	ISO_10360-8_PLANES_Bridge...	Sensor Firmware	NA	
Scan speed (mm/s)	25			
Scan acceleration (mm/s/s)	300			
	Probing Form Error Local Test Flat		Flat Form Error Global Test	
No	Orientation	P[Form.Sph.1x25:Tr:ODS]	P[Form.Sph.D95%:Tr:ODS]	E[Form.Pla.D95%:Tr:ODS]
1	2D A0 B150	3	7	8
2	3D A30 B150	3	7	8
Values are including expanded measurement uncertainty according ISO/TS 17865:2016.				
		P[Form.Sph.1x25:Tr:ODS]	P[Form.Sph.D95%:Tr:ODS]	E[Form.Pla.D95%:Tr:ODS]
MPE:		8	15	16
U:		1.2	1.2	1.2
Error:		3	7	8
Passed:		YES	YES	YES
Unit: µm				
	ISO- identifier	Meaning		
	P[Form.Sph.1x25:Tr:ODS]	Form out of 25 representative points		
	P[Form.Sph.D95%:Tr:ODS]	Form out of 95% of all detected points		
	E[Form.Pla.D95%:Tr:ODS]	Form out of 95% of all detected points of the patched plane		
Signature: _____ <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> Customer Person in charge </div>				

Příloha 4: Verifikace skeneru HP-L-10.6 na desce


			
ISO 10360 - 8 :2013 SMS s optickými snímači vzdálenosti			
Zákazník	DIPLOMOVÁ PRÁCE		
Typ SMS	GLOBAL_S	Datum kalibrace	03.05.2022
Výrobní číslo SMS	GLOB001625IA	Použitý etalon:	
Velikost SMS	07.10.07	Výrobní číslo bíle desky	1E00050R
Typ kontroléru SMS	DC800	Číslo kalibračního listu	43700
Firmware kontroléru SMS	V 11	Datum kalibrace	8.9.2021
Otočná hlava	HH-AS8-T2.5		
		Typ sensoru	HP-L-10.6A
PC DMIS verze	2021.2	Výrobní číslo sensoru	7Z0001710
ISO Program verze	ISO_10360-8_PLN	Firmware sensoru	0
Skenovací rychlost (mm/s)	10		
Akcelerace skenu (mm/s/s)	100		

		Chyba snímání tvaru lokální zkušební desky Jednořadý sken 63 na 30mm		Chyba měření globální desky řádkového skenu 126 na 30mm
Č.	Orientace	P[Form.Sph.1x25:Tr:ODS]	P[Form.Sph.D95%:Tr:ODS]	E[Form.Pla.D95%:Tr:ODS]
1	2D A0/B145	5	21	22
2	3D A35/B145	11	21	22
<i>Hodnoty jsou včetně rozšířené nejistoty měření podle ISO/TS 17865:2016.</i>				
		P[Form.Sph.1x25:Tr:ODS]	P[Form.Sph.D95%:Tr:ODS]	E[Form.Pla.D95%:Tr:ODS]
	MPE:	22	34	40
	U:	1.9	1.9	1.9
	Chyba:	11	21	22
	Vyhodnocení shody:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Jednotky: µm				
	ISO - značka	Význam		
	P[Form.Sph.1x25:Tr:ODS]	Chyba snímání tvaru		
	P[Form.Sph.D95%:Tr:ODS]	Rozptyl snímání		
	E[Form.Pla.D95%:Tr:ODS]	Chyba měření tvaru desky		

Příloha 5: Verifikace skeneru HP-L-10.6 na kouli

											
ISO 10360 - 8 :2013 SMS s optickými snímači vzdálenosti											
Zákazník	DIPLOMOVÁ PRÁCE			Technik	TOMAS SOBEK						
Typ SMS	GLOBAL_S			Datum kalibrace	03.05.2022						
Výrobní číslo SMS	GLOB001625IA			Použitý etalon:							
Velikost SMS	07.10.07			Průměr koule [mm]	25.456						
Typ kontroléru SMS	DC800			Výrobní číslo koule	43699						
Firmware kontroléru SMS	V 11			Číslo kalibračního listu	D-K-15151-01-00						
Otočná hlava	HH-AS8-T2.5			Datum kalibrace	23.8.2021						
PC DMIS verze	2021.2			Typ sensoru	HP-L 10.6T						
ISO Program verze	ISO_10360-8:2013			Výrobní číslo sensoru	7Z001710						
Skenovací rychlost (mm/s)	10			Firmware sensoru	0						
Akcelerace skenu (mm/s/s)	100			Úhel kuželu paprsku	120°						
Chyba snímání a hodnota polohování natočením [mm]											
	Orientace		25 bodů					95% bodů		Všechny body	
Č.	A	B	Ø	Tvar	Střed X	Střed Y	Střed Z	Tvar	Ø	Tvar	Ø
1	0	0	25.453	0.016	-0.011	0.001	-0.011	0.026	25.450	0.261	25.450
2	90	0	25.447	0.018	-0.001	0.023	-0.010				
3	90	90	25.455	0.015	-0.012	0.004	-0.009				
4	90	180	25.447	0.0	-0.003	-0.011	-0.010				
5	90	-90	25.450	0.015	0.013	0.003	-0.009				
Hodnoty jsou včetně rozšířené nejistoty měření podle ISO/TS 17865:2016.											
	Ø(25 Bodů)		Ø(all)		Tvar (25 Bodů)		Tvar (95%)		5D		
MPE/MPL:	30		25		22		34		45		
U:	2.2		2.2		4.1		4.1		4.1		
Chyba:	-12		-6		21		26		34		
Vyhodnocení shody:	VYHOVUJE		VYHOVUJE		VYHOVUJE		VYHOVUJE		VYHOVUJE		
Jednotky: µm											
	ISO- značka		Symbol		Význam						
	P[Size.Sph.1x25.Tr:ODS]		Ø (25 Bodů)		Chyba snímání rozměru						
	P[Size.Sph.All.Tr:ODS]		Ø (all)		Celková chyba snímání rozměru						
	P[Form.Sph.1x25.Tr:ODS]		Tvar (25 Bodů)		Chyba snímání tvaru						
	P[Form.Sph.D95%.Tr:ODS]		Tvar (95 %)		Rozptyl snímání						
	L[Dia.5x25:Art:ODS]		5D		Hodnota polohování natočením						

Příloha 6: Verifikace skeneru HP-L-10.10 na kouli

		Acceptance report for 3D CMMs ISO 10360 - 8 :2013 CMMs with optical distance sensors									
Customer	DIPLOMOVÁ PRÁCE	Operator	TOMAS SOBEK								
CMM Type	GLOBAL_S	Inspection Date	května 01 2022								
CMM Serial Number	GLOB001625IA										
CMM Size	07.10.07	Sphere Diameter [mm]	24.957								
CMM Controller Type	DC800	Sphere Number	G-05808								
CMM Controller Firmware	V 11	Certificate Number	G-05808-01								
Probe Head	HH-AS8-T2.5	Calibration Date	04.08.2021								
PC DMIS Version	2022.1	Sensor Type	HP-L-10.10T								
ISO Program Version	ISO_10360-8_SPHERE_Bridge...	Sensor Serial Number	10.10-00510-GE								
		Sensor Firmware	NA								
Scan speed (mm/s)	25										
Scan acceleration (mm/s/s)	300	Incidence angle	120°								
Probing Errors and Articulated Location Value [mm]											
	Orientation		25 points				95% points		all points		
Nr	A	B	Ø	Form	X Cen	Y Cen	Z Cen	Form	Ø	Form	Ø
1	0	0	24.958	0.000	-0.000	-0.000	0.001	0.007	24.958	0.020	24.958
2	90	0	24.960	0.000	0.001	-0.003	0.005				
3	90	90	24.959	0.002	0.001	0.004	0.005				
4	90	180	24.960	0.001	-0.005	0.005	0.006				
5	90	-90	24.960	0.000	-0.007	-0.002	0.005				
Values are including expanded measurement uncertainty according ISO/TS 17865:2016.											
	Ø(25Pts)		Ø(all)		Form (25Pts)		Form (95%)		LDia5x25		
MPE/MPL:	12		8		8		12		15		
U:	0.6		0.6		0.3		0.3		0.3		
Error:	1		1		0		7		11		
Passed	YES		YES		YES		YES		YES		
Unit: µm											
ISO- identifier			Abbrev.		Meaning						
P[Size.Sph.1x25.Tr:ODS]			Ø (25 Pts)		Diameter out of 25 representative Points						
P[Size.Sph.All.Tr:ODS]			Ø (all)		Diameter out of all detected points						
P[Form.Sph.1x25.Tr:ODS]			Form (25 Pts)		Form out of 25 representative Points						
P[Form.Sph.D95%.Tr:ODS]			Form (95 %)		Form out of 95% of all detected points						
L[Dia.5x25:Art:ODS]			LDia5x25		Diameter of the minimum circumscribed sphere of the five detected centres of the sphere measured from 5 different directions resulting in 5 sphere fits						
Signature: _____ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Customer Person in charge </div>											