

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Diplomová práce**

**Kontrola geometrických specifikací pomocí 3D skeneru**

Geometrical specifications inspection using a 3D scanner

**Tomáš Grznárik**

Praha 2024

Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Grznárik** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **491493**  
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:

**Kontrola geometrických specifikací pomocí 3D skeneru**

Název diplomové práce anglicky:

**Geometrical specifications inspection using a 3D scanner**

Pokyny pro vypracování:

1. Princip funkce a možnosti ručních skenerů.
2. Analýza současného stavu trhu v oblasti 3D skenerů.
3. Výběr součástí pro praktické zkoušky, získání referenčních hodnot.
4. Měření součástí ručním skenerem. Stanovení aplikačního potenciálu ručních skenerů.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **05.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

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

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podle děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny zdroje v seznamu použité literatury.

V Praze dne: .....

.....

Tomáš Grznárik

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Koptišovi za zapůjčení zařízení pro měření a jeho odborné a velmi obohacující rady v oblasti měření optickými přístroji, které byly využity pro zpracování této práce a osobně jsou mi přínosem i k mému kariérnímu zaměření. Dále bych chtěl samozřejmě poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Petru Mikešovi Ph.D za jeho pomoc a rady při měření na souřadnicovém měřícím stroji.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá výzkumem a experimentací s relativně novou technologií na trhu. 3D skenery velmi rychle pronikají do průmyslové sféry, avšak ukazují se tím i jejich nedostatky. V této práci se zabývám skutečnými možnostmi konkrétního 3D skeneru a ověřuji jeho vlastnosti udávané výrobcem pomocí přesnějšího měření na CMM.

## **Klíčová slova**

Ruční 3D skener, CMM, Laserové skenování, Pruhová projekce, Alufix, Calypso, Přesnost, Opakovatelnost, MSA, Barevná mapa

## **Abstract**

This thesis deals with research and experimentation with a relatively new technology on the market. 3D scanners are rapidly entering in the industrial sphere but this also shows their disadvantages. In this thesis, I examine the actual capabilities of a particular 3D scanner and verify its characteristics stated by the manufacturer using more accurate measurements on a CMM.

## **Keywords**

Handheld 3D scanner, CMM, Laser scanning, Structured light, Alufix, Calypso, Accuracy, Repeatability, MSA, Color map

# Obsah

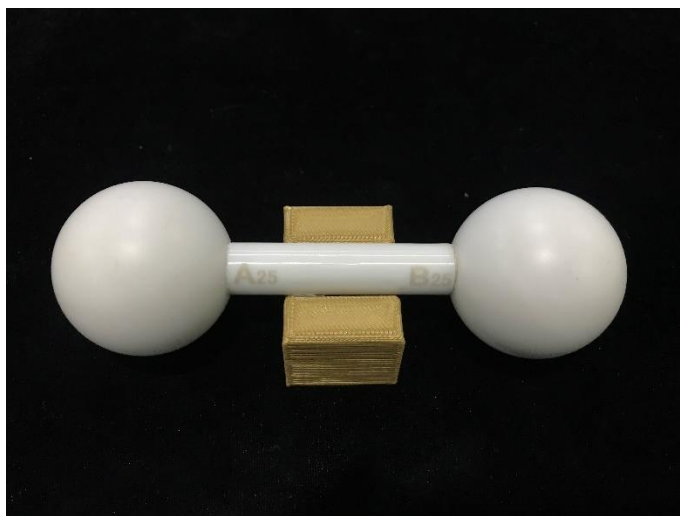
Úvod.....	8
1. Princip funkce ručních 3D skenerů.....	9
Optické skenery využívající laser.....	9
Optické skenery využívající strukturované světlo.....	12
2. Možnosti použití 3D skenerů .....	13
3. Omezení 3D skenerů.....	15
Druhy povrchů, osvětlení, referenční body .....	15
Volumetrická přesnost.....	17
Tabulkové porovnání skenování laserem a pruhovou projekcí .....	17
4. Průzkum trhu .....	18
T-SCAN Hawk 2.....	18
Artec Leo .....	19
Artec Space spider .....	20
HandySCAN 3D BLACK series .....	21
SIMSCAN 30 .....	22
EinScan HX.....	23
Souhrnné porovnání skenerů.....	24
5. Výběr součásti, získání referenčních hodnot a měření 3D skenerem.....	26
Získání referenčních dat.....	27
Měření na CMM stroji Zeiss Prismo .....	27
Tvorba programu .....	27
Volba a kvalifikace snímacího systému .....	32
Upnutí součásti .....	33
Vyrovnání součásti .....	33
Měření.....	33
Měření 3D skenerem .....	34

Kvalifikace .....	34
Zaměření referenčních bodů .....	36
Výhody a nevýhody umístění referenčních bodů .....	37
Vlastní měření součástí .....	40
Nastavení roviny ořezu .....	41
Měření.....	41
Postprocessing dat .....	42
Vyhodnocení měření.....	43
Vyhodnocení referenčních dat.....	43
Vyhodnocení dat naměřených 3D skenerem.....	46
Vyhodnocení reálných nepřesností 3D skeneru .....	50
Vyhodnocení charakteristiky „Rovinnost_zakladnaB“.....	53
Vyhodnocení charakteristiky prumer2 a kruhovitost_dira2.....	56
MSA analýza .....	63
Výsledky výpočtu R&R .....	65
Měření „freeform“ etalonu.....	67
Výsledky měření etalonu .....	72
6. Závěr.....	74
7. Zdroje .....	76

# Úvod

Počátky 3D skenerů sahají do začátku 60. let 20. století, avšak větší rozvoj v tomto odvětví byl zaznamenán až na úplném konci 20. století při příchodu větší výpočetní síly počítačů. Tato práce je zaměřena na užší skupinu ručních 3D skenerů pro strojní průmysl. Tyto přístroje se začaly více rozvíjet až v 10. letech tohoto století a do průmyslu teprve postupně pronikají. Jedná se tedy o relativně novou, nevyzkoušenou technologii v praxi. [1]

Hlavním problémem je, že udávané přesnosti 3D skenerů jsou dle různých norem počítány velmi jednoduše například pouze pomocí určení vzdálenosti středů 2 referenčních koulí nebo určení maximálního rozpětí naměřených bodů na jednoduchých útvarech jako je koule či rovina. Konkrétní zkouška pro mnou použitý skener je dle normy VDI/VDE 2634, která je prováděna pouze na kalibračním tělese viz obrázek (tzv. „Ballbar“). Při této zkoušce se vyhodnocuje pouze odchylka vzdálenosti středů dvou koulí od kalibrované vzdálenosti středů tělesa. Další normou, která popisuje metodiku zkoušení přesnosti ručních skenerů, je například norma ISO 10 360 [2; 3]



Obrázek 1 – kalibrační těleso – Ballbar [2]

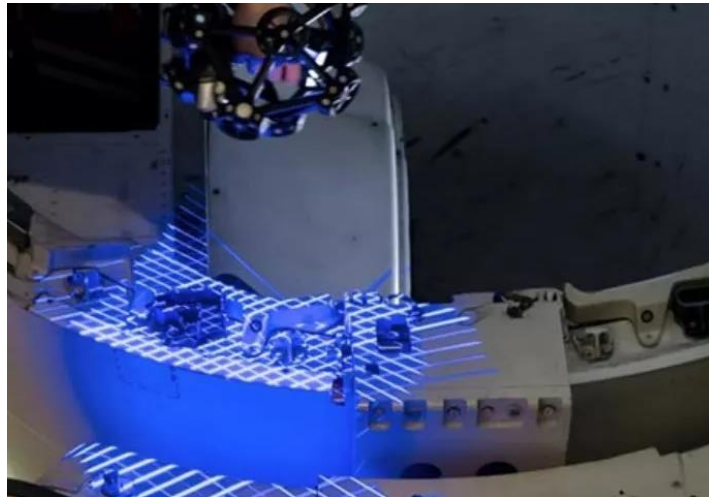
Cílem práce bylo stanovení reálných přesností, vlastností a chování ručního 3D skeneru Simscan42 od firmy 3D Scantech na reálné součásti. Ty se ověřovaly na přesně obroběném dílu a následně i na etalonu s obecnou tvarovou plochou. Jako referenční stroj byl použit souřadnicový měřicí stroj (CMM) Prismo. Ze zjištěných přesností skeneru lze následně určit aplikační potenciál v průmyslu.



# 1. Princip funkce ručních 3D skenerů

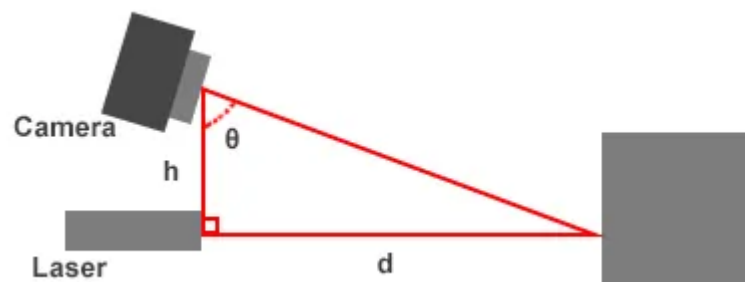
## Optické skenery využívající laser

Princip spočívá v promítání laserového paprsku na povrch součásti nejčastěji ve tvaru linky, v případě rychlého pokroku skenerů v dnešní době a nároků na vysokou produktivitu a rychlost skenování může být těchto linek na objekt promítáno i více.



Obrázek 2 – Příklad měření pomocí několika linek modrého laseru [4]

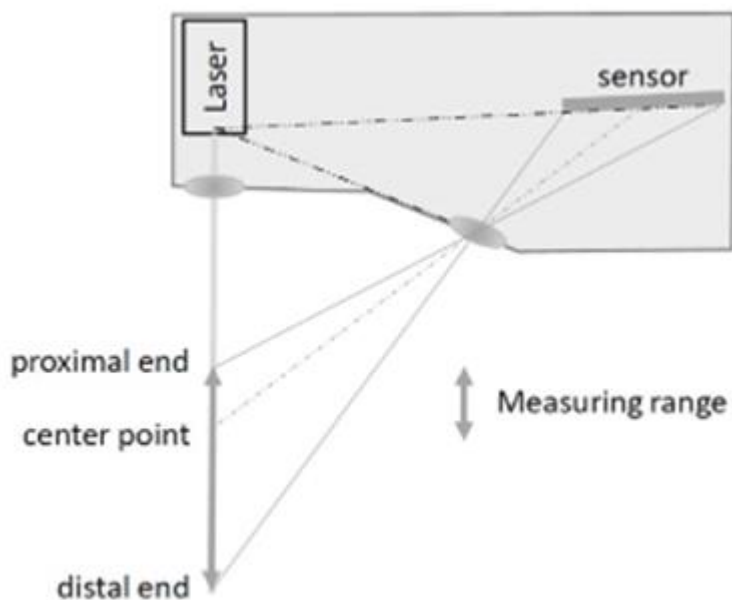
Paprsky se promítají na povrch součásti a následně jsou snímány senzorem. Optické skenery využívají princip aktivní triangulace, která dopočítává vzdálenost snímaných bodů (rozměr  $d$ ) ze znalosti přesně definované vzdálenosti mezi zdrojem laserového paprsku a kamerou (s CCD čipem – charge coupled device) – vzdálenost  $h$ , úhlem mezi směrem záření laseru a kamerou (úhel mezi úsečkami  $d$  a  $h$ ) a úhlem dopadu odraženého paprsku – úhel  $\theta$  viz obrázek 2.



Obrázek 2 – Aktivní laserová triangulace [5]

Přesnost zaznamenávání bodů velmi ovlivňuje to, v jaké části hloubky ostrosti skeneru se nacházíme – čím dále od objektu, v rozmezí své hloubky ostrosti, se bude skener nacházet, tím horší bude přesnost naměřených bodů. To je zapříčiněno tím, že na jakoukoliv snímanou plochu máme stále stejný počet pixelů CCD čipu. To ve výsledku znamená, že čím dále se

nacházíme od objektu, tím větší plocha připadá na jeden pixel CCD čipu a snižuje se rozlišení/přesnost. Pokud se ovšem budeme pohybovat v dolních mezích hloubky ostrosti (to je v nejmenší možné vzdálenosti laseru od měřeného objektu), bude měřená oblast nejmenší – bude klesat produktivita měření. Pro použití v praxi je tedy nutno měřicí vzdálenost volit rozumně vzhledem k požadovaným přesnostem a rychlosti měření. [5; 6]



Obrázek 3 – Znárodnění hloubky ostrosti skeneru [6]

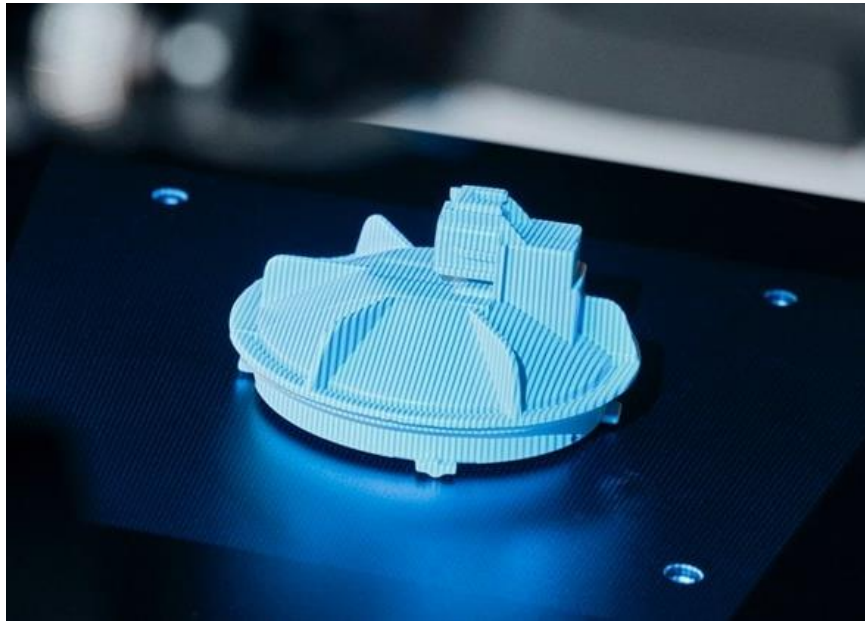
Přesnost a hloubku ostrosti dále také ovlivňuje barva (vlnová délka) laseru. Se zmenšující se vlnovou délkou laseru se teoreticky zvyšuje přesnost, ta ovšem závisí také na optických vlastnostech snímaného povrchu, a proto je vliv vlnové délky laseru na přesnost měření zanedbatelný. [6] V praxi se dnes reálně využívají 2 barvy laserů - červený ( $\lambda=650-700$  nm) a modrý ( $\lambda=445$  nm). Největší výhodou modrého laseru je jeho schopnost skenovat i relativně lesklé objekty a jeho vyšší teoretická přesnost, ta je ovšem, jak už bylo řečeno výše, nevýrazná. Dalším výhodným případem pro použití modrého laseru je skenování horkých součástí, které vyzařují světlo o podobné vlnové délce jako má červený laser. V takovém případě se červený laser vůbec nedá použít. Naopak červený laser je vhodnější pro produktivní měření – má vyšší intenzitu záření a tak dokáže skenovat objekty rychleji a v neposlední řadě je také levnější. [7; 8]



Obrázek 4 – barva laseru v závislosti na vlnové délce [nm] [8]

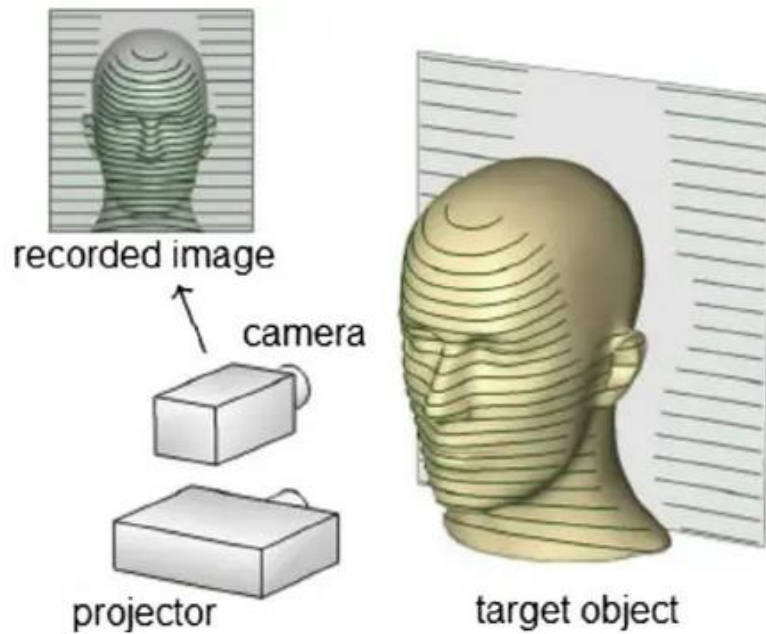
## Optické skenery využívající strukturované světlo

Měření probíhá na základě snímání povrchu součásti kamerou (CCD čipem), na kterém je projektorem promítáno strukturované světlo, viz obrázek 5. Toto světlo má tvar linek/pruhů a jejich barvy jsou závislé na vybraném způsobu kódování. Pro zjištění polohy bodů je stejně jako u předešlé metody laserového skenování použita aktivní triangulace. Strukturované světlo se tvoří pomocí různých druhů kódování jako je např. Grayův kód, binární kód nebo fázové posunutí.



Obrázek 5 – Měření pomocí strukturovaného světla [9]

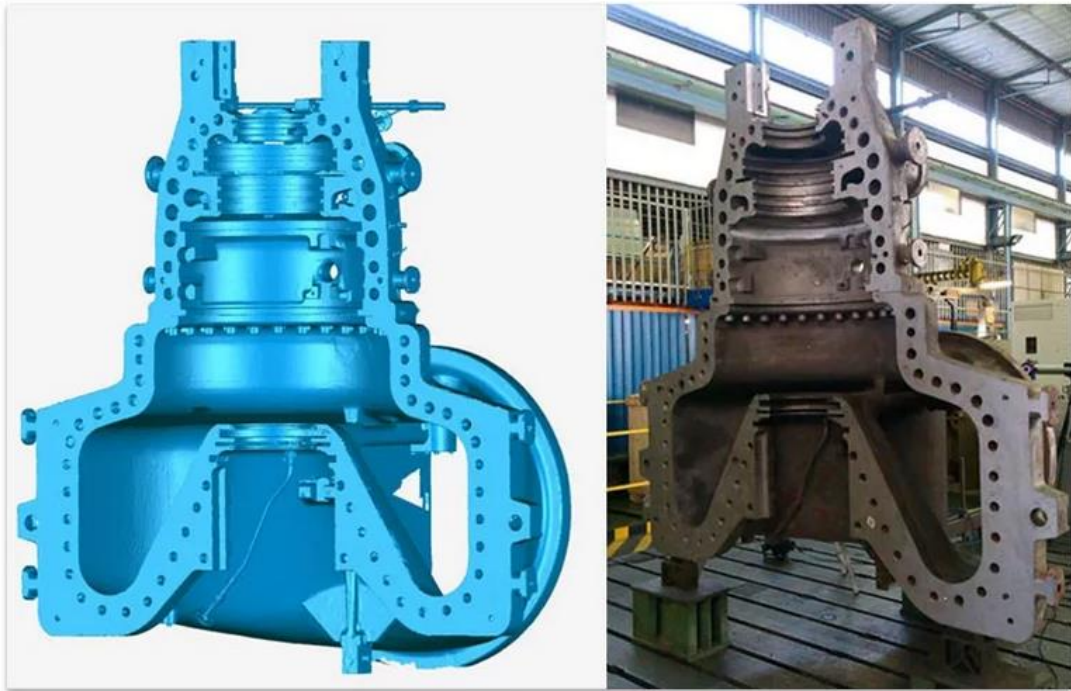
Strukturované světlo promítnuté na tvarovou plochu se z bočního pohledu kamery jeví jako křivka kopírující povrch měřeného objektu, viz obrázek 6. Ze znalosti tvaru nezdeformovaného vzoru a barev strukturovaného světla, kde na každý jeden pixel připadá unikátní kód vyplývající z použití různých odstínů šedi, barev nebo geometrických tvarů, systém opět pomocí triangulace dopočítává souřadnice bodu. [10; 11; 12]



Obrázek 6 – Měření pomocí strukturovaného světla [5]

## 2. Možnosti použití 3D skenerů

Optické skenery mají v dnešní době vícero využití. Můžeme s nimi nakládat jako s nástrojem pro reverzní inženýrství nebo je používat při postupném vývoji a úpravě součástí. Tímto způsobem tak můžeme získat 3D model skenované součásti v řádu několika minut, přičemž přesnost získaného modelu závisí na kvalitě použitého skeneru. U levnějších přístrojů se pohybujeme v přesnostech řádu desetin milimetrů (u větších součástí až milimetrů). Naopak u nejdražších skenerů můžeme při správném použití dosáhnout přesností v řádech setin milimetru.



Obrázek 7 – Příklad naskenované součásti [4]

Další možností využití je samotné měření, které je velmi produktivní a vhodné především pro složité tvary, které se buďto vůbec nedají měřit klasickými měřidly, nebo by toto měření či příprava na něj trvala příliš dlouho. Využití má určitá omezení, jakými jsou například špatně snímatelné ostré hrany, hluboké otvory nebo také barva, transparentnost či odrazivost povrchu součásti. 3D skenery se kvůli svým omezením a přesnostem zatím využívají především v méně přesných provozech, jakými jsou slévárny, kovárny, svařovny či montáže. Mimo strojní průmysl to může být architektura, stavařství nebo archeologie. [4; 13; 14]

### 3. Omezení 3D skenerů

#### Druhy povrchů, osvětlení, referenční body

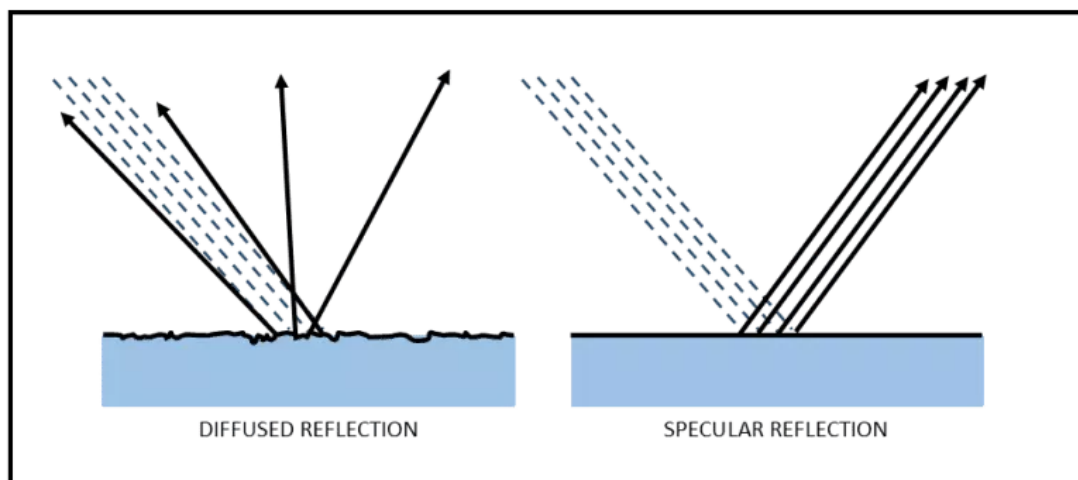
Pro možnost skládání shluků bodů do jednoho modelu je nutné na součást umisťovat referenční body, podle kterých následně algoritmus skládá naskenované části k sobě. Pruhová projekce potřebuje pro funkčnost většinou méně referenčních bodů než laserové skenování.

Laserové skenery nedokáží nést informaci o barvách, což může být pro některé aplikace nevýhodou a podnětem k používání pruhové projekce, která barvy zaznamenávat zvládne. [4]

Velkou nevýhodou obou typů skenerů je horší schopnost měření otvorů či zakřivených ploch připomínající hluboké otvory nebo drážky. Aby skener mohl místo změřit, musí mít toto místo v zorném poli jak zdroj světla tak i snímací kamera.

Dalším problémem je měření tmavých, lesklých a transparentních povrchů. To úzce souvisí s vlastnostmi a chováním světla při kontaktu s těmito druhy povrchů.

- a) Tmavé povrchy – absorbují světlo, čímž zmenšují pravděpodobnost odrazu světla směrem ke kameře. Tento problém mají spíše skenery využívající pruhovou projekci, jejichž zdroje světla mají nižší intenzitu záření než lasery. [15]
- b) Lesklé povrchy – mají velmi malou drsnost povrchu a tím snižují pravděpodobnost odrazu světla pod jiným úhlem než je úhel dopadu paprsků. To ve výsledku znamená, že se většina světla odrazí mimo snímací kameru a kamera nic nezachytí. [16]

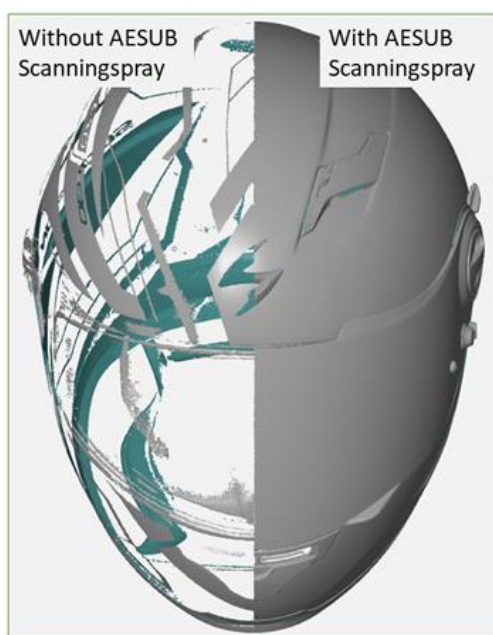


Obrázek 8 – Odraz světla na drsném (vlevo) a lesklém (vpravo) povrchu [16]

- c) Transparentní povrchy – tyto povrchy světlo neodráží prakticky vůbec, naopak světelné paprsky prochází skrze povrch.

Problém s tmavými a lesklými povrchy dokáže částečně eliminovat laserové skenování. Frekvence pulsů a intenzita moderních laserů dokáže obejít tyto nevýhody. Vysoká frekvence pulsů dokáže zajistit odraz velmi malého procenta (přesto dostačujícího) paprsků od lesklých povrchů směrem ke kameře. Naopak vysoká intenzita laseru pomáhá při skenování tmavých povrchů.

Pokud se skenování nevhodných povrchů nelze vyhnout, tak se dá použít jednoduchá metoda nanesení křída nebo barvy ve spreji na povrch skenovaného dílu, která zajistí vhodné podmínky pro odraz světla. Má ovšem pár úskalí – křída/barva do měření vnáší chybu o velikosti nanesené vrstvy. Pokud je navíc vrstva nanesená nerovnoměrně, je tato chyba neodhadnutelná a nedá se korigovat. Na obrázku 7 je v levé části vidět úspěšnost skenování helmy v černé lesklé barvě (nenaskenovaná část) se žlutými pruhy (naskenovaná část). [15; 16]



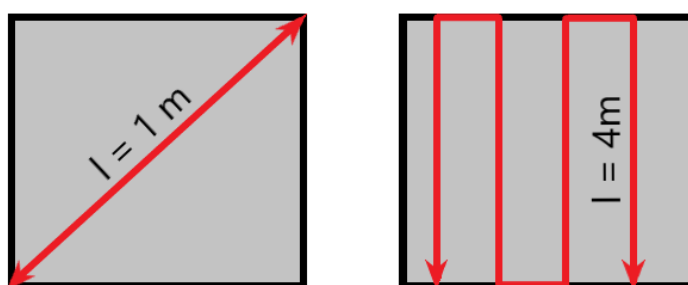
Obrázek 9 – Příklad skenování bez (vlevo) a s (vpravo) použitím úpravy povrchu sprejem [15]

Neposledním problémem při měření je okolní osvětlení. To může interferovat s vlastním laserem či strukturovaným světlem a vytvářet tak chyby v podobě odlehlých bodů. Pro měření je tedy vhodné mít uzavřenou místnost s vlastním řízeným osvětlením. Na okolní světlo je více náchylná pruhová projekce, což opět souvisí s její nižší intenzitou zdrojů světla. [14]



## Volumetrická přesnost

Jedná se o vyjádření přesnosti při skenování větších objektů. Každý skener se zvětšující se uraženou dráhou při měření ztrácí svou přesnost. To lze vyjádřit volumetrickou přesností v jednotkách mm/m. Správným přístupem ke zjištění této přesnosti je výpočet, který zahrnuje dráhu, která byla optickým skenerem při skenování objektu opsána, přenásobenou volumetrickou přesností skeneru. Na příkladu z obrázku lze říci, že pokud bude skenován objekt a dráha uražená skenerem (který má volumetrickou přesnost např.: 0,1 + 0,2 mm/m) bude 4 m, tak výsledná vypočítaná přesnost bude  $0,1 + 4 \cdot 0,2 = 0,9 \text{ mm}$ . (Mylný výpočet přes maximální rozměr součásti je na obrázku vlevo -  $0,1 + 1 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ mm}$ )



Obrázek 10 – Špatně zvolená vzdálenost do výpočtu (vlevo), správně zvolená dráha do výpočtu (vpravo)

## Tabulkové porovnání skenování laserem a pruhovou projekcí

Tabulka 1 – Porovnání skenování laserem a pruhovou projekcí

		Laserové skenování	Pruhová projekce
Rychlost měření		-	+
Přesnost měření		+	-
Zachycení barev		-	+
Cena		-	+
Problematické druhy povrchu	Tmavé	+	-
	Lesklé	+*	-**
	Transparentní	-**	-**
Zachycení detailů a ostrých hran		+	-
Čistota dat		+	-

+ obecně lepší

- obecně horší

+\* lze skenovat pouze lepšími skenery s modrým laserem a správnou metodikou

-\*\* nelze skenovat bez úpravy povrchu

## 4. Průzkum trhu

### T-SCAN Hawk 2

Jedná se o ruční laserový 3D skener od firmy ZEISS s možností použití jedné či více laserových linií. Jedna laserová linie se používá většinou pro skenování hlubších drážek nebo děr. Další funkcí skeneru je funkce „Satellite mode“, která umožňuje skenování velkých součástí (velikosti až několik metrů) bez použití fotogrametrických kalibračních tyčí. Ohnisková vzdálenost skeneru se pohybuje od desítek centimetrů po několik metrů v závislosti na velikosti skenovaného objektu. Hmotnost skeneru je necelý 1 kg, což pozitivně ovlivňuje ruční práci se skenerem, kterou naopak může mírně omezovat přítomnost kabelu pro přenos dat. Výrobce deklaruje volumetrickou přesnost  $0,020 \text{ mm} + 0,015 \text{ mm/m}$  dle přejímacích zkoušek ISO 10 360. Jedná se tedy o jeden z nejpřesnějších skenerů na trhu, který ovšem také spadá do nejdražší kategorie skenerů v cenové relaci nad 40 000 EUR. [13; 17]



Obrázek 11 – Ukázka měření s T-SCAN hawk 2 na lesklém povrchu [17]

## Artec Leo

3D skener od firmy ARTEC 3D využívající k měření pruhovou projekci. Ohnisková vzdálenost skeneru je v rozmezí 350 - 1 200 mm a velikost snímatelné plochy v největší pracovní vzdálenosti je 838 x 488 mm. Základní přesnost skeneru dosahuje hodnoty 0,1 mm a volumetrická přesnost 0,1 mm + 0,3 mm/m. Zajímavou funkcí je automatické nastavování jasů světelného zdroje při skenování různých barev a odstínů povrchů pro lepší výsledky skenování. Rychlost sběru dat dosahuje až 35 milionů bodů za sekundu. Hmotnost skeneru je 2,6 kg, což by při delším skenování mohl být problém. Cenová nabídka základní verze je 34 800 EUR. [18]



Obrázek 12 – Skener Artec Leo [18]

## Artec Space spider

Jedná se o 3D skener od firmy Artec pracující na bázi pruhové projekce. Oproti dříve zmíněnému Artec Leo je navržen na skenování spíše menších dílů, čemuž odpovídají i parametry skeneru. Ohnisková vzdálenost je pouze 200 – 300 mm a maximální velikost skenovací plochy 180 x 140 mm. Výrobce udává přesnost 0,05 mm a volumetrická přesnost 0,05 mm + 0,3 mm/m. Skener dokáže zaznamenat až 1 000 000 bodů/s. Hmotnost skeneru dosahuje 0,8 kg a cenová nabídka začíná na 21 700 EUR. [19]



Obrázek 13 – 3D skener Space spider [19]

Následující tabulka porovnává další 3D skenery od firmy Artec 3D.

Tabulka 2 – Porovnání 4 verzí skeneru od Artec [19]

3D skener	Typ skeneru	Skenovací rychlost [bodů/s]	Přesnost [mm]	Volumetrická přesnost [mm + mm/m]	Hmotnost [kg]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Max. skenovací plocha [mm]	Cena [EUR]
Artec Leo	Pruhová projekce	35 000 000	0,1	0,1 + 0,3	2,6	350 - 1200	838 x 488	34 800
Artec Space spider	Pruhová projekce	1 000 000	0,05	0,05 + 0,3	0,8	200 - 300	180 x 140	21 700
Artec Eva	Pruhová projekce	18 000 000	0,1	0,1 + 0,3	0,9	400 - 1000	536 x 371	13 700
Artec Eva lite	Pruhová projekce	2 000 000	0,1	0,1 + 0,3	0,9	400 - 1000	536 x 371	6 700

## HandySCAN 3D BLACK series

3D skener od firmy Creaform 3D využívá k měření 7 laserových křížů (ve vylepšené verzi 11 laserových křížů). Ohnisková vzdálenost je 300 mm a využitelná skenovací plocha 350 x 310 mm. Skenovací rychlost je oproti konkurenci nižší - 800 000 bodů/s. Základní přesnost skeneru dle VDI/VDE 2634 dosahuje na hodnoty 0,035 mm a volumetrická přesnost 0,020 mm + 0,060 mm/m. Hmotnost skeneru je 940 g, čímž se vyrovnává skeneru T-SCAN Hawk 2. Tento skener firma Creaform nabízí ve vylepšené verzi „Elite“ nebo ještě přesnější verzi „Elite Limited Edition“, která podléhá přísnější výrobě a kalibraci. V následující tabulce jsou k porovnání 3 zmíněné verze. [20; 21]

Tabulka 3 – Porovnání 3 verzí skeneru od Creaform 3D [20]

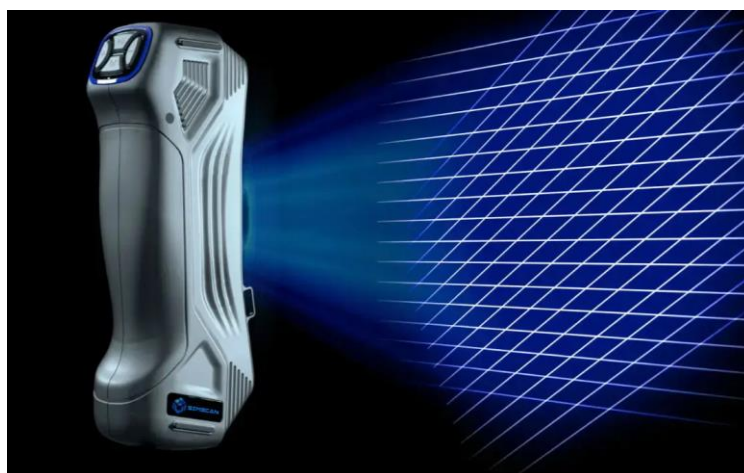
3D skener	Typ skeneru	Skenovací rychlost [bodů/s]	Přesnost [mm]	Volumetrická přesnost [mm + mm/m]	Hmotnost [kg]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Max. skenovací plocha [mm]	Cena [EUR]
Handy SCAN 3D BLACK series	Laser	800 000	0,035	0,020 + 0,060	0,94	300	310 x 350	54 000
Handy SCAN 3D BLACK series/elite	Laser	1 300 000	0,025	0,020 + 0,040	0,94	300	310 x 350	65 000
Handy SCAN 3D BLACK series/elite (Limited edition)	Laser	1 300 000	0,012	0,012 + 0,020	0,94	300	310 x 350	Více než 65 000

## SIMSCAN 30

3D skener od firmy 3D Scantech s měřením pomocí laseru se vyznačuje třemi módy měření. Pro produktivní měření využívá 11 modrých laserových křížů, pro přesné skenování 7 laserových linií a pro skenování hlubokých otvorů a děr používá 1 laserovou linii. Je navržen pro měření špatně dostupných prostorů což znamená, že úhel mezi kamerou a zdrojem světla je velmi ostrý. Maximální přesnost skeneru dle normy VDI/VDE 2634 je 0,020 mm (volumetrická přesnost 0,015 mm + 0,035 mm/m). Skenovací rychlost dosahuje až 2 020 000 bodů/s a maximální skenovací oblast je 650 x 550 mm. Hmotnost skeneru je pouze 570 g. Cenová relace skeneru je okolo 27 000 EUR. V následující tabulce je možno vidět rychlé porovnání různých verzí skeneru SIMSCAN. [13; 22]

Tabulka 4 - Porovnání verzí skeneru SIMSCAN [22]

3D skener	Typ skeneru	Skenovací rychlost [bodů/s]	Přesnost [mm]	Volumetrická přesnost [mm + mm/m]	Hmotnost [kg]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Max. skenovací plocha [mm]	Cena [EUR]
SIMSCAN 22	Laser	1 250 000	0,020	0,015 + 0,035	0,57	300	650 x 550	/
SIMSCAN 30	Laser	2 020 000	0,020	0,015 + 0,035	0,57	300	650 x 550	27 000
SIMSCAN 42	Laser	2 800 000	0,020	0,015 + 0,035	0,57	300	700 x 600	50 000



Obrázek 14 – Skener SIMSCAN [22]

## EinScan HX

Firma Shining 3D vyvinula tento skener využívající kombinaci laseru i pruhové projekce pro širší využití skeneru. Pruhová projekce nachází uplatnění u rychlého skenování, naopak laser se používá pro přesnější a detailnější měření. Skenovací oblast při využití pruhové projekce má velikost 420 x 440 mm a skenovací rychlost je 1 200 000 bodů/s, při použití laseru (7 laserových křížů) je oblast nepatrně menší a to konkrétně 380 x 400 mm a skenovací rychlost se snižuje na 480 000 bodů/s. Ohnisková vzdálenost je v obou případech 470 mm. Použití pruhové projekce nabízí přesnost 0,05 mm a volumetrickou přesnost 0,05 mm + 0,1 mm/m, zatímco skenování pomocí laseru nabízí přesnost 0,04 mm a objemovou přesnost 0,04 mm + 0,06 mm/m. Hmotnost skeneru je 0,71 kg. Cenová nabídka začíná okolo 10 000 EUR. [23; 24]

Tabulka 5 – Porovnání 3 skenerů od firmy Shining 3D [23]

3D skener	Typ skeneru	Skenovací rychlost [bodů/s]	Přesnost [mm]	Volumetrická přesnost [mm + mm/m]	Hmotnost [kg]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Max. skenovací plocha [mm]	Cena [EUR]
EinScan HX	Laser	480 000	0,040	0,040 +0,060	0,71	470	400 x 380	10 000
	Pruhová projekce	1 200 000	0,050	0,050+0,100			440 x 420	
EinScan Pro 2X	Pruhová projekce	3 000 000	0,045	0,045 + 0,300	1,13	400	260x 190	6 000
EinStar	Pruhová projekce	980 000	/	/	0,5	160 - 1400	434 x 379	959



Obrázek 15 – 3D skener EinScan HX v laserovém režimu [23]

## Souhrnné porovnání skenerů

Tabulka 6 – Porovnání zmíněných skenerů

3D skener	Typ skeneru	Skenovací rychlost [bodů/s]	Přesnost [mm]	Volumetrická přesnost [mm + mm/m]	Hmotnost [kg]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Max. skenovací plocha [mm]	Cena [EUR]
T-SCAN Hawk 2	Laser	/	0,020	0,020 + 0,015	<1	/	/	40 000
Artec Leo	Pruhová projekce	35 000 000	0,100	0,100 + 0,300	2,6	350 - 1200	838 x 488	34 800
Artec Space spider	Pruhová projekce	1 000 000	0,050	0,050 + 0,300	0,8	200 - 300	180 x 140	21 700
Artec Eva	Pruhová projekce	18 000 000	0,100	0,100 + 0,300	0,9	400 - 1000	536 x 371	13 700
Artec Eva lite	Pruhová projekce	2 000 000	0,100	0,100 + 0,300	0,9	400 - 1000	536 x 371	6 700
Handy SCAN 3D BLACK series	Laser	800 000	0,035	0,020 + 0,060	0,94	300	310 x 350	54 000
Handy SCAN 3D BLACK series/elite		1 300 000	0,025	0,020 + 0,040				65 000
Handy SCAN 3D BLACK series/elite (Limited edition)			0,012	0,012 + 0,020				65 000+
EinScan HX	Laser	480 000	0,040	0,040 + 0,060	0,71	470	400 x 380	10 000
	Pruhová projekce	1 200 000	0,050	0,050 + 0,100			440 x 420	
EinScan Pro 2X	Pruhová projekce	3 000 000	0,045	0,045 + 0,300	1,13	400	260x 190	6 000
EinStar	Pruhová projekce	980 000	/	/	0,5	160 - 1400	434 x 379	959



3D skener	Typ skeneru	Skenovací rychlost [bodů/s]	Přesnost [mm]	Volumetrická přesnost [mm + mm/m]	Hmotnost [kg]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Max. skenovací plocha [mm]	Cena [EUR]
SIMSCAN 22	Laser	1 250 000	0,020	0,015 + 0,035	0,57	300	650 x 550	/
SIMSCAN 30	Laser	2 020 000	0,020	0,015 + 0,035	0,57	300	650 x 550	27 000
SIMSCAN 42	Laser	2 800 000	0,020	0,015 + 0,035	0,57	300	700 x 600	50 000

## 5. Výběr součásti, získání referenčních hodnot a měření 3D skenerem

V této části diplomové práce se budeme zabývat vlastním měřením reálné součásti. Jedná se o součást ze série upínacích prvků Alufix.



Obrázek 16 – Měřená součást

Na této součásti provedeme měření pomocí CMM (souřadnicového měřicího stroje), přičemž hodnoty z tohoto měření budeme považovat za referenční. Přesnost CMM je o řád vyšší než u použitého 3D skeneru, a tak se tímto srovnáním nedopustíme chyby větší než jsou nižší jednotky procent. Díl změříme 10x na CMM, následně 10x pomocí 3D skeneru SIMSCAN 42. Vyhodnocení dat bude v obou případech probíhat v softwaru Calypso, který využijeme k tvorbě programu pro měření na CMM a zároveň tento program využijeme pro vyhodnocení STL (Standard Triangle Language) dat ze 3D skeneru. Tímto postupem by mělo být eliminováno zkreslení výsledků měření nepřesnostmi vyrobené součásti (přestože součást by měla být dle katalogu výrobce velmi přesně vyrobena), jelikož budou vyhodnoceny charakteristiky u obou měření ze stejných míst na měřené součásti. Z těchto dat se vyhodnotí opakovatelnost a reálná přesnost měření 3D skeneru.

V další části bude 3D skener podroben částečné MSA analýze (Measurement System Analysis – analýza systému měření). Jelikož se jedná o ruční zařízení pro měření, je zde předpoklad pro náchylnost měření na kvalitu operátora, respektive vliv lidského faktoru.

V poslední části bude ověřeno chování a přesnost skeneru na „freeform“ kalibračním tělísku pro optické přístroje v jednotlivých měřicích módech.

## Získání referenčních dat

### Měření na CMM stroji Zeiss Prismo

Stroj disponuje přesností M<sub>Pe</sub> (maximální chyba stroje) = 0,9 + L/330 μm. Tato přesnost je dostačující na to, aby se naměřené hodnoty z tohoto stroje mohli brát jako referenční hodnoty pro porovnání s 3D skenerem (se zanedbatelnou chybou).

### Tvorba programu

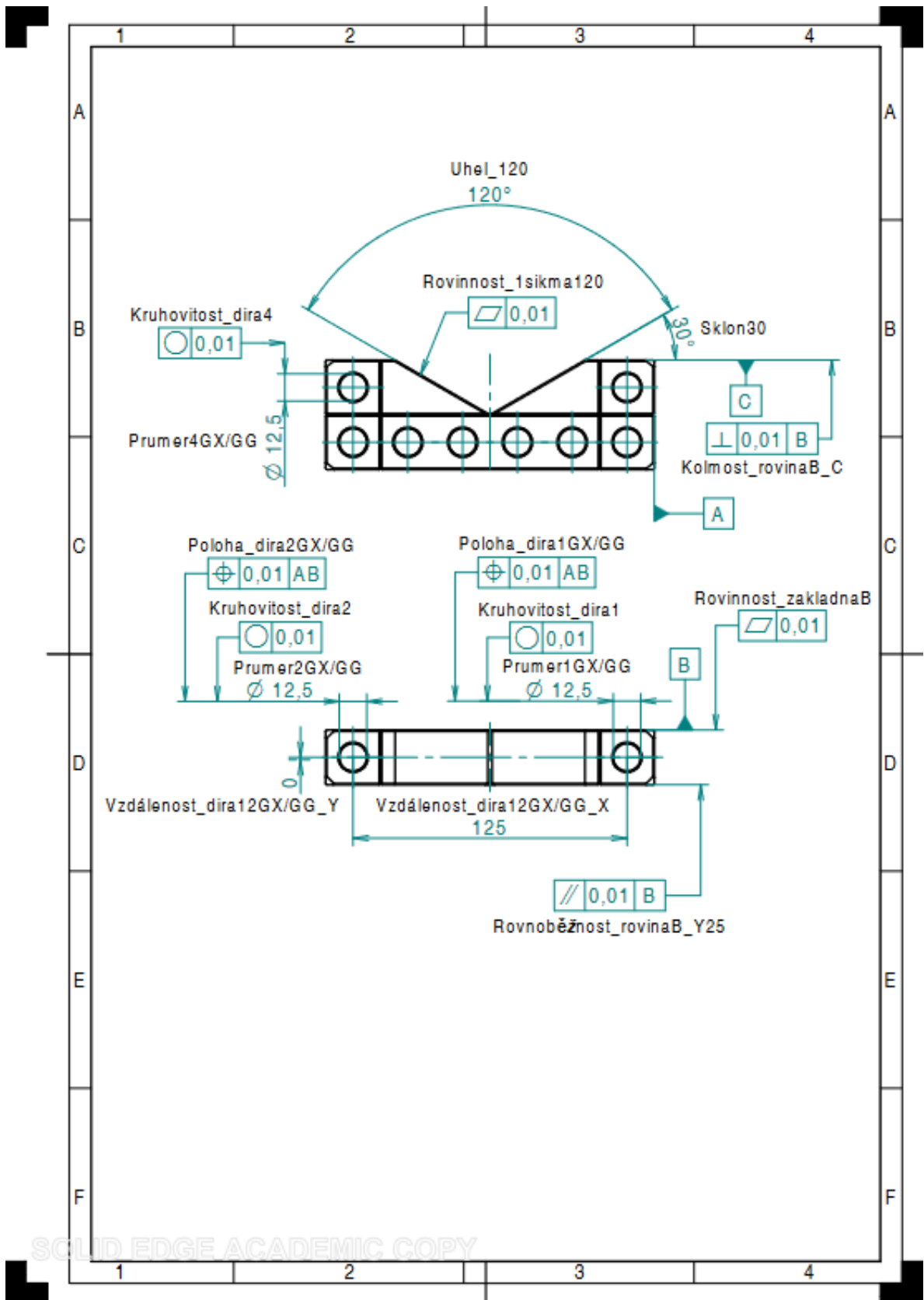
#### Měřené charakteristiky

Pro měření byl vytvořen model součásti dle katalogu výrobce součásti Alufix, ke kterému byl vytvořen měřicí program v softwaru Calypso 2020. Pro vyhodnocování bylo zvoleno 15 charakteristik, aby bylo prověřeno chování skeneru na více typech geometrií. Jejich výčet je vidět v tabulce 7 a jejich přesné zobrazení je možno shlédnout na výkresu (nejedná se přímo o výkres, spíše o znázornění měřených charakteristik) součásti, viz další strana.

Tabulka 7 - Výčet měřených charakteristik

Rovinnost_zakladnaB	Poloha_dira1GX
Rovinnost_1sikma120	Poloha_dira2GX
Kruhovitost_dira1	Uhel_120
Kruhovitost_dira2	Kolmost_rovinaB_C
Kruhovitost_dira4	Prumer1GG
Prumer1GX	Prumer2GG
Prumer2GX	Prumer4GG
Sklon30	Vzdálenost_dira12GG_X
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	Vzdálenost_dira12GG_Y
Vzdálenost_dira12GX_X	Poloha_dira1GG
Vzdálenost_dira12GX_Y	Poloha_dira2GG

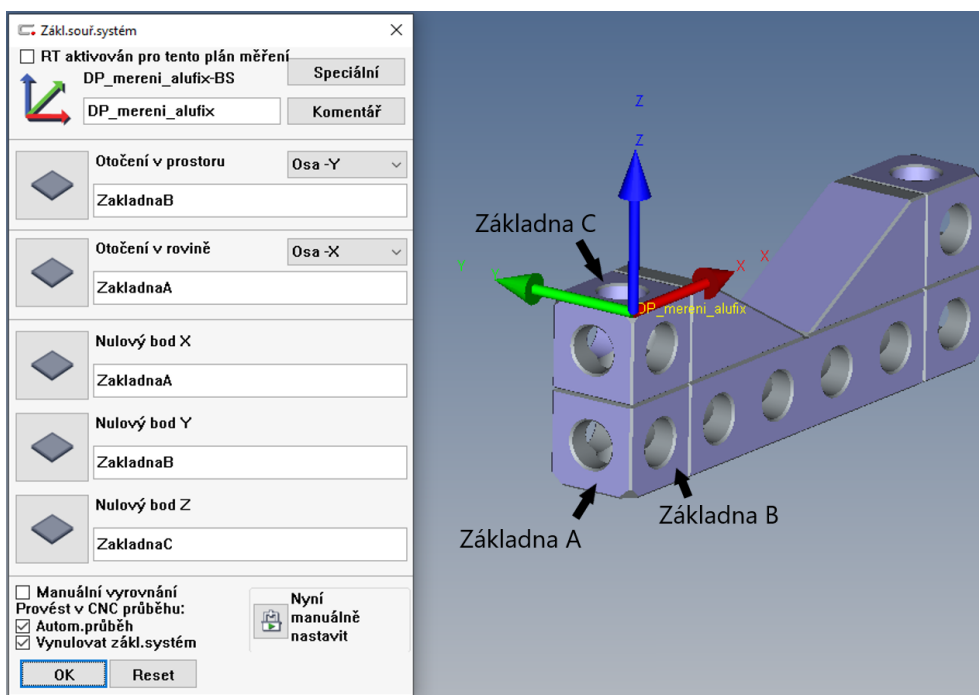
Výkres součásti



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

## Vyrovnání součásti

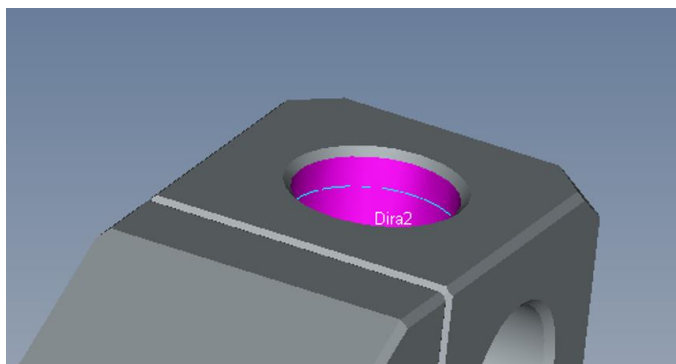
Vyrovnání součásti bylo zvoleno vzhledem ke skenovaným datům tak, aby se díl nemusel při skenování otáčet a následně data (mračky bodů) skládat k sobě pomocí funkce best-fit. Toto skládání více mraků bodů dohromady vnáší do měřených dat další chybu. Proto bylo vyrovnání provedeno na horním rohu součásti viz obr. 17.



Obrázek 17 – Vyrovnání součásti

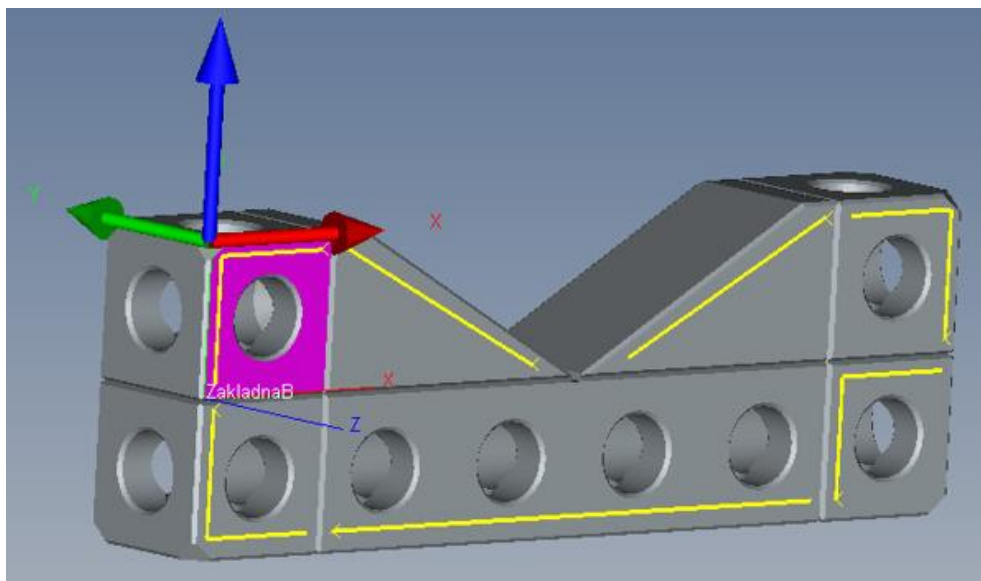
## Volba drah na součásti

Jedním z největších problémů u dat skenovaných optickými měřicími přístroji jsou ostré a sražené hrany. U těchto hran STL síť neodpovídá reálnému tvaru součásti a odchylky v těchto oblastech jsou výrazné. Proto se jim cíleně při vyhodnocování dat vyhýbáme. Pro díry byla zvolena kružnice vzdálená 3 mm od horního kraje dílu. Kružnice je dostatečně daleko od hrany a zároveň ne příliš daleko pro zachycení dat 3D skenerem.



Obrázek 18 – Pozice kružnice pro vyhodnocení průměru díry

Pro rovinné plochy byl odstup od hran na součásti 2-3 mm (viz obr. 19). Dále bylo nutné se vyhnout útvarům vzniklým upnutím součásti při měření 3D skenerem, viz obr. 34.



Obrázek 19 – Dráha pro měření základny B

### Rychlost a délka kroku

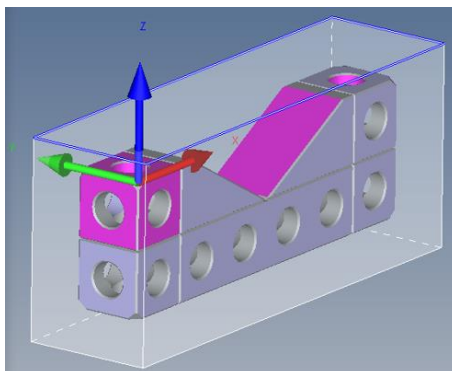
Pro snímání děr byla použita rychlost 5 mm/s a pro rovinné plochy 7 mm/s. Vzdálenost měřených bodů byla ve všech případech nastavena na 0,1 mm.

### Metody vyhodnocování

Pro měření děr bylo zvoleno vyhodnocení pomocí kružnice vepsané (GX) a následně i vyhodnocení Gaussovo metodou (GG).

### Bezpečnostní kvádr

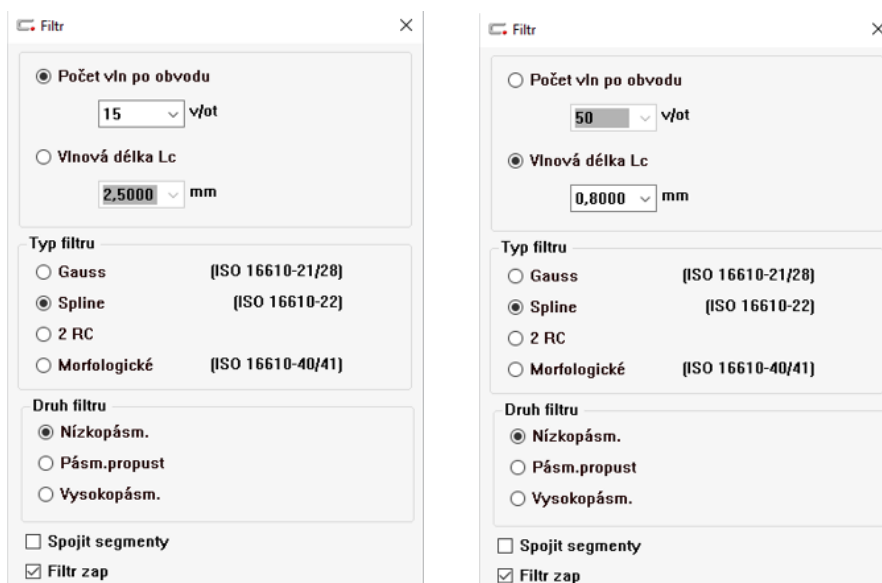
Bezpečná vzdálenost při přejezdu snímačů okolo součásti byla stanovena na 10 mm od ploch modelu.



Obrázek 20 – Bezpečnostní kvádr

## Filtrace dat

Pro skenování bodů na CMM byly zvoleny 2 typy aktivních filtrů při sběru dat. Na díry byl dle tabulek pro díru o průměru 12,5mm použit filtr s hodnotou 15 vln/otáčku a pro rovinné plochy byl dle drsnosti součásti zvolen filtr s hodnotou 0,8 mm, viz obr.21.

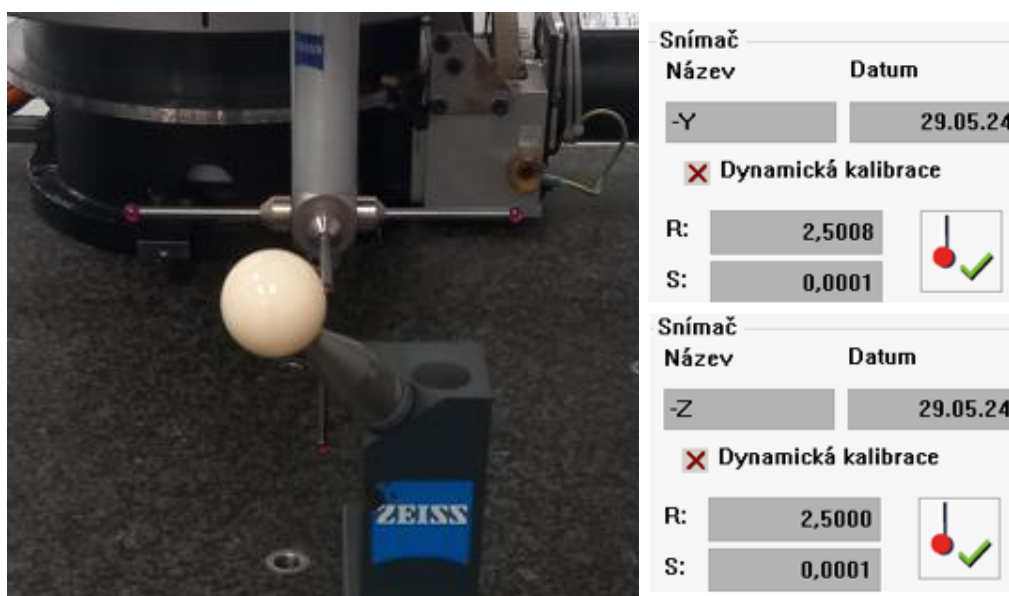


Obrázek 21 – Filtrace měřených dat (vlevo pro díry, vpravo pro rovinné plochy)

## Volba a kvalifikace snímacího systému

Pro co nejpřesnější měření je vhodné využít co nejmenší počet snímačů. Dřívky snímačů by měly mít co největší tuhost. Dřík by tedy měl mít co nejmenší délku, která umožní přístup ke všem měřeným plochám. Z tohoto důvodu byl vybrán snímač o průměru kuličky 5 mm s délkou dříku 60 mm. Tento snímač byl použit 2 krát – ve směru osy Z a Y. Všechny rovinné plochy byly snímány snímačem v ose Z, pouze boční díry byly snímány snímačem v ose Y.

Kvalifikace snímacího systému se provádí pomocí referenční koule. Nejprve se koule zaměří referenčním snímačem. Následně proběhne kvalifikace snímačů. Systém pro začátek kvalifikace vyžaduje manuální nájezd na jeden bod na referenční kouli, zbytek procesu probíhá automaticky. Snímač by měl mít polohu středu (písmeno S na obrázku 22) do 0,0005 mm. Pokud je tato hodnota vyšší, je vhodné snímač kvůli nechtěným nepřesnostem vyměnit.

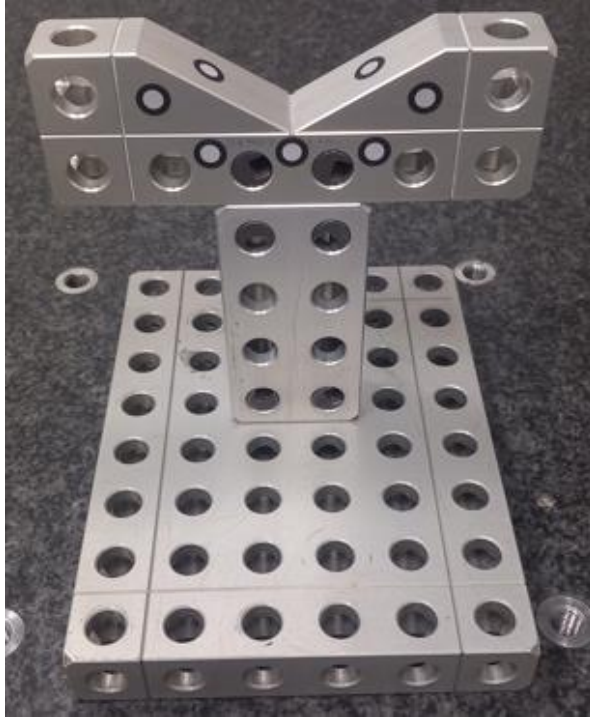


Obrázek 22 – Kalibrace snímače -Y na kalibrační kouli a informace o kalibraci obou snímačů.



## Upnutí součásti

Upnutí součásti musí být co nejtužší a zároveň musí zajistit přístup ke všem měřeným plochám. Z námi vybraných charakteristik a konfigurace snímačů vyplynulo, že se díl musel upnout do určité výšky nad granitovou desku pomocí dalších prvků Alufix, viz obrázek 23.



Obrázek 23 – Upnutí součásti

## Vyrovnání součásti

Před automatickým vyrovnáním systém musí nejprve zjistit, kde se součást nachází. K tomu slouží funkce manuálního vyrovnání, při kterém musíme ručně najet u každé plochy na 3 body. Z těchto bodů systém dopočítá roviny a určí střed souřadného systému. Následně automaticky provede vyrovnání podle již vytvořeného programu.

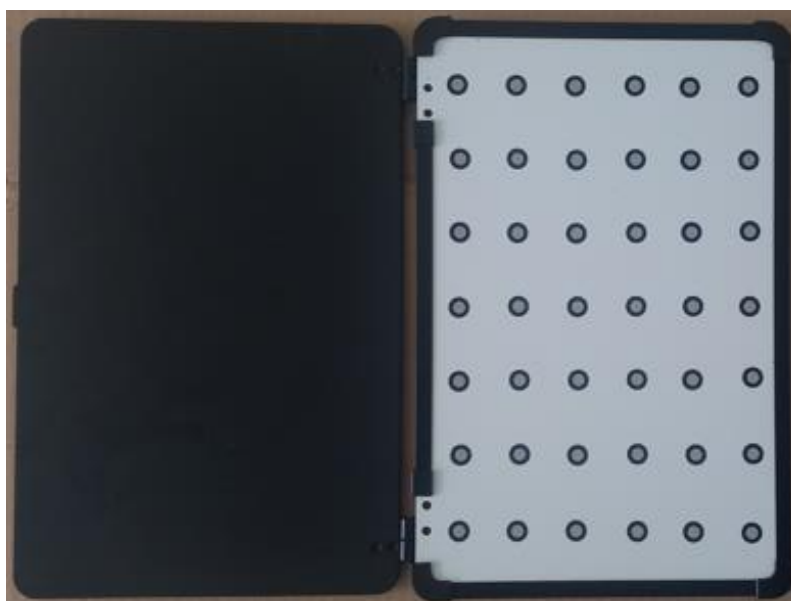
## Měření

Samotné měření se opakovalo 10 krát pro následné porovnání opakovatelnosti měření CMM a 3D skeneru.

## Měření 3D skenerem

### Kvalifikace

Pro měření je nutná kvalifikace přístroje. Kvalifikace se provádí pomocí kvalifikační desky dodávané výrobcem, která obsahuje 42 referenčních bodů. Kvalifikace probíhá v módu 17 laserových křížů, viz obrázek 25.

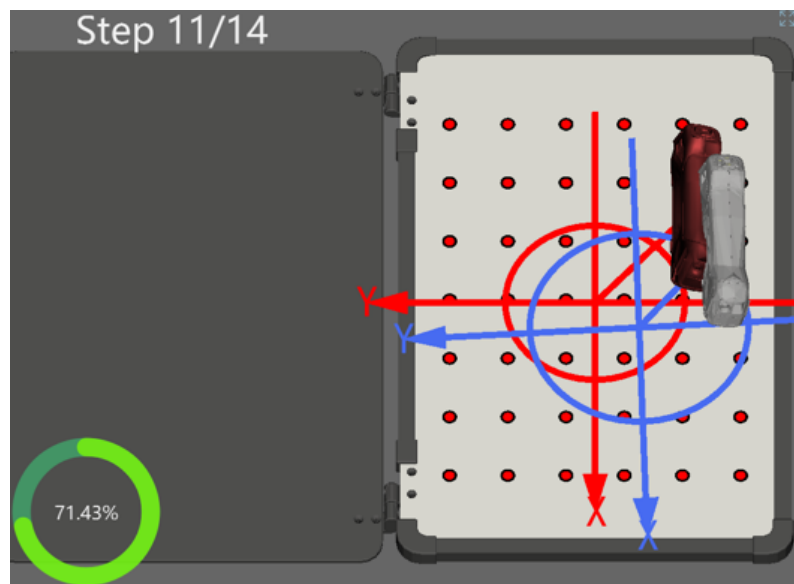


Obrázek 24 – Kvalifikační deska



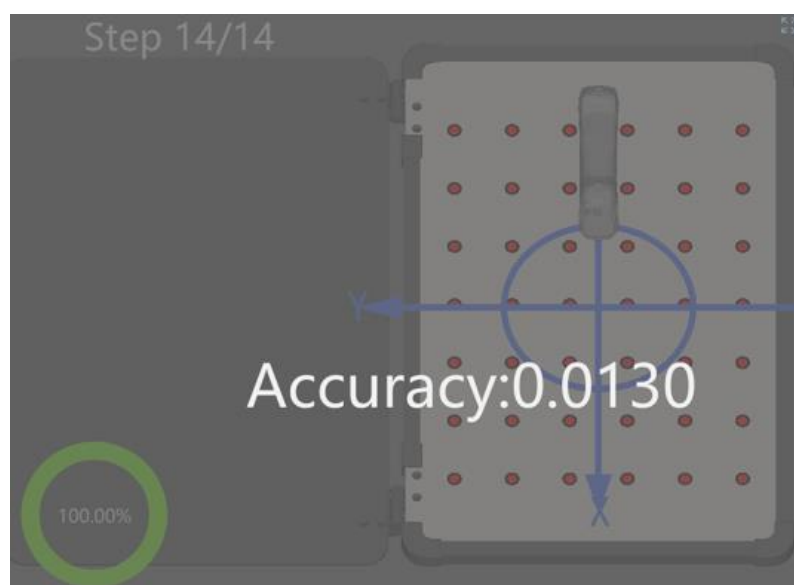
Obrázek 25 – Kvalifikace skeneru

V softwaru ScanViewer, dodávaným výrobcem ke skeneru, nastavíme proces kvalifikace. Následně je na operátorovi, aby kvalifikační desku nasnímal ve 14 pozicích, které software naznačuje na obrázcích. Při správném napolohování skeneru, které spočívá v nastavení správné ohniskové vzdálenosti a natočení skeneru, se pozice uloží a automaticky posune na další krok – jinou pozici.



Obrázek 26 – Naznačení pozice skeneru v softwaru

Po správném nasnímání všech pozic se kvalifikace ukončí vyskakovacím oknem, které pravděpodobně oznamuje aktuální přesnost skeneru (tuto informaci nelze považovat za směrodatnou). Kvalifikace nemusí vždy proběhnout úspěšně, v takovém případě je nutno proces opakovat. Pro operátora s jistou zkušeností proces zabere přibližně 2-3 minuty.



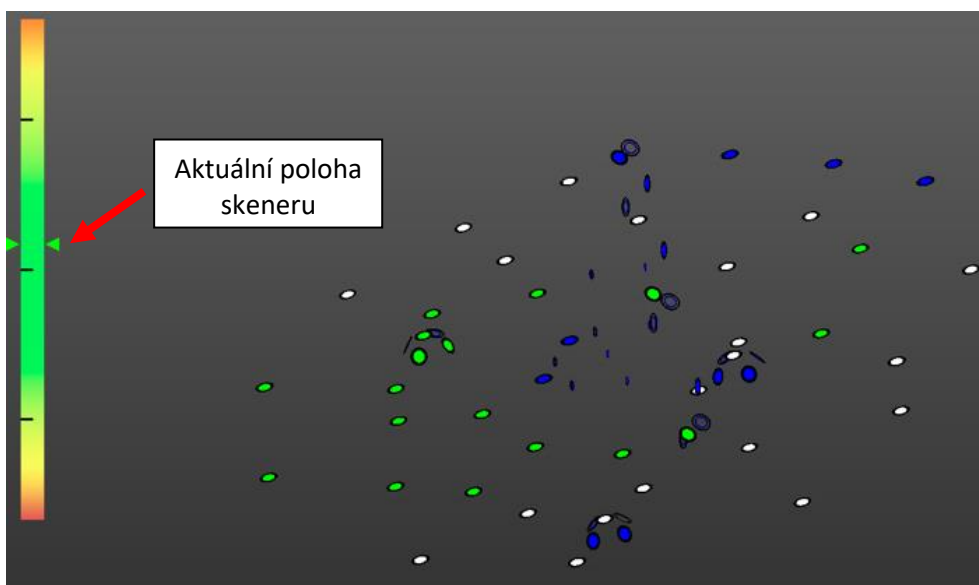
Obrázek 27 – Úspěšné dokončení kalibrace

## Zaměření referenčních bodů

Další přípravou před měřením je zaměření referenčních bodů. Tento krok je stěžejní pro následující měření. Jelikož se jedná o laserový 3D skener, je zapotřebí relativně velké množství referenčních bodů. Tyto body skeneru slouží pro jeho orientaci v prostoru. Pro funkčnost skeneru je potřeba, aby při měření byly v jeho zorném poli minimálně 3 body, ovšem vždy je lepší mít těchto bodů více. Pokud skener nevidí/nemá zaměřené 3 body, ztrácí svou orientaci v prostoru a nelze s ním v dané poloze měřit (v softwaru se to projeví zamrznutím obrazu až do chvíle, kdy skener opět zaměří 3 a více referenčních bodů). Pokud se nám toto stane již při vlastním měření, je nutné přidat do okolí nebo na samotný díl referenční body, opět projít procesem zaměření bodů a měření opakovat.

Samotné zaměřování probíhá přepnutím softwaru do režimu skenování referenčních bodů a následným nasnímáním celé potřebné oblasti pro měření v různých, operátorem zvolených, polohách. Rychlost zaměření referenčních bodů závisí na zkušenostech operátora a především na umístění těchto bodů. Při špatném umístění bodů se může stát, že se nám v žádné poloze nepodaří některý z bodů zaměřit. Takový bod je poté skeneru pro orientaci v prostoru nepoužitelný a při měření je nevyužitý.

Na následujícím obrázku je vidět snímek ze softwaru při zaměřování bodů. Na levé straně software znázorňuje rozsah ohniskové vzdálenosti a v jaké vzdálenosti se skener zrovna nachází. Pokud skener vyneseme mimo toto rozmezí, upozorní nás zvukovým signálem, případně přerušit měření.



Obrázek 28 – Snímek softwaru při zaměřování bodů

- Bílé body jsou již plně zaměřené a uloženy (podle těchto bodů se skener může plně orientovat v prostoru)
- Modré body nejsou plně zaměřené a je potřeba je nasnímat z další polohy
- Zelené body jsou aktivní (body, které skener momentálně vidí v zorném poli a používá je pro orientaci, případně pro zaměřování dalších bodů)

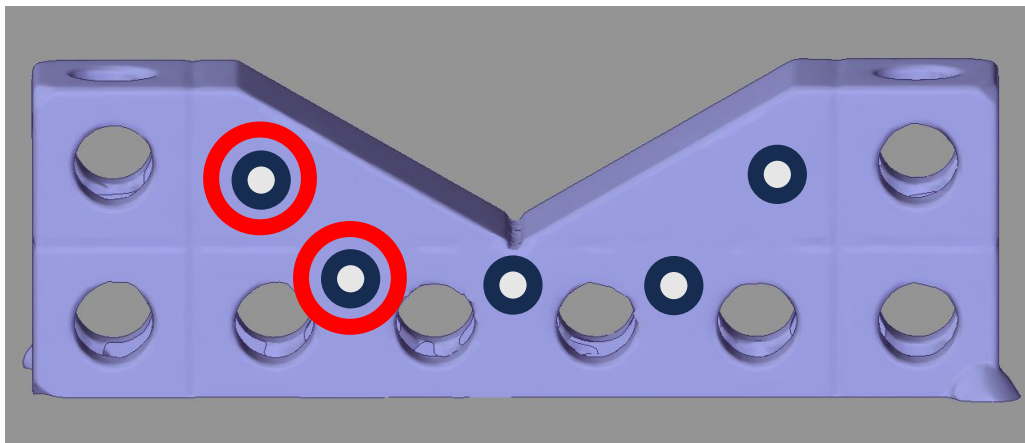
Zaměřování bodů ukončí operátor ve chvíli, kdy je spokojen s množstvím zaměřených bodů.

## Výhody a nevýhody umístění referenčních bodů

Referenční body lze umístit jak do okolí dílu, tak přímo na samotný díl.

**Umístění bodů na díl** je výhodné z prostého důvodu – je vždy v zorném poli skeneru a ve většině případů jsou skenované plochy pod vhodným úhlem pro zachycení bodů skenerem.

Má to ovšem i své nevýhody. První nevýhodou je ztráta dat pod nalepeným bodem. Jestliže je plocha překryta referenčním bodem, tak ji samozřejmě skener nemůže zaznamenat. Ve výsledku to znamená, že jsou tato data dopočítávána softwarem na základě informací o okolním povrchu. To může následně vést k různým chybám měření a obecně by se tyto dopočítávané plochy neměly využívat pro vyhodnocování rozměrů, jelikož se nejedná o reálně naměřená data. Proto bychom body měli na díl lepit, s ohledem na požadavky vyhodnocování, v nejlepším případě na nevyhodnocované plochy.

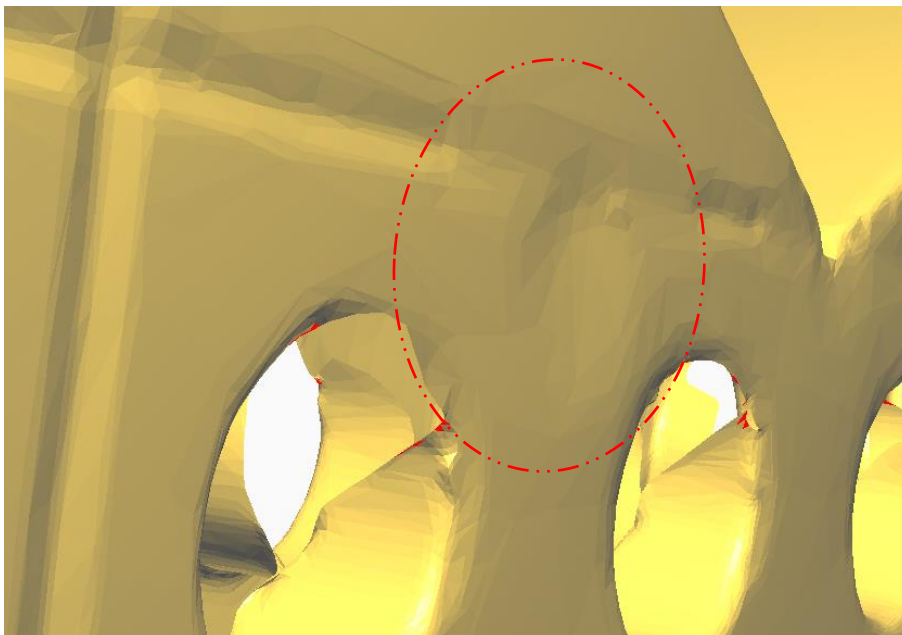


Obrázek 29 – Naskenovaný díl s umístěním referenčních bodů a naznačením oblasti pro dopočítávání ploch pod referenčními body (červeně)

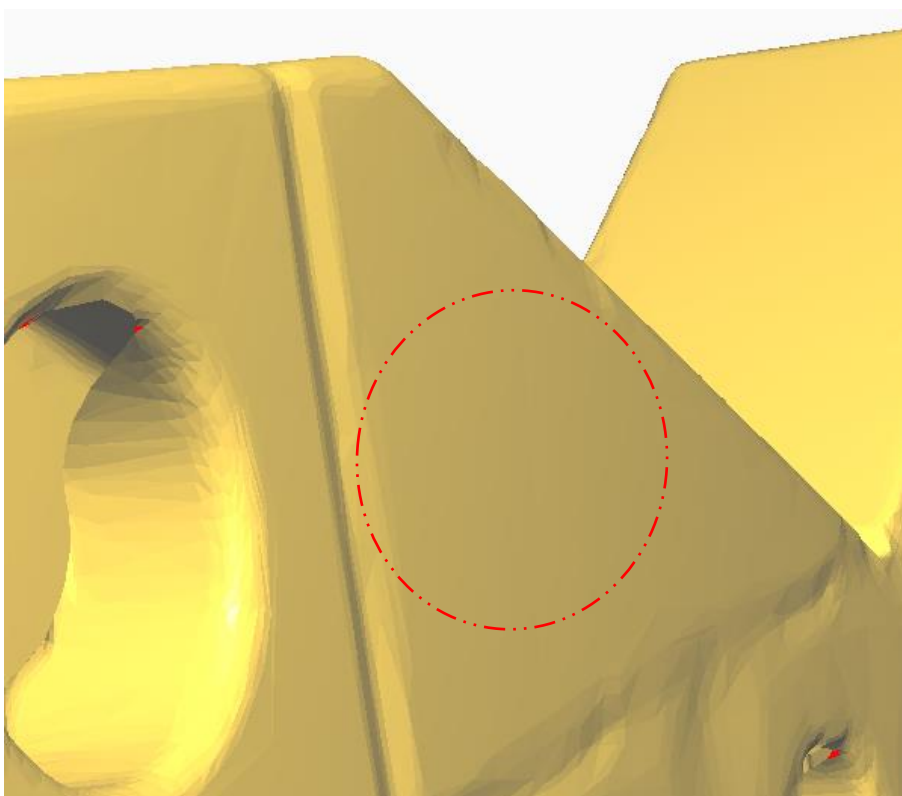
Konkrétně v našem případě měření nastal jeden problém. Při detailním pohledu na STL síť v okolí referenčních bodů je vidět, že algoritmus pro dopočítání těchto ploch bere do úvahy kruhovou oblast okolo bodu (viz obr. 29). Pokud tato oblast obsahuje sražení, část díry, drážku nebo jakoukoliv jinou plochu, která je svou geometrií velmi odlišná od plochy pod

referenčním bodem (jako je tomu v našem případě), tak nebude dopočítaná plocha odpovídat realitě.

Na následujícím obrázku 30 je vidět ukázka dopočítávané plochy pod ref. bodem umístěného u zkosení. Dopočítaná plocha je propadlá a ještě k tomu zasahuje její část do přilehlých děr.



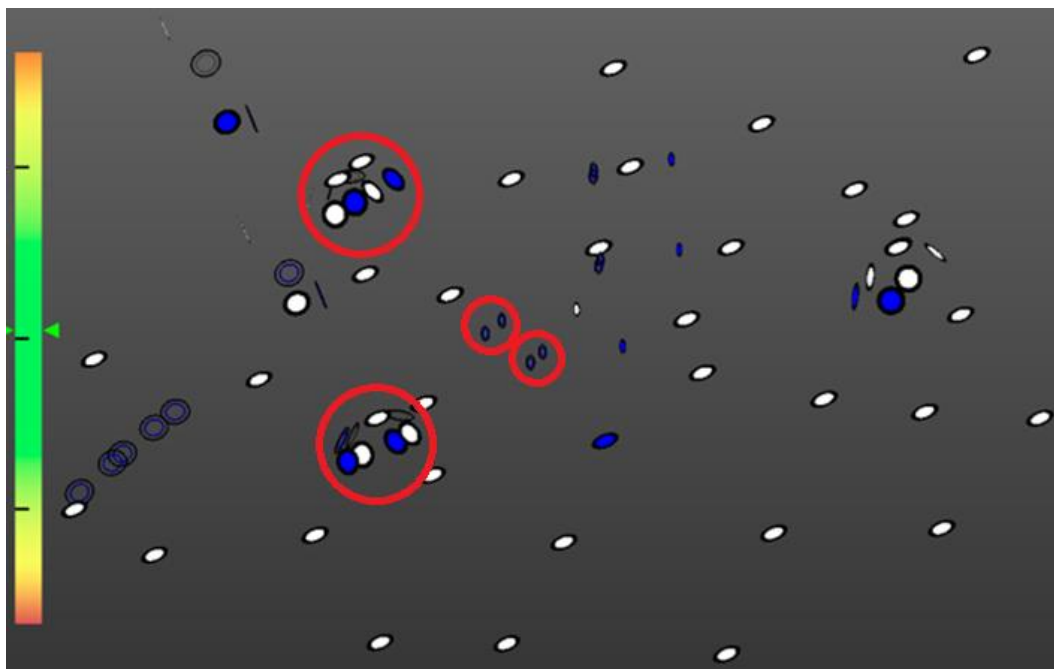
*Obrázek 30 – Příklad špatného dopočítání ploch pod referenčním bodem*



*Obrázek 31 – Příklad reálně(správně) dopočítané plochy pod referenčním bodem*

Další nevýhodou referenčních bodů na součásti je nutnost zajištění součásti proti pohybu. Pokud se součást při zaměřování bodů nebo vlastním měření posune, musíme celý proces opakovat znovu. Zároveň není možné použít již zaměřený systém a sériově měřit součásti za sebou. S každou součástí musíme provést zaměření referenčních bodů znovu a až poté součást změřit. V případě použití v průmyslu se jedná o velmi výrazné snížení produktivity, jelikož zaměření referenčních bodů u tohoto dílu trvá přibližně stejně dlouho jako samotné měření součásti a následný postprocesing dat.

Na obrázku níže je vidět důsledek nechtěného pohybu součásti při zaměřování bodů. Některé body se v tomto případě duplikovaly do softwaru skeneru, což je pro další měření nepřijatelné.



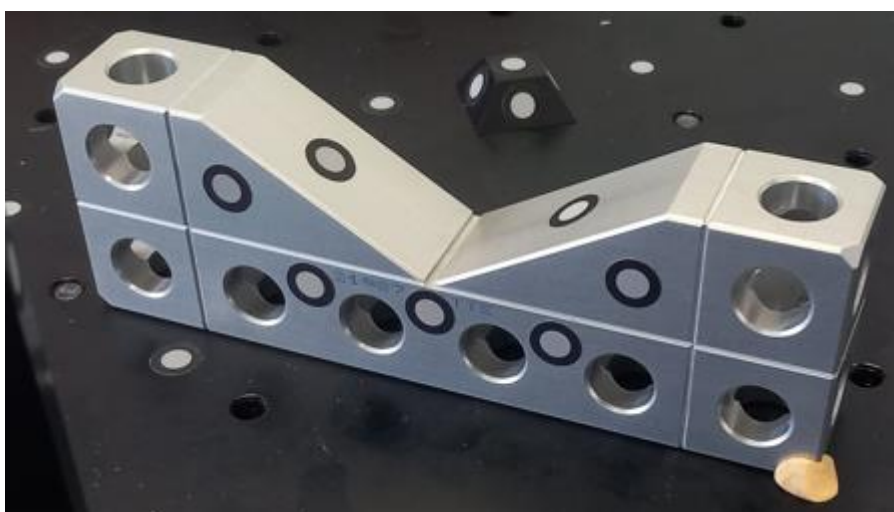
Obrázek 32 – Duplicitní referenční body označeny kroužkem



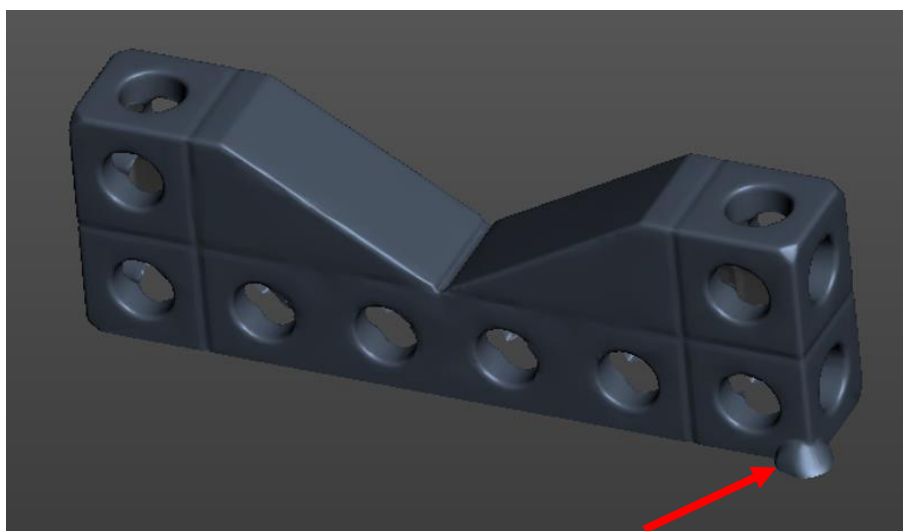
## Vlastní měření součásti

### Upnutí součásti

Z důvodu jednoduchosti upnutí a dostupnosti ke všem potřebným plochám pouze na jeden sken bylo zvoleno zajištění součásti pouze modelovací hmotou ve dvou rozích součásti (viz obr. 33). Tento způsob dostatečně zajišťoval součást vůči veškerému pohybu a zároveň vzniklá STL data označil (viz obr. 34) pro přesnou identifikaci orientace součásti – aby nedošlo k symetrickému otočení součásti a následnému měření charakteristik na zrcadlově obrácených plochách než tomu bylo u CMM měření. Důsledkem této záměny by byla nesprávně vyhodnocená data a celý pokus by byl znehodnocen.



Obrázek 33 – Zajištění součásti modelovací hmotou

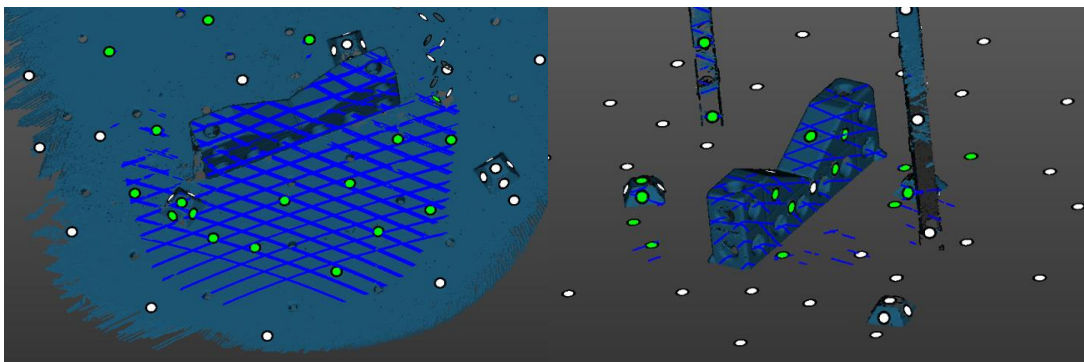


Obrázek 34 – Nezaměnitelný útvar na součásti pro přesnou identifikaci orientace součásti



## Nastavení roviny ořezu

Toto nastavení nám značně usnadní práci s následným postprocesingem dat. Nastavená rovina ořízne všechna data nacházející se pod touto rovinou – odstraní naskenovanou pracovní desku, která by jinak byla součástí skenu a její odstranění je následně zdlouhavé.



Obrázek 35 – Srovnání skenu bez ořezové roviny (vlevo) a s použitím ořezové roviny (vpravo)

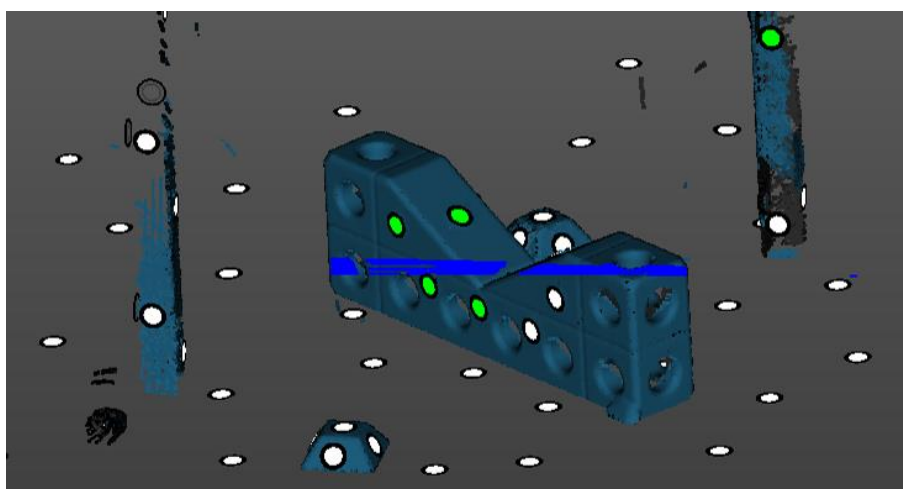
## Měření

Pro měření byly nastaveny následující parametry:

- Hustota naměřených bodů 0,5mm
- Doba expozice 1ms.

Jedná se o základní nastavení skeneru pro běžné měření součástí.

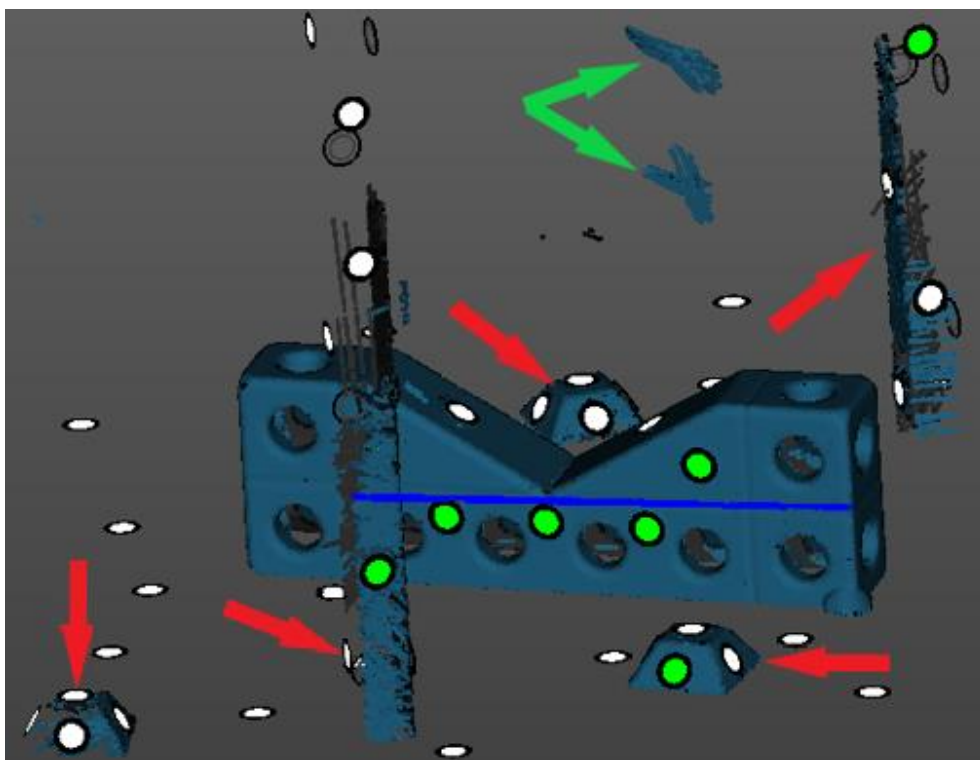
Následně byla nasbírána data pomocí 17 laserových křížů (hrubý sken) a následně byl použit mód jedné laserové linie pro lepší nasnímaní děr. Proces je poměrně jednoduchý – postupně skenujeme součást dokud nejsme spokojeni s rozsahem naskenování.



Obrázek 36 – Detailní skenování děr jednou laserovou linií

## Postprocessing dat

V tomto kroku vybereme a odstraníme data, která nechceme. Může jít o odlehlé body, pomocné detaily jako jsou pomocné tyče nebo terče s referenčními body. Následně z mračna bodů vytvoříme STL síť, se kterou následně pracujeme při vyhodnocování dat. STL síť byla optimalizována bez vyhlazování sítě – to znamená, že se STL síť optimalizuje tak, aby co nejméně ovlivnila naměřená data.



Obrázek 37 – Postprocessing dat – odstranění pomocných detailů (červeně) a odlehlých bodů (zeleně)

## Vyhodnocení měření

Pro zjištění reálné nepřesnosti skeneru je nutno vyhodnotit referenční data – měření na CMM. To nám poskytne informace o rozměrových a geometrických úchylnkách součásti, které od naměřených dat skenerem odečteme a získáme průměrnou nepřesnost skeneru. V rámci měření pro nás bude další důležitou hodnotou rozpětí naměřených hodnot, které vypovídá o opakovatelnosti měření daným přístrojem.

## Vyhodnocení referenčních dat

10 náměrů jedné součásti bylo vyhodnoceno v programu Calypso a převedeno do protokolů o měření a tabulek do excellu pro usnadnění práce s daty. V následujících tabulkách je kompletní soupis náměrů z CMM.

Tabulka 8 – Naměřené odchylky referenčních hodnot od teoretických rozměrů na CMM (1. část)

Naměřené odchylky					
[mm]	měření 3	měření 4	měření 5	měření 6	měření 7
Rovinnost_zakladnaB	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102
Rovinnost_1sikma120	0,0024	0,0021	0,0019	0,0018	0,0017
Kruhovitost_dira1	0,0029	0,0029	0,0028	0,0028	0,0028
Kruhovitost_dira2	0,0033	0,0032	0,0031	0,0031	0,0031
Kruhovitost_dira4	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Prumer1GX	0,0038	0,0039	0,0040	0,0040	0,0041
Prumer2GX	0,0050	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051
Sklon30	0,0031	0,0034	0,0033	0,0031	0,0030
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,0127	0,0150	0,0141	0,0139	0,0131
Vzdálenost_dira12GX_X	0,0006	0,0003	0,0001	0,0007	0,0008
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,0069	0,0069	0,0069	0,0069	0,0071
Poloha_dira1GX	0,0046	0,0043	0,0044	0,0049	0,0050
Poloha_dira2GX	0,0179	0,0176	0,0177	0,0180	0,0184
Uhel_120	0,0100	0,0099	0,0100	0,0100	0,0100
Kolmost_rovinaB_C	0,0082	0,0082	0,0079	0,0066	0,0067
Prumer1GG	0,0071	0,0071	0,0072	0,0072	0,0070
Prumer2GG	0,0083	0,0085	0,0085	0,0084	0,0085
Prumer4GG	0,0052	0,0053	0,0053	0,0052	0,0052
Vzdálenost_dira12GG_X	-0,0010	-0,0012	-0,0013	-0,0013	-0,0011
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,0067	0,0068	0,0067	0,0066	0,0067
Poloha_dira1GG	0,0030	0,0025	0,0029	0,0032	0,0037
Poloha_dira2GG	0,0166	0,0164	0,0165	0,0167	0,0173

Tabulka 9 – Naměřené odchylky referenčních hodnot od teoretických rozměrů na CMM (2. část)

Naměřené odchylky					
[mm]	měření 8	měření 9	měření 10	měření 11	měření 12
Rovinnost_zakladnaB	0,0102	0,0101	0,0103	0,0103	0,0102
Rovinnost_1sikma120	0,0016	0,0016	0,0014	0,0015	0,0014
Kruhovitost_dira1	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028
Kruhovitost_dira2	0,0031	0,0031	0,0031	0,0032	0,0031
Kruhovitost_dira4	0,0016	0,0017	0,0017	0,0016	0,0016
Prumer1GX	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041
Prumer2GX	0,0051	0,0051	0,0051	0,0052	0,0051
Sklon30	0,0030	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,0131	0,0123	0,0124	0,0129	0,0133
Vzdálenost_dira12GX_X	0,0010	0,0013	0,0013	0,0012	0,0006
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,0070	0,0072	0,0070	0,0071	0,0069
Poloha_dira1GX	0,0045	0,0043	0,0048	0,0046	0,0047
Poloha_dira2GX	0,0178	0,0178	0,0179	0,0181	0,0178
Uhel_120	0,0100	0,0099	0,0099	0,0099	0,0100
Kolmost_rovinaB_C	0,0081	0,0083	0,0082	0,0082	0,0081
Prumer1GG	0,0070	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071
Prumer2GG	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0084
Prumer4GG	0,0054	0,0054	0,0053	0,0052	0,0053
Vzdálenost_dira12GG_X	-0,0010	-0,0010	-0,0012	-0,0012	-0,0013
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,0066	0,0068	0,0066	0,0068	0,0067
Poloha_dira1GG	0,0032	0,0029	0,0032	0,0032	0,0032
Poloha_dira2GG	0,0165	0,0166	0,0167	0,0169	0,0169

Z těchto hodnot vypočítáme průměrnou hodnotu, která bude představovat naší referenční hodnotu pro další vyhodnocení. Zároveň byla vypočtena i směrodatná odchylka a rozptyl naměřených hodnot pro porovnání s naměřenými hodnotami ze 3D skeneru.

Rozptyl, vypočtený dle vzorce níže, měřených hodnot na CMM se pohybuje v řádu desetin mikrometru a měření je velmi stabilní.

$$\text{Rozpětí} = \text{MAXIMUM}[\text{měření 3}; \text{měření 12}] - \text{MINIMUM}[\text{měření 3}; \text{měření 12}]$$

Tabulka 10 – Vypočtené statistické hodnoty z naměřených hodnot na CMM

[mm]	Střední hodnota	Rozpětí
Rovinnost_zakladnaB	0,0102	0,0002
Rovinnost_1sikma120	0,0017	0,0010
Kruhovitost_dira1	0,0028	0,0001
Kruhovitost_dira2	0,0032	0,0002
Kruhovitost_dira4	0,0016	0,0001
Prumer1GX	0,0040	0,0003
Prumer2GX	0,0051	0,0001
Sklon30	0,0031	0,0005
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,0133	0,0027
Vzdálenost_dira12GX_X	0,0008	0,0011
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,0070	0,0003
Poloha_dira1GX	0,0046	0,0007
Poloha_dira2GX	0,0179	0,0008
Uhel_120	0,0099	0,0001
Kolmost_rovinaB_C	0,0078	0,0017
Prumer1GG	0,0071	0,0001
Prumer2GG	0,0084	0,0002
Prumer4GG	0,0053	0,0002
Vzdálenost_dira12GG_X	-0,0012	0,0003
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,0067	0,0002
Poloha_dira1GG	0,0031	0,0011
Poloha_dira2GG	0,0167	0,0009

## Vyhodnocení dat naměřených 3D skenerem

STL sítě byly importovány do programu Calypso ve virtuálním režimu STL a bylo provedeno vyhodnocení stejným programem, kterým se měřil díl na CMM. Následně byla data zpracována a vyhodnocena stejně jako data referenční z předchozí kapitoly.

Tabulka 11 – Naměřené odchylky 3D skenerem od teoretických rozměrů (1. část)

Naměřené odchylky					
[mm]	G1	G2	G3	G4	G5
Rovinnost_zakladnaB	0,032	0,039	0,041	0,040	0,033
Rovinnost_1sikma120	0,021	0,034	0,039	0,035	0,024
Kruhovitost_dira1	0,064	0,039	0,036	0,088	0,114
Kruhovitost_dira2	0,076	0,078	0,048	0,077	0,082
Kruhovitost_dira4	0,014	0,013	0,030	0,024	0,042
Prumer1GX	-0,092	-0,082	-0,063	-0,116	-0,170
Prumer2GX	-0,112	-0,120	-0,108	-0,139	-0,166
Sklon30	0,030	0,035	0,039	0,036	0,026
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,062	0,053	0,055	0,063	0,053
Vzdálenost_dira12GX_X	-0,007	-0,038	0,026	0,020	-0,037
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,019	0,038	0,031	0,010	0,027
Poloha_dira1GX	0,079	0,075	0,023	0,111	0,136
Poloha_dira2GX	0,039	0,092	0,102	0,155	0,147
Uhel_120	-0,010	0,003	0,012	0,014	0,015
Kolmost_rovinaB_C	0,033	0,025	0,025	0,026	0,038
Prumer1GG	-0,034	-0,043	-0,023	-0,037	-0,068
Prumer2GG	-0,034	-0,050	-0,054	-0,076	-0,042
Prumer4GG	-0,036	0,013	-0,024	-0,020	-0,012
Vzdálenost_dira12GG_X	-0,013	-0,010	0,020	0,026	0,004
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,023	0,014	0,018	0,005	0,025
Poloha_dira1GG	0,057	0,063	0,026	0,067	0,091
Poloha_dira2GG	0,034	0,063	0,074	0,113	0,050

Tabulka 12 - Naměřené odchylky 3D skenerem od teoretických rozměrů (2. část)

Naměřené odchylky					
[mm]	G6	G7	G8	G9	G10
Rovinnost_zakladnaB	0,026	0,036	0,031	0,051	0,033
Rovinnost_1sikma120	0,025	0,025	0,032	0,022	0,028
Kruhovitost_dira1	0,047	0,090	0,187(X)	0,240(X)	0,085
Kruhovitost_dira2	0,036	0,066	0,062	0,122(X)	0,123
Kruhovitost_dira4	0,021	0,024	0,041	0,027	0,026
Prumer1GX	-0,066	-0,163	-0,274(X)	-0,408(X)	-0,099
Prumer2GX	-0,065	-0,143	-0,157	-0,227(X)	-0,157
Sklon30	0,029	0,029	0,035	0,023	0,029
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,051	0,053	0,044	0,063	0,037
Vzdálenost_dira12GX_X	0,046	0,008	-0,079(X)	-0,164(X)	-0,009
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,013	0,001	0,015(X)	0,055(X)	0,020
Poloha_dira1GX	0,023	0,129	0,207(X)	0,402(X)	0,129
Poloha_dira2GX	0,075	0,143	0,073	0,181(X)	0,131
Uhel_120	0,022	0,008	0,018	0,009	0,008
Kolmost_rovinaB_C	0,025	0,018	0,028	0,039	0,030
Prumer1GG	-0,026	-0,076	-0,094(X)	-0,192(X)	-0,013
Prumer2GG	-0,034	-0,092	-0,099	-0,101(X)	-0,069
Prumer4GG	-0,024	-0,081	-0,046	-0,033	-0,060
Vzdálenost_dira12GG_X	0,041	0,043	-0,015(X)	-0,073(X)	-0,011
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,012	0,023	0,014(X)	0,045(X)	0,010
Poloha_dira1GG	0,014	0,063	0,071(X)	0,273(X)	0,108
Poloha_dira2GG	0,093	0,147	0,045	0,102(X)	0,083

Data s označením „(X)“ nebyla zahrnuta do konečného výpočtu průměrů, směrodatných odchylek a rozpětí, jelikož u těchto náměrů u daných charakteristik došlo k výrazným chybám na STL síti. Proto byla tato data považována za irelevantní pro vyhodnocení, jelikož by zkreslovala výsledky.

Rozpětí naměřených hodnot 3D skeneru se pohybuje v řádech setin milimetru, je tedy v tomto případě o 3 řády horší než CMM.

Tabulka 13 - Vypočítané statistické hodnoty z naměřených hodnot 3D skenerem

Naměřené odchytky	Střední hodnota	Rozpětí
[mm]		
Rovinnost_zakladnaB	0,036	0,025
Rovinnost_1sikma120	0,029	0,018
Kruhovitost_dira1	0,070	0,077
Kruhovitost_dira2	0,072	0,087
Kruhovitost_dira4	0,026	0,029
Prumer1GX	-0,106	0,107
Prumer2GX	-0,130	0,101
Sklon30	0,031	0,016
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,053	0,026
Vzdálenost_dira12GX_X	0,001	0,085
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,020	0,036
Poloha_dira1GX	0,088	0,113
Poloha_dira2GX	0,106	0,116
Uhel_120	0,010	0,032
Kolmost_rovinaB_C	0,029	0,021
Prumer1GG	-0,040	0,062
Prumer2GG	-0,061	0,065
Prumer4GG	-0,032	0,094
Vzdálenost_dira12GG_X	0,012	0,056
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,016	0,020
Poloha_dira1GG	0,061	0,094
Poloha_dira2GG	0,078	0,113



Porovnání naměřených odchylek na CMM a Simscan 42 pro lepší orientaci v datech.

Tabulka 14 – Porovnání naměřených odchylek CMM a Simscan 42

[mm]	CMM		Simscan 42	
	Průměrná odchylka	Rozpětí	Průměrná odchylka	Rozpětí
Rovinnost_zakladnaB	0,0102	0,0002	0,036	0,025
Rovinnost_1sikma120	0,0017	0,0010	0,029	0,018
Kruhovitost_dira1	0,0028	0,0001	0,070	0,077
Kruhovitost_dira2	0,0032	0,0002	0,072	0,087
Kruhovitost_dira4	0,0016	0,0001	0,026	0,029
Prumer1GX	0,0040	0,0003	-0,106	0,107
Prumer2GX	0,0051	0,0001	-0,130	0,101
Sklon30	0,0031	0,0005	0,031	0,016
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,0133	0,0027	0,053	0,026
Vzdálenost_dira12GX_X	0,0008	0,0011	0,001	0,085
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,0070	0,0003	0,020	0,036
Poloha_dira1GX	0,0046	0,0007	0,088	0,113
Poloha_dira2GX	0,0179	0,0008	0,106	0,116
Uhel_120	0,0099	0,0001	0,010	0,032
Kolmost_rovinaB_C	0,0078	0,0017	0,029	0,021
Prumer1GG	0,0071	0,0001	-0,040	0,062
Prumer2GG	0,0084	0,0002	-0,061	0,065
Prumer4GG	0,0053	0,0002	-0,032	0,094
Vzdálenost_dira12GG_X	-0,0012	0,0003	0,012	0,056
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,0067	0,0002	0,016	0,020
Poloha_dira1GG	0,0031	0,0011	0,061	0,094
Poloha_dira2GG	0,0167	0,0009	0,078	0,113

## Vyhodnocení reálných nepřesností 3D skeneru

Po získání všech dat se může porovnat měření mezi CMM a 3D skenerem, z čehož se získá výsledná přesnost skeneru a nahlédne se na vyhodnocení některých vybraných charakteristik a výsledky se zhodnotí podrobněji.

Reálná přesnost se získá odečtením průměru referenčních hodnot od hodnot naměřených 3D skenerem. Tento výpočet funguje za předpokladu, že referenční hodnoty jsou skutečné rozměry součásti. Toto tvrzení samozřejmě neplatí, jelikož CMM pracuje také s určitou chybou měření, každopádně tato chyba je dostatečně malá na to, aby se mohla vůči naměřeným hodnotám 3D skenerem zanedbat.

Tabulka 15 – Reálná chyba(přesnost) 3D skeneru u jednotlivých měření (část 1)

Chyba 3D skeneru [mm]	G1	G2	G3	G4	G5
Rovinnost_zakladnaB	0,021	0,029	0,031	0,030	0,023
Rovinnost_1sikma120	0,019	0,032	0,037	0,033	0,023
Kruhovitost_dira1	0,062	0,036	0,034	0,085	0,111
Kruhovitost_dira2	0,072	0,074	0,045	0,074	0,079
Kruhovitost_dira4	0,013	0,011	0,028	0,022	0,040
Prumer1GX	0,096	0,086	0,067	0,120	0,174
Prumer2GX	0,117	0,125	0,113	0,144	0,171
Sklon30	0,026	0,032	0,036	0,033	0,023
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,048	0,039	0,041	0,050	0,039
Vzdálenost_dira12GX_X	0,008	0,039	0,025	0,019	0,038
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,012	0,031	0,024	0,003	0,020
Poloha_dira1GX	0,075	0,070	0,018	0,106	0,132
Poloha_dira2GX	0,021	0,074	0,084	0,137	0,130
Uhel_120	0,020	0,007	0,002	0,004	0,005
Kolmost_rovinaB_C	0,025	0,017	0,017	0,018	0,030
Prumer1GG	0,042	0,050	0,030	0,045	0,076
Prumer2GG	0,043	0,059	0,062	0,084	0,050
Prumer4GG	0,041	0,008	0,029	0,025	0,017
Vzdálenost_dira12GG_X	0,012	0,009	0,021	0,027	0,005
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,017	0,007	0,012	0,002	0,018
Poloha_dira1GG	0,054	0,060	0,023	0,064	0,088
Poloha_dira2GG	0,017	0,046	0,057	0,097	0,034

Tabulka 16 – Reálná chyba(přesnost) 3D skeneru u jednotlivých měření (část 2)

Chyba 3D skeneru					
[mm]	G6	G7	G8	G9	G10
Rovinnost_zakladnaB	0,016	0,026	0,021	0,040	0,023
Rovinnost_1sikma120	0,024	0,023	0,030	0,020	0,026
Kruhovitost_dira1	0,044	0,087	0,185	0,238	0,082
Kruhovitost_dira2	0,033	0,063	0,059	0,119	0,120
Kruhovitost_dira4	0,020	0,022	0,039	0,025	0,024
Prumer1GX	0,070	0,167	0,278	0,412	0,103
Prumer2GX	0,070	0,148	0,162	0,233	0,162
Sklon30	0,026	0,026	0,032	0,020	0,026
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,038	0,040	0,030	0,049	0,024
Vzdálenost_dira12GX_X	0,046	0,007	0,080	0,165	0,010
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,006	0,006	0,008	0,048	0,013
Poloha_dira1GX	0,019	0,124	0,203	0,397	0,124
Poloha_dira2GX	0,057	0,125	0,055	0,164	0,113
Uhel_120	0,012	0,002	0,008	0,001	0,002
Kolmost_rovinaB_C	0,017	0,011	0,020	0,032	0,022
Prumer1GG	0,033	0,083	0,101	0,199	0,020
Prumer2GG	0,042	0,100	0,107	0,109	0,078
Prumer4GG	0,029	0,087	0,051	0,038	0,066
Vzdálenost_dira12GG_X	0,042	0,044	0,014	0,072	0,010
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,006	0,016	0,008	0,038	0,003
Poloha_dira1GG	0,011	0,060	0,068	0,270	0,105
Poloha_dira2GG	0,076	0,130	0,028	0,086	0,066

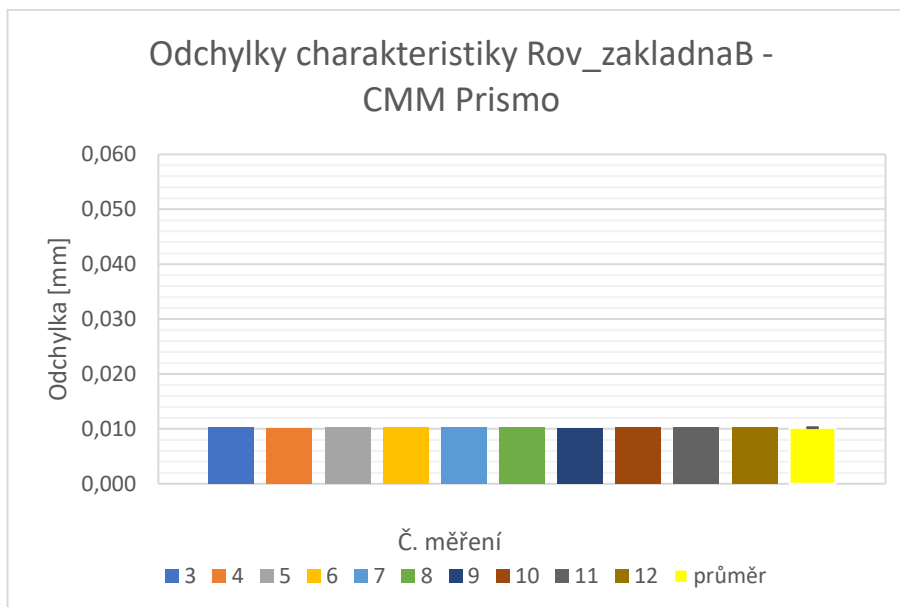
Tabulka 17 – Statistické hodnoty reálných přesností 3D skeneru

Chyba 3D skeneru				
[mm]	Střední hodnota	Rozpětí	Min. chyba	Max. chyba
Rovinnost_zakladnaB	0,026	0,025	0,016	0,040
Rovinnost_1sikma120	0,027	0,018	0,019	0,037
Kruhovitost_dira1	0,068	0,077	0,034	0,111
Kruhovitost_dira2	0,069	0,087	0,033	0,120
Kruhovitost_dira4	0,024	0,029	0,011	0,040
Prumer1GX	0,111	0,107	0,067	0,174
Prumer2GX	0,135	0,101	0,070	0,171
Sklon30	0,028	0,016	0,020	0,036
Rovnoběžnost_rovinaB_Y25	0,040	0,026	0,024	0,050
Vzdálenost_dira12GX_X	0,024	0,038	0,007	0,046
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,014	0,027	0,003	0,031
Poloha_dira1GX	0,084	0,113	0,018	0,132
Poloha_dira2GX	0,089	0,116	0,021	0,137
Uhel_120	0,006	0,018	0,001	0,020
Kolmost_rovinaB_C	0,021	0,021	0,011	0,032
Prumer1GG	0,047	0,062	0,020	0,083
Prumer2GG	0,070	0,065	0,042	0,185
Prumer4GG	0,039	0,079	0,008	0,087
Vzdálenost_dira12GG_X	0,021	0,039	0,005	0,044
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,010	0,016	0,002	0,018
Poloha_dira1GG	0,058	0,094	0,116	0,193
Poloha_dira2GG	0,061	0,113	0,017	0,197

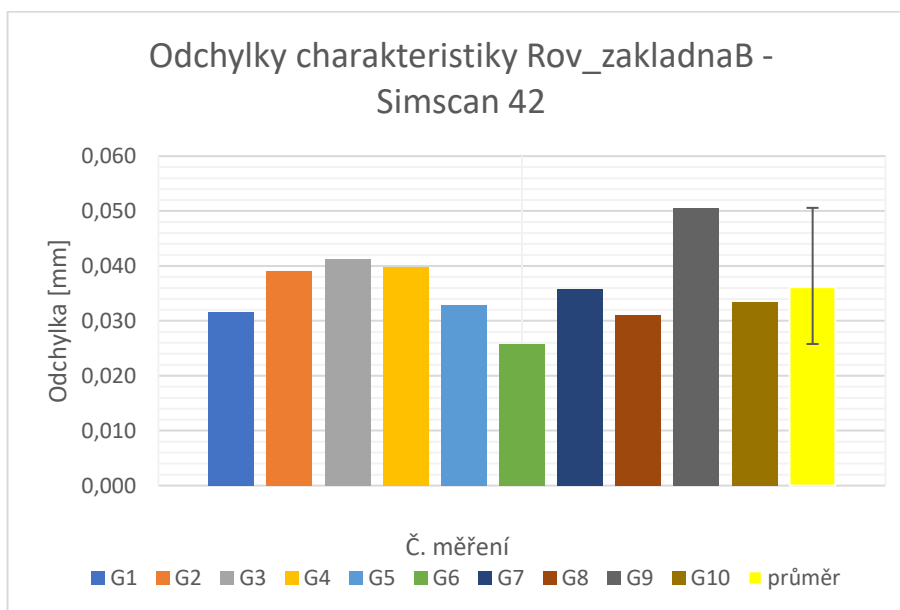
Z předchozí tabulky vybereme 2 charakteristiky – jednu charakteristiku z měření rovinných ploch a jednu z měření děr. Tento výběr má důvod založený na datech z měření. Dle předchozí tabulky se velmi výrazně odlišují nepřesnosti skeneru na jednoduchých plochách a v dírách.

## Vyhodnocení charakteristiky „Rovinnost\_zakladnaB“

Na obrázku 38 a 39 je možno graficky porovnat odchylky a rozpětí jednotlivých měření pomocí CMM a 3D skeneru.

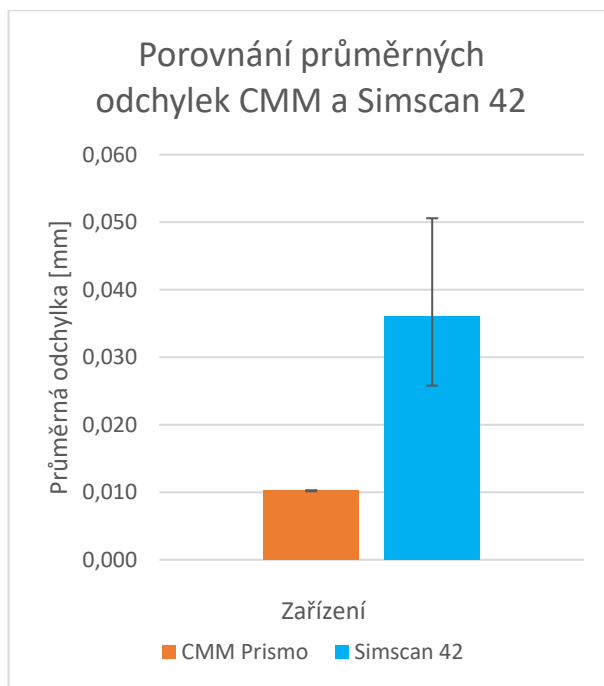


Obrázek 38 – Grafické znázornění odchylek u jednotlivých měření na CMM Prismo + průměr a rozpětí hodnot (černá úsečka)



Obrázek 39 – Grafické znázornění odchylek u jednotlivých měření pomocí Simscan 42 + průměr a rozpětí hodnot (černá úsečka)

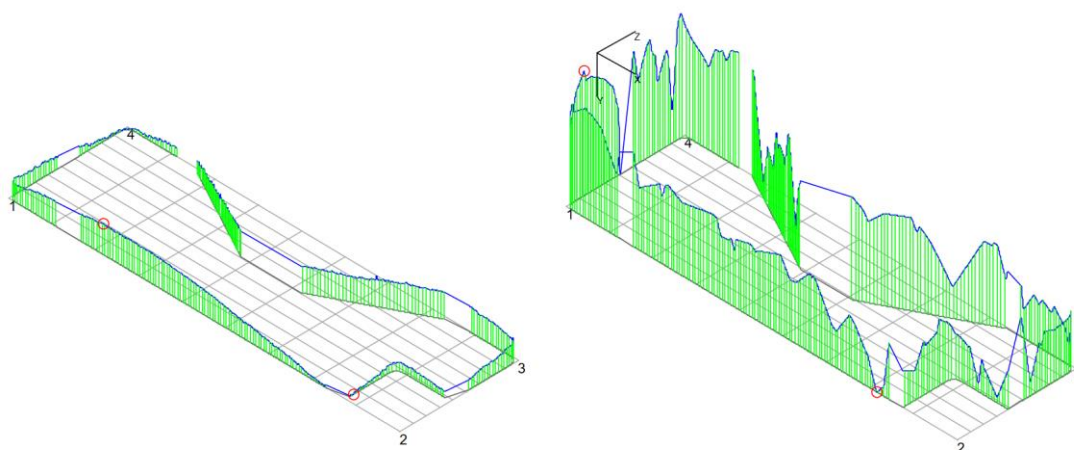
V tomto případě vychází průměrná přesnost 3D skeneru 0,026 mm. Tato hodnota je větší pouze o 0,006 mm od udávané přesnosti skeneru výrobcem (viz tabulka 6 – Simscan 42), což je pozitivní výsledek. Větším problémem je ovšem maximální rozpětí měření. Ten je roven 0,025 mm, což odpovídá 96% rozsahu průměrné přesnosti skeneru a vypovídá o relativně špatné opakovatelnosti měření.



Obrázek 40 – Porovnání průměrných naměřených odchylek CMM Prismo a Simscan 42 u charakteristiky Rovinnost\_zakladnaB (černá úsečka = rozpětí)

V průmyslu samozřejmě nelze každý díl měřit vícekrát a ze všech měření dělat průměr, abychom dosáhli požadované přesnosti měřidla. Kvůli velkému rozptylu hodnot by se nám tedy stalo to, že v nejlepším možném případě by byla přesnost skeneru 0,005 mm, ale v nejhorším případě 0,040 mm. V praxi by se tedy s největší pravděpodobností muselo počítat s nejhorším případem kvůli zamezení vzniku zmetků z důvodu nepřesnosti měřidla. S touto skutečností firmy pracují pomocí koeficientu způsobilosti měřidla, který ve vyhodnocení bere v potaz právě rozpětí (nebo směrodatnou odchylku, což je určité vyjádření rozpětí) měřícího zařízení.

Na obrázku 41 je vidět grafické porovnání naměřených odchylek ve stejném měřítku (1000x).



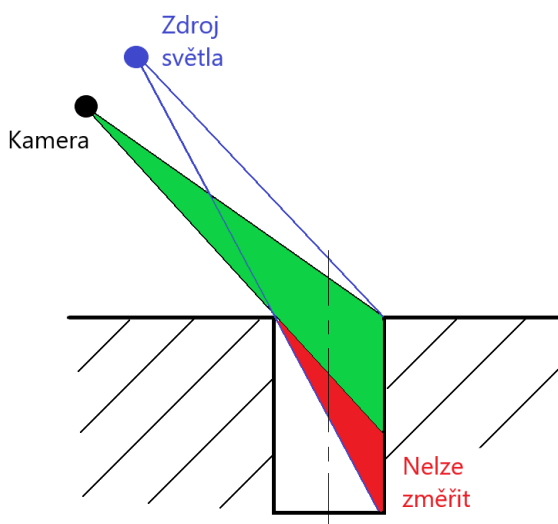
Obrázek 41 – Grafické porovnání rovinnosti naměřené na CMM Prismo (vlevo) a SimsScan 42 (vpravo)

Z tohoto grafického porovnání lze vyčíst následující – měřená plocha je dle měření na CMM velmi přesně vyrobena bez jakýchkoliv náhlých změn tvaru plochy a veškeré odchylky mají plynulý přechod.

Taková informace v datech naměřených 3D skenerem zaniká, jelikož naměřené odchylky jsou velmi proměnlivé. To souvisí s náchylností skeneru na vznik odlehlých bodů, které vznikají kvůli odleskům na součásti a dalšími optickými jevy.

## Vyhodnocení charakteristiky průměr<sub>2</sub> a kruhovitost\_díra<sub>2</sub>

Při vyhodnocování děr je nutno brát v potaz více faktorů. Prvním problémem je obecně u optických přístrojů přístup do otvorů (viz obrázek 42). To znamená, že data z děr se nemusí povést pořídit, případně bude naskenovaná určitá část díry od povrchu. Schopnost zařízení skenovat díry předurčuje geometrie mezi zdrojem světla a kamerou. Dalším faktorem je správné nastavení polohy skeneru vůči díře operátorem.



Obrázek 42 – Příklad měřitelnosti díry – zelená část lze měřit, červenou část nevidí kamera (nelze měřit)

Dalším problémem je přítomnost ostrých hran (nebo sražení), v okolí kterých jsou naskenovaná data nekvalitní a vyhodnocovat rozměry musíme až v určité vzdálenosti od nich. Další problematikou u menších děr je přítomnost protilehlé stěny, od které se může odrazet světlo a způsobovat častější vznik odlehlých bodů než je tomu při skenování vnějších ploch součástí. Pokud tedy všechny tyto faktory sečteme, zbyde nám určitá použitelná plocha pro vyhodnocení, která zpravidla nebývá velká. V našem případě byla data použitelná do hloubky přibližně 4 mm, přičemž první 1,5 mm je nepoužitelných z důvodu přítomnosti sražení.

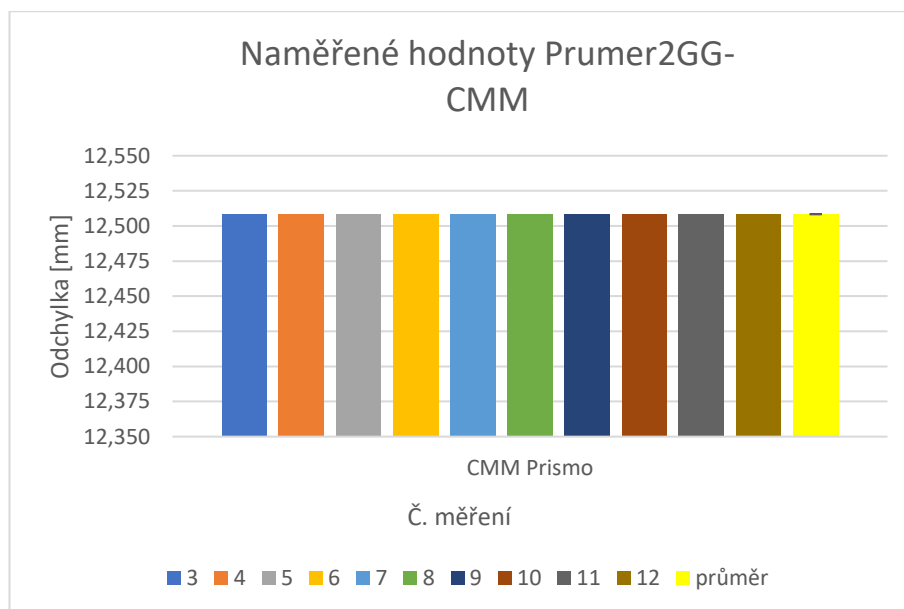
Pro vyhodnocení byla použita kružnice v hloubce 3 mm od povrchu. Pro zajímavost byl průměr vyhodnocen pomocí Gaussovi metody i vepsané kružnice.



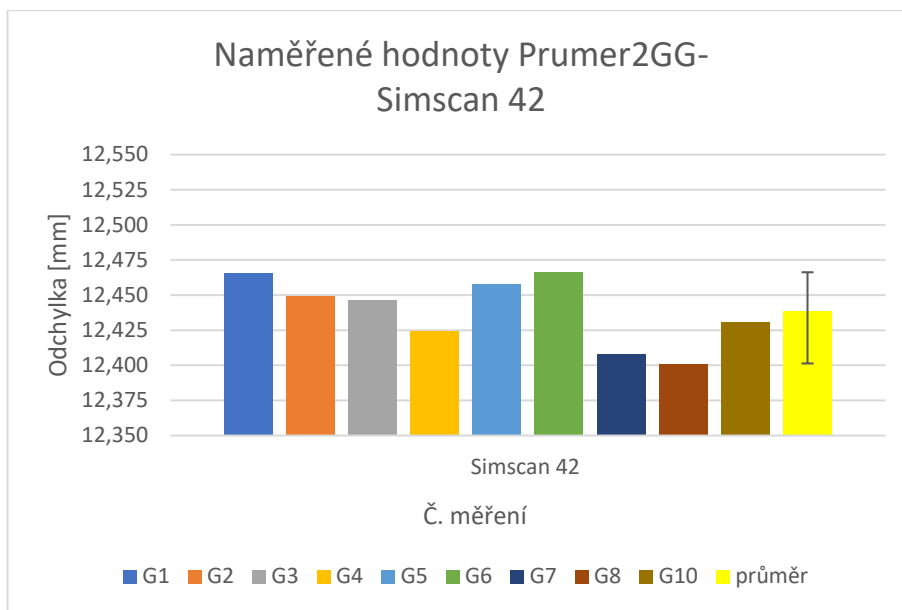
Pro kompatibilitu součástí v průmyslu by se správně měl průměr díry vyhodnocovat pomocí kružnice vepsané a součásti typu hřídelů/šroubů pomocí kružnice opsané. Pokud bychom použili v obou případech výpočet kružnice pomocí Gaussovi metody, tak by výsledné velikosti průměrů byly v případě díry větší a v případě hřídelů menší. To může být problém při následném párování součástí, pokud do sebe mají například zapadat nebo když mají mít vůči sobě určité přesahy např pro nalisování a podobně.

V případě 3D skenerů nelze vyhodnocení pomocí kružnice vepsané ani opsané použít z jednoho důvodu zmíněného výše – náchylnost na odlehlé body. Podíváme-li se na data pořízená našim skenerem, je důvod na datech vidět na první pohled.

Na následujících obrázcích je možno porovnat naměřené hodnoty charakteristiky prumer2 pomocí CMM a 3D skeneru.



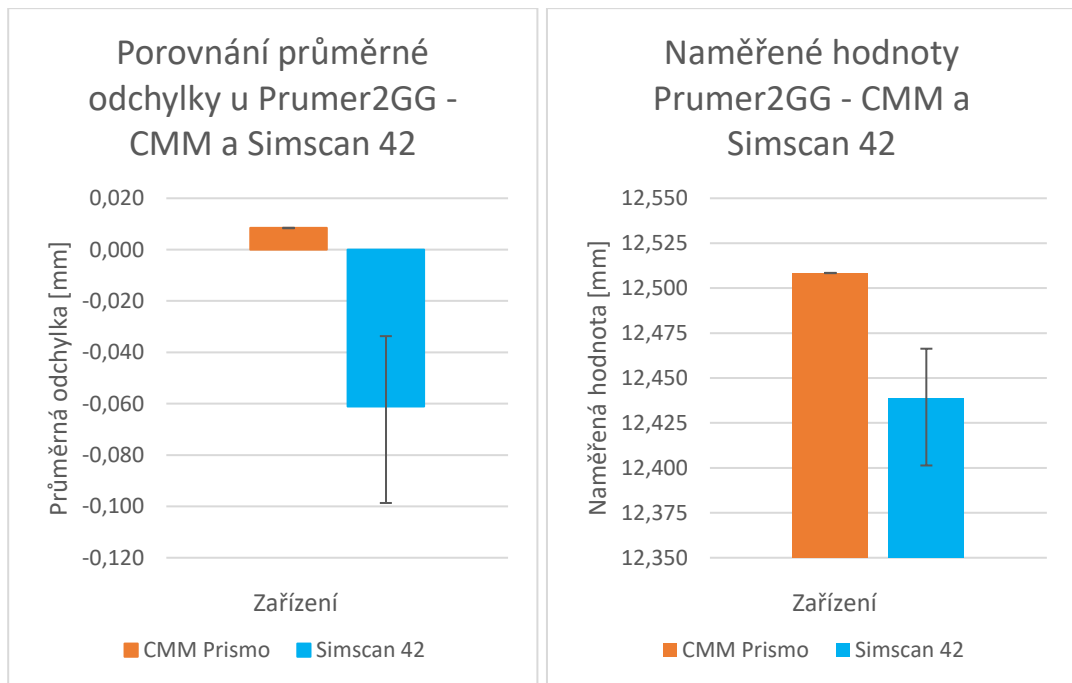
Obrázek 44 – Grafické znázornění odchylek u jednotlivých měření pomocí CMM Prismo + průměr a rozpětí hodnot (černá úsečka)



Obrázek 45 – Grafické znázornění odchylek u jednotlivých měření pomocí Simsan 42 + průměr a rozpětí hodnot (černá úsečka)

Při použití vyhodnocení pomocí kružnice vepsané byla průměrná přesnost skeneru 0,135 mm, což by bylo výrazně více než přesnost udávaná výrobcem. Rozpětí hodnot bylo 0,101 mm. Toto hodnocení ale nemůžeme brát v potaz právě kvůli náchylnosti vyhodnocení na odlehlé body.

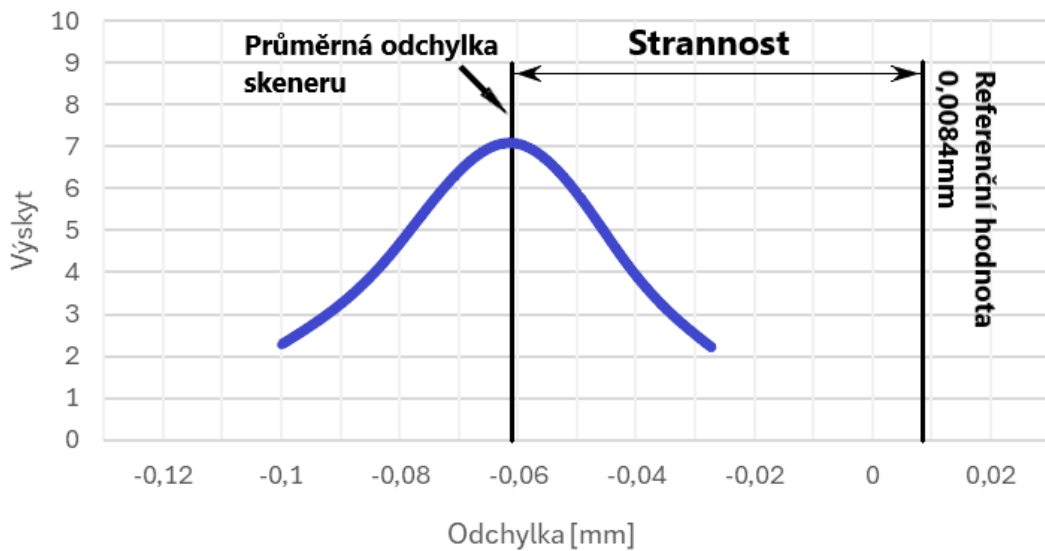
Pro Gaussovu metodu výpočtu průměru byla průměrná přesnost 0,070 mm s rozptylem hodnot 0,065 mm, viz obrázek 46. Tato hodnota je již pro tento přístroj reálná. Minimální chyba skeneru ze všech náměrů byla 0,042 mm a maximální chyba 0,107 mm. Tyto hodnoty jsou přibližně 2,5 krát horší oproti přesnosti u charakteristiky Rovinnost\_zakladnaB. Obecně se tedy dá říci, že chování skeneru na složitějších tvarových plochách je horší než u jednoduchých rovinných ploch.



Obrázek 46 – Porovnání průměrných naměřených odchylek CMM a 3D skeneru u prumer2GG (černá úsečka = rozpětí) (vlevo) a naměřených absolutních hodnot (vpravo)

Z předchozích grafů lze vyčíst jednu zajímavou vlastnost skeneru. Díry měří vždy menší, než opravdu jsou. Z této skutečnosti lze vyjádřit strannost měřidla. Strannost (anglický výraz BIAS) měřidla je tendence měřidla měřit rozměry odchýlené na jednu stranu od referenční hodnoty. [25] Je to vlastnost měřidla, se kterou se v tomto případě musí počítat a vědět, co nám tato vlastnost dělá s výsledky měření. Výsledky ukazují, že skener měří průměry vždy do minusových hodnot od referenční hodnoty. To pravděpodobně souvisí s tím, že odlehle body vznikají nad měřeným povrchem.

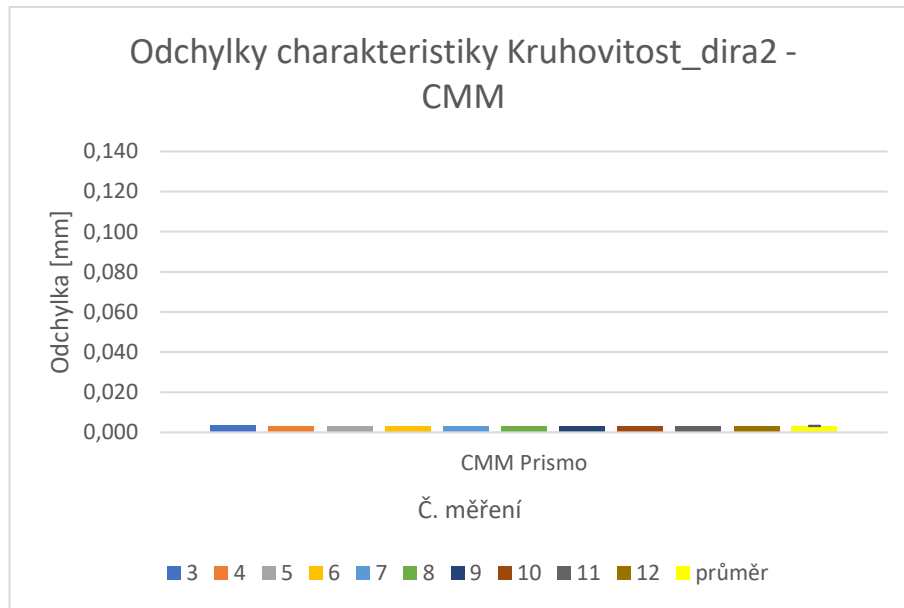
### Strannost 3D skeneru u charakteristiky prumer2



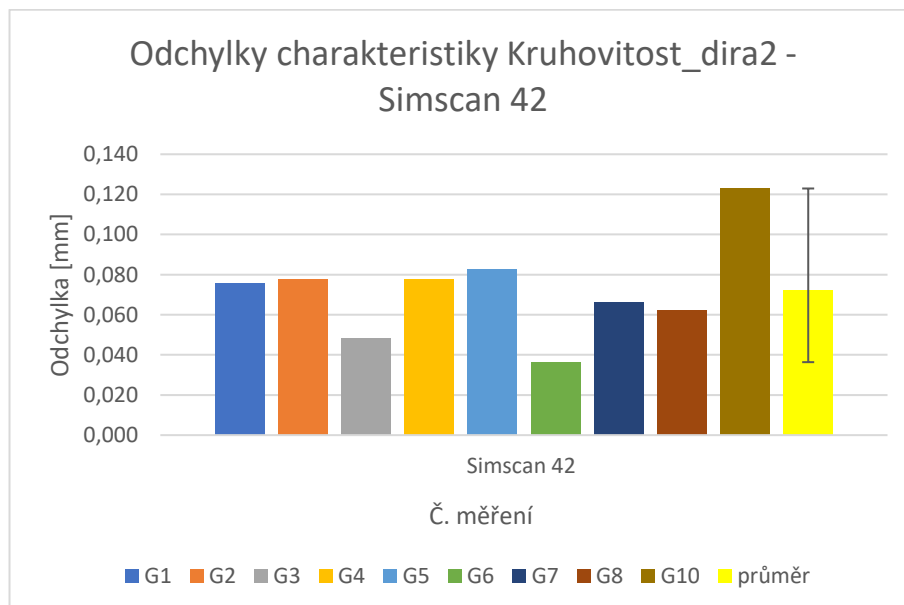
Obrázek 47 – Strannost skeneru v případě měření průměru 2. díry (průměr 12,5mm H7)

Strannost skeneru je průměrně 0,070 mm.

Na následujících obrázcích jsou vidět naměřené odchylky jednotlivých měření u další charakteristiky Kruhovitost\_dira2.

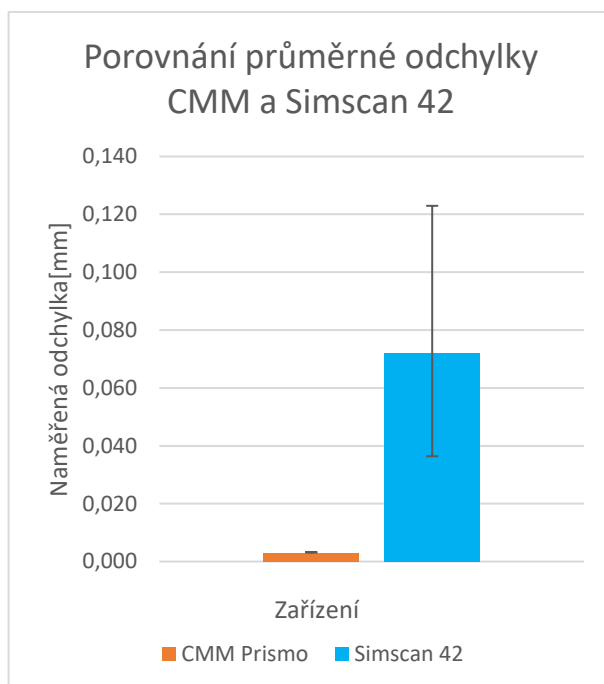


Obrázek 48 - Grafické znázornění odchylek u jednotlivých měření pomocí Simscan 42 + průměr a rozpětí hodnot (černá úsečka)



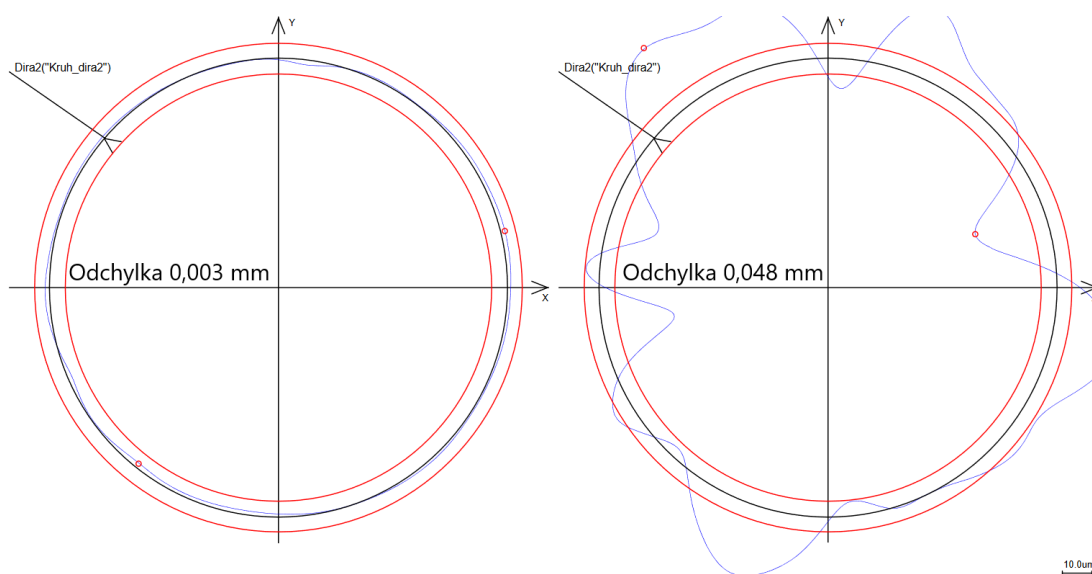
Obrázek 49 - Grafické znázornění odchylek u jednotlivých měření pomocí Simscan 42 + průměr a rozpětí hodnot (černá úsečka)

V případě kruhovitosti je výsledek velmi podobný jako u měření průměru. Přesnost skeneru u této charakteristiky vychází na 0,069 mm s rozpětím hodnot 0,087 mm.



Obrázek 50 – Porovnání průměrných naměřených odchylek CMM a 3D skeneru u charakteristiky kruh\_dira2 (černá úsečka = rozpětí)

Podle výsledků měření na CMM je díra vyrobena velmi precizně bez prakticky jakýchkoliv výrobních vad a úchylek (kruhovitost 0,003 mm). Přesto ani v tomto případě skener není schopen tento tvar kopírovat. Důvodem jsou stejně jako v předchozím případě přítomné odlehlé body. Na obrázku možno porovnat výsledky kruhovitosti díry ve stejném měřítku (1000x)



Obrázek 51 – Grafické porovnání kruhovitosti naměřené na CMM Prismo (vlevo) a Simscan 42 (vpravo)

## MSA analýza

U ručních měřidel je předpoklad na náchylnost měření při změně operátora. Proto jsme se skenerem provedli měření 3x3 – 3 operátoři, 3 měření jedné součásti. Výsledky analýzy by nám měly dát alespoň částečnou představu o vlivu lidského faktoru. Pro přesnější výsledky je ovšem lepší provést analýzu na více součástech z výrobní dávky. My jsme bohužel byli omezeni množstvím dostupných součástí pouze na 1 kus. [26]

Pro analýzu R&R (Gauge Repeatability and Reproducibility) byla použita metoda průměru a rozpětí.

- a) Z naměřených dat musíme vypočítat rozpětí naměřených hodnot jedním operátorem.

$$R_i = \text{MAXIMUM}(\text{měření1}; \text{měření3}) - \text{MINIMUM}(\text{měření1}; \text{měření3})$$

- b) V dalším kroku spočítáme průměr rozpětí

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_i; k \dots \text{počet měřených kusů} - \text{není nutno počítat (máme jen 1 kus)}$$

- c) Dále spočítáme průměr všech rozpětí

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{R}_i; n \dots \text{počet operátorů (n = 3)}$$

- d) Dále potřebujeme spočítat průměr jednotlivých měření

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i; m \dots \text{počet opakování měření (m = 3)}$$

- e) Z těchto průměrů vypočítáme jejich rozpětí

$$\bar{x}_{DIF} = \text{MAX} - \text{MIN} (\bar{x}_1; \bar{x}_3)$$

f) Následně již můžeme přistoupit k výpočtu EV – opakovatelnosti měření

$$EV = \bar{R} \cdot k_1; k_1 = \frac{1}{d_2} \dots d_2 \text{ odečteno z tabulky viz obrázek 52}$$

k	2	3
1	1.414	1.912
2	1.279	1.805
3	1.231	1.769
4	1.206	1.750
5	1.191	1.739
6	1.181	1.731
7	1.173	1.726
8	1.168	1.721
9	1.164	1.718

Obrázek 52 – Hodnoty  $d_2$  [26]

g) Výpočet AV - reprodukovatelnosti (lidského faktoru)

$$AV = \sqrt{(\bar{x}_{DIF} \cdot k_2)^2 - \frac{EV^2}{m \cdot k}}; k_2 = \frac{1}{d_2} \dots d_2 \text{ odečteno z tabulky viz obrázek 53}$$

Poznámka: pokud vyjde odmocnina ze záporného čísla pak je hodnota AV = 0.

k	2	3
1	1.414	1.912
2	1.279	1.805
3	1.231	1.769

Obrázek 53 – Hodnoty  $d_2$  [26]

h) Konečný výpočet R&R

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2}$$

i) R&R ve vztahu vůči tolerančnímu poli

$$\%R\&R = \frac{R\&R}{\text{šířka tol. pole}} \cdot 100 \rightarrow \text{šířka tol. pole} \geq \frac{R\&R}{\%R\&R} \cdot 100$$

Jelikož analýza nebyla dělána na reálné součásti s pevně stanovenými tolerancemi, tak je lepší vyhodnotit minimální šířku tolerančního pole, při které by měřidlo vyhovovalo požadavkům. Kritérium pro použitelnost měřidla je následující:

$\%R\&R \leq 10\%$  ... měřidlo je vyhovující

$10\% \leq \%R\&R \leq 30\%$  ... měřidlo je použitelné, ale mělo by se snažit systém zlepšit [26]



## Výsledky výpočtu R&R

Tabulka 18 – Výsledky výpočtu R&R

	Nepřesnost přístroje	Lidský faktor	
[mm]	EV (opakovatelnost)	AV (reprodukovatelnost)	R&R
Rov_zakladnaB	0,008	0,000	0,008
Rov_1sikma120	0,008	0,000	0,008
Kruh_dira1	0,049	0,020	0,053
Kruh_dira2	0,014	0,016	0,021
Kruh_dira4	0,013	0,009	0,015
Prumer1GX	0,058	0,025	0,063
Prumer2GX	0,015	0,028	0,032
Sklon30	0,006	0,002	0,007
Rovno_rovinaB_Y25	0,012	0,000	0,012
Vzdálenost_dira12GX_X	0,035	0,013	0,037
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,012	0,012	0,017
Poloha_dira1GX	0,068	0,017	0,070
Poloha_dira2GX	0,022	0,012	0,025
Uhel_120	0,010	0,003	0,011
Kolmost_rovinaB_C	0,003	0,001	0,004
Prumer1GG	0,015	0,005	0,015
Prumer2GG	0,013	0,003	0,013
Prumer4GG	0,030	0,000	0,030
Vzdálenost_dira12GG_X	0,015	0,000	0,015
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,005	0,007	0,009
Poloha_dira1GG	0,035	0,000	0,035
Poloha_dira2GG	0,019	0,000	0,019

Z dat v tabulce lze konstatovat, že lidský faktor se v případě měření rovinných ploch vůbec neprojevuje, nebo případně pouze velmi malou až zanedbatelnou mírou. Ani u měření děr, vyhodnocovaných Gaussovo metodou, dle statistických výpočtů na zkušenostech operátora prakticky nezáleží. Dále je na vypočítaných datech vidět, že co se týká měřených dat skenerem porovnávaných pouze vůči sobě, tak se skener neprojevuje jako špatná volba ani pro relativně přesná měření viz tabulka 19. Toto tvrzení ovšem vyvrací předchozí výzkum ohledně reálných přesností skeneru.

Minimální velikost tolerančního pole (aby skener splnil požadavky R&R vůči tolerančnímu poli) pro jednotlivé charakteristiky v závislosti na výsledku hodnoty R&R je vypočtena v následující tabulce.

Tabulka 19 – Výpočet minimální velikosti tolerančního pole

Min. velikost tol. pole [mm]	Pro $\%R\&R \leq 10\%$	Pro $10\% \leq \%R\&R \leq 30\%$
Rov_zakladnaB	0,084	0,028
Rov_1sikma120	0,079	0,026
Kruh_dira1	0,526	0,175
Kruh_dira2	0,211	0,070
Kruh_dira4	0,151	0,050
Prumer1GX	0,629	0,210
Prumer2GX	0,315	0,105
Sklon30	0,066	0,022
Rovno_rovinaB_Y25	0,119	0,040
Vzdálenost_dira12GX_X	0,372	0,124
Vzdálenost_dira12GX_Y	0,170	0,057
Poloha_dira1GX	0,704	0,235
Poloha_dira2GX	0,252	0,084
Uhel_120	0,106	0,035
Kolmost_rovinaB_C	0,037	0,012
Prumer1GG	0,153	0,051
Prumer2GG	0,135	0,045
Prumer4GG	0,304	0,101
Vzdálenost_dira12GG_X	0,150	0,050
Vzdálenost_dira12GG_Y	0,089	0,030
Poloha_dira1GG	0,347	0,116
Poloha_dira2GG	0,190	0,063

Tyto výsledky jsou zavádějící, jelikož z předchozího výzkumu známe reálné přesnosti 3D skeneru a měřit například Prumer2GG v toleranci 0,135 mm je s přesností měření skeneru 0,070 mm a rozpětím 0,065 mm naprosto nereálné. Tato závislost platí prakticky u každé měřené charakteristiky. Lze tedy konstatovat, že analýza R&R neodhalí skutečnost, že skener měří nepřesně.

## Měření „freeform“ etalonu

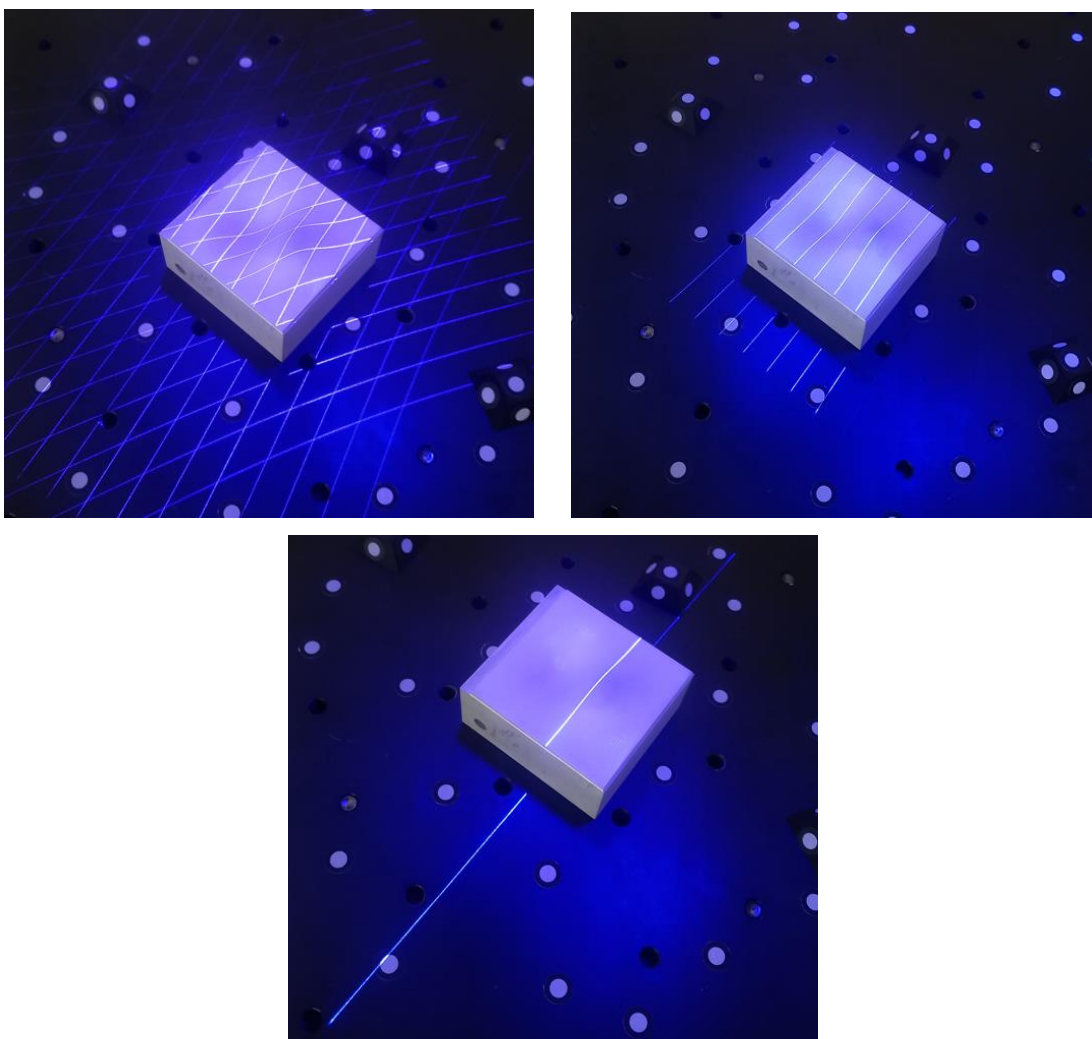
Tato část byla věnována měření etalonu pomocí jednotlivých módů skeneru. Výsledkem by měla být informace o vlastnostech a přesnostech jednotlivých módů skeneru a vhodnosti jejich použití.

Etalon byl vyráběn z hliníku pomocí frézování a broušení. Jako dokončovací operace bylo provedeno eloxování a leštění. Následně se pomocí softwaru Zeiss Reverse Engineering vytvořil z naměřených bodů pomocí CMM model artefaktu. Po několika iteracích bylo na leštěném artefaktu dosaženo chyby tvaru plochy  $1,23\ \mu\text{m}$ . Pro možnost použití artefaktu pro optické metody měření musel být povrch zmatněn – otryskán. Touto operací se chyba tvaru plochy zhoršila na  $2,06\ \mu\text{m}$ . Jedná se tedy o velmi přesný artefakt s reverzně vytvořeným modelem vhodným právě ke zjišťování vlastností optických měřících přístrojů. [27]



Obrázek 54 – Etalon pro optické měřící přístroje

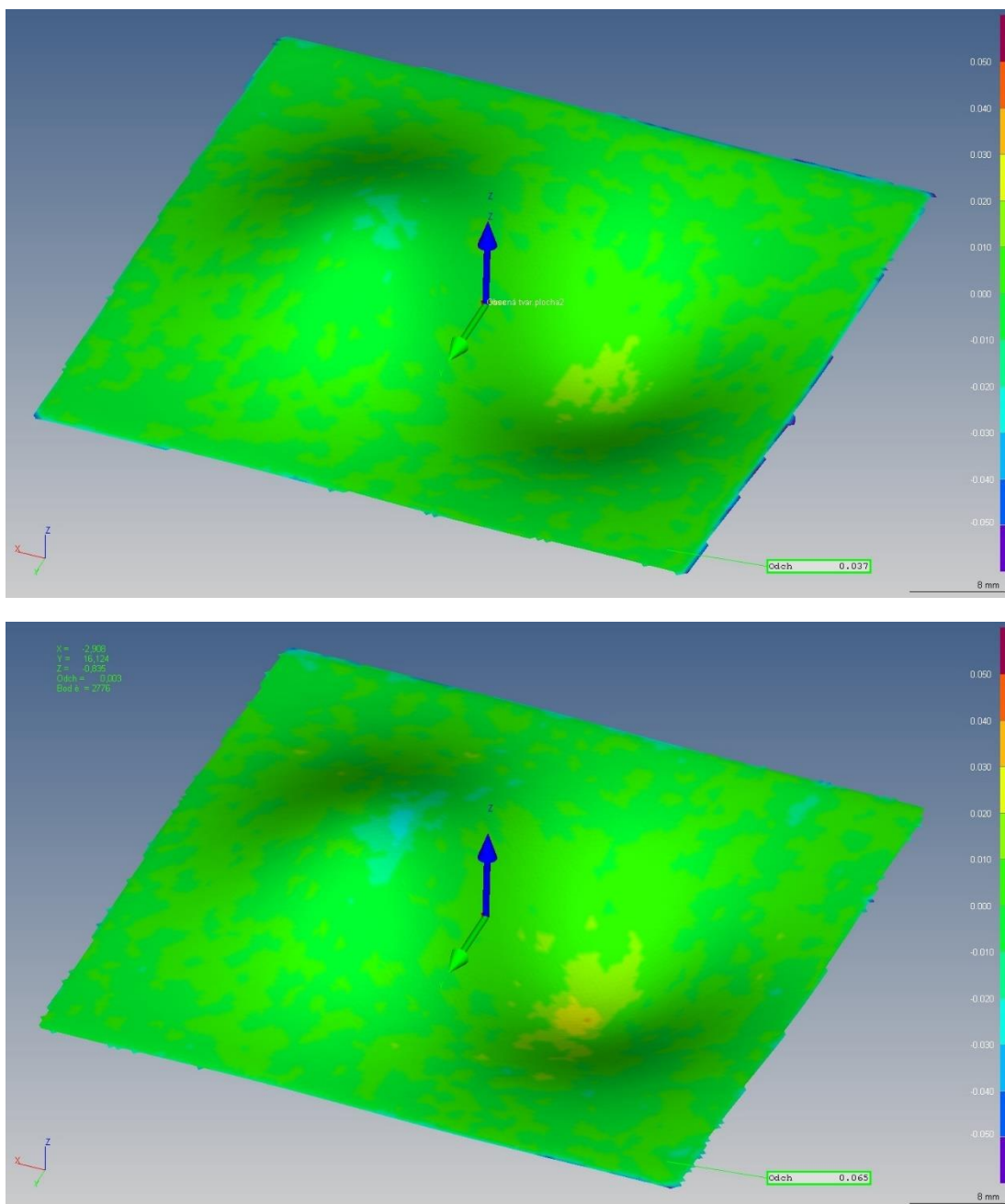
Samotné měření a příprava na něj probíhala následovně. Artefakt byl temperován přes noc při teplotě 20°C a měřen v klimatizované místnosti taktéž při teplotě přesně 20°C. V každém módu skeneru (jednotlivé módy viz obrázek 55) se artefakt 10x změřil.



*Obrázek 55 – Jednotlivé módy skeneru*

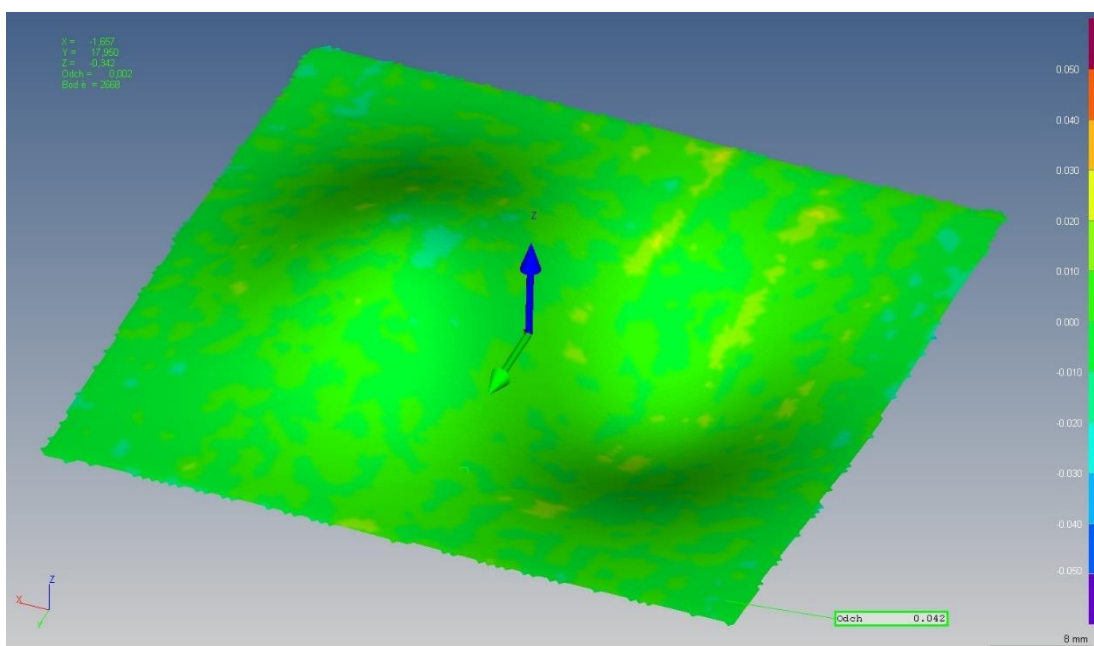
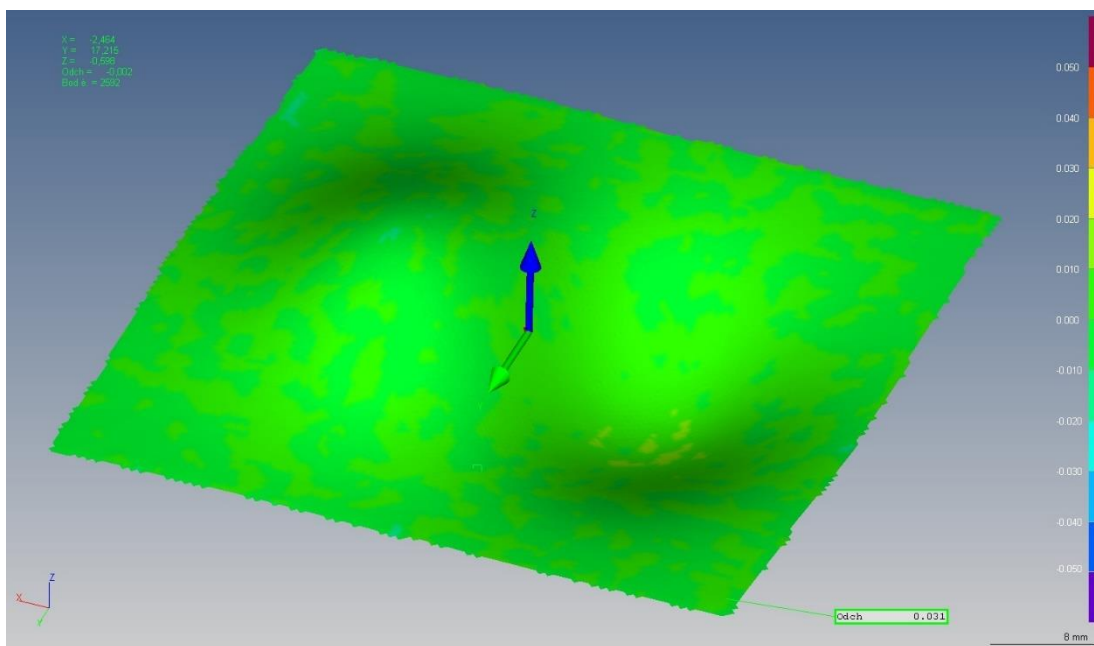
Vyhodnocení naměřených dat probíhalo opět v programu Calypso, ve kterém se pro každý náměr (STL síť) vygenerovala barevná mapa a maximální chyba tvaru plochy pro best-fit přizpůsobení na model. Chyba tvaru se vyhodnocovala pomocí měření rastru bodů vzdálených 1 mm, které byly odsazeny od krajů o 5 mm, aby se opět eliminoval vliv sražené hrany na kraji etalonu, který je i po oříznutí plochy v některých místech stále ještě viditelný, viz obrázek 56 nahoře (modré okraje).

## Barevné mapy pro mód 17 laserových křížů (mód pro produktivní měření)



Obrázek 56 – Barevné mapy pro mód 17 laserových křížů (Minimum a maximum)

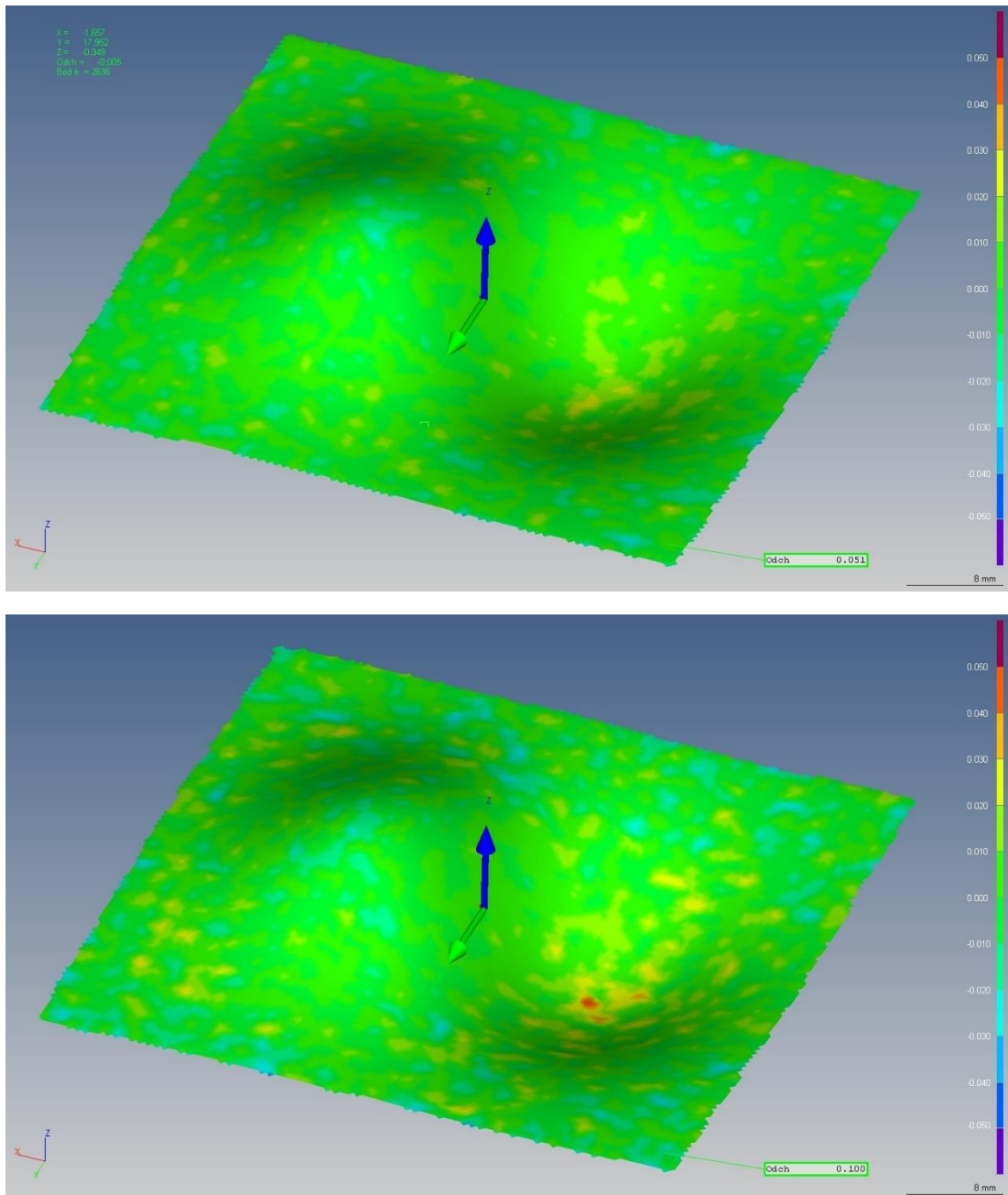
## Barevné mapy pro mód 7 laserových linií (mód pro přesné měření)



Obrázek 57 – Barevné mapy pro mód 7 laserových linií (Minimum a maximum)



## Barevné mapy pro mód 1 laserové linie (mód pro měření děr)



Obrázek 58 – Barevné mapy pro mód 1 laserové linie (Minimum a maximum)

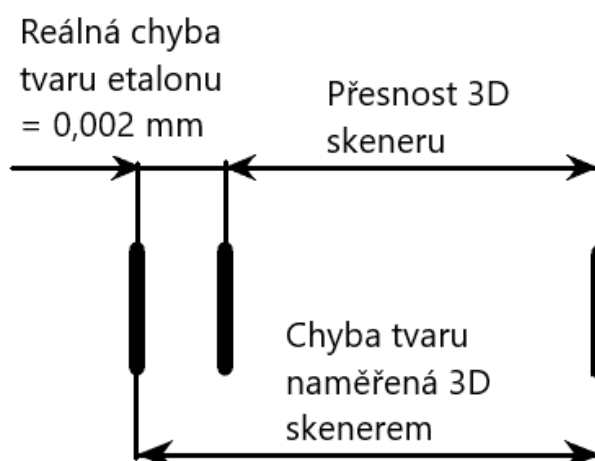
## Výsledky měření etalonu

Výsledky odchylek od modelu na obecné tvarové ploše:

Tabulka 20 – Chyba tvaru plochy jednotlivých náměrů různými módy skeneru

Chyba tvaru plochy [mm]	17křížů	7 linií	1 linie
Měření 1	0,037	0,034	0,065
Měření 2	0,048	0,038	0,051
Měření 3	0,047	0,036	0,077
Měření 4	0,057	0,032	0,073
Měření 5	0,050	0,036	0,100
Měření 6	0,053	0,041	0,052
Měření 7	0,065	0,032	0,058
Měření 8	0,053	0,035	0,066
Měření 9	0,058	0,031	0,067
Měření 10	0,061	0,042	0,083
Průměr	0,053	0,036	0,069
Směr. odchylka	0,008	0,004	0,014
Rozpětí	0,028	0,011	0,049
Přesnost	0,051	0,034	0,067

Přesnost měření 3D skeneru byla vypočítána jako rozdíl reálné chyby tvaru etalonu a naměřené hodnoty skenerem. Tímto odfiltrujeme chybu tvaru etalonu a získáme přesnost skeneru.



Obrázek 59 – Způsob výpočtu přesnosti 3D skeneru



Na výsledcích je vidět, jaké veličiny zasahují do přesnosti skeneru.

7 laserových linií si vede nejlépe s průměrnou přesností při měření chyby tvaru 0,034 mm. To je objektivně dobrý výsledek, jelikož i rozpětí naměřených hodnot je velmi malé – pouze 0,011 mm. Velkou nevýhodou v tomto módu ale je, že ohnisková vzdálenost je velmi malá a tím pádem je malá i plocha, kterou má skener v zorném poli. Produktivita měření v tomto režimu velmi klesá a práce se skenerem je náročnější.

Oproti tomu mód se 17 laserovými kříži dosáhl průměrné přesnosti u chyby tvaru 0,051 mm s rozpětím naměřených hodnot 0,028 mm. Tento výsledek je s přihlédnutím na velmi rychlé a produktivní měření přijatelný.

Nejhorším módem, co se přesnosti týče, je režim 1 laserové linie – ten dosáhl průměrné přesnosti u chyby tvaru 0,067 mm s rozpětím 0,049 mm. Relativně špatná přesnost souvisí pravděpodobně s ohniskovou vzdáleností skeneru, která je v tomto režimu větší z důvodu lepšího skenování děr (větší ohnisková vzdálenost znamená menší úhel mezi kamerou a zdrojem laseru a tím pádem je lepší přístup do skenovaných děr). Poté je tedy otázkou, zdali je pro měření děr akceptovatelné snížení přesnosti měření.

## 6. Závěr

Z výsledků naměřených na součásti Alufix lze říci, že chyba měření (přesnost) 3D skeneru u charakteristik vázaných na jednoduché rovinné plochy (rovinnost, kolmost...) je jen velmi mírně vyšší (průměrně o maximálně 0,010 mm) než výrobcem udávaná přesnost 0,020 mm dle normy VDI/VDE 2634. Větší problémy nastávají u měření tvarových ploch nebo průměru děr. Průměrná přesnost měření děr se při použití vyhodnocení Gaussovo metodou zhoršuje na hodnotu průměrně 0,050 mm. Vyhodnocení pomocí kružnice vepsané nelze vůbec použít, což je velká nevýhoda a skener je v praxi na měření funkčních děr nepoužitelný. Velmi dobrým poznatkem je zjištění, že skener měří průměry děr vždy menší. U měření chyby tvaru díry (kruhovitosti) je přesnost skeneru kvůli náchylnosti vyhodnocení na odlehlé body ještě o něco horší – průměrně 0,068 mm.

Při částečném vyhodnocení R&R analýzy pro opakované měření jedné součásti 3 operátory nebyl zjištěn vliv lidského faktoru na měření. Velmi malý vliv operátora byl zjištěn pouze u měření děr v rámci jednotek mikrometrů). Většina nepřesnosti měření je tedy ovlivněna pouze vlastnostmi skeneru. Dále lze konstatovat, že pokud měření skenerem neporovnáváme s jinými (přesnějšími) měřidly, ale pouze mezi jednotlivými operátory/opakovaným měřením pomocí 3D skeneru, tak jsou výsledky analýzy R&R překvapivě dobré – opakovatelnost a reprodukovatelnost měření je relativně v pořádku. Při vysvětlení například na charakteristice Prumer2GG zjistíme, že opakovatelnost měření je 0,013 mm a reprodukovatelnost 0,003 mm. Měřidlo by podle požadavků 10% > R&R bylo způsobilé měřit díry s tolerancí 0,135 mm. Díry s touto tolerancí ale určitě nelze měřit při konstatování, že reálná zjištěná přesnost (systematická chyba měření) skeneru u této charakteristiky je průměrně 0,070 mm s rozpětím 0,065 mm. Tato systematická chyba měřidla pokrývá přibližně 75% tolerančního pole, což je pro sériové měření absolutně nepřijatelné.

Z posledního experimentu zaměřeného na přesnost a vlastnosti jednotlivých módů skeneru při měření obecné tvarové plochy etalonu lze vyvodit následující závěry. V případě potřeby co nejpřesnějšího měření je vhodné využít 7 laserových linií. V tomto režimu lze i na tvarově složité ploše menších rozměrů (60x60 mm) dosáhnout dobré přesnosti u vyhodnocení chyby tvaru s velmi dobrou opakovatelností. Konkrétně se jedná o hodnotu 0,034 mm s rozpětím 0,011 mm. Při potřebě vysoké produktivity lze využít mód 17 laserových křížů, který dosahuje přesnosti u chyby tvaru 0,051 mm s rozpětím 0,028 mm. Pro měření hlubokých děr lze využít mód jedné laserové linie, avšak se značnou ztrátou přesnosti. Zde je přesnost u chyby tvaru

plochy 0,067 mm s rozpětím 0,049 mm. Tento výsledek vysvětluje špatnou přesnost u měření děr v prvním experimentu na součásti Alufix, jelikož tento mód byl při měření použit. Pokud tedy není nutná potřeba ho použít (například kvůli hloubce díry nebo přístupnosti), je vhodnější i pro měření děr využít jeden ze dvou výše zmiňovaných módů.

Ze zjištěných výsledků lze stanovit aplikační potenciál měřidla. U vyhodnocování odchylek jednoduchých ploch, se lze spolehnout na přesnost okolo 0,030 mm. U složitějších tvarů je přesnost v závislosti na použitém módu skeneru až 2 krát horší s velmi velkým rozpětím naměřených hodnot (objektivně okolo 0,060 mm). Samotná přesnost měřidla by nebyla takovým problémem jako je tomu u velkého rozpětí. Měřidlo, které měří pouze systematicky špatně s malým rozpětím se dá zkalibrovat, případně se dají upravit naměřené hodnoty odečtením (případně přičtením) strannosti měřidla. V tomto případě, kdy máme velmi velké rozpětí naměřených hodnot, nelze tuto korekci provést. Spolehlivě se tedy tímto skenerem dají měřit pouze rozměry s tolerancemi v řádech spíše vyšších desetín milimetrů (v závislosti na druhu měřené charakteristiky okolo 0,2 – 0,4 mm). Vlastnosti a chování skeneru dále také ovlivňují optické vlastnosti měřeného povrchu a okolních podmínek. To znamená, že pokud bude povrch lesklejší nebo například velmi tmavý, tak se může stát, že přesnost bude ještě o něco horší (pouze teoretická úvaha, ověření by mohlo být předmětem dalšího výzkumu). Nutno také podotknout, že veškerá měření probíhala za laboratorních podmínek (teplota 20°C, vytemperovaný díl), čehož v praxi v určitých provozech buďto nelze dosáhnout (povaha pracoviště, čas - ekonomické důvody), nebo nejsou tyto parametry striktně dodržovány. Z tohoto důvodu 3D skener stále nestačí na stabilní měření přesně obráběných dílů, které obsahují funkční plochy nebo další prvky, zajišťující kompatibilitu s jinou součástí. 3D skenery jsou tedy stále vhodné pouze pro méně přesné provozy, kterými jsou svařovny a běžné slévárny (z praxe mohu říci, že ani u sléváren na velmi přesné odlitky v některých případech 3D skener nesplňuje požadavky).

## 7. Zdroje

- [1] POINTSCAN. The Evolution of 3D Laser Scanning. *3D LASER SCANNING* [online]. [cit. 2024-07-25]. Dostupné z: <https://www.pointscan.co.uk/the-evolution-of-3d-laser-scanning/>
- [2] Accuracy of EinScan Pro Series Hand Held 3D Scanners. *EinScan* [online]. [cit. 2024-07-25]. Dostupné z: <https://www.einscan.com/news/accuracy-of-einscan-pro-series-multi-functional-3d-scanner/>
- [3] ISO 10360-8 standard for 3D scanners. *Couldn't find publisher* [online]. [cit. 2024-07-25]. Dostupné z: <https://kreon3d.com/article/iso-10360-8-standard-for-3d-scanners>
- [4] CHENEY, Sam. Choosing a 3D Scanner: Light vs Lasers, Applications, & Considerations. In: *Goengineer* [online]. 2023, 22. března 2023 [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.goengineer.com/blog/choosing-a-3d-scanner>
- [5] Types & Benefits of 3D Scanners and 3D Scanning Technologies. In: *Prescient technologies* [online]. 2019, 19. února 2019 [cit. 2023-12-15]. Dostupné z: <https://www.pre-scient.com/knowledge-center/product-development-by-reverse-engineering/scanners-scanning/>
- [6] ENGEL, Thomas. 3D optical measurement techniques. *IOPscience* [online]. 2022 [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6501/aca818
- [7] BESTECH AUSTRALIA. Know the difference between red laser and blue laser technology. *IndustrySearch* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.industrysearch.com.au/know-the-difference-between-red-laser-and-blue-laser-technology/f/20868>
- [8] ELITE LASER SOLUTION PROVIDER. What is the wavelength of the laser? *Elite Optoelectronics Co.,Ltd* [online]. 2020 [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.s-laser.com/info/what-is-the-wavelength-of-the-laser-50866750.html>
- [9] GOM Scan 1. In: *GOM* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-scanning/gom-scan-1>

- [10] SALVI, Joaquim, Jordi PAGÈS a Joan BATLLE. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*. 2004, **37**(4), 827-849. ISSN 0031-3203. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.patcog.2003.10.002>
- [11] HUIJUAN, Yuan. The principle of 3D measurement on structure light and color-encoded method. *ResearchGate* [online]. [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: doi:10.1117/12.572230
- [12] GENG, Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. Optica Publishing Group, 2011/06/30, **3**(2), 128-160. Dostupné z: doi:10.1364/AOP.3.000128
- [13] The Best 3D Scanners in 2023 – Buyer’s Guide. In: *All3dp* [online]. 2023, 14. listopadu 2023 [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-3d-scanner-diy-handheld-app-software/>
- [14] Advantages & Disadvantages of 3D Laser Scanning. In: *3space* [online]. 2020, 8. ledna 2020 [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://3space.com/advantages-disadvantages-of-3d-laser-scanning/>
- [15] How to Scan Dark, Shiny, or Clear Surfaces with a 3D Scanner. In: MOTLEY, Paul. *Gomeasure3D* [online]. 2021, 19. března 2021 [cit. 2023-12-21]. Dostupné z: <https://gomeasure3d.com/blog/scan-dark-shiny-clear-surfaces-3d-scanner-video-demo/>
- [16] Reflections: Can you 3D laser scan a shiny surface? In: *PointSCAN* [online]. c2019 [cit. 2023-12-21]. Dostupné z: <https://www.pointscan.co.uk/reflections/>
- [17] T-SCAN hawk 2. In: , ZEISS. *HandsOnMetrology* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.handsonmetrology.com/products/t-scan-hawk-2/>
- [18] ARTEC 3D. Artec Leo. *Professional 3D scanning solutions | Artec 3D* [online]. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-leo>
- [19] Artec Space Spider - Industrial 3D scanner of metrological accuracy. ARTEC 3D. *Professional 3D scanning solutions | Artec 3D* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-spider>

- [20] CREAFORM. *HandySCAN 3D/BLACK Series - Technical Specifications* [online]. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanner-handyscan-3d/technical-specifications>
- [21] ANIWAA. HandySCAN BLACK. *Aniwaa* [online]. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-scanners/creaform-handyscan-black/>
- [22] 3D SCANTECH. SIMSCAN Portable 3D Laser Scanner. *Scantech* [online]. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.3d-scantech.com/product/simscan-3d-scanner/>
- [23] SHINING 3D. EinScan Multifunctional 3D Scanner Specs. *EinScan* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.einscan.com/einscan-hx/einscan-hx-specs/>
- [24] TOP3DSHOP. Einscan HX 3D Scanner [1 x Aesub Spray for Free]. *Digital Manufacturing Store Top 3D Shop* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://top3dshop.com/product/shining-3d-einscan-hx-3d-scanner>
- [25] GURUS, Quality. Bias, Linearity, and Stability in Measurement System Analysis. *Quality Gurus* [online]. [cit. 2024-07-11]. Dostupné z: <https://www.qualitygurus.com/bias-linearity-and-stability-in-measurement-system-analysis/>
- [26] HESSING, Ted. Gage Repeatability and Reproducibility (R&R). *Six Sigma Study Guide* [online]. [cit. 2024-07-11]. Dostupné z: <https://sixsigmastudyguide.com/repeatability-and-reproducibility-rr/>
- [27] KUMPRECHT, Vít. *Zkoušení přesnosti CMM při měření obecných tvarových ploch* [online]. [cit. 2024-07-18]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/103571>