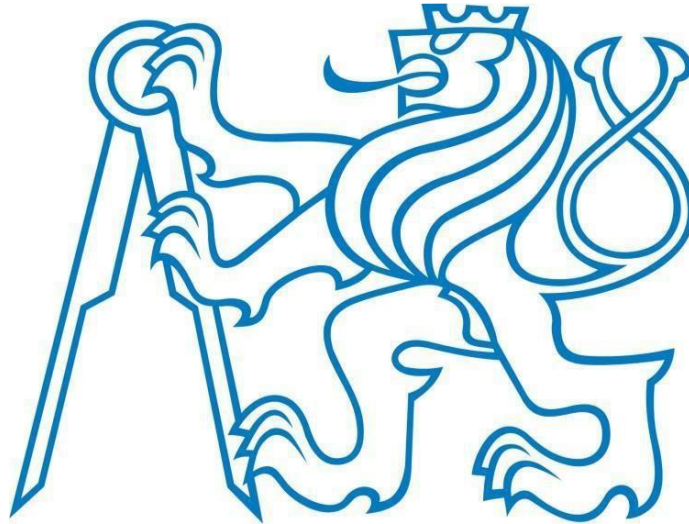


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Využitelnost bezkontaktních metod snímání při
přesném měření**

Diplomová práce

Autor: Bc. Jiří Vaněček

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaněček** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **474993**
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:

Využitelnost bezkontaktních metod snímání při přesném měření

Název diplomové práce anglicky:

Non-contact measurement methods usability for accurate measurements

Pokyny pro vypracování:

1. Rozdělení metod měření, využitelnost, výhody, nevýhody
2. Bezkontaktní metody měření - problematika snímání bodů
3. Porovnání vybraných metod měření s dotykovým systémem
4. Analýza získaných dat s ohledem na přesnost a opakovatelnost

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Šimota ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Šimota
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

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

V Praze dne

.....

podpis



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šimotovi, za odborné vedení, veškeré rady, poznatky, trpělivost, ochotu a čas, který mi věnoval při vypracovávání diplomové práce.



Abstrakt

Diplomová práce byla zaměřena na využitelnost bezkontaktních metod snímání při přesném měření. První část se zabývala popisem snímacích systémů. Pozornost byla zaměřena na rozdělení, možnosti využití při měření součástí. V další části byla rozebírána problematika bezdotykového měření. Tato část zahrnovala principy bezdotykového měření, popis strukturovaného světla a jednotlivých struktur promítaných vzorů. Zvláštní pozornost byla věnována faktorům ovlivňujícím rozměrovou přesnost bezkontaktního měření. Dále se práce zabývala volbou měřených součástí a definicí srovnávacích charakteristik. Poté se věnovala způsobu získávání nominálních hodnot na souřadnicovém měřicím stroji a využití těchto dat k tvorbě modelů. Následně se zabývala optickým skenováním a vlivu sublimujícího a permanentního matného prášku. V závěru se vyhodnotila získaná data a došlo k jejich měření a porovnání modelů s výslednými měřeními.

Klíčová slova

Optická měřicí technika, pruhová projekce, 3D skenování, Přesnost měření, CMM, souřadnicové měřicí stroje, kontaktní a bezkontaktní senzorka.

Abstract

This diploma thesis was focused on non-contact measurement methods usability for accurate measurements. The first part dealt with the description of sensing systems. The attention was focused on the distribution, the possibilities of use when measuring components. In the next part, the issue of non-contact measurement was discussed. This part included the principles of non-contact measurement, the description of structured light and the individual structures of the projected patterns. Special attention was paid to the factors of influencing the dimensional accuracy of non-contact measurement. Furthermore, the work dealt with the choice of measured components and the definition of comparative characteristics. It was then devoted to the method of obtaining nominal values on a coordinate measuring machine and the use of this data to create models. Subsequently, it dealt with optical scanning and the effect of sublimating and permanent matting powder. At the end, the obtained data were evaluated and were measured and the models were compared with the resulting measurements.

Keywords

Optical measurement technology, Fringe Light Projection, 3D scanning, Measurement accuracy, CMM, Coordinate Measuring Machines, coordinate measuring techniques, tactile and non-contact sensors.



Obsah

Úvod	10
1. Souřadnicové měřicí stroje	11
2. Rozdělení metod snímání	12
2.1 Rozdělení dle působení na měřený objekt	12
2.1.1 Destruktivní.....	12
2.1.2 Nedestruktivní	13
2.2 Rozdělení dle mobility zařízení	13
2.2.1 Stacionární zařízení	13
2.2.2 Mobilní zařízení.....	13
2.3 Kontaktní metody.....	13
2.3.1 Spínací systémy	13
2.3.2 Skenovací systémy	15
2.4 Bezkontaktní metody	16
2.4.1 Optické systémy	16
2.4.2 Laserové systémy	20
2.4.3 Ultrazvukové systémy	22
2.4.4 Výpočetní tomografie.....	22
3. Problematika 3D skenování	24
3.1 Principy bezkontaktního snímání.....	24
3.1.1 Projekce rastru světla.....	25
3.1.2 Stereovidění.....	27
3.1.3 Detekce laserové paprsku	29
3.2 Strukturované světlo	30
3.3 Struktury promítaných vzorů	31
3.3.1 Temporální kodifikace	32
3.3.2 Prostorová kodifikace.....	34
3.3.3 Přímá kodifikace.....	37
3.4 Faktory ovlivňující rozměrovou přesnost	38
3.4.1 Měřicí systém.....	39
3.4.2 Digitalizace.....	42
3.4.3 Vyhodnocení dat	44



4.	Cíl práce a přehled souvisejících prací	47
4.1	Cíl práce	47
4.2	Použité statistické charakteristiky	48
4.3	Přehled souvisejících publikací	49
5.	Průběh měření na souřadnicovém měřicím stroji.....	52
5.1	Měřicí konfigurace	52
5.2	Definování upnutí.....	54
5.3	Tvorba plánů měření a vyhodnocení	55
5.3.1	Kalibrační kroužek	55
5.3.2	Koncová měrka	58
5.3.3	Nastavovací kroužek.....	60
5.3.4	Matná koule.....	62
5.4	Tvorba CAD modelů	64
6.	Průběh skenování optickým skenerem.....	65
6.1	Způsoby zmatnění povrchu	66
6.1.1	Volba řešení zmatnění povrchu	67
6.1.2	Analýza tloušťky matnicí vrstvy	68
6.2	Skenování objektivem s FOV 45 mm	70
6.2.1	Skenování matné koule	70
6.2.2	Skenování koncové měrky	73
6.2.3	Skenování nastavovacího kroužku	76
6.2.4	Skenování kalibračního kroužku	79
6.3	Skenování objektivem s FOV 100 mm	82
6.3.1	Skenování matné koule	83
6.3.2	Skenování koncové měrky	84
6.3.3	Skenování nastavovacího kroužku	86
6.3.4	Skenování kalibračního kroužku	89
6.4	Skenování objektivem s FOV 250 mm	91
6.4.1	Skenování matné koule	92
6.4.2	Skenování koncové měrky	93
6.4.3	Skenování nastavovacího kroužku	95
6.4.4	Skenování kalibračního kroužku	97
7.	Zpracování a vyhodnocení naměřených dat.....	99



7.1	Vliv sublimace matnicí vrstvy na podíl naskenovaného povrchu	99
7.2	Analýza výsledků měření 3D optickým skenerem	102
7.2.1	Měření matné koule.....	102
7.2.2	Měření kalibračního kroužku	104
7.2.3	Měření koncové měrky.....	106
7.2.4	Měření nastavovacího kroužku.....	109
	Závěr	112
	Zdroje.....	114
	Seznam obrázků	119
	Seznam tabulek.....	122
	Seznam grafů.....	124



Seznam použitých symbolů a zkratk

1D	-	Jednodimenzionální
2D	-	Dvojdimenzionální
3D	-	Třídimenzionální
AKL	-	Akreditovaná kalibrační laboratoř
$C_{12}H_{24}$	-	Cyklodekan
$CaCO_3$	-	Uhličitan vápenatý
CCD	-	Charge-Coupled Device (Čip pro snímání obrazové informace)
CMM	-	Coordinate-Measuring Machine (Souřadnicový měřicí stroj)
ČIA	-	Český institut pro akreditaci
ČSN	-	Česká technická norma
DIN	-	Deutsches Institut für Normung (Německý institut pro normalizaci)
EN	-	Euripänischen Normen (Evropská norma)
FDM	-	Fused Deposition Modeling (Technologie 3D tisku)
FOV	-	Field Of View (Zorné pole)
GD&T	-	Geometric Dimensioning and Tolerancing (Geometrické kótování a tolerance)
ISO	-	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro standardizaci)
LCD	-	Liquid Crystal Display (Displej z tekutých krystalů)
LED	-	Light-Emitting Diode (Polovodičový světelný zdroj)
Mpx	-	Megapixel
MV	-	Measuring Volume (Měřicí objem)
PC	-	Personal Computer (Osobní počítač)
RGB	-	Red Green Blue (Barevný model červená-zelená-modrá)
RPS	-	Reference Point Systém (Systém referenčních bodů)
SLA	-	Stereolithography Apparatus (Stereolitografie - technologie 3D tisku)
TiO_2	-	Oxid titaničitý
VDI/VDE	-	Vereins Deutscher Ingenieure/Verbands der Elektrotechnik Symbol



Úvod

Obor metrologie byl vždy nedílnou a důležitou součástí každého průmyslového podniku, neboť rozměrová kontrola je potřebná jak ve fázi vývoje výrobku při ověřování prototypů nebo pro měření nástrojů, tak samozřejmě i v sériové výrobě pro kontrolu a sledování jakosti vyráběných dílů. Zatímco historicky bylo využíváno různých často i ručních konvenčních měřidel, automatickému a velmi přesnému měření po dlouhou dobu vévodily souřadnicové měřicí stroje, které se staly jakýmsi standardem v metrologii. Díky své přesnosti a spolehlivosti jsou ve velké míře používány dodnes.

S rostoucími nároky na rychlost měření a se zvyšující se tvarovou náročností výrobků se však v posledních letech stále více prosazují bezkontaktní systémy měření, nazývané také jako 3D skenery. V mnoha oblastech průmyslově vyspělého výrobního podniku se skenovací zařízení v kombinaci s kontrolním softwarem stávají hlavním nástrojem průmyslové inspekce, přestože jsou ve srovnání s příslušnými kontaktními systémy méně přesné. Důvody lze také spatřovat ve vysokých požadavcích moderní výroby souvisejícími s automatizací měření a přechodem na Průmysl 4.0. V rámci této nové koncepce se měřicí a kontrolní technologie stále více používají jako řídicí nástroj přímo ve výrobě. Lze očekávat, že v následujících letech zde budou CMM dále nahrazovány laserovými a optickými 3D skenery, bude více využíváno měření v těsné blízkosti výrobní linky nebo přímo v ní (např. robotické in-line měření) s cílem zvýšit flexibilitu a efektivitu, zkrátit čas výroby a zvýšit jakost výrobků.

Limitací pro technologii optického skenování jsou povrchy zkoumaných součástí. Problémy nastávají při snímání transparentních předmětů a předmětů s tmavým, nebo lesklým povrchem. Jako řešení tohoto problému se nejčastěji používá dočasné změnění optických vlastností povrchů pomocí nástřiků, které umožní bezproblémové naskenování součástí. Nástřiky jsou po dokončení skenování odstraněny. Negativním prvkem této metody je ovlivnění snímané geometrie. Jedná se o samotný nárůst měřených rozměrů o tloušťku nanesené vrstvy, ale také dochází k hromadění nanášených částic v rozích a vzniku rádiusů. Dalším faktorem je prostředí, ve kterém měříme, tedy teplota, vlhkost, osvětlení, prach atp. Velký vliv na přesnost měření má také úprava povrchu měřené součásti a v neposlední řadě i samotný postup při skenování, systematické i náhodné chyby způsobené obsluhou. Existuje mnoho doporučení a postupů, které by měly být dodržovány.

Tato práce se zabývá problematikou optického bezkontaktního měření založeného na principu proužkové projekce modrého světla. Má čtenáře seznámit s problematikou týkající se bezkontaktního měření. Cílem této práce je experimentálně posoudit vliv matných nástřiků, a především určit přesnost a opakovatelnost měření pruhového projektoru Zeiss Comet L3D 2.



1. Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje představují jednu z nejvýznamnějších, dynamicky se rozvíjejících inovací v oblasti měření ve strojírenství. CMM se začaly využívat zhruba před padesáti lety paralelně s nástupem výpočetní techniky a jejím propojováním s výrobou a kontrolou kvality.

Konstrukce souřadnicových měřicích strojů byla zapříčiněna potřebou měření tvarově složitých součástí v automobilovém a leteckém průmyslu (např. měření karoserií vozů), nebo u NC a CNC strojů. V současné době se většina výrobních podniků bez CMM téměř neobejde. Souřadnicová měřicí technika se tedy stala nezbytným předpokladem pro kontrolu kvality v průmyslu. Postupem času byly vyvinuty normy a směrnice k harmonizaci specifikace výkonnosti CMM. Hlavním důvodem byla především možnost, aby byl uživatel schopen provést porovnání při nákupu zařízení a jeho způsobilosti ve výrobě. Návaznost na národní standardy a přesnost měření provedených u tříosých souřadnicových měřicích strojů je velice důležitá pro zachování důvěry a spolehlivosti měření. [24]

Mezi další významné výhody měření pomocí CMM patří rychlost měření umožňující kontrolovat větší počet kusů a tím urychlit vyhodnocování. CMM kontroluje výrobky podobným způsobem, jako je CNC stroj vyrábí, měřené časy redukuje asi o 80 %. Spolehlivost CMM se neustále zvyšuje, a přitom se snižuje jejich citlivost vůči vnějším rušivým vlivům, tudíž je možné zařazení těchto strojů přímo do dílen a nemusí se nacházet jen v laboratořích. Toto umožňuje bezprostřední zapojení do systému kontroly kvality a vytvoření 100 % podmínek pro kontrolu důležitých součástí. [25] [26]



Obr. 1 Souřadnicový měřicí stroj ZEISS PRISMO [40]

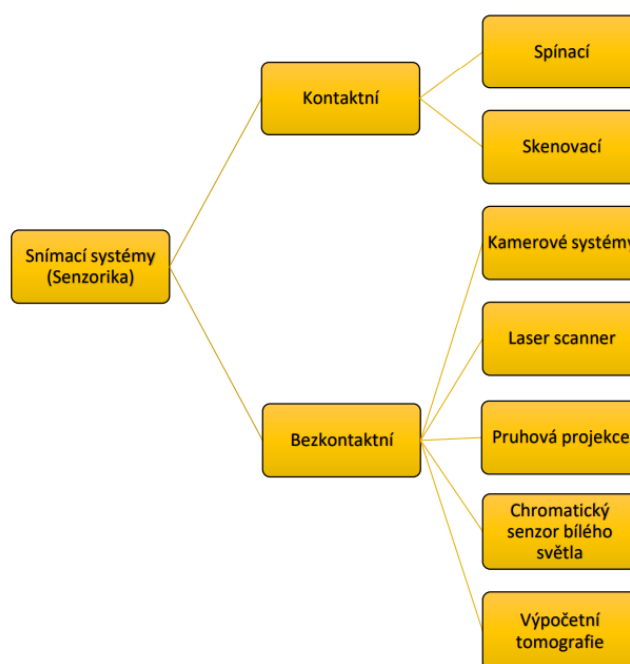


2. Rozdělení metod snímání

Obecně lze metody snímání rozdělit dle mnoha hledisek. Existují zařízení, které dokážou snímat pouze viditelné geometrie, ale i systémy pro skenování vnitřních struktur.

Nezákladnější rozdělení (Obr. 2) snímacích systémů rozlišuje snímání bodů na dotykové, kde je pro získávání informací zapotřebí přímý kontakt s měřeným dílem a na metody bezdotykové, které kontakt nepotřebují a fungují například na optických principech.

Systémy lze dělit dle mobility zařízení na stacionární a mobilní, dle působení na měřený objekt na destruktivní a nedestruktivní a dále například dle různých principů pozicování a snímání.



Obr. 2 Rozdělení snímacích systémů [20]

2.1 Rozdělení dle působení na měřený objekt

2.1.1 Destruktivní

Při skenování součásti pomocí destruktivních skenerů dojde ke zničení původního skenovaného objektu z důvodu získání dat kompletní vnější i vnitřní struktury. Jednotlivé vrstvy jsou postupně odfrézovány a oskenovány, čímž vzniká digitální obraz vnitřních dutin a záhybů. Skenování tohoto typu je velmi přesné (v rádech setin milimetru) a doba skenování se odvíjí od velikosti skenovaného objektu a může se vyšplhat až na několik hodin.



2.1.2 Nedestruktivní

Opakem destruktivních skenerů, které jsou využívány například pro skenování termištů, jsou skenery nedestruktivní, které bývají užívány častěji, jelikož ve většině případů nechceme digitalizovaný objekt zničit. [47][48][49][50]

2.2 Rozdělení dle mobility zařízení

2.2.1 Stacionární zařízení

Jedná se o skenery, které mají limitovaný snímací prostor, nelze je přepravovat, je na nich tedy možné skenovat pouze objekty do určité velikosti – skenovacího prostoru. Většinou se jedná o velké skenery, nejčastěji obsahující rameno.

2.2.2 Mobilní zařízení

Opak stacionárního zařízení, malý přenosný skener, který se využívá na snímání velkorozměrových objektů, které není možné přemísťovat a tím tedy donést „pod skener“. Mobilita zařízení bývá v dnešní době brána jako jeden z rozhodujících parametrů při nákupu skeneru. [47][48]

2.3 Kontaktní metody

Kontaktní metody měření fungují na jednoduchém principu kontaktu snímače s měřeným objektem. Snímač, složený z hlavy, dřívku a doteku zaznamenává přesný okamžik dotyku sondy s povrchem a zaznamená okamžitou polohu. Tento snímač může být umístěný buď na souřadnicovém měřicím stroji (CMM), nebo na měřicích ramenech. Tyto metody se dělí dle režimu provozu na spínací a skenovací. [42]

2.3.1 Spínací systémy

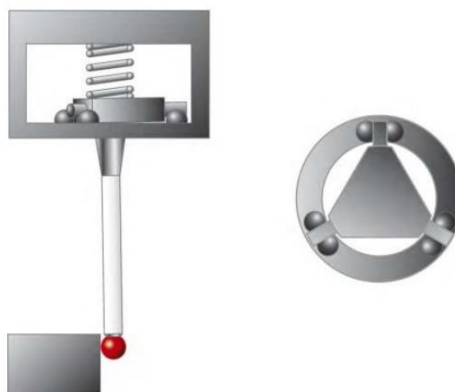
Spínací snímací systémy jsou díky své konstrukci využívány pro postupné měření jednotlivých bodů na součásti. Odečtení souřadnic jednotlivých bodů funguje na základě najetí stroje do polohy v bezpečné vzdálenosti od dílu, poté se za plynulé rychlosti vhodné pro měření najíždí k součásti až se provede mechanický dotyk. Ve chvíli, kdy tento dotyk proběhne, jsou odečteny aktuální hodnoty jednotlivých souřadnic měřicího stroje. Nevýhodou takto konstruovaných snímacích systémů je především nižší produktivita oproti systémům skenovacím a mnohdy také ne zcela celistvý a dostačující popis měřeného elementu na dílu. Výhodou je poté především nízká složitost konstrukce a díky tomu relativně nízká pořizovací cena oproti složitějším typům snímacích systémů. Mezi základní druhy dotykových spínacích systémů patří kinematický a elektronický (tenzometrický) typ. [21]

Kinematický typ

Typický mechanismus tohoto typu se skládá ze tří válečků. Každý z těchto válečků leží na dvou kuličkách. Takovéto uspořádání odstraňuje všech šest stupňů volnosti a samotný dřík se snímačem se po odměření bodu vždy vrátí do své původní polohy. Ve chvíli, kdy se dotkne snímač měřeného elementu na dílu, se vždy alespoň jeden ze tří kontaktních bodů rozpojí a tím vzniká signál k odečtení souřadnic odměřovacím systémem CMM.



Odměřené souřadnice daného bodu odpovídají středu snímacího prvku (nejčastěji kulička). Tento prvek je zpravidla připevněn ke dříku, který je z druhé strany upevněn na tříbodovém uložení. Hlavní problém spojený s touto konstrukcí je, že geometrie kontaktu způsobuje rozdílně velké potřebné síly vznikající při doteku v závislosti na směru, ve kterém dojde ke kontaktu snímače s povrchem stroje. Tím vznikají různá ohnutí dříku ve chvílích, kdy se snímač dotkne stroje a kdy je generován signál označující dotyk. Čím více je dřík delší, tím je ohnutí znatelnější. [21]



Obr. 3 Kinematický typ [21]

Elektronický (tenzometrický) typ

Jedná se o vylepšený typ dotykového snímacího systému, který se snaží odstranit nechtěné problémy týkající se konstrukce kontaktního typu. Vylepšení spočívá v použití třech vysoce citlivých elektronických senzorů nacházejících se uvnitř hlavy. Tyto senzory umí detekovat kontaktní síly vznikající mezi snímačem připojeným na dřík a měřeným dílem. V této konstrukci je spínací signál generován při mnohem nižších silách, které jsou navíc nezávislé na směru dotyku snímače s dílem. Díky tomu jsou eliminovány nepřesnosti měření způsobené silami závislými na směru působení.

Mezi další výhody, které přináší tato konstrukce oproti běžné kinematické patří například možnost využití delších dříků, protože jsou síly dotyku nízké a dřík se tedy minimálně prohýbá. Lze tedy využít delší dříky bez citelného snížení přesnosti měření. Díky nižším silám je také značně vylepšena opakovatelnost měření a taktéž životnost snímačů. [21]



Obr. 4 Elektronický (tenzometrický) typ [21]

2.3.2 Skenovací systémy

Druhou možností provozu je skenovací režim se skenovací sondou. Sonda je v tomto případě instalována výhradně na souřadnicovém měřicím stroji a na rozdíl od bodového režimu. Tento systém využívá k pohybu tři pružinové paralelogramy, které se typicky vychylují v rozmezí ± 3 milimetry ve směru měřicí osy. Zjišťování polohy je v případě analogového systému realizováno pomocí induktivního odměřování. Každý paralelogram je přirozeně ve své neutrální pozici, nulové body induktivního odměřování jsou soustředěny do těchto neutrálních poloh. Pohybující se systém cívek generuje měřicí sílu v momentě, kdy se snímač dotkne měřeného dílu. Jakmile se měřicí systém nastaví do polohy blížící se poloze nulové, jsou souřadnice stroje a digitalizované pozůstatkové výchylky skenovací hlavy přeposlány do počítače. Hlavní rozdíl oproti dotykovým spínacím systémům tkví v tom, že je měření pomocí analogových měřicích hlav statické. Díky tomu jsou naměřená data přesnější. Analogové hlavy mohou operovat buď v tzv. free-floating režimu, kdy pracují souvisle všechny tři osy zároveň nebo v režimu uzamknutí, kde jsou osy nevyužívané k měření zamknuté. Tyto měřicí systémy mohou využívat buď pasivní senzory, kdy zařízení jednoduše rozeznává vychýlení senzoru, nebo může používat motory, které přímo kontrolují vychýlení a přítlačnou sílu. [21]



Obr. 5 Skenovací systém výrobce ZEISS [21]

2.4 Bezkontaktní metody

Druhým typem snímacích systémů, jsou bezdotykové snímací systémy. Tento systém nevyžaduje ke své funkci hmotný dotyk s měřeným povrchem, proto v dnešní době nahrazuje v některých aplikacích dotykové snímací systémy. Výhodami oproti dotykovým snímacím systémům je, že nám umožňují měřit křehké obrobky, vysoká rychlost snímání nám umožňuje nasnímat větší počet bodů a v poslední řadě větším pracovním prostorem se nám snižuje riziko kolize mezi snímacím systémem a obrobkem.

Řadíme sem zařízení, která jsou založena na bezkontaktním způsobu snímání „3D digitalizace“. Bezdotykové systémy měření se považují za skenery (digitizéry). Digitální 3D podoba reálného objektu se získá měřením třetí souřadnice, použitím metody triangulace a interference světla.

Výhodou těchto přístrojů je, že mají značnou produktivitu a vytvářejí po nasnímání bodů hustou síť bodů. Přístroje jsou vhodné pro snímání vnější geometrie, ale existují i systémy pro snímání vnitřní geometrie. [27]

2.4.1 Optické systémy

Optické 3D technologie se v posledních několika letech prosadily v celé řadě různých aplikací. Jejich hlavní výhodou oproti dotykovým měřicím metodám je mnohem vyšší flexibilita a efektivita (za několik sekund mohou v jediném měření zaznamenat a zpracovat velké množství bodů).

Optické skenery pracují na principu bezdotykového snímání, digitalizují vnější povrch a dokážou rozpoznávat i textury povrchu. Princip činnosti optických skenerů spočívá v tom, že skenovaný objekt je snímán z několika úhlů. Při každém natočení se součástka naskenuje (vyfotí) a data se odešlou do PC na zpracování. K přesnějšímu vystižení tvaru



povrchu se využívá pásů a značek. Po získání všech snímků, ze všech stran (úhlů pohledu) se data zpracují a pomocí metody aproximace se vytvoří digitalizovaný model. [27]

Kamerové systémy

Kamerové systémy jsou všechny senzory, které fungují na podobném principu jako lidské oko a mají alespoň dvourozměrné zobrazení měřené součásti. Kamerové systémy neumožňují snímat třetí rozměr. Základní kamerové systémy jsou senzory na zpracování obrazu, kde se měřený objekt pomocí kamery převede z optického signálu na digitální obraz. Digitální obraz slouží vyhodnocovacímu softwaru k výpočtu měřených bodů. Na nejistoty v měření mají největší vliv jednotlivé komponenty přístroje jako je osvětlení, optika, čip senzoru a algoritmus programu sloužící k výpočtu.

Kamerové snímací systémy jsou vhodné pro měření dílů s velmi malými nebo dvourozměrnými geometrickými prvky a dílů z měkkých materiálů jako plech, pryž nebo plast. Tento typ senzoru dokáže rozpoznat pouze hrany měřené součásti. Proto je tato metoda velice rychlá a produktivní u měření dvourozměrných elementů. S použitím doplňkových mobilních stolků s procházejícím světlem s LED osvětlením se dají provádět i obtížná měření málo kontrastních měřených objektů, jako jsou plechové výstřižky, desky plošných spojů. Nevýhodou tohoto systému oproti dotykovým metodám je neschopnost změřit třetí rozměr jako je například hloubka nebo celý průběh součásti. Dále se do měření vkládají nejistoty způsobené špatným osvětlením nebo lesklostí měřeného povrchu. [22] [45] [46]



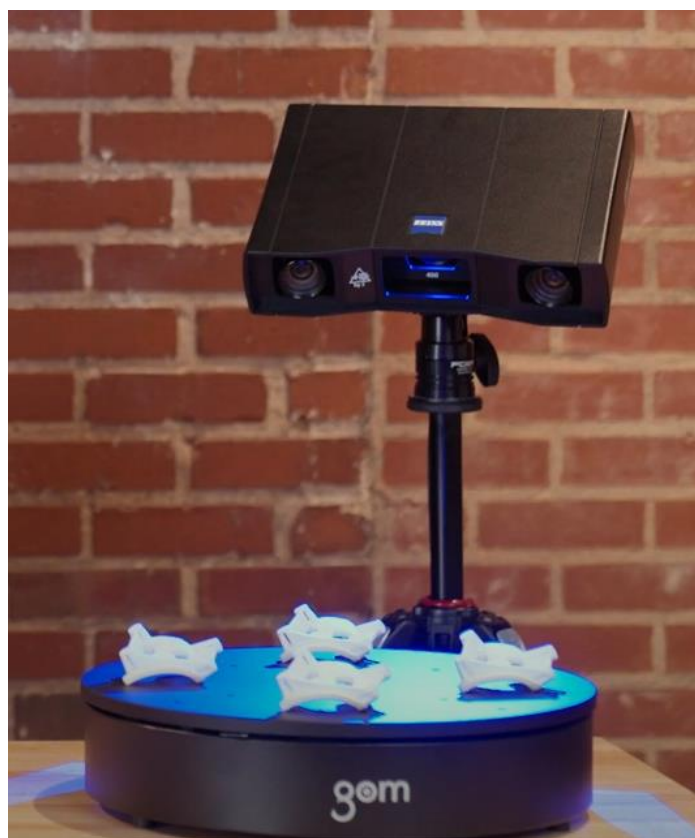
Obr. 6 2D obrazový senzor ZEISS ViScan [44]

Pruhový projektor

Pracuje na principu 3D aktivní triangulační metody. Pruhový projektor na snímání objektu promítá proužky světla, zachytává a zaznamenává je za pomoci digitální kamery. Při digitálním fotoaparátu je snímání objektu snímáno z určité vzdálenosti a za pomoci metody triangulace je 2D obraz převeden do 3D podoby.



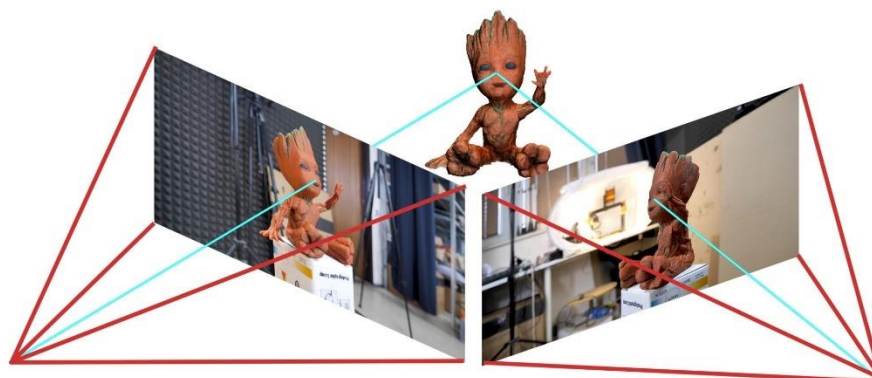
Na povrchu snímaného předmětu jsou pruhovým projektorem promítané proužky světla, tzv. metoda Fringe Light Projection a prostřednictvím jedné, nebo dvou vzájemně posunutých digitálních kamer se snímá objekt. Tímto způsobem se získají obrazy z různých úhlů, kde se následným digitálním zpracováním s danou přesností vypočítá poloha každého obrazového bodu, a za pomoci úhlů, které svírají sdružené paprsky, se dopočítá třetí souřadnice bodu (aby bylo dosaženo většího rozlišení s jednoznačným přiřazením bodů k jejich prostorovým souřadnicím, promítají se na povrchu postupně různé vzory). [27]



Obr. 7 Pruhový projektor GOM Scan 1 [44]

Fotogrammetrie

Fotogrammetrie (někdy též SFM – Structure From Motion) je jednou z optických metod, která se zařazuje mezi nekontaktní pasivní 3D měřicí metody, která vypočítává umístění bodu v trojrozměrném prostoru použitím fotografií objektu zachyceného z více úhlů pomocí fotoaparátu či videokamery. To je alespoň velmi zjednodušené vysvětlení. V podstatě jde o to, že ze všech možných úhlů pořídíte sadu fotografií konkrétního objektu, které následně nahrajete do specializovaného programu. Program následně hledá společné prvky na všech fotografiích, a snaží se s pomocí nich vypočítat, z jakého úhlu byl na dané fotografii předmět vyfotografován. S informací o pozici a úhlu kamery pak dokáže software vytvořit bod ve 3D prostoru, který odpovídá prvku na 2D fotografii. V ideálním případě by měl být výsledkem bezchybný trojrozměrný model. Aby se však dosáhlo nejlepších výsledků, bez ručního doladění se to neobejde. [36]



Obr. 8 Schéma fotogrammetrie [36]

Chromatický senzor bílého světla

Chromatický senzor bílého světla je bodový senzor vzdálenosti. Ze zdroje bílého světla se pomocí optických vláken pohybuje světelný signál do optické sondy. V optické sondě se bílé světlo pomocí čoček s využitím chromatické aberace rozloží na ohniskové vzdálenosti celého viditelného spektra. Tyto senzory mají daný rozsah měření, do kterého se promítají rozložené jednotlivé ohniskové vzdálenosti. Po vložení měřené součásti do rozsahu měření se na její povrch promítnou paprsky světla o jednotlivých vlnových délkách. Pouze jedna vlnová délka je nejostřejší a dokonale odražena. Odražené světlo putuje zpět do spektrometru, který na základě největší intenzity odražené vlnové délky přesně změří vzdálenost měřeného bodu. Senzory dokážou pomocí naskenování povrchu součásti vygenerovat rastrový obraz měřené součásti. Vysoká hustota měřených bodů vykreslí přesně topografii povrchu měřené součásti. Výsledkem měření tohoto senzoru může být vzdálenost bodu v ose Z nebo celkový tvar povrchu součásti ve formě mračna bodů. Tyto body se dají využít k měření rovinnosti a drsnosti povrchu a k měření základních geometrických prvků.

Tento senzor má výhody jako ostatní bezkontaktní optické senzory. Dokáže rychle a s velkou přesností bezkontaktně měřit a je proto vhodný i pro křehké a měkké materiály. Má však nad ostatními bezkontaktními senzory výhodu v měření na lesklých a reflexních površích. Nemá problém s měřením zrcadel a skel, kdy dokáže změřit i tloušťku skla. Tento senzor se proto často využívá v automobilovém průmyslu k měření tloušťky skel nebo deformací jejich povrchu při výrobě. Další aplikace tohoto senzoru můžeme najít v továrnách na výrobu skleněných nebo plastových lahví či nádob z bílého nebo barevného materiálu. V takových provozech se opět využívá k měření tloušťky skla a malých defektů. Senzor se dále hojně využívá k měření tenkých průhledných vrstev, které jsou aplikovány ve všech možných odvětvích průmyslu. V poslední řadě se senzor využívá k přesnému naskenování povrchu a vytvořením rastrového obrazu celé součásti s následným porovnáním s CAD modelem. Nevýhodou tohoto senzoru je jeho dražší pořizovací cena, menší rozsah měření a problém s měřením ostřejších úhlů. [33] [34] [35]



Obr. 9 Chromatický senzor bílého světla ZEISS DotScan [39]

2.4.2 Laserové systémy

Laserové skenování je založeno na principu triangulace a řadíme je mezi aktivní metody digitalizace. Tyto laserové skenery pracují na stejném principu jako např. sonar, který využívá vlastnosti laserového paprsku. Systém obsahuje zdroj laserového světla a optický detektor (kamera snímající deformovaný vzor na naskenované součástce). Laser vysílá světlo v podobě čáry nebo složitějšího vzoru. Laser je zdrojem intenzivního monochromatického a časově i prostorově koherentního záření. [27]

Laser scanner

Laserové skenery pracují na principu záření laseru. Skenovací hlavou, ve které je umístěn laser, najedeme nad měřenou součást. Ze skenovací hlavy září laserový paprsek na měřený prvek. Odražené světlo zachycuje objektiv a velice citlivá kamera. Díky tomu nám umožňuje vyhodnotit polohu nasnímaných bodů od skeneru. Využívá se princip triangulace bodů. Laserovým skenerem se získává obrovské množství bodů (desítky tisíc), které je potom filtrováno na trojúhelníkovou síť, která se dá použít např. pro pevnostní výpočty součástí. Kvalita zdigitalizovaného tělesa je dána hustotou, s jakou laserový paprsek pokryl plochu reálného tělesa. Výstupem je soubor dat o polygonech definujících geometrii povrchu zkoumaného tělesa.



Obr. 10 Laser scanner ZEISS LineScan [37]

Laser tracker

Zařazujeme k mobilním měřícím systémům, které sledují polohu odrazového systému z určité vzdálenosti. K měření snímaného objektu využívají laserový měřič vzdálenosti typu TOF (Time of Flight) o dvou přesných úhlových senzorech polohy (enkóдеры) a softwaru pro výpočet, ukládání a zobrazení polohy odrazového systému (reflektoru).

Laserový paprsek vycházející z vysílače se ovládá podle pohybu reflektoru dvěma servomotory, které natáčí laserovou hlavu. Sledovaný obraz laserového pulzu na reflektoru je aktualizovaný 1000x za sekundu, zajišťuje přesnost a opakovatelnost. Reflektor je vedený ručně nebo automaticky na objekty připravené k měření. [27]

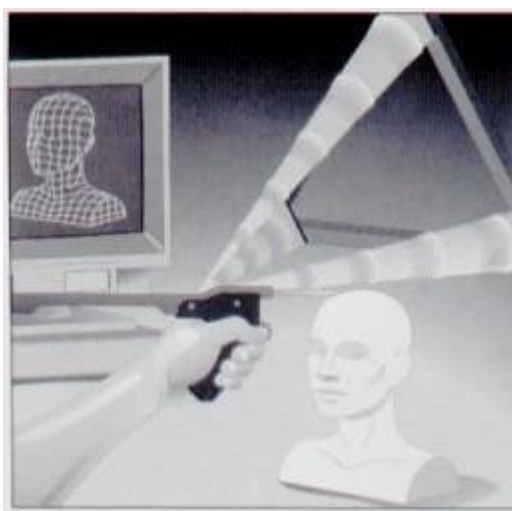
Průmyslové laser trackery jsou vhodné pro měření středně velkých až velkých dílců v řádech jednotek metrů. Staly se nezbytnou součástí metrologického vybavení ve většině průmyslových odvětvích od povrchových inspekcí automobilových karosérií až po velkoobjemová měření v instalacích v energetickém průmyslu či leteckém průmyslu. [27] [32]



Obr. 11 Laser tracker API RADIANT CORE [1038]

2.4.3 Ultrazvukové systémy

Tento způsob 3D digitalizace funguje na principu bezkontaktního snímání povrchu objektu ultrazvukovou sondou. Skenování se provádí manuálně ultrazvukovou sondou, která má tvar pistole s kovovým hrotem, který přikládáme ke skenovanému povrchu, kde stisknutím páčky (spouště) dojde k vyslání signálu. Tento signál se dekóduje za pomoci ultrazvukových čidel do prostorových souřadnic, které se můžou vyslat do CAD systému. Výhoda těchto systémů je jejich nízká cena, ale za cenu malé přesnosti (pohybuje se v rozmezích 0,3 – 0,5 mm). Využívá se v oblasti filmu, reklamy a animací. [27]



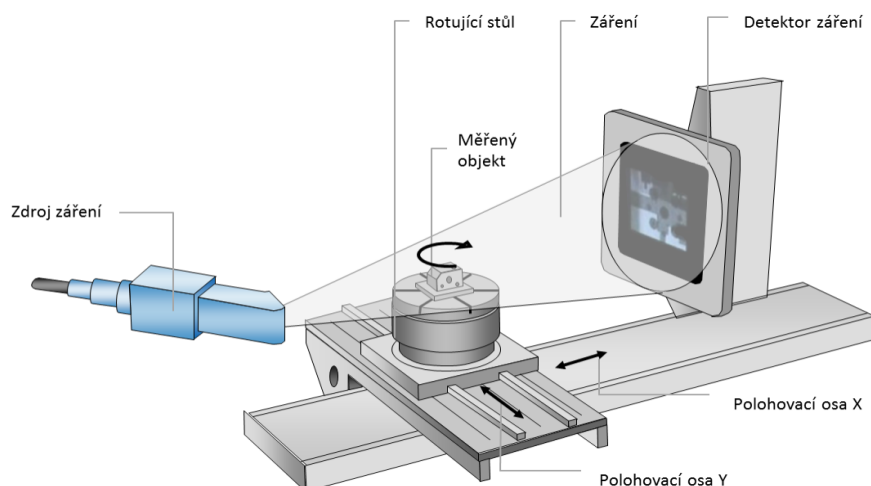
Obr. 12 Ultrazvukový skener Freepoint [27]

2.4.4 Výpočetní tomografie

Počítačová tomografie má dnes v průmyslové technice významnou roli. Možnost uplatnění je velmi široká od zjišťování nejrůznějších defektů dílů přes velmi přesné měření. A to i komplikovaných vnitřních struktur, které není možné jiným

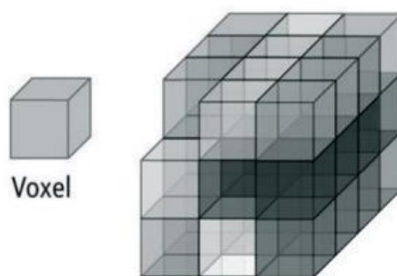


nedestruktivním způsobem prozkoumat. Možností uplatnění počítačové tomografie v průmyslu je mnoho a obliba této technologie stoupá. Průmyslové tomografy se využívají při materiálových analýzách, nedestruktivním testování a v metrologii.



Obr. 13 Vizualizace počítačového tomografu [28]

Průmyslový počítačový tomograf se skládá ze statického zdroje rentgenových paprsků-rentgenky, snímaný objekt je uložen na rotačním podstavci, který se otáčí. Pronikající záření se skrze objekt dostává na detektor. V závislosti na absorpčních vlastnostech objektu a jeho geometrické struktuře je získána 2D informace o snímaném objektu. Při průchodu vzduchem ztrácí záření jen málo energie, naopak například absorpční vlastnosti oceli jsou velké (nutno použít záření s vyšší energií). V závislosti na absorpci záření se na snímku body jeví v určitém kontrastu. Určitý problém nastává při zkoumání látek, které mají malou absorpci nebo velmi podobnou – jedná se například uhlíkové kompozity, polymery, měkké tkáně aj. Záření, které prochází těmito materiály mění intenzitu záření jen nepatrně. Dochází však ke změně fáze záření. Detektor nezaznamenává měnící se fázi. Je nutné pozorování ve fázovém kontrastu. [22] [29]



Obr. 14 Vizualizace voxelu [31]

Rotací objektu o 360 stupňů kolem rotační osy stolu jsou získávány až tisíce snímků s dílčím pootočením. Ze snímků je získán vhodnou matematickou metodou mrak bodů tzv. voxelový obraz, ve kterém je uložena trojrozměrná informace o objektu. Voxel (objemový pixel) představuje hodnotu absorpce záření v pravidelné mřížce trojrozměrného prostoru. Ačkoliv má voxel objemový charakter jeho rozměr je udáván pouze jako jednorozměrný v jednotkách mikrometrů. Tím se myslí lineární rozměr



pravidelného útvaru a objem lze tak vypočítat. Voxely jsou poté zpracovávány počítačovým programem, který je schopen vygenerovat 3D model.

Limitujícím faktorem u počítačové tomografie je hlavně výkon zdroje rentgenového záření. Maximální možná přípustná akumulovaná tloušťka materiálu je ovlivněna druhem materiálu a výkonem zdroje rentgenového záření. Skenování malých součástí lze provádět díky posunutí rotační osy vůči rentgenové jednotce. Dochází tak ke zvětšení objektu. Výběr zvětšení má vliv na výsledné rozlišení obrazu. Rozlišení je rovněž ovlivněno ohniskovou vzdáleností. [22] [23] [30] [31]



Obr. 15 Počítačový tomograf Zeiss Metrotom 1500 [41]

3. Problematika 3D skenování

3.1 Principy bezkontaktního snímání

Většina optických zobrazovacích zařízení interpretuje 3D scénu pouze ve 2D podobě. Pro prostorové měření je však ztráta jedné souřadnice nežádoucí. Aby bylo možné dopočítat souřadnice 3D scény, je tedy nutné vedle získaného 2D obrazu z čipů kamer znát další informace o optické soustavě zařízení. [1] [4]

Systémy pro skenování využívají pro určení souřadnic bodů v prostoru několika základních principů. Jedním z často používaných je rastrová projekce světla na snímáný objekt a číslkové zpracování takto získaného obrazu. Využívána je metoda aktivní nebo pasivní triangulace, jejíž podskupinou je tzv. stereovidění. Dalším principem je optická interferometrie. Laserové skenery detekují vzdálenost objektu nejčastěji na základě měření doby letu nebo fázového posunu světla. [1] [4]

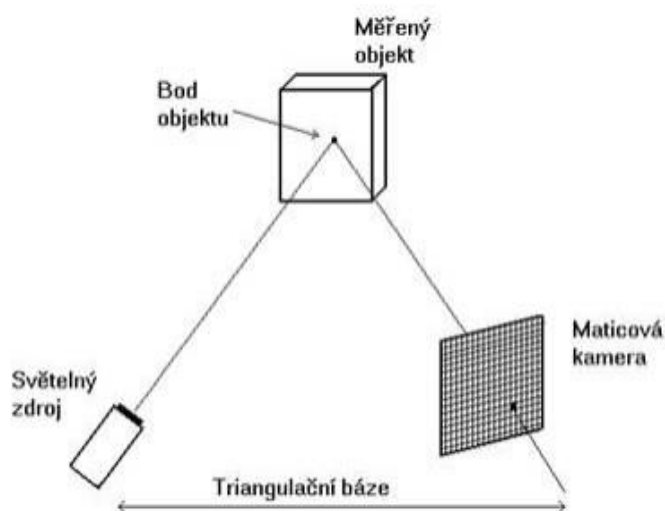
Vhodnost metody pro konkrétní případ závisí na mnoha proměnných, jako jsou velikost a vzdálenost měřeného objektu, požadovaná přesnost měření, vlastnosti povrchu ale i okolní světelné podmínky. [1] [4]



3.1.1 Projekce rastru světla

Skenery založené na projekci světla vychází při výpočtu bodů v prostoru z metody aktivní triangulace. Ta je v dnešní době pravděpodobně nejpoužívanější technikou optické digitalizace. Přístroje jsou složeny minimálně ze dvou senzorů - nejčastěji světelného zdroje a kamery (Obr. 16). Jako promítaný vzor může být použit bod (1D triangulace), světelný pruh (2D triangulace) nebo strukturovaný světelný svazek - sada pruhů, mřížka apod. (3D triangulace). Obraz promítnutého rastru je snímán kamerou a následně počítačově zpracován. Některé systémy využívají ne jedné, ale více kamer. To má pozitivní vliv na přesnost měření, dochází k redukci šumu a snížení chybně změřených bodů především na hranách rovnoběžných s promítanými pruhy.

Oproti jedno-kamerovým systémům je zde také možná automatická kontrola aktuálního stavu kalibrace. Typickým příkladem systému na tomto principu jsou průmyslové skenery od německé firmy Zeiss - řada stacionárních skenerů GOM a Comet (viz Obr. 17) a přenosné skenery T-SCAN a T-SCAN hawk. StereoScan neo, SmartScan, PrimeScan, RS-SQUARED od švédské firmy Hexagon. HandySCAN 3D, Go!SCAN SPARK, MetraSCAN 3D od kanadské firmy Creaform a mnoho dalších. [1] [4] [5] [6] [7]



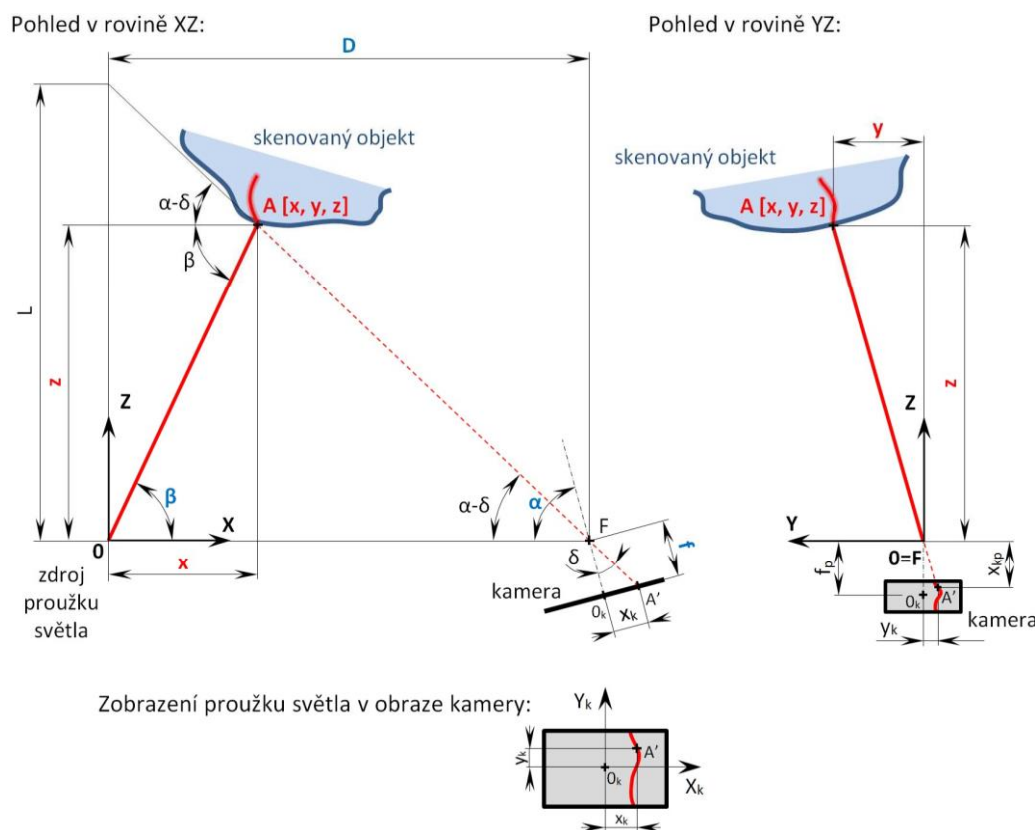
Obr. 16 Princip triangulace [1]



Obr. 17 Skener Comet LED 2 pracující na principu projekce modrého světla [5]

Příklad výpočtu souřadnic měřeného bodu (bodů) pomocí triangulace je uveden na Obr. 18. Zdroj světla, snímač a osvětlený bod na měřeném objektu definují tzv. triangulační trojúhelník.

Základní princip vychází z faktu, že trojúhelník je definován délkou jedné strany a dvěma přilehlými úhly. Zbývající dvě strany a třetí úhel lze dopočítat. Pro výpočet je tedy nutné znát konstrukční parametry skeneru - vzdálenost mezi ohniskem kamery a projektoru (D) (nazývána také jako triangulační báze), úhel optické osy kamery (α), úhel osy projektoru – promítaného světla (β) a ohniskovou vzdálenost optické soustavy (f). Tyto parametry jsou dány hardwarem, nebo jsou vypočítány při kalibraci. Zatímco úhel mezi paprskem světla a triangulační bází (β) je pro daný promítaný paprsek neměnný, úhel na straně snímače ($\alpha - \sigma$) je závislý na pozici vysvíceného bodu na CCD snímači, resp. na poloze (souřadnicích) hledaného bodu A. [2]



Obr. 18 Výpočet souřadnice bodu A pomocí triangulace [2]

V obraze kamery je nejprve nalezen proužek světla promítaný projektorem na měřenou součást. Tím jsou známy obrazové souřadnice bodů, které leží v oblasti promítaného proužku v souřadném systému kamery X_k, Y_k . Pro obraz vybraného bodu A' o zjištěných souřadnicích $A'[x_k, y_k]$ lze z triangulačních trojúhelníků vypočítat jeho prostorové souřadnice $A[x, y, z]$ dle následujících vztahů [2].

$$x = \frac{D \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{x_k}{f})}{\operatorname{tg}(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{x_k}{f}) + \operatorname{tg}(\beta)} \quad (1)$$

$$y = x \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot \frac{y_k}{f \cdot \sin \alpha - x_k \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

$$z = x \cdot \operatorname{tg}(\beta) \quad (3)$$

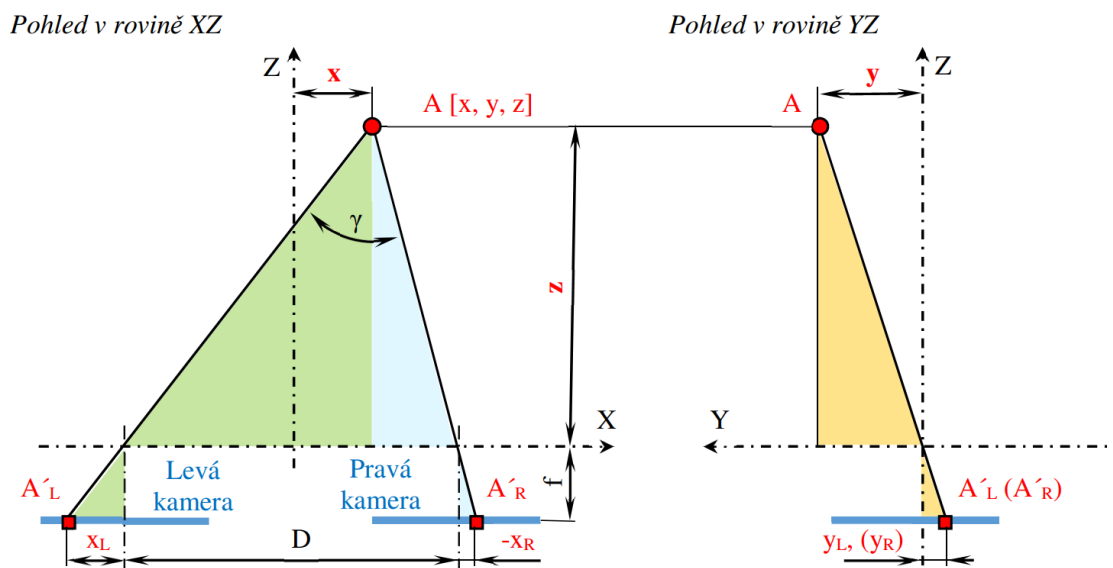
Stejným způsobem lze vypočítat i další body v místě proužku. V případě 3D triangulace jsou pak výstupem souřadnice mnoha bodů (tzv. mrak bodů) v celém zorném poli (měřicím objemu) skeneru viditelných z dané pozice skeneru. [2] [4]

3.1.2 Stereovidění

Metoda stereovidění vychází v podstatě též z principu triangulace. Protože se ale v tomto případě nevyužívá žádného zdroje světla, ale objekt je sledován „pasivně“ pouze (nejčastěji dvěma) kamerami, mluvíme o tzv. *pasivní triangulaci*. Pro výpočet polohy měřeného bodu je i zde nutné znát parametry zařízení - ohniskovou vzdálenost optické soustavy f a vzájemnou vzdálenost mezi optickými osami kamer (tzv. bázi) – viz parametr D na Obr. 19. Tu systém určí během kalibrace, tedy snímání etalonu známých rozměrů.



Na základě podobnosti trojúhelníků (odpovídající si trojúhelníky jsou v obrázku označeny stejnou barvou) lze sestavit tři rovnice o třech neznámých – ze kterých je možno vypočítat souřadnice hledaného bodu A [x, y, z]:



Obr. 19 Metoda pasivní triangulace – stereovidění [4]

$$\frac{x_L}{f} = \frac{\frac{D}{2} + x}{z} \quad (4)$$

$$\frac{y_L}{f} = \frac{y}{z} \quad (5)$$

$$\frac{-x_R}{f} = \frac{\frac{D}{2} - x}{z} \quad (6)$$

Kde x_L , y_L , a x_R , y_R jsou souřadnice obrazu bodu A_L , resp. A_R na CCD snímači levé, resp. pravé kamery hledaného bodu A. Vyřešením soustavy rovnic lze odvodit vztahy pro výpočet všech prostorových souřadnic x, y, z bodu A:

$$x = \frac{D}{2} \cdot \frac{x_L + x_R}{x_L - x_R} = \frac{D}{2} \cdot \frac{x_L + x_R}{p} \quad (7)$$

$$y = y_L \cdot \frac{D}{x_L - x_R} = y_L \cdot \frac{D}{p} \quad (8)$$

$$z = \frac{D \cdot f}{x_L - x_R} = \frac{D \cdot f}{p} \quad (9)$$

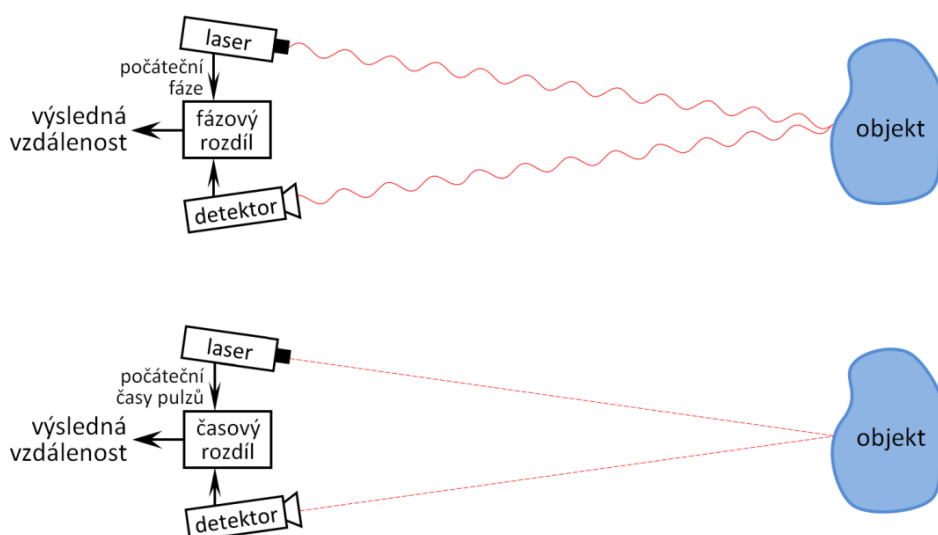
Kde parametr p bývá označován jako horizontální paralaxa a představuje rozdíl mezi x_L a x_R . S ním souvisí úhel γ – tzv. úhlová paralaxa, jež svírají sdružené paprsky mezi měřeným bodem A a ohnisky obou kamer. Pro dosažení dostatečné citlivosti měření je



třeba zajistit, aby tento úhel, potažmo velikost horizontální paralaxy, neklesala pod určité minimum. U profesionálních skenerů bývá úhel mezi kamerami zpravidla v řádu desítek úhlových stupňů. [4]

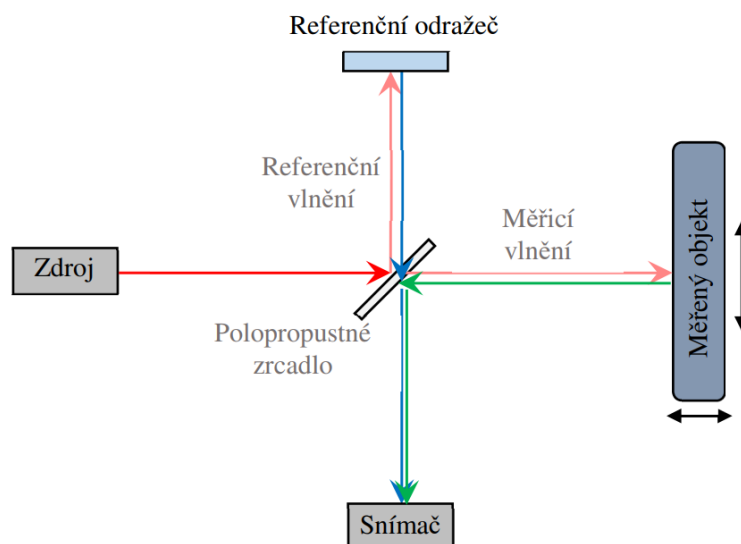
3.1.3 Detekce laserové paprsku

Další z používaných principů bezkontaktní digitalizace povrchu objektu je obecně založen na měření doby letu světelného paprsku. Pro ten je třeba používat monochromatického koherentního světla, mezi jehož zdroje patří nejčastěji lasery. Proto pro systémy pracující na tomto principu také časté označení laserové skenery. Při použití této metody se paprsek světla vyslaný ze skeneru odráží od měřeného objektu a vzdálenost (z-ová souřadnice měřeného bodu) je detekována buď z časového zpoždění (metoda „time-of-flight“) navraceného laserového paprsku (modulovaného světla) nebo měřením jeho fázového posunu (metoda „phase shift“), vycházející nejčastěji z metody optické interferometrie (Obr. 20). V některých případech jsou pro zvýšení přesnosti kombinovány obě metody. [2] [4]



Obr. 20 Základní princip laserových skenerů [4]

Můžeme se setkat s několika druhy modulace signálu (např. pulzní, spojitá, pseudonáhodná) a různými principy optické interferometrie (např. pracující s několika vlnovými délkami, holografická, skvrnová, s bílým světlem). Základní princip optické interferometrie je přiblížen na Obr. 21. Laserový světelný paprsek je na polopropustném zrcadle rozdělen na vlnění referenční a měřicí (signálové). Referenční vlna po odražení od referenčního odražeče interferuje s vlnou odraženou od měřeného předmětu. Jelikož vzdálenost předmětu (měřeného bodu) je na rozdíl od vzdálenosti referenčního odražeče proměnlivá, mění se na základě její polohy i intenzita výsledného vlnění. Jeho vyhodnocením můžeme získat informaci jak o amplitudě vlny, tak i o fázi, resp. fázovém posunu. [1] [3] [4]



Obr. 21 Základní princip interferometru (Michelsonův interferometr) [4]

Výhodou oproti metodě založené na triangulaci je mnohem menší citlivost na optické vlastnosti měřeného povrchu, kdy tyto systémy zpravidla umožňují měřit i lesklé povrchy bez antireflexní úpravy. [4]

3.2 Strukturované světlo

Strukturované světlo je dnes jedním z nejčastějších způsobů, jak zjistit rychle a efektivně požadované informace o povrchu tělesa. Velmi užitečnou vlastností technik využívajících strukturované světlo je bezkontaktní zajištění rekonstrukce celého pole objektů ve vysokém rozlišení. Měřicí proces je realizován profilometrickým systémem, který obsahuje jednotku pro zpracování a analýzu (PC), projekční jednotku (projektor) a vizuální jednotku (CCD kamera). Proces digitalizace začíná projekcí nadefinovaného vzoru na objekt. Vzniklé deformace vzoru vlivem geometrie objektu jsou zaznamenány jednou nebo více kamerami. Modulovaný vzor počítač porovná se vzorem promítaným a použitím vhodného algoritmu vytvoří body orientované v prostoru, tzv. mraky bodů. S těmito body lze dále pracovat a vytvořit souvislý povrch. Za poslední dobu bylo provedeno množství výzkumů, k jejichž kategorizaci lze přistupovat na základě různých kritérií. [8]

Rozdělují se například dle:

- Struktury promítaného vzoru
- Metody vygenerování a projekce vzorů
- Způsobu kalibrace systému
- Velikosti měřících objemů
- Algoritmu pro analýzu obrazu [8]

Pomocí systému se strukturovaným světlem lze zaznamenat geometrii pohybujících se objektů, ovšem na úkor snížení kvality digitalizace. Při skenování statické scény je zapotřebí přidavných upínacích zařízení z důvodu dostatečného zajištění objektu proti pohybu. Mezi upínací zařízení většinou patří speciální rámečky s omezeným rozsahem

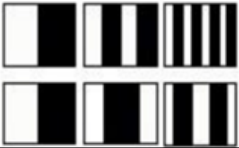










rozměrů upínacího prostoru, sklíčidla nebo svěráky. Při skenování pohybujících se objektů byly základní vzory nedostačující, což vedlo ke vzniku strukturálně složitějších vzorů. Rozdělení vzorů dle struktury je uvedeno v následující kapitole. [9]

Hlavní nevýhodou použití strukturovaných vzorů jsou chyby vznikající měřením lesklých a transparentních povrchů. Promítané paprsky světla se v těchto případech mohou odrazit od povrchu pod nežádoucím úhlem nebo projít skrze povrch. Pokud nemá povrch objektu dostatečnou difúzní odrazivost, dochází ke značnému ovlivnění naměřených dat a naměřené body nemají požadované souřadnice. Nedostatky lze kompenzovat nanesením vrstvy matnějšího prášku na povrch měřeného předmětu. [9]

3.3 Struktury promítaných vzorů

Z důvodu zlepšení přesnosti, rychlosti a kvality měření vznikly nové druhy vzorů, které se tvoří a analyzují odlišnými způsoby. Individualita vzorů přitom zůstává zachována, protože každý má jisté výhody i nevýhody. Vzory se skládají z jednotlivých skupin pixelů majících odlišná kódová slova. Kódová slova jsou mapována v promítaných vzorech na základě úrovně šedé a barevných nebo geometrických reprezentací. Větší množství zakódovaných bodů má za následek složitější mapování ve vzorech, ale i vyšší přesnost. Základní rozdělení vzorů je do tří skupin na temporální, prostorovou a přímou kodifikaci. Kategorizace těchto kodifikací je znázorněna na Obr. 22. Dále se vzory dělí například dle barevné hloubky, vhodnosti pro dynamické měření nebo periodicity kódovaných slov. [10]

Temporální kodifikace	Prostorová kodifikace	Přímá kodifikace
Binární kódy 	Neformální kodifikace 	Stupně šedi 
n-ární kódy 	De Bruijnovi sekvence 	Barevné vzory 
Grayův kód + fázový posun 	M – pole 	
Hybridní metody 		

Obr. 22 Dělení vzorů dle struktury [10]



3.3.1 Temporální kodifikace

Jedna z nejčastěji používaných strategií, která je založena na časovém kódování. V tomto případě se na měřenou plochu postupně promítá sada vzorů. Kódové slovo pro daný pixel je obvykle tvořeno posloupností hodnot osvětlení pro tento pixel napříč promítanými vzory. Proto se kodifikace nazývá temporální (dočasná), protože hodnoty kódových slov jsou v čase multiplexovány. Tento druh vzoru může dosáhnout vysoké přesnosti měření. [12]

Výhody:

- Vysoké rozlišení a přesnost měření řádově v μm , přičemž přesnost určení 3D souřadnic jednotlivých bodů závisí na preciznosti binarizace a lokalizace pruhů
- Vhodnost při skenování barevných objektů

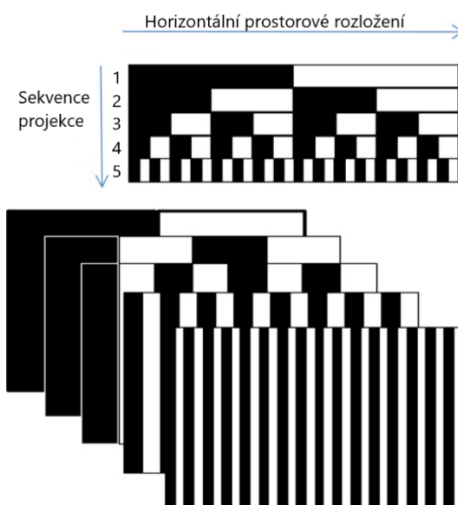
Nevýhody:

- Systémy s temporální kodifikací nelze uplatnit na pohybujících se objektech, aplikovatelné jsou pouze při statickém měření scény
- Počet promítaných vzorů v závislosti na přesnosti roste, což má za následek delší skenovací čas [11]

Vzory s binárním kódem

Binární kódování je založeno na sekvenční projekci vzorů s černobílými pruhy. Vzory jsou kódovány pouze v jednom směru osy. Každý zakódovaný bod je potom identifikován na základě jeho intenzity. Kódová slova přiřazená jednotlivým pixelům jsou posloupností jedniček a nul získaných z promítaných vzorů.

Obecně platí, že maximální počet promítaných pruhů udává rozlišení projektoru v pixelech. Kamera nemusí mít požadované rozlišení pro bezpečnou identifikaci pruhů, a proto se maximální počet pruhů nedoporučuje. Technika projekce vzorů s binárním kódem je spolehlivá a méně citlivá na povrchové vlastnosti objektu. Nicméně v rámci zvýšení prostorového rozlišení stále zůstává nevýhodou nutnost pořízení většího počtu snímků a s tím spojená časová náročnost. [11]

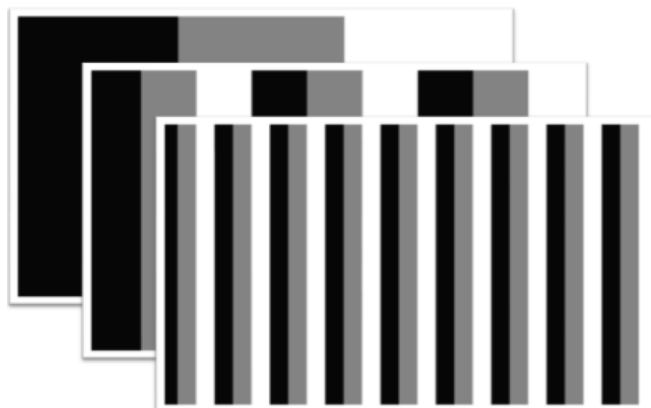


Obr. 23 Binární kódování [13]



Vzory s n-árním kódem

Vznikly za účelem snížení počtu promítaných vzorů při aplikaci binárního kódování rozšířením šedého kódu o abecedu n symbolů tak, že každý symbol abecedy reprezentuje určitou barvu z RGB modelu. Sekvence promítaných vzorů je patrná z Obr. 24. [13]

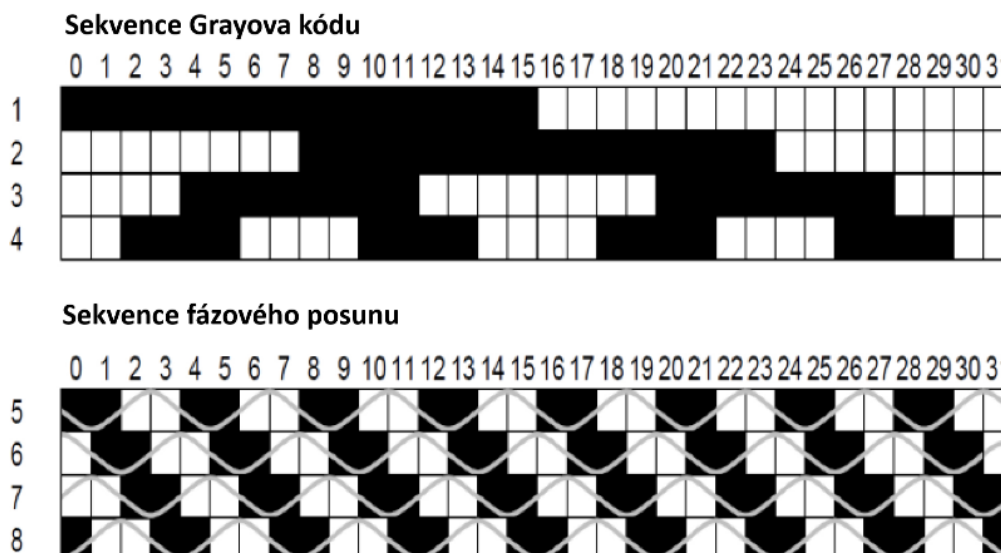


Obr. 24 Ukázka vzorů s n-árním kódem [13]

Kombinace Grayova kódu a fázového posuvu

Při aplikaci metody fázového posuvu se promítají sinusoidální vzory (periodický černobílý gradient). Projekce fázově posunutých sinusoidálních vzorů má své opodstatnění především ve vysokém prostorovém rozlišení (na subpixelové úrovni). Nedostatky fázového posuvu souvisejí s nerovnoměrností povrchu objektu. Je-li nespojitost dvou povrchů větší než dovolená, nedojde k úplnému rozbalení fáze a vznikají jisté nepřesnosti měření.

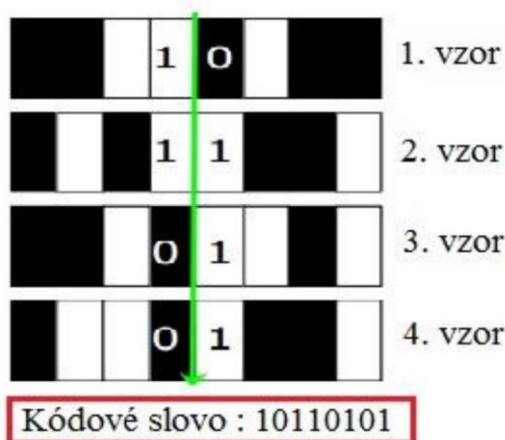
Vzory založené na Grayově kódu, stejně jako binární a n-ární kódy, mají výhodu v tom, že kodifikace pixelů je provedena přesně a při kodifikaci není třeba brát v úvahu žádné prostorové sousedství. Diskrétní povaha takových vzorů však omezuje rozsah rozlišení. Kromě toho metody fázového posuvu využívají vyšší prostorové rozlišení, protože několikrát promítají vzor periodické intenzity tím, že jej posunují v každé projekci. Nevýhodou těchto metod je periodická povaha vzorů, která zavádí nejednoznačnost při určování period signálu v obrazech kamery. Integrace metod Grayova kódu s metodami fázového posuvu spojuje výhody obou strategií, tj. jednoznačnost a robustní kodifikaci vzorových pruhů, plus vysoké rozlišení. Kombinace obou technik vede k vysoce přesné 3D rekonstrukci. [13]



Obr. 25 Kombinace G kódu a fázového posuvu [13]

Hybridní metody

Oproti ostatním metodám temporální kodifikace je snížen počet promítaných vzorů. Speciálně navržený algoritmus přiřazuje v aktuálním snímku hranice pruhů k místům s nejvyšším gradientem světelné intenzity. Výstupem algoritmu je kód charakterizující hranice dvou sousedních pruhů (viz Obr. 26).



Obr. 26 Kódování vzorů na hranicích pruhů [15]

Zvláštností hybridních metod je schopnost zachycení pomaleji se pohybujících objektů, protože při kodifikaci vzoru je zahrnuta i prostorová okolní informace pixelů.

3.3.2 Prostorová kodifikace

Oproti temporální kodifikaci není nijak časové závislá, protože měření scény se realizuje pouze jedním snímkem. Kódové slovo pixelu je tvořeno na základě informací o barvě nebo intenzitě pixelů v jeho blízkém okolí. Velikost takového okolí je pak přímo úměrná počtu zakódovaných bodů a nepřímo úměrná počtu použitých barev. Problém zde nastává, pokud se v blízkosti okolí daného pixelu objeví nespojitosti povrchu objektu nebo jeho stíny. [13]



Výhody:

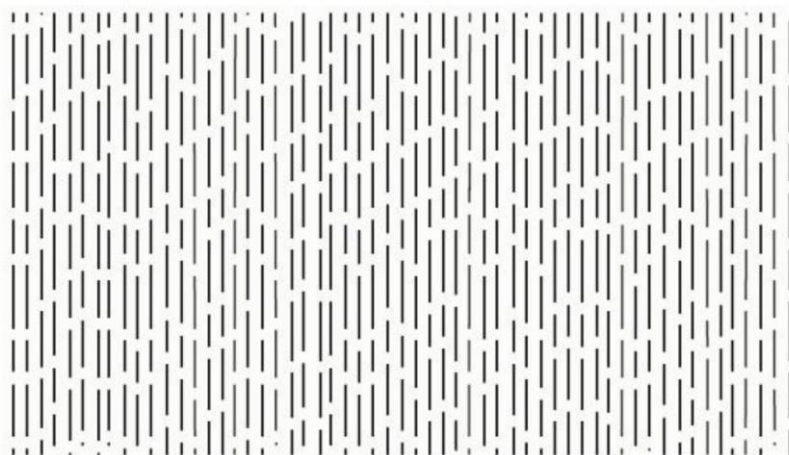
- Lze zaznamenat především pohybující se objekty
- Možnost situovat veškerý kódovací systém do jednoho vzoru

Nevýhody:

- Rozlišení není maximální (nižší než u temporální kodifikace)
- U vzorů s obsáhlejším počtem barev je složitější dekódování
- Nespojité povrchy objektů způsobují chyby v měření [11]

Neformální kodifikace

Využívá speciálně navržené vzory bez aplikace dosavadních matematických základů, kde jsou kódová slova získávána z menších podoblastí. Vzniklé segmenty jsou mapovány ve vzorech pomocí jejich pozic a vlastní délky. Ve vzoru zachyceném kamerou jsou s ohledem na sousedící segmenty dekódovány ty segmenty, které délkově odpovídaly těm promítaným. Po nalezení všech shod je pro určení zbývajících segmentů aplikován regionální růstový algoritmus. Délka těchto segmentů je závislá na použité optice a vzdálenosti kamery a projektoru od měřeného objektu. Příklad promítaného neformálního vzoru je uveden na Obr. 27. Snímání barevně složitých objektů není u této metody doporučováno. Koherence barevných paprsků s měřeným povrchem totiž způsobuje chyby v dekódování. [13]



Obr. 27 Vzorec neformální kodifikace [13]

De Bruijnovy vzory

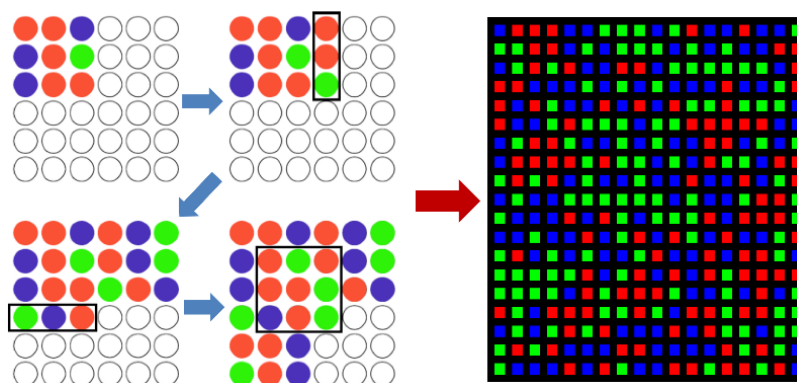
Na rozdíl od předchozích technik neformální kodifikace koriguje de Bruijnova posloupnost nedostatky, které vznikají v důsledku opakujících se okolí bodů. Vytváří totiž unikátní vzory bez opakujících se okolí. Zjednodušeně řečeno jsou pomocí této metody vytvořena kódová slova tak, že žádné z nich není ve výsledku obsaženo dvakrát. Toho je dosaženo například pomocí barevného vzoru, který obsahuje konkrétní pruh pouze jedenkrát. [13] [16]



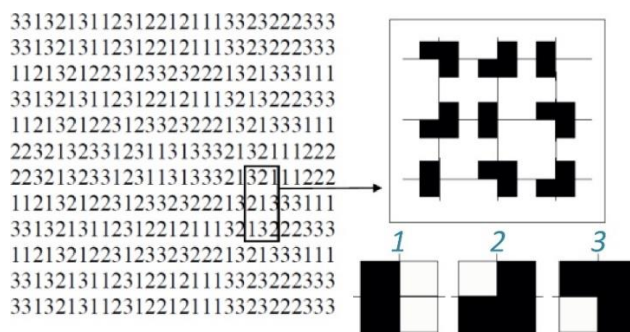
Obr. 28 Projekce de Bruijnova vzoru [16]

M-pole

Matice mají využití v mnoha různých oborech. Pro rekonstrukci měřeného objektu se využívá matematických vlastností matic, tzv. M-polí. Použití polí ke kódování vzoru znamená, že se používá dvourozměrné kódovací schéma, protože každý bod vzoru má jiné kódové slovo, které kóduje vertikální i horizontální souřadnice. Vzory tvořené M-polem jsou generovány pomocí pseudonáhodných sekvencí. Na základě reprezentujících elementů jsou tyto techniky rozděleny do dvou základních skupin. První skupinou jsou vzory obsahující barevné tečky, přičemž každá tečka reprezentuje jeden ze symbolů kódovací abecedy (viz Obr. 29). Druhou skupinou jsou vzory složené z geometrických tvarů, kde je každý tvar přiřazen k příslušnému symbolu (viz Obr. 30). Tato skupina využívá tzv. ternárního kódování. Prvky v poli musí mít rozdílná kódová slova korespondující nejen s vlastní hodnotou, ale také s hodnotou čtyř sousedních prvků. [13]



Obr. 29 Kódování barevnými tečkami [13]



Obr. 30 Ternární kódování vzorů [11]

3.3.3 Přímá kodifikace

Existují určité způsoby, jak vytvořit vzor, tak že každý pixel může být označen reprezentovanou informací. Celé kódové slovo pro daný bod je tedy obsaženo v jedinečném pixelu. Aby toho bylo dosaženo, je nutné použít buď velký rozsah barevných hodnot nebo zavést periodicitu. Teoreticky lze získat vysoké rozlišení 3D informace. Nicméně, citlivost na šum je velmi vysoká, protože "vzdálenost" mezi "kódovými slovy", tj. použité barvy, je téměř nulová. Navíc zobrazované barvy závisí i na vlastní barvě měřicí plochy. To ve většině případů znamená, že musí být pořízen jeden nebo více referenčních snímků. Proto tyto techniky nejsou typicky vhodné pro dynamické scény. Přímá kodifikace je obvykle omezena na neutrální barevné objekty nebo světlé objekty. Z tohoto důvodu je to nutné vnímat a identifikovat celé spektrum barev, což vyžaduje „ladící“ fázi, které není vždy snadné dosáhnout (v závislosti na použitých zařízeních). [10]

Existují dvě skupiny metod využívajících přímou kodifikaci. První kodifikace založená na úrovni šedi (ke kódování bodů vzoru se používá spektrum úrovní šedé) a druhá kodifikace na základě barvy (tyto techniky využívají velké spektrum barev).

Výhody:

- Snížení počtu promítaných vzorů
- Vysoké rozlišení

Nevýhody:

- Přijímaný signál je více náchylný na šum
- Nutnost speciálních projektorů a kamer
- Nevhodné pro zachycení dynamické scény
- Malá přesnost [11]

Vzory s úrovněmi šedé

Využívají vzory s gradientem úrovně šedé barvy. Malá přesnost měření (řádově v cm).



Obr. 31 Vzor s úrovněmi šedé [18]

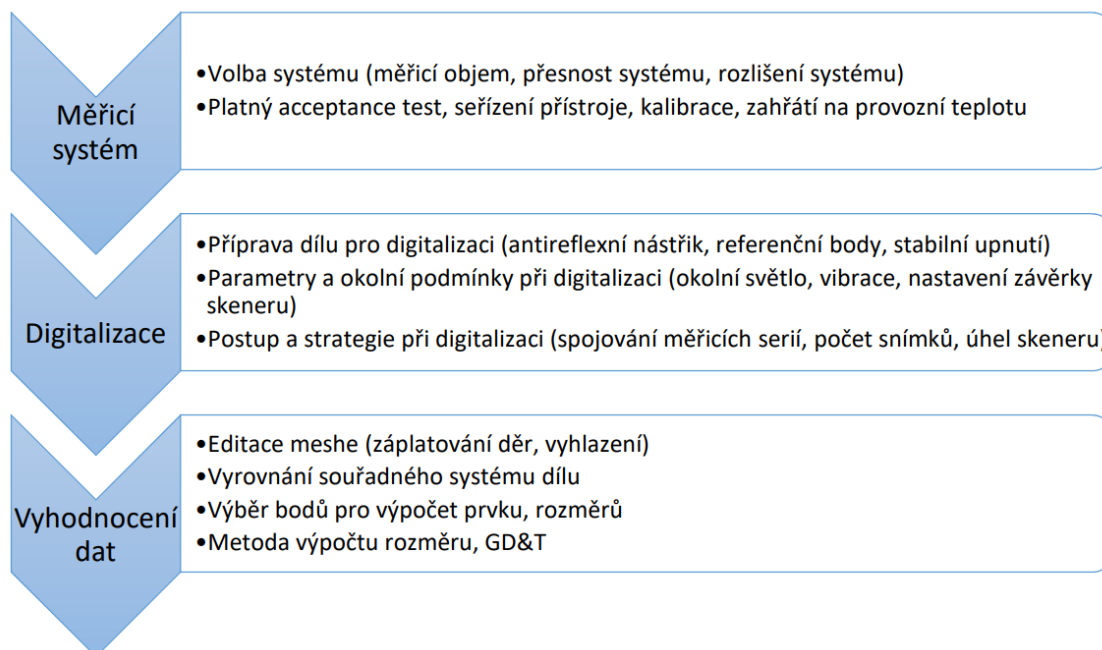
Barevné vzory

U této metody se využívají stejný princip jako u metody s úrovněmi šedi. Pouze zde se používá barva ke kódování pixelů namísto použití úrovní šedé. [17]

3.4 Faktory ovlivňující rozměrovou přesnost

Bezkontaktní 3D skenování se v současné době stále častěji využívá nejen pro účely reverzního inženýrství, dokumentaci památek nebo ve zdravotnictví, ale také pro účely inspekce rozměrových a tvarových charakteristik (rozměrů, úhlů, GD&T) výrobků. Při této kontrole je správnost zjištěných rozměrových a tvarových veličin ovlivněna mnoha aspekty. Na rozdíl od kontaktního měření (např. na CMM), kde je samozřejmě také důležité zvolit správnou strategii snímání a vyhodnocení, je u bezkontaktní digitalizace parametrů ovlivňujících výsledek podstatně více.

Proměnné, které mohou ovlivnit správnost a kvalitu naměřených dat, lze u inspekce pomocí bezkontaktních skenerů rozdělit zhruba do tří základních skupin, jak je znázorněno na Obr. 32. Prvním krokem je volba správného systému pro digitalizaci, druhá oblast zahrnuje korektně provedenou digitalizaci a poslední, třetí skupina shrnuje bezchybné vyhodnocení naskenovaných dat. [4]



Obr. 32 Parametry ovlivňující přesnost inspekce [4]



Pouze při dodržení správných postupů ve všech třech oblastech bude pravděpodobné, že naměřené hodnoty jedním operátorem na určitém zařízení se budou shodovat s výsledky, které zjistí jiný operátor, na jiném zařízení v jiné firmě. Praxe však ukazuje, že tomu tak není, přestože v rámci nejistoty měření by měly být výsledky teoreticky srovnatelné. [4]

3.4.1 Měřicí systém

Volba systému

Prvním krokem pro zajištění kvalitní digitalizace a následně správného výsledku měření je volba vhodného měřicího systému - v případě bezkontaktního skenování - vhodného optického nebo laserového 3D skeneru. Jeho výběr bude vycházet především z charakteristiky měřeného výrobku a jeho rozměrů. Musíme se zaměřit na tyto klíčové parametry:

- Velikost výrobku
- Minimální tolerance, které je třeba vyhodnotit
- Minimální rozměry (detaily), které je třeba měřit
- Dostupnost geometrií pro měření
- Barva a povrch výrobku
- Tuhost výrobku

Velikost výrobku bude klíčová pro volbu vhodného měřicího objemu (přístroje s potřebnými pracovním rozsahem). Některé systémy mají pevný pracovní rozsah, nebo rozsah nastavitelný pouze softwarově. Řada skenerů využívající především triangulační metody dovoluje nastavení polohy kamery vůči projektoru, díky čemuž umožňují skenovat různě velké součásti bez výměny optiky. Profesionální systémy, pak řeší změnu měřicího objemu hardwarově, a to výměnou objektivů kamer a projektoru. To sice klade vyšší nároky na obsluhu, ale díky tomu lze dosáhnout vysoké přesnosti měření se širokou škálou rozměrové variability. Příklad měřících objemů, které výrobce nabízí pro systém Comet L3D 2 je uveden v tabulce níže. [4]

Tabulka 1 Měřicí objemy dostupné pro systém Comet L3D 2 [51]

	FOV [mm]	Objem [mm ³]	Vzdálenost bodů [μm]
L3D 2 5M	45	45x38x30	18
	75	74x62x45	30
	100	118x98x60	48
	250	255x211x140	105
	500	481x404x250	196

Minimální tolerance, které je požadováno dle výkresu vyhodnotit, musí být větší, než je definovaná přesnost (maximální chyba) zvoleného metrologického systému. Máme-li měřit rozměry s přesností na desetiny mm, lze 3D skener, jehož chyba měření je definována v setinách mm, použít. Pokud by však na výkresu byly tolerované rozměry v řádu setin, nebo dokonce tisícín mm, je samozřejmě již nutné volit přesnější systém



měření (typicky CMM), než je bezkontaktní digitalizace. V opačném případě nelze zjištěné výsledky považovat za relevantní, neboť budou mít velmi velkou nejistotu měření. [4]

Minimální rozměry (detaily), které jsme schopni bezkontaktní digitalizací změřit, souvisí s rozlišením skenovacího systému. Tento parametr je v případě optických 3D skenerů ovlivněn především rozlišením CCD čipu kamer a velikostí použitého měřicího objemu. S rostoucím měřícím objemem roste zároveň i minimální vzdálenost mezi naměřenými body na povrchu součásti (nižší hustota mraku bodů). Tento parametr je směrodatným údajem pro odhad toho, jaký minimální detail (prvek, plochu) jsme na díle schopni zaznamenat, a tedy i změřit a vyhodnotit. U vnitřních geometrií je pak neschopnost skenovat malé geometrie ještě markantnější. [4]

Geometrie dílu je též důležitá pro posouzení vhodnosti použití optické digitalizace. Obecně není 3D skenování příliš vhodné pro měření opticky nepřístupných geometrií, typicky např. hlubokých otvorů, vnitřních prohlubní, rohů, drážek apod. Bude-li tedy požadavkem takové geometrie na naskenovaném díle vyhodnocovat, je třeba zvážit vhodnost tohoto systému měření. Pokud se jedná o ojedinělá těžko přístupná místa, lze optickou digitalizaci kombinovat s dotykovou sondou (tzv. Touch probe) a dané místo doměřit kontaktním způsobem. V případě složitých vnitřních struktur je pak vhodné zvolit např. počítačovou tomografii. [4]

Barva a povrch výrobku mohou také hrát klíčovou roli při volbě vhodného měřicího systému. Zatímco při kontaktním měření je tento atribut zcela irelevantní, při bezkontaktním měření naopak velmi podstatný. Laserové skenery obecně nemají takový problém s lesklými povrchy jako skenery založené na optickém principu. Skenery používající rastrovou projekci jsou v tomto ohledu na nevhodné optické vlastnosti měřeného povrchu mnohem náchylnější a v některých případech může být problematická i nevhodná kombinace barvy světla projekční jednotky skeneru a barvy měřeného objektu. Nejobtížnější jsou pro skenování průhledné, lesklé či černé povrchy. Požadujeme-li tedy skenovat výrobek, který má nevhodné optické vlastnosti, je často jedinou cestou využití zmatňujících nástřiků např. na bázi křídý či titanové běloby. Nastane-li tato situace, je třeba dále posoudit dvě otázky. Prvně je třeba rozhodnout, jaký prostředek na zmatnění použijeme (prostředky mají různé vlastnosti a dosahují různé tloušťky nástřiku – možné ovlivnění rozměrů). Za druhé je třeba mít na zřeteli, zda přípravek nemůže znehodnotit měřený díl. Z neporézních materiálů lze ve většině případů přípravek poměrně lehce umýt, pokud ale bude třeba přípravek aplikovat na porézní materiál, textil, historický exponát apod., je nutné si ověřit, zda aplikací díl neznehodnotíme a můžeme přípravek použít. [4]

Tuhost výrobku je pro posouzení metodiky měření také podstatná. Je-li měřený díl velmi poddajný (guma, měkké plasty, velké plechové výlisky apod.), není často možné ho měřit kontaktním způsobem. Při dotyku sondy s povrchem by se výrobek deformoval a docházelo by ke zkreslení naměřených hodnot. V tomto případě je tedy měření bezkontaktním způsobem ve velké výhodě. Pokud je možné díl oskenovat v jedné poloze, stačí ho dle požadavku volně položit na měřicí stůl, případně dle potřeby fixovat do přípravku a provést digitalizaci. Při ní již na díl nepůsobí žádné síly, a je tedy zaznamenán jeho skutečný tvar. Pokud je ale nutné pro kompletní digitalizaci díl zaznamenat v několika pozicích (typicky během měření díl otočit, pro nasnímání druhé



strany) i zde je třeba přizpůsobit strategii měření konkrétním podmínkám. Zásadní je, aby při změně pozice dílu pro měření (při jeho otočení) nedošlo k jeho deformaci. Poddajný díl je proto vhodné fixovat do přípravku nebo volit takové polohy pro měření, ve kterých je ohybová tuhost dílu nejvyšší a nehrozí např. průhyb jeho vlastní vahou. [4]

Seřízení a kalibrace přístroje

Budeme-li vycházet z předpokladu, že pro měření byl jako vhodný přístroj zvolen optický 3D skener, je v dalším kroku třeba zajistit, aby tento přístroj měřil relevantně. Za tímto účelem musíme dodržet postupy stanovené výrobcem, provádět kalibrace v předepsaných intervalech či zajistit ověřování přístroje v akreditační laboratoři. U optického 3D skeneru se jedná především o tyto úkony:

- Platný Acceptance test (zkouška / kalibrace v certifikované laboratoři, u výrobce apod.)
- Seřízení přístroje
- Uživatelská kalibrace přístroje

To, že přístroj měří v deklarované přesnosti, je při jeho koupi doloženo kalibračním listem nebo tzv. Acceptance testem. Působením okolních vlivů však přístroj může časem ztrácet svoji přesnost, a proto je doporučováno v pravidelných intervalech nechat přístroj znovu zkalibrovat nebo zkontrolovat akreditovanou kalibrační laboratoří.

Úkony, které je třeba učinit pro seřízení přístroje, jsou závislé na konkrétním zařízení. Obecně u optického 3D skeneru jde především o nastavení zaostření kamery a projektoru, nastavení clony objektivu, případně seřízení laserových ukazovátek. Úplné nastavení senzoru je vyžadováno pouze tehdy, pokud příslušná sada objektivů nebyla v minulosti nikdy používána nebo došlo k dekalibraci.

Zásadním krokem celého procesu přípravy měření je uživatelská kalibrace přístroje. Kalibrace je proces měření, při kterém probíhá nastavení měřicího systému pomocí kalibračních objektů tak, aby byla zajištěna rozměrová stálost měřicího systému. Při tomto procesu software stanovuje geometrické parametry (např. pozici a orientaci jednotlivých kamer) na základě zaznamenaných obrazů kamery. Dále jsou stanoveny zobrazovací charakteristiky objektivů kamer a kamerových čipů. Na základě tohoto nastavení vypočítává software z bodů kalibračního objektu v 2D obrazu kamery jejich 3D souřadnice. Vypočítané 3D souřadnice jsou pak přepočítány zpět na 2D obrazy kamery. Nejběžněji používané kalibrační objekty jsou deska nebo kříž. Obecně má každý měřicí objem svůj kalibrační objekt. [4]



Obr. 33 Kalibrační desky [51]

Dle výrobce je uživatelská kalibrace vyžadována před prvním spuštěním měření s nově nainstalovanou sadou objektivů. Systém dále vyžaduje opakovanou uživatelskou kalibraci v případě, že se změnilo nastavení objektivů kamer nebo vzájemná pozice kamer. Uživatelskou kalibraci je také nutné opakovat, pokud systém hlásí možné rozkalibrování. Pro zajištění vysoké přesnosti měření je vhodné systém uživatelsky kalibrovat také v případě, že byl transportován (byl vystaven vibracím), došlo k výraznější změně teploty okolí, a obecně v pravidelných časových intervalech. A to i v případě, že neměníme hardware nastavení kamer, nebo systém sám nehlásí nutnost recalibrace.

Celý proces kalibrace je řízen softwarem, je postupováno dle průvodce kalibrace. Na počátku kalibračního procesu je třeba zadat teplotu nechat systém zahřát na kalibrovanou teplotu. Dále je nutné podle použitého senzoru nastavit měřící vzdálenost ke kalibračnímu objektu. Samotná kalibrace pak spočívá v pořízení několika snímků kalibračního artefaktu v definovaných vzdálenostech a úhlech vzhledem k senzoru. [4]

3.4.2 Digitalizace

Pokud jsme zvolili vhodný systém pro digitalizaci, je správně seřízen a kalibrován, můžeme přistoupit k samotnému procesu skenování. Jeho cílem je převést reálný výrobek do digitální podoby k dalšímu zpracování. I v tomto kroku je třeba dodržovat doporučené postupy, aby proces digitalizace proběhl korektně a počítačový model výrobku, který bude sloužit dále k inspekci rozměrů, odpovídal reálné předloze s co možná nejvyšší přesností.

Příprava dílu pro měření

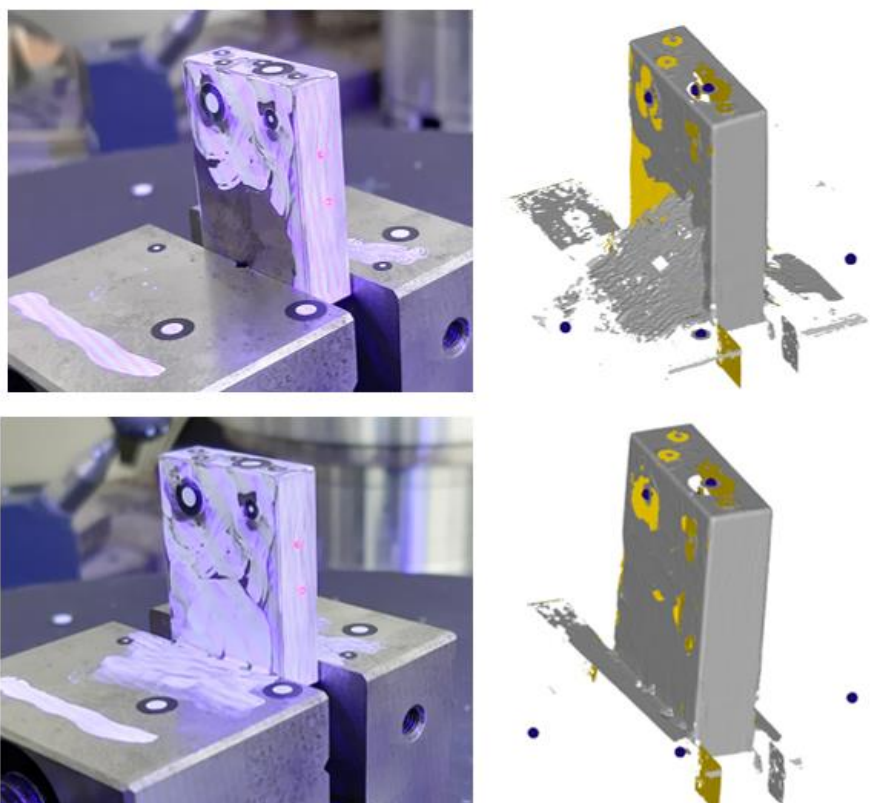
Prvním krokem digitalizace je příprava měřeného objektu. Ta spočívá zejména v umístění referenčních značek, často také v aplikaci matného nástřiku a spolehlivém upnutí dílu na měřicí stůl (do přípravku). Klíčové jsou tedy tyto body:

- antireflexní nástřik
- referenční body
- upnutí dílu



Matnící prášky mají zásadní vliv na kvalitu a přesnost bezkontaktního měření. Z hlediska antireflexního nástřiku je důležité si položit otázku, zda nástřik použít či ne, pokud ano-jaký použijeme přípravek a jakým způsobem ho budeme aplikovat (technika nanesení). Digitalizace povrchu měřeného objektu probíhá tak, že skener promítá na měřený díl rastrový vzor, který pak snímá kamera. Pokud je kontrast rastru příliš nízký, program nebude schopný vypočítat 3D body. Protože se kontrast odvíjí od typu povrchu, je z tohoto pohledu ideální matný a světlý povrch. Naopak problematické pro digitalizaci jsou průhledné (průsvitné) povrchy, u kterých dochází k rozptylu světla, černé povrchy, které světlo pohlcují, nebo lesklé povrchy, u kterých dochází k nechtěnému odrazu. [4]

V první řadě je tedy nutné rozhodnout, zda je pro daný díl nutné (bez něho by nebylo možné díl vůbec zdigitalizovat) použít úpravu povrchu matnícím přípravkem. Tak můžeme učinit na základě povrchových vlastností dílu a vlastních zkušeností. Zřejmá nutnost pro aplikaci přípravku je u průhledných a poloprůhledných materiálů a ve většině případů i u lesklých materiálů, zejména při použití optických skenerů. Černé výrobky je také lépe zmatnit. Snáze tak naskenujeme hůře přístupná místa, naskenovaný model bude kvalitnější a skenování se díky zkrácení doby expozice zrychlí. Na obrázku níže je prezentován vliv lesklého, kdy při nezmatnění spodní poloviny koncové měřky a přilehlého povrchu svěraku dojde k přiřazení naměřených dat do absurdní pozice.



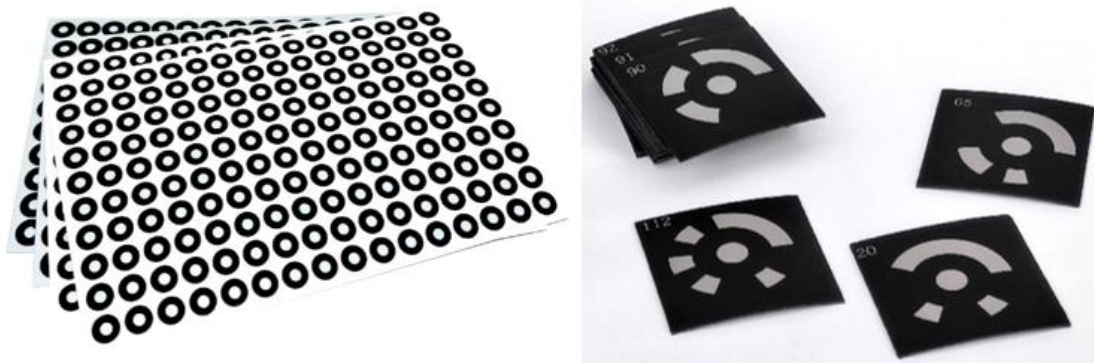
Obr. 34 Vliv lesklého povrchu

Příprava součásti na optickou digitalizaci dále spočívá v nalepení referenčních bodů (u systémů, které to vyžadují). Ty jsou vyžadovány zejména v případě, kdy je úkolem digitalizovat součást větších rozměrů, složitějšího tvaru a u skenování na více měřicích sérií (typicky oboustranné skenování). Pro celkovou digitalizaci je u takových úloh



provedeno mnoho jednotlivých měření (skenů) a ty jsou spojeny s pomocí společných referenčním bodům do jednoho celku. U měření na jeden záběr naopak referenční značky nepotřebujeme. [4]

Referenční značky se liší svojí velikostí, tvarem, kvalitou a dalšími parametry. Nejčastěji se používají značky kruhového tvaru (bílý kruh uprostřed černého pole, případně negativně). Jejich průměr je doporučen výrobcem a odvíjí se od rozlišení CCD čipu a měřicího objemu. Body mohou být samolepící, magnetické, se zvýšenou odolností proti vysokým teplotám (keramické) apod. Dále rozlišujeme body nekódované a kódované.



Obr. 35 Referenční body (vlevo nekódované lepicí; vpravo kódované magnetické) [51]

Při optické digitalizaci nejsou na pevné upnutí dílu kladeny tak vysoké nároky, jako při kontaktním měření (na díl nepůsobíme silou). V případě, že skenujeme bezkontaktním systémem, který používá pro transformaci jednotlivých snímků v prostoru referenční body, máme několik možností. Body umísťujeme pouze na měřený objekt, mimo měřený objekt (na přípravek, měřicí rámeček apod.) nebo volíme kombinaci.

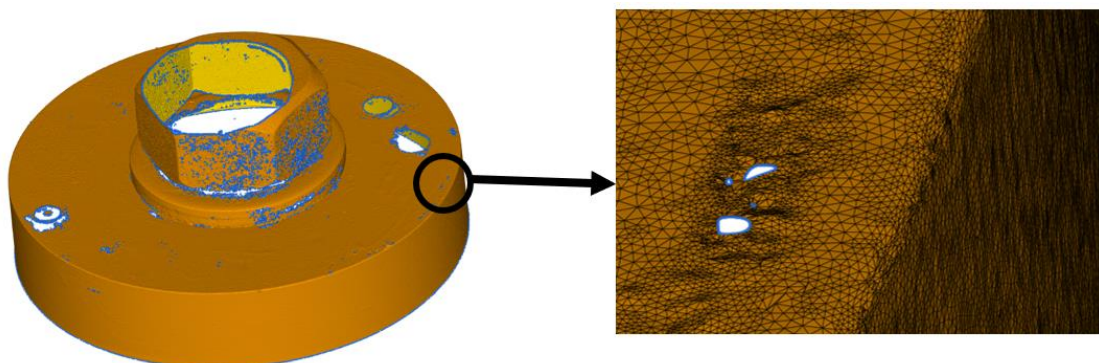
Velké objekty, které nemají vlastní stabilitu (např. velké plechové výlisky), je vhodné (někdy nutné) upevnit do měřicího přípravku. Body pak lze umístit na přípravek a při výměně dílu tak ušetříme čas pro lepení nových bodů. Pro velmi malé objekty, na které by bylo body problematické umístit, se často používají speciální měřicí rámečky s předem proměřenými body, do kterých díl upínáme pomocí upevňovacích hrotů. Především pro jednodušší objekty mnohdy postačí díl volně položit (případně fixovat např. pomocí speciální plastelíny) na rotační skenovací stůl, a body nalepit na desku stolu. [4]

3.4.3 Vyhodnocení dat

Po digitalizaci následuje ve většině případů softwarová úprava naskenovaných dat. V první řadě je doporučováno odstranit nežádoucí části skenu (přípravek, pomocná geometrie, šum apod.), u oboustranného skenování navzájem vyrovnat individuální měřicí série (transformovat do společného souřadného systému s využitím společných referenčních bodů) (viz předchozí kapitola), nechat přepočítat celý projekt (dojde k opětovnému zpřesňujícímu vyrovnání všech dílčích snímků vůči sobě) a nakonec spustit polygonizaci takto připraveného mraku bodů. Během ní SW dále upraví zachycené měřicí body a převede je do jediné optimalizované sítě nepřesahujících trojúhelníků. V závislosti na zakřivení povrchu měřeného objektu má polygonální síť



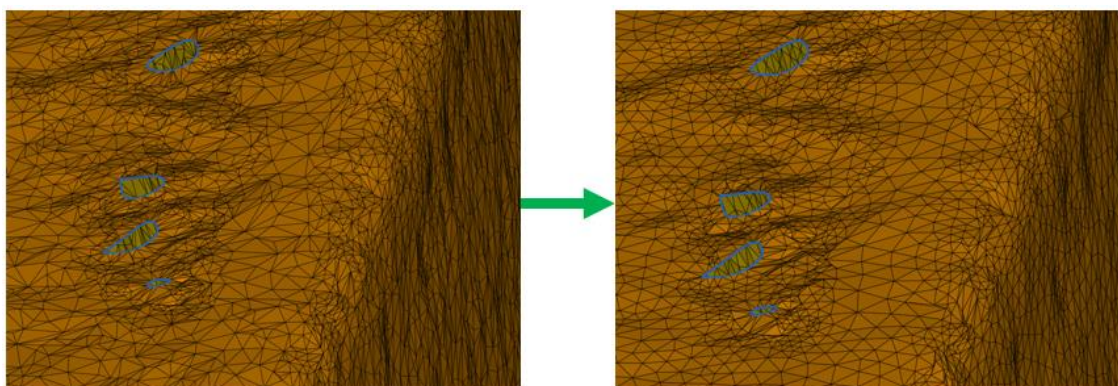
různou hustotu (viz Obr. 36). Během polygonizace software s ohledem na šum specifický pro daný senzor provádí mimo jiné následující kroky: odstranění chyb sítě, vyplnění referenčních bodů (pokud uživatel povolí tuto možnost), vyhlazování, ředění. Postprocessing sítě polygonů lze změnit v pěti nebo šesti krocích. Vzniklý model (nazýván např. jako polygonální síť, mesh, STL model) je primárním výstupem procesu 3D skenování. Výstupními formáty pro uložení jsou např. .g3d, .ply, .pol nebo pravděpodobně nejznámější a nejpoužívanější formát .stl. Model lze dále uživatelsky editovat ve speciálních programech – síť softwarově zjemňovat nebo naopak redukovat, vyhlazovat, záplatovat nežádoucí otvory apod. Nejčasnější využití nalézá při inspekci, výrobě aditivními technologiemi či přímým CNC obráběním, nebo pro účely reverzního inženýrství. [4] [51]



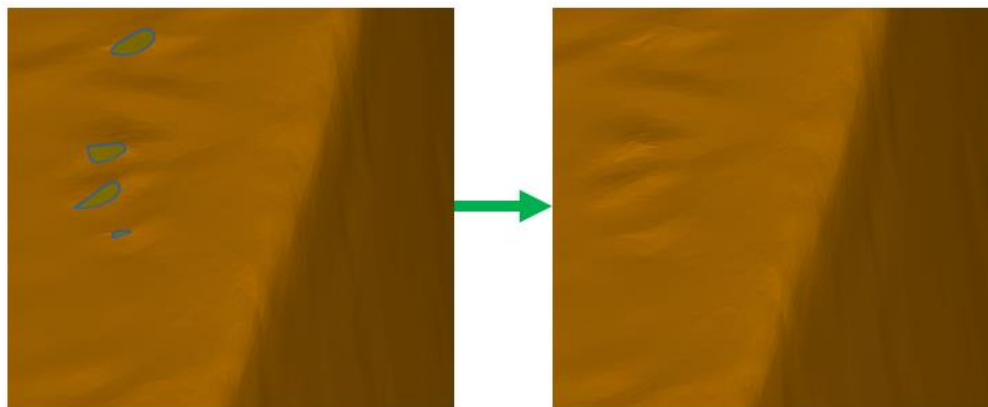
Obr. 36 Detail polygonální sítě

Editace meshe

Pokud budou data dále sloužit pro tvorbu 3D modelu (reverzní inženýrství) či pro přímý 3D tisk, je zpravidla třeba výraznější úprava trojúhelníkové sítě, zacelení děr, vyhlazení apod. Bude-li však model sloužit k inspekci rozměrů a tvaru, je naopak k jakýmkoliv úpravám třeba přistupovat obezřetně a s velkou opatrností, abychom neuváženým zásahem neovlivnili výsledek kontroly. Na obrázcích níže jsou prezentovány některé editační funkce, konkrétně jsou to funkce Zpravidelnění sítě, která má za funkci optimalizovat strukturu trojúhelníkové sítě, a funkce Upravit otvory, která má za cíl úplné nebo částečné vyplnění otvorů a tvorbu můstků. [4] [51]



Obr. 37 Příklad funkce zpravidelnění sítě

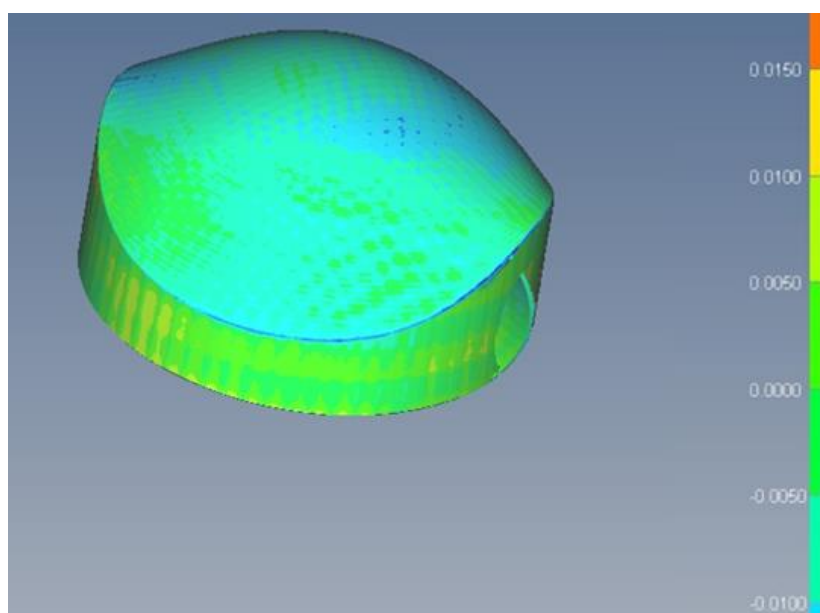


Obr. 38 Příklad funkce úpravy otvorů

Vyrovnání souřadného systému dílu

Při kontaktním měření je uživatelské vyrovnání dílu v souřadném systému prováděno zpravidla již před vlastním měřením přímo na stroji. Naopak při optické digitalizaci je objekt naskenován v souřadném systému skeneru, trackeru apod. a jeho zarovnání do požadovaného souřadného systému je prováděno až ve vyhodnocovacím SW na virtuálním modelu (aktuálním modelu). Vyrovnání tedy předchází samotné inspekci a je to jedna z prvních operací, které je vhodné s modelem po importu do vyhodnocovacího SW provést.

Pokud není k dispozici nominální CAD model, provede se vyrovnání nejčastěji metodou 3-2-1 (rovina – přímka – bod), dle geometrických elementů (tři roviny, 2 otvory a rovina, osa a otvor apod.) dle výkresu nebo uvážení uživatele. Je-li k dispozici nominální model, lze kromě výše uvedených ustavení volit i další metody, jako je například vyrovnání metodou BestFit, kdy SW hledá nejlepší shodu mezi povrchovými body CAD modelu a aktuálního modelu přes celý model, resp. ve vybraných lokálních oblastech. Především v automobilovém průmyslu je také často používáno ustavení pomocí referenčních bodů, tzv. ustavení RPS. [4] [51]



Obr. 39 Barevná mapa při vyrovnání BestFit



4. Cíl práce a přehled souvisejících prací

4.1 Cíl práce

Kontrola přesnosti a kvality výrobků patří mezi důležité kroky ve výrobním procesu. Ještě donedávna byla kontrola součástí, tedy měření rozměrové a tvarové přesnosti, nejčastěji prováděna konvenčními metodami, například dotykovým způsobem na souřadnicovém měřicím stroji. Měření tímto způsobem je velmi přesné, ve většině případů však poskytuje pouze diskrétní informace o předepsaných rozměrech, které jsou porovnávány s kótami a tolerancemi tvaru podle výkresu. Principiální omezení způsobu získávání souřadnic bodů těmito přístroji se projeví například při kontrole tvarově složitých ploch. Pro změření souřadnic bodu na povrchu dílu je nutné se ho mechanicky dotknout. Pro detailní a přesný popis tvaru povrchu dané plochy je nutné získat dostatečně hustou síť bodů, což je časově velmi náročné. Nejen proto se v současné době stále častěji začínají i v průmyslu k měření a kontrole používat optické měřicí systémy, tzv. 3D skenery.

Hlavním cílem této práce byla analýza přesnosti měření vybraných artefaktů bezkontaktním optickým skenerem pracujícím na principu proužkové projekce modrého světla. Tedy ověření, jaké byly odchylky mezi výsledky měření na souřadnicovém měřicím stroji a výstupy z 3D optického skenování. Dílčím cílem bylo stanovení opakovatelnosti měření 3D optickým skenerem a posouzení tloušťky a vlivu nanesených permanentních a sublimujících matných vrstev.

Pro experiment byly vybrány celkem čtyři artefakty reprezentující základní měřené charakteristiky. Prvním byla matná koule, na které probíhalo vyhodnocování jejího průměru, dále nastavovací kroužek, kde vyhodnocovala velikost průměr otvoru, pak kalibrační kroužek, u kterého vyhodnocovanou charakteristikou byl průměr vnějšího válce a posledním artefakt byla koncová měrka, na které se vyhodnocovala vzdálenost rovin.



Obr. 40 Zvolené artefakty (vlevo nahoře koncová měrka ,vlevo dole kalibrační kroužek, vpravo nahoře matná koule, vpravo dole nastavovací kroužek)

4.2 Použité statistické charakteristiky

Naměřené výsledky byly statisticky vyhodnoceny v programu Microsoft Excel, kde se především sledovala směrodatná odchylka, aritmetický průměr, rozpětí a medián. [66] [67]

- Výběrový průměr – charakterizuje symetrická či slabě nesymetrická rozdělení. Vyjadřuje průměrnou hodnotu měřeného znaku

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

n ... počet hodnot, x_i ... konkrétní hodnota

- Medián – prostřední hodnota řady vzestupně uspořádaných hodnot

$$Me = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \quad \dots \text{pro lichý počet } n \quad (11)$$

$$Me = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}}{2} \quad \dots \text{pro sudý počet } n \quad (12)$$

- Výběrové rozpětí – rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou výběru

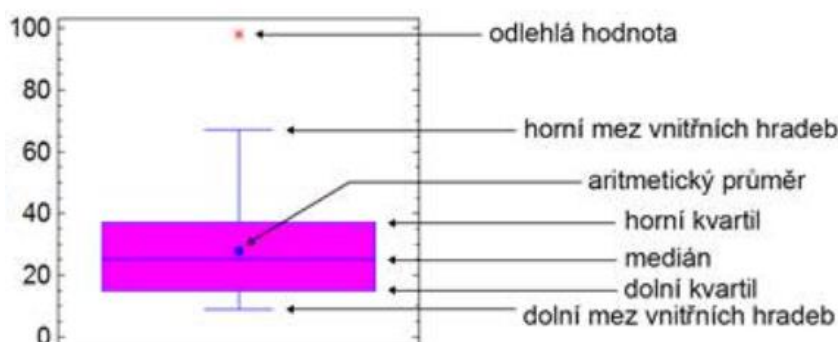
$$R = x_{max} - x_{min} \quad (13)$$



- Výběrová směrodatná odchylka – ukazuje, jak jsou hodnoty proměnné rozptýleny kolem průměru. Malá směrodatná odchylka nám říká, že hodnoty proměnné jsou koncentrovány kolem průměru.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (14)$$

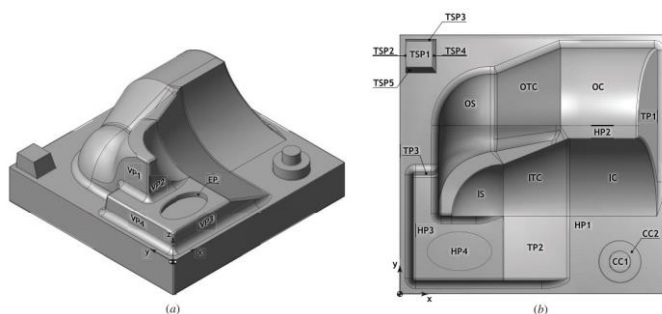
- Krabicový graf – je grafické vyjádření rozložení dat ve statistickém souboru, které znázorňuje rozpětí, kvartily, medián, odlehlé hodnoty a extrémní hodnoty tohoto souboru.



Obr. 41 Krabicový graf [67]

4.3 Přehled souvisejících publikací

Přesnosti skenování se věnuje výzkum v [58] (2010). V příspěvku je poukazováno na fakt, že díky zvýšení přesnosti a opakovatelnosti jsou 3D optické skenery stále častěji využívány nejen pro oblast reverzního inženýrství, ale také pro kontrolu kvality, a že jsou vhodnou alternativou k souřadnicovým měřicím strojům (CMM). Je též zmiňována německá směrnice VDI / VDE 2634 jako jediný možný referenční materiál k posouzení, zda 3D optické měřicí systémy odpovídají deklarovaným nebo požadovaným výkonovým specifikacím. Přesto je dle autora obtížné porovnat různé skenery v souladu s touto směrnicí. V článku proto nabízí adekvátní nový standard. Se zaměřením na kontrolu výrobních nástrojů (forem) navrhl s využitím běžných geometrických prvků a ploch volného tvaru inovativní zkušební díl. Celková absolutní odchylka mračna bodů získaná skenerem GOM Atos III byla v souladu s přesností optického zařízení (0,02 mm) deklarované výrobcem. Tento závěr potvrdily také výsledky srovnávacích testů klasických geometrií.



Obr. 42 Referenční CAD model (a) a seznam referenčních prvků (b) [58]



Vědecký tým T. Brajlíha [59] (2011) provedl výzkum možnosti použití 3D skenování pro inspekci obrobků. Dosažení rozměrové přesnosti optického skeneru ATOS II bylo testováno na řadě koncových měrek opatřených antireflexním nástřikem na bázi titanového prášku (TiO₂). Z řady deseti měření byla určena směrodatná odchylka 7,1 mm (pro koncovou měrku o jmenovité délce $l = 20$ mm), resp. 5,9 mm (pro $l = 50$ mm) a 11,2 mm (pro $l = 70$ mm).

Výzkum autora Mongona [61] (2012) se zabývá otázkou použitého světla u skenerů pracujících na principu projekce strukturovaného světla. Článek popisuje klady a zápory osvětlení bílým světlem (celé spektrum), které kontrastuje s použitím vybraných komponentních barev. Je vysvětleno, že výběr barev osvětlení (vlnových délek) se může pohybovat od infračerveného (IR) po ultrafialové (UV), včetně viditelného spektra. Různá pásma vlnových délek mohou být výhodná v různých kategoriích aplikací, např. použití IR je prospěšné pro kulturní dědictví a biometrické skenování, modrá pro skenování pokožky. V práci je také vyhodnocován vliv různých barev na skenování lesklých povrchů.

C. Bernal [62] (2013) se svým týmem analyzovali přesnost měřicího systému Comet LED pomocí lepicí pásky, kterou použili místo antireflexního nástřiku. Naměřenou bílou neprůhlednou pásku o tloušťce 0.06 mm porovnávali s náměry objektů ošetřených bílým práškem.

Práce kolektivu autorů pod vedením Martínez-Pellitero S. [60] (2018) hodnotí výkonové a provozní limity rozměrové přesnosti 3D optického skenování založené na technologii projekce s modrým světlem (skener AICON SmartScan). Etalon použitý k výzkumu byl vyroben z matného bílého keramického materiálu a referenční rozměry byly změřeny na souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Image. V rámci výzkumu se autoři věnovali také analýze vlivu softwaru skeneru na výsledky měření. Kromě toho byly provedeny různé testy pro několik měřicích objemů snímače. Výsledky ukázaly, že software Optocat provádí počáteční filtrování před generováním sítě STL, což mírně prospívá výsledkům měření. Dále bylo zjištěno, že měřicí objem 850 mm přinášel v některých ohledech přesnější výsledky, než měřicí objem 400 mm. A to i přesto, že druhý jmenovaný poskytuje vyšší rozlišení dat. Pravděpodobným důvodem je nutnost pořídit více dílčích skenů a vznikající chyba při jejich následném skládání. Průměrná odchylka průměrů koulí od referenčních dat se pohybovala od -0,1 mm do +0,1 mm, odchylka průměrů válců byly zhruba poloviční. Chyba tvaru koule byla v rozmezí 0,3 - 0,5 mm, u válce 0,1 - 0,35 mm.

Porovnání kontaktního měření a optického 3D skenování se ve své práci věnuje Návrat [63] (2019). V praktické části porovnává měření na optickém 3D skeneru ATOS Triple Scan 16M (pro MV170 a MV 320) a souřadnicovém měřicím stroji Wenzel LH 65 – X3M Premium. Pro experiment byl zvolen ověřovací etalon využívaný pro tzv. Acceptance testy s označením GOM Probing / Spacing Artefact 400. Z výsledků dle očekávání vyplynulo, že CMM měření poskytuje stálejší hodnoty s mnohem nižší mírou nejistoty měření.

V dostupné literatuře lze nalézt i výzkumy, věnující se cíleně problematice antireflexních nástřiků a jejich vlivu na přesnost měření. Autor Dokoupil [61] (2013) provedl experimentální zjištění odchylek měření optického systému ATOS Triple Scan při aplikaci



matnících přípravků. Cílem výzkumu popsaného v této literatuře je stanovení nejistoty měření při opakovaném nástřiku křídovým a titanovým práškem a určení tloušťky vrstvy matnících prášků. Ve své práci zmiňuje, že jedním z hlavních vnějších faktorů ovlivňující přesné měření za pomoci optického skeneru je příprava měřeného objektu - ošetření zmatňující vrstvou. Tloušťka vrstvy musí být dostatečná, jinak by nedošlo ke kvalitnímu zmatnění povrchu, zároveň nesmí ale ovlivnit výsledky měření. Dochází k závěrům, že na každém z použitých etalonů (kalibrační kroužek, kalibrační koule, koncová měrka) se vrstva projevuje odlišně. Po zpracování veškerých dat a určení nejistot autor zjistil, že křídový prášek dosahuje zhruba dvojnásobné nejistoty měření v porovnání s titanovým nástřikem. U křídového prášku je také mnohem vyšší tloušťka 0.029 ± 0.006 mm, oproti 0.006 ± 0.003 mm pro titanový prášek.

Další významný výzkum zaměřený na vliv matnících nástřiků na přesnost 3D optického měření publikoval Paloušek [64] (2015). Práce se zabývala určením odrazivosti světla, určením geometrických odchylek a statistickému zpracování dat. Autoři ve svém článku popisují problémy, které se mohou vyskytnout při skenování bez použití zmatňujících nástřiků a zároveň vysvětlují, kdy je vhodné nástřik použít. Jelikož výrobce zmatňujících přípravků udává velmi přesné podmínky pro měření (teplota, osvětlení a zkušený personál), kterými může být výsledek měření ovlivněn. Výzkum vedl ke zjištění, že zatímco křídový povlak může v průměru dosahovat tloušťky až 44 μ m, použitím antireflexního nástřiku na bázi titanové běloby se tloušťka sníží zhruba desetkrát na úroveň kolem 5 μ m.

Cílem práce autorky Levínské [65] (2017) bylo provést experimentální porovnání série přípravků pro zmatnění povrchu a popsat jejich vliv na přesnost 3D digitalizace. K porovnání byly vybrány přípravky různých dodavatelů primárně věnované 3D skenování, ale i vývojky určené pro penetrační zkoušky. Skenování bylo prováděno za pomoci optického skeneru ATOS II, porovnávané přípravky byly nanášeny na válcovém kalibru a sadě koulí. Z výzkumu vyplynulo, že nejvhodnějším prostředkem pro úpravu povrchu je oxid titaničitý. Při použití tohoto přípravku bylo dosaženo nejtenčí vrstvy (průměrně 8 μ m) a byl prokázán nejmenší vliv na přesnost měření z hlediska rozměrových charakteristik. Přijatelných výsledků bylo dosaženo i při použití antireflexního nástřiku křídovým sprejem 3-D Helling a vývojky Ardrex s průměrnou tloušťkou 13 μ m, resp. 16 μ m. Je však nutné mít na zřeteli, že skenované rozměry jsou ovlivněny nejen zvoleným přípravkem a množstvím nanášeného prášku, ale také podkladovým materiálem. Bylo prokázáno, že nedostatečná vrstva může výrazně zkreslit výsledky měření geometrie tvaru prvků (rovinnost, válcovitost apod.). Tento vliv byl velmi výrazný především u nástřiku TiO_2 a 3D Helling, u kterých geometrická odchylka válcovitosti kalibru dosahovala při slabém nástřiku až 40 μ m v porovnání s 10 μ m při standardně silném nástřiku. Z experimentu tedy vyplývá, že antireflexní nástřik je třeba provést nejen rovnoměrně, ale je podstatné nalézt kompromis mezi slabou a silnou tloušťkou vrstvy tak, aby výsledky měření nebyly ovlivněny jak nedostatečným nástřikem (hrozí nedokonalé oskenování a zvýraznění chyby tvaru), tak nadbytečně silnou vrstvou (vyšší ovlivnění skutečného rozměru kontrolovaného dílu). To vyžaduje značnou zkušenost a zručnost obsluhy.



5. Průběh měření na souřadnicovém měřicím stroji

Získání nominálních hodnot všech artefaktů probíhalo na souřadnicovém měřicím stroji (CMM) Carl Zeiss UMC 1000 Carat. Pracovní prostor stroje je 1000x3000x900 mm. Software pro tvorbu plánu měření a pro následné vyhodnocení bylo Zeiss Calypso 2020.



Obr. 43 Zeiss UMC 1000 Carat

5.1 Měřicí konfigurace

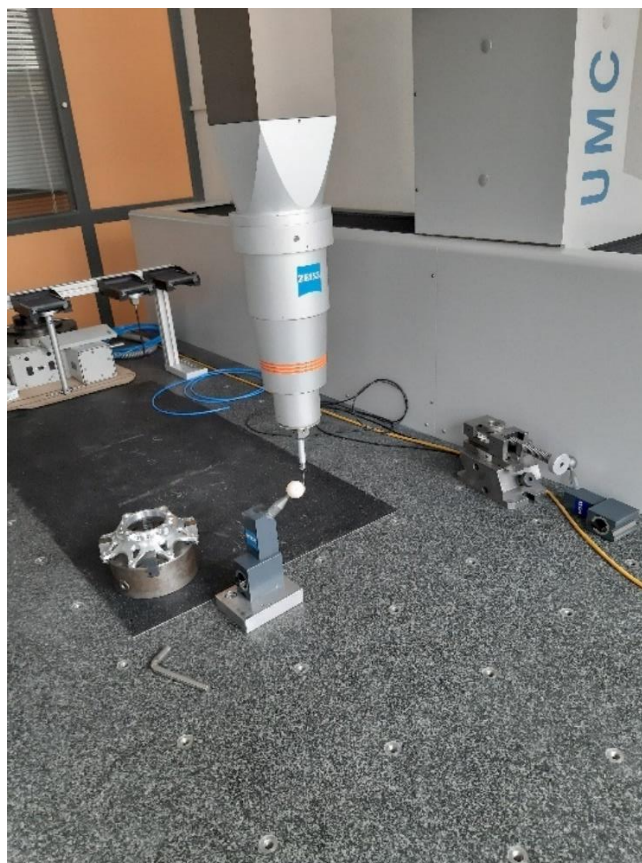
Dalším krokem bylo vytvoření měřicí konfigurace. Měřicí konfigurace byla složena z upínacího talířku, na který byla připevněna spojovací kostka, do níž se uchytilo thermofitové prodloužení, na jehož konci se nacházel snímač ve směru -Z. Snímač byl tvořen snímacím dotekem v podobě rubínové kuličky o průměru 3 mm.



Obr. 44 Měřicí konfigurace

Před samotným měřením bylo zapotřebí připravit stroj. Začátkem přípravy byla kvalifikace snímacího systému. Kvalifikace snímacího systému spočívala v zaměření polohy kalibrační (kvalifikační) koule referenčním snímačem a z výsledků byly zjištěny hodnoty korekce snímače. Kalibrační koule se rozuměla koule se známým průměrem, která byla dřívkem spojená s měřícím stolem. Pro určení její polohy bylo potřeba využít referenční snímač. Tyto snímače jsou obvykle značeny červenou tečkou.

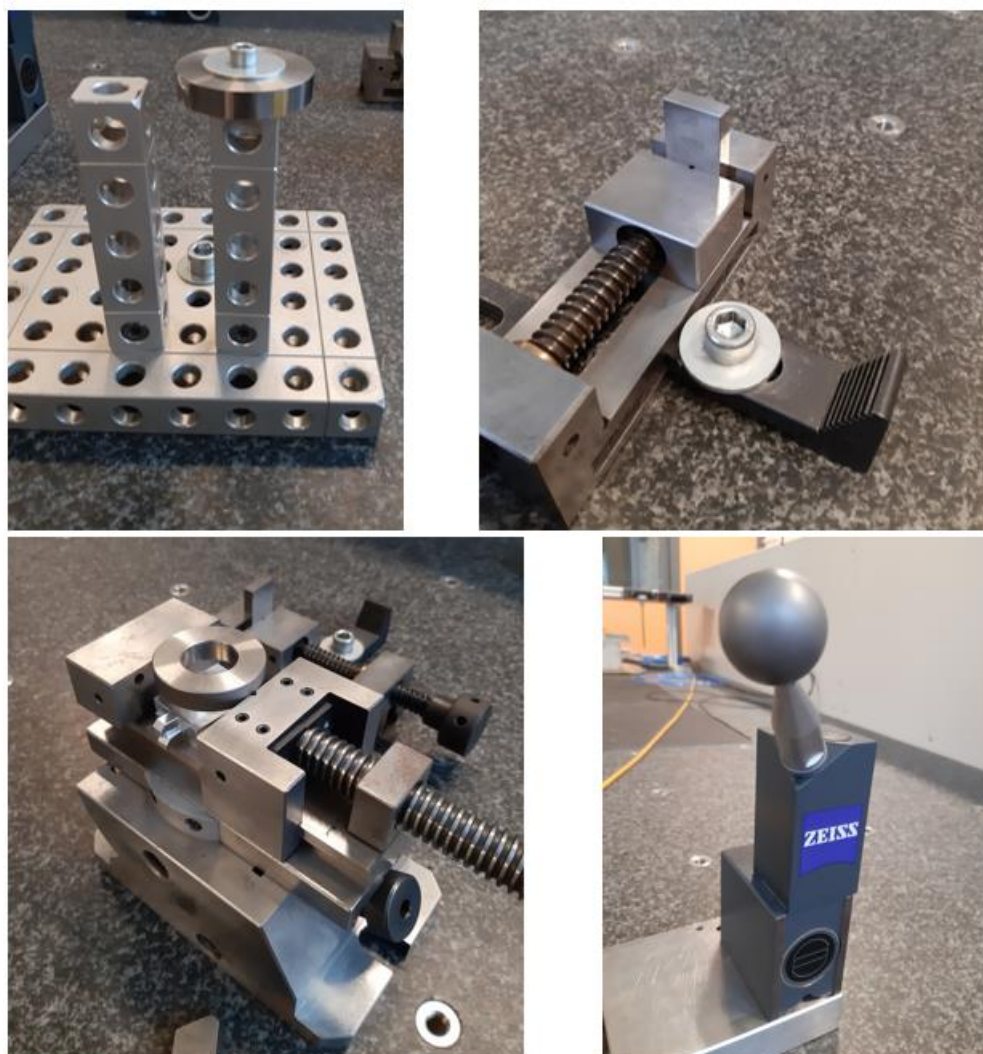
Po kvalifikaci snímacího systému, sestavení měřicí konfigurace a jejím upnutí do pinoly souřadnicového měřicího stroje se provedla verifikace konfigurace snímače. Verifikace snímače probíhala na totožné kalibrační kouli jako v případě kvalifikace. Po určení polohy kalibrační koule stroj provede verifikaci zvoleného snímače a vypíše výsledek tohoto kroku. Tento úkon se musí provést u každého snímače, který obsahuje měřicí konfigurace a u všech měřících konfigurací, které se budou používat při měření.



Obr. 45 Průběh verifikace

5.2 Definování upnutí

Prvním krokem bylo upnutí zkoumaných artefaktů, které je zobrazeno na Obr. 46. Pro kalibrační kroužek se využil stavebnicový upínací systém Alufix od firmy WITTE, jenž se připevnil k pracovní desce souřadnicového měřicího stroje a pomocí šroubu přes podložku se do něj upnul kalibrační kroužek. Koncová měrka se upnula do malého svěráku, který byl posléze taktéž připevněn k pracovní desce souřadnicového stroje pomocí upínek. K upnutí nastavovacího kroužku se taktéž využilo svěráku, který se pomocí šroubu s podložkou připevnil k pracovní desce. Matná koule byla umístěna v magnetickém držáku, který se upnul pomocí magnetu na ocelovou desku, jenž byla k pracovní desce připevněna pomocí šroubu.



Obr. 46 Upnutí měřených součástí (vlevo nahoře kalibrační kroužek, vlevo dole nastavovací kroužek, vpravo nahoře koncová měrka, vpravo dole matná koule)

5.3 Tvorba plánů měření a vyhodnocení

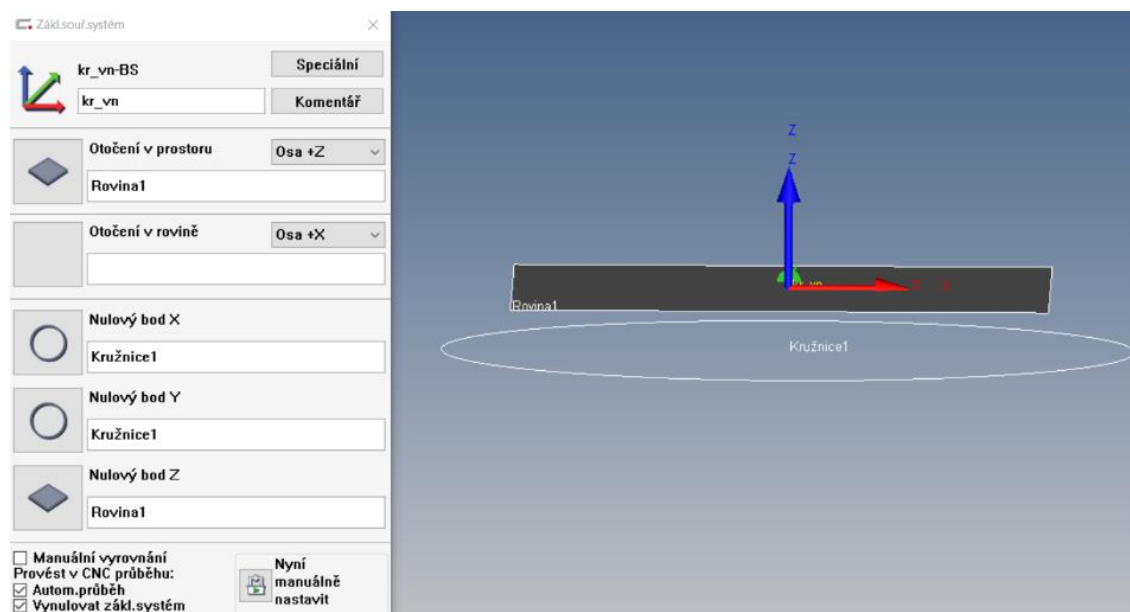
Cílem bylo naměřit charakteristiky k získání referenčních hodnot sloužící k pozdějšímu porovnání s výsledky optického skenování z pohledu přesnosti a opakovatelnosti procesu. Plán měření byl vytvořen v softwaru Calypso od firmy Zeiss. Byl tvořen bez použití CAD modelů. Základní geometrické prvky byly ručně nasnímány a přeneseny do Calypsa. Parametry strategie a vyhodnocení měření se volily dle manuálu výrobce stroje. U společnosti Zeiss pro tento účel byla vytvořena publikace Cookbook - measuring strategies for tactile Coordinate Metrology. K získání dostatečného množství dat se u každého elementu provedlo deset měření.

5.3.1 Kalibrační kroužek

Měřenými charakteristiky byly 3x vnější průměr a kruhovitost. Na vnější průměry se vybral jako geometrický prvek element kružnice, na kterém bylo provedeno vyhodnocování kruhovitosti.



Vyrovnaní součásti v plánu měření a určení souřadného systému bylo na základě vrchní roviny a kružnice, jak je zobrazeno na obrázku níže. V tomto případě nebylo nutné určit natočení součásti (vzhledem k symetrii součásti).

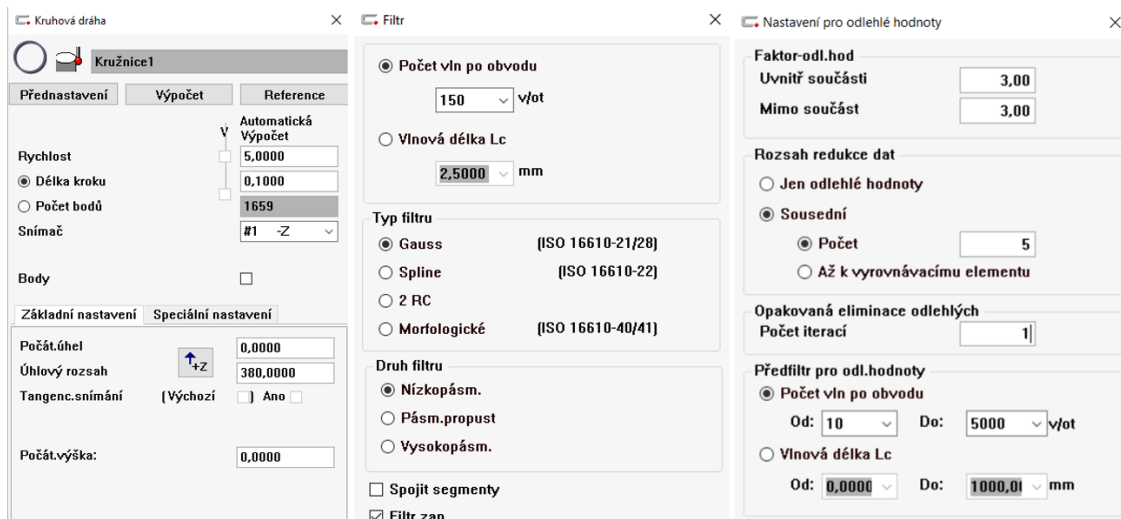


Obr. 47 Vyrovnání kalibračního kroužku

V plánu měření se stanovily nejprve základní elementy, které byly použity právě pro vyrovnání a doplnily se elementy, které jsou potřebné pro vyhodnocení potřebných charakteristik.

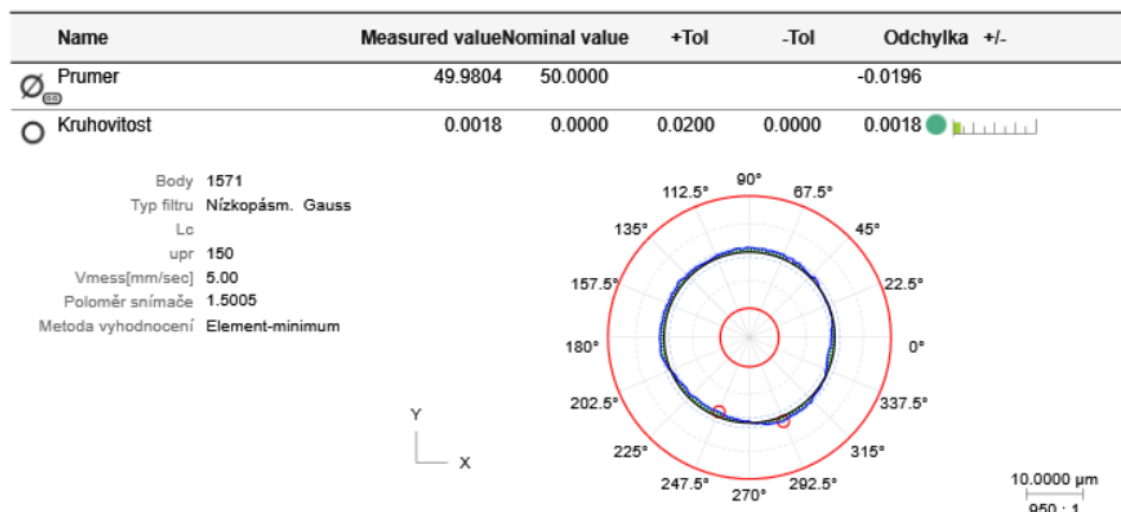
Pro naměření elementů bylo potřeba určit strategie, kterými budou snímány body definující tyto elementy. Vytvořily se tři elementy kružnice ve třech hladinách Z (Kružnice1: Z=-4,5 mm; Kružnice2: Z=-1 mm; Kružnice3: Z=-8 mm), pro které se zvolila shodná strategie kruhové dráhy. Pro dráhy se definovala rychlost snímání 5 mm/s, délka kroku 0,1 mm a úhlový rozsah 380°.

Pro vyhodnocení charakteristik se použila filtrace dat. Zde se určily parametry počtu vln po obvodu 150 v/ot, typ filtru Gaussův a druh filtru nízkopásmový. Následně byla využita eliminace odlehlých dat, kdy se nastavil faktor odlehlé hodnoty na 3 hodnoty uvnitř i mimo součást, rozsah redukce dat na 5 a předfiltraci odlehlých hodnot na počet vln od 10 do 5000 v/ot.



Obr. 48 Parametry strategie a vyhodnocení kalibračního kroužku

Vyhodnocení změřených charakteristik bylo možné zobrazit v různých grafických znázornění ať už 2D nebo 3D. Dále bylo možné využít některý z protokolů, které software Calyso nabízí jako například prezentační protokol či vícenásobný protokol.



Obr. 49 Vícenásobný protokol kalibračního kroužku (Kružnice1)

Výsledná naměřená data jsou zobrazena v tabulce níže. Nejdůležitější parametr z toho souboru byl celkový průměr, ten byl poté využitý pro konstrukci CAD modelu užitému k porovnání.



Tabulka 2 Naměřená data kalibračního kroužku

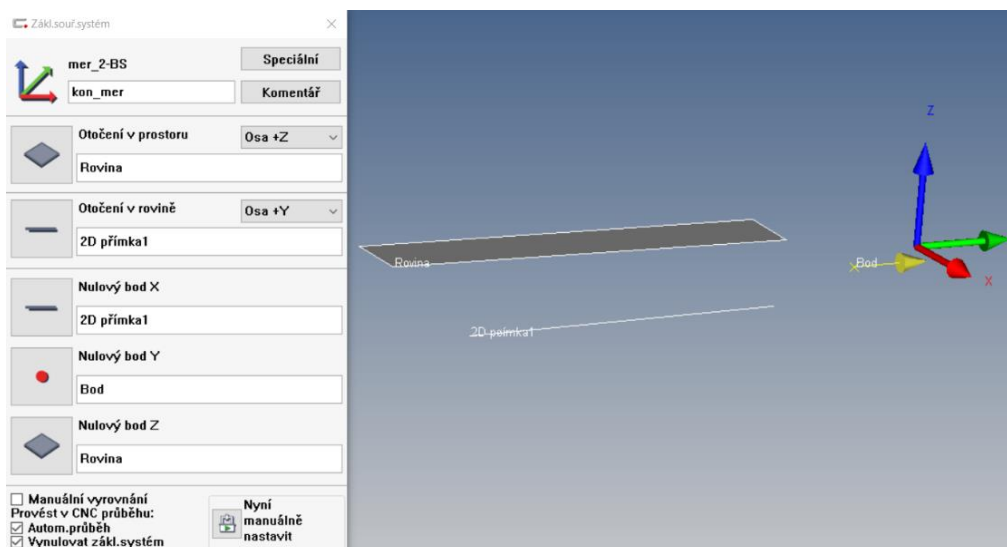
Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	49,9804	49,9794	49,9802	0,0021	0,0019	0,0021
2	49,9804	49,9793	49,9802	0,0020	0,0018	0,0021
3	49,9805	49,9794	49,9801	0,0018	0,0018	0,0021
4	49,9804	49,9793	49,9801	0,0019	0,0019	0,0021
5	49,9804	49,9794	49,9801	0,0021	0,0019	0,0021
6	49,9804	49,9793	49,9801	0,0021	0,0018	0,0020
7	49,9804	49,9793	49,9802	0,0020	0,0017	0,0021
8	49,9804	49,9793	49,9802	0,0018	0,0019	0,0021
9	49,9804	49,9793	49,9802	0,0018	0,0017	0,0021
10	49,9804	49,9793	49,9802	0,0018	0,0017	0,0021
	Průměr [mm]			Kruhovitost [mm]		
\bar{x}	49,97997			0,00195		
s	0,00047			0,00015		
Me	49,9802			0,0020		
x_{max}	49,9805			0,0021		
x_{min}	49,9793			0,0017		
R	0,0012			0,0004		

Naměřená data udávala průměrnou hodnotu průměru kalibračního kroužku 49,97997 mm se směrodatnou odchylkou 0,00047 mm. Vyhodnocovaná hodnota kruhovitosti nabývala v průměru hodnoty 0,00195 mm.

5.3.2 Koncová měřka

Měřenými charakteristiky byly 2x rovinnost a vzdálenost v ose. Na zkoumané plochy se využil element rovina, na kterých bylo provedeno vyhodnocování rovinnosti a vzdálenosti mezi nimi.

Vyrovnání součásti v plánu měření a určení souřadného systému bylo na základě vrchní roviny, 2D přímky na čelní ploše s označením a prostorového bodu z pravé strany.



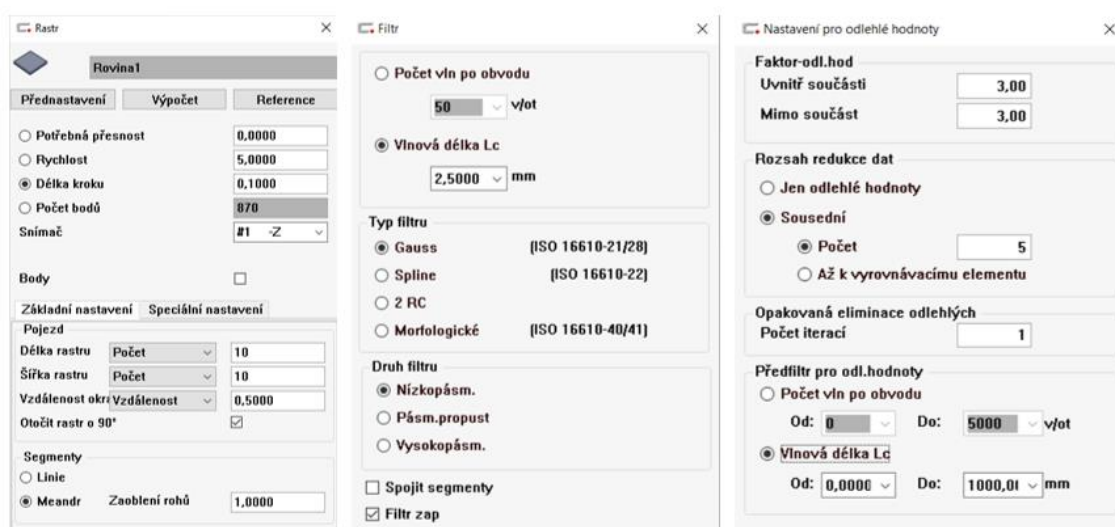
Obr. 50 Vyrovnání koncové měřky



V plánu měření se opět stanovily nejprve základní elementy, které byly použity právě pro vyrovnání a doplnily se elementy, které jsou potřebné pro vyhodnocení potřebných charakteristik.

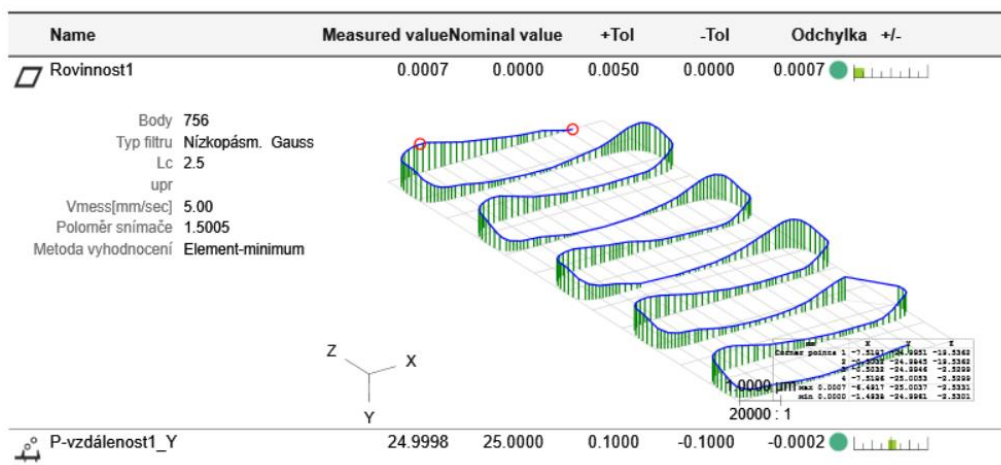
Pro naměření zkoumaných elementů, bylo potřeba určit strategie, kterými se snímaly body definující tyto elementy. Vytvořily se dva elementy roviny, pro které se zvolila shodná strategie rastru. Pro dráhy se definovala rychlost snímání 5 mm/s, délku kroku 0,1 mm a zaoblení rohů 1 mm.

Pro vyhodnocení charakteristik se použila filtrace dat. Zde se určily parametry vlnové délky 2,5 mm a typ filtru Gaussův. Následně se využilo eliminace odlehlých dat, kdy se nastavil faktor odlehlé hodnoty na 3 hodnoty uvnitř i mimo součást a rozsah redukce dat na 5 hodnot.



Obr. 51 Parametry strategie a vyhodnocení koncové měřky

Vyhodnocení změřených charakteristik je pro demonstraci zobrazeno v rámci vícenásobného protokolu na obrázku níže.



Obr. 52 Vícenásobný protokol koncové měřky (Rovina 1)



Kompletní výsledná naměřená data jsou zobrazena v tabulce níže. Nejdůležitější parametr z toho souboru je vzdálenost mezi rovinami, která se využila pro konstrukci CAD modelu užitému k porovnání.

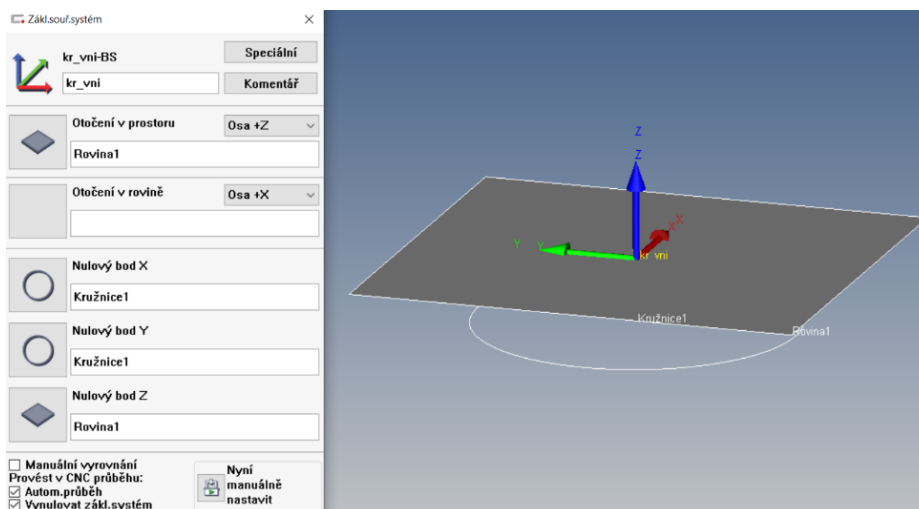
Tabulka 3 Naměřená data koncové měřky

Číslo měření	Rovinnost1 [mm]	Rovinnost2 [mm]	Vzdálenost [mm]
1	0,0008	0,0007	24,9998
2	0,0009	0,0008	24,9999
3	0,0009	0,0009	25,0000
4	0,0008	0,0008	24,9998
5	0,0007	0,0007	24,9999
6	0,0008	0,0007	24,9998
7	0,0010	0,0007	24,9998
8	0,0007	0,0007	24,9998
9	0,0007	0,0007	24,9999
10	0,0007	0,0007	24,9998
\bar{x}	0,00080	0,00074	24,99985
s	0,00011	0,00007	0,00007
Me	0,0008	0,0007	24,9998
x_{max}	0,0010	0,0009	25,0000
x_{min}	0,0007	0,0007	24,9998
R	0,0003	0,0002	0,0002

Z naměřených dat se určila velikost koncové měřky, která z opakovaného měření nabývala průměrné hodnoty 24,99985 mm, při směrodatné odchylce 0,00007 mm. Rovinnost první roviny vycházela 0,0008 mm a druhé 0,00074 mm.

5.3.3 Nastavovací kroužek

Měřenými charakteristikami byly 3x vnitřní průměr a kruhovitost. Na vnitřní průměry se vybral jako geometrický prvek element kružnice, na kterém bylo provedeno vyhodnocování kruhovitosti. Vyrovnání součásti v plánu měření a určení souřadného systému bylo na základě vrchní roviny a kružnice, jak je zobrazeno na obrázku níže. V tomto případě nebylo nutné určit natočení součásti (vzhledem k symetrii součásti).



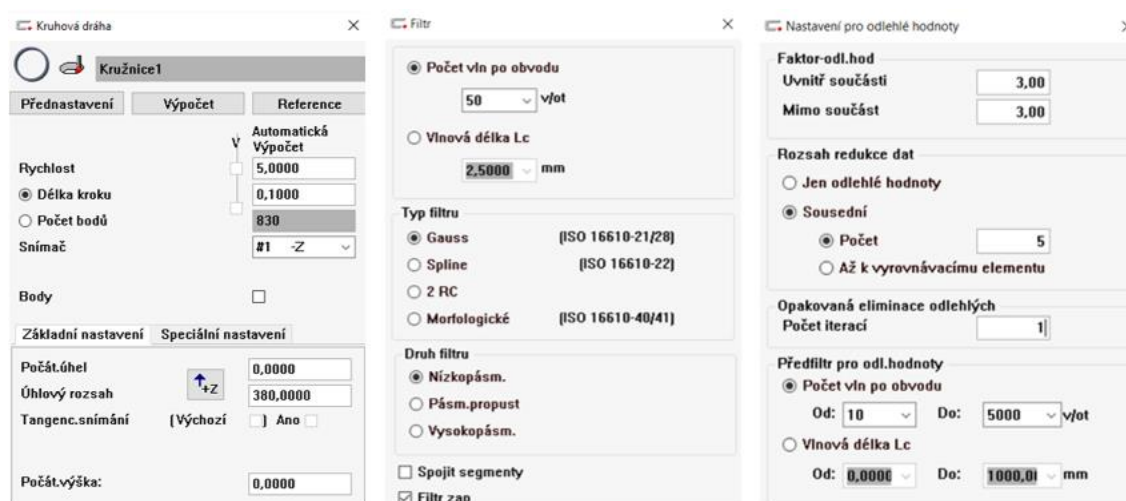
Obr. 53 Vyrovnání nastavovacího kroužku



V plánu měření se stanovily nejprve základní elementy, které byly použity právě pro vyrovnání a doplnily se elementy, které jsou potřebné pro vyhodnocení potřebných charakteristik.

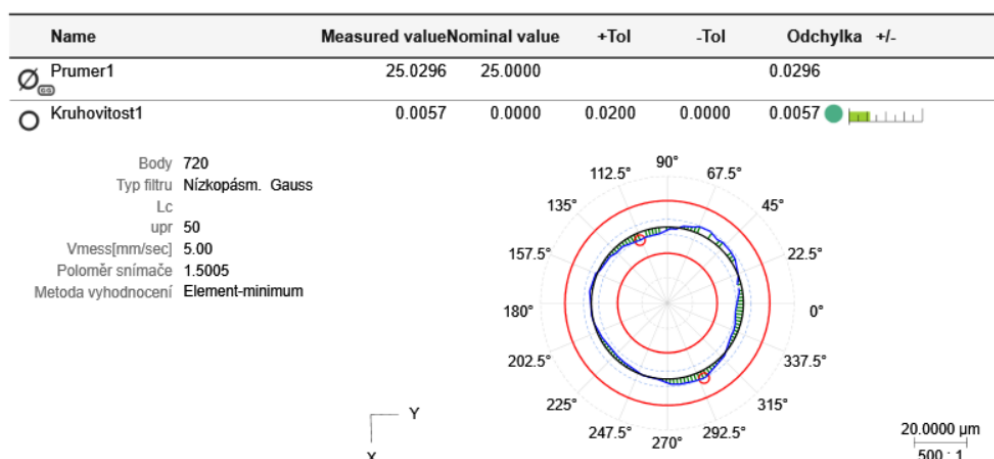
Pro naměření elementů se vytvořily tři elementy kružnice ve třech hladinách Z (Kružnice1: Z=-4,5 mm; Kružnice2: Z=-2 mm; Kružnice3: Z=-8 mm), pro které se zvolila shodná strategie kruhové dráhy. Pro dráhy se nadefinovala rychlost snímání 5 mm/s, délka kroku 0,1 mm a úhlový rozsah 380°.

Pro vyhodnocení charakteristik se použila filtrace dat. Zde se určil parametr počtu vln po obvodu 50 v/ot, typ filtru Gaussův a druh filtru nízkopásmový. Následně se využila eliminace odlehlých dat s faktorem odlehlé hodnoty na 3 hodnoty uvnitř i mimo součást, rozsah redukce dat na 5 a předfiltraci odlehlých hodnot na počet vln od 10 do 5000 v/ot.



Obr. 54 Parametry strategie a vyhodnocení nastavovacího kroužku

Vyhodnocení změřených charakteristik je pro demonstraci zobrazeno v rámci vícenásobného protokolu na obrázku níže.



Obr. 55 Vícenásobný protokol nastavovacího kroužku (Kružnice1)

Výsledná naměřená data jsou zobrazena v tabulce níže. Nejdůležitější parametr z toho souboru byl celkový průměr, ten byl poté využitý pro konstrukci CAD modelu užitému k porovnání.



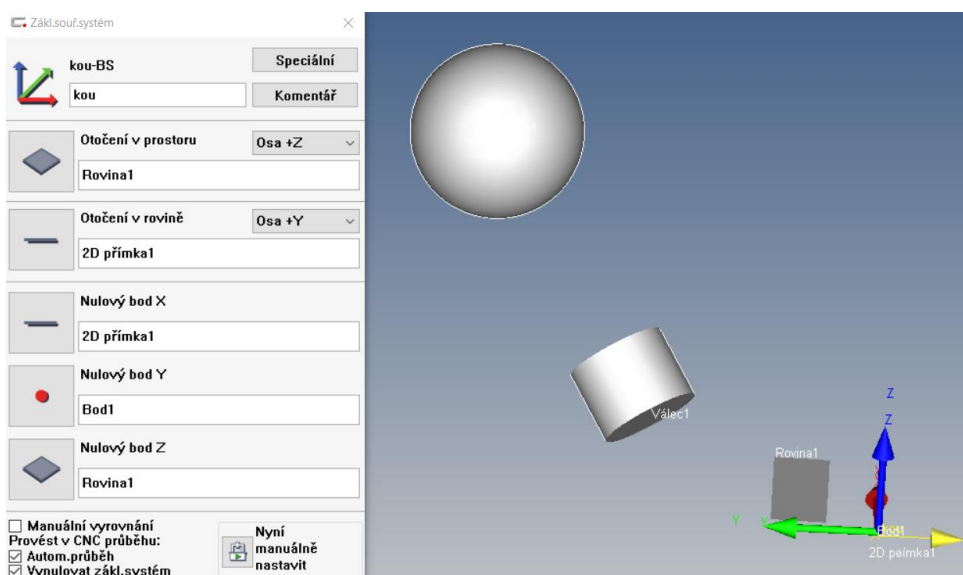
Tabulka 4 Naměřená data nastavovacího kroužku

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	25,0297	25,0298	25,03	0,0057	0,0055	0,0057
2	25,0297	25,0298	25,03	0,0059	0,0055	0,0057
3	25,0298	25,0297	25,0301	0,006	0,0056	0,0056
4	25,0297	25,0298	25,0299	0,0055	0,0056	0,0056
5	25,0297	25,0297	25,0298	0,0057	0,0055	0,0056
6	25,0296	25,0298	25,0299	0,0057	0,0056	0,0057
7	25,0296	25,0298	25,03	0,0055	0,0056	0,0056
8	25,0296	25,0298	25,0299	0,0057	0,0055	0,0057
9	25,0296	25,0298	25,0299	0,0058	0,0056	0,0059
10	25,0296	25,0299	25,0299	0,0057	0,0055	0,0059
	Průměr [mm]			Kruhovitost [mm]		
\bar{x}	25,029797			0,005657		
s	0,00014			0,00014		
Me	25,0298			0,0056		
x_{max}	25,0301			0,006		
x_{min}	25,0296			0,0055		
R	0,0005			0,0005		

Z naměřených dat se získala průměrná hodnota průměru nastavovacího kroužku 25,029797 mm, přičemž výsledná směrodatná odchylka byla 0,00014 mm. Z pohledu kruhovitosti byla v průměru naměřena chyba 0,005657 mm.

5.3.4 Matná koule

Měřenými charakteristikami byly průměr a tvar. Na zkoumané plochy se využil element koule, na kterém bylo provedeno vyhodnocování průměru a tvaru. Vyrovnání součásti v plánu měření a určení souřadného systému se provedlo na držáku za pomoci roviny, přímky určující orientaci v prostoru a bodu.



Obr. 56 Vyrovnání matné koule



V plánu měření se stanovily nejprve základní elementy, které byly použity právě pro vyrovnání a doplnily se o elementy, které jsou potřebné pro vyhodnocení potřebných charakteristik. Určila se strategie spirály pro naměření elementu koule. Pro dráhu se definovala rychlost snímání 5 mm/s, délka kroku 0,1 mm a 6 otáček.

Pro vyhodnocení charakteristik se použila filtrace dat. Zde se určily parametry počet vln po obvodu 150 v/ot a typ filtru Gaussův. Následně se využila eliminace odlehlých dat, kde se nastavil faktor odlehlé hodnoty na 3 hodnoty uvnitř i mimo součást, rozsah redukce dat na 5 hodnot a předfiltraci odlehlých hodnot na počet vln od 10 do 5000 v/ot.

Obr. 57 Parametry strategie a vyhodnocení matné koule

Vyhodnocení změřených charakteristik je pro demonstraci zobrazeno v rámci vícenásobného protokolu na obrázku níže.

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Odchyłka +/-
PrumerKoule1	29.9956	30.0000	0.1000	-0.1000	-0.0044
Tvar1	0.0031	0.0000	0.0100	0.0000	0.0031

Obr. 58 Vícenásobný protokol matné koule

Výsledná naměřená data jsou zobrazena v tabulce níže. Nejdůležitější parametr z toho souboru byl průměr, ten byl poté využitý pro konstrukci CAD modelu užitému k porovnání.



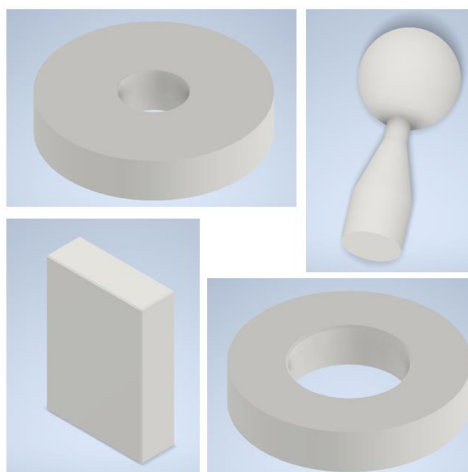
Tabulka 5 Naměřená data matné koule

Číslo měření	Průměr [mm]	Tvar [mm]
1	29,9956	0,0032
2	29,9956	0,0031
3	29,9956	0,0032
4	29,9956	0,0032
5	29,9956	0,0033
6	29,9956	0,0030
7	29,9956	0,0033
8	29,9956	0,0031
9	29,9956	0,0031
10	29,9956	0,0031
\bar{x}	29,9956	0,0032
s	0,0000	0,0001
Me	29,9956	0,0032
x_{\max}	29,9956	0,0033
x_{\min}	29,9956	0,0030
R	0,0000	0,0003

Z naměřených dat se získala průměrná hodnota průměru koule 29,9956 mm, přičemž se všechny hodnoty shodovali. Z pohledu chyby tvaru byla naměřena v průměru chyba 0,0032 mm.

5.4 Tvorba CAD modelů

Na základě dat naměřených opakovaným měřením zkoumaných artefaktů na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss UMC 1000 Carat se vytvořily příslušné CAD modely jednotlivých artefaktů, které se využily později v porovnání s naskenovanými daty. CAD modely byly vytvořeny v softwaru Autodesk Inventor 2022. Stěžejní geometrie pro kalibrační kroužek byla vnější průměr (49,97997 mm), pro matnou kouli to byl průměr koule (29,9956 mm), u koncové měřky ji představovala vzdálenost rovin (24,99985 mm) a pro nastavovací kroužek to byl vnitřní průměr (25,02980 mm). Ostatní rozměry se určily orientačně pomocí posuvného měřítka čili s řádově nižší přesností.



Obr. 59 CAD modely zkoumaných artefaktů (vlevo nahoře kalibrační kroužek, vlevo dole koncová měřka, vpravo nahoře matná koule, vpravo dole nastavovací kroužek)



6. Průběh skenování optickým skenerem

Skenování vybraných artefaktů probíhalo na optickém skeneru Zeiss Comet L3D 2. Jedná se o kompaktní zařízení, které pracuje na principu proužkové projekce. Světelným zdrojem je zde modrý LED projektor. Princip měření je založen na kombinaci Greyova kódu s fázovým posunem. Toto zařízení dodává se softwarem colin3D, který provádí postupem měření od založení projektu až po skládání jednotlivých snímků do výsledného modelu a jeho exportu pro další zpracování ve formátu STL.

Výhodou zařízení je možnost jej jednoduše sbalit a přenést na potřebné místo. Díky otočnému stolu je možné provést několik různých měření bez úpravy polohy součástí a tím je měření rychlejší. Zařízení disponuje škálou objektivů, které zaručují ideální poměr mezi maximální velikostí součástí a nejvyšším možným rozlišením snímků, a počtem příslušenství, díky kterým je možné vytvořit celou řadu různých konfigurací. Zařízení je využitelné pro aplikaci ve většině aplikacích využívajících bezdotykové měřicí systémy.

Konfigurace využitá v tomto experimentu se skládala z optického skeneru Zeiss Comet L3D 2, mobilním Manfrotto stativu, rotačního stolu pro automatizované polohování měřených objektů COMETrotary 100/400 a sady objektivů se zornými poli (FOV – field of view) 45, 100 a 250 mm. Každý artefakt byl opakovaně změřen všemi třemi měřicími objemy.



Obr. 60 Využitá konfigurace



Před hlavním měřením se provedlo několik testovacích skenů zvolených artefaktů, aby se určilo, které budou mít potřebu zmatnění povrchu. Z testovacích skenů vyšlo najevo, že u artefaktů koncové měřky, nastavovacího kroužku a kalibračního kroužku bylo třeba provést zmatnění skenovaného povrchu. Matná koule byla skenovatelná bez větších problémů i bez aplikace zmatňující vrstvy. Po tomto ověření skenovatelnosti bylo třeba určit způsob získání zmatňující vrstvy.

6.1 Způsoby zmatnění povrchu

Na trhu existuje spousta způsobů, jak zmatnit povrch měřeného artefaktu, ať už destruktivní (pískování) nebo nedestruktivní (nanesení matné vrstvy). V tomto případě se jeví jako optimálnější použít nedestruktivní metodu, tedy nanést na povrch artefaktů matné vrstvy. V oblasti 3D skenování jsou nejčastěji používány zmatňující přípravky na bázi titanového prášku, křídly, rýžového škrobu a cyklododekanu.

Titanový prášek s označením TiO_2 neboli oxid titaničitý, známý též jako titanová běloba. Jde o pevnou hydrofobní bílou látku v prášku nerozpustnou ve vodě, která je v přírodě zastoupena v podobě minerálů, kterými jsou například brookit, rutil a anatas. Velikost drobných částic TiO_2 je zhruba 0,2 - 0,35 μm . Pokud je nástřik vhodně aplikován, je možné dosáhnout hodnoty tloušťky nanesené vrstvy 1 μm . Prášek se nanáší za pomoci stříkací pistole a míchá se nejčastěji s etanolem. [55]

Jde o ještě nedávno hojně využívanou látku jak v průmyslové výrobě, tak ve farmacii a potravinářství. Nicméně v současné době se řeší podezření oxidu titaničitého z toxicity. Tedy na to, že její nanočástice mohou mít schopnost způsobit mutace v genetické výbavě, a ty mohou vést ke vzniku nádoru. Z tohoto důvodu se momentálně upouští od jeho používání. [56]

Pro zmatňující nástřiky lze použít křídové prášky, kde hlavní složkou je uhličitán vápenatý CaCO_3 . Nejčastěji se distribuují ve formě aerosolového spreje na bázi alkoholu. Křída je drobná, pórovitá, velmi jemnozrnná, nedostatečně zpevněná hornina, která se získává prostřednictvím těžby a zpracováním rud nebo chemickým procesem. Nejčastěji se setkáme právě se syntetickou výrobou za pomoci srážení. Průměrná velikost částic je zhruba 2,8 μm . Pokud je nástřik vhodně aplikován, je možné dosáhnout hodnoty tloušťky nanesené vrstvy 10 μm . Nicméně s křídovými prášky je spojeno zdlouhavé čištění měřených dílů a náročnější likvidace. [57]

Cyklododekan ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}$) je organická sloučenina, hořlavá látka, která samovolně sublimuje. Je chemicky stálý a netoxický, ale vysoce hořlavý. Významnou vlastností je vodoodpudivost. Odpařování daného prášku trvá řádově v několika hodinách v závislosti na tloušťce nanesené vrstvy, druhu základního materiálu nebo teplotou okolí. U objektu, který je tvořen více druhy materiálů, dochází k nerovnoměrné sublimaci, což způsobuje nerovnoměrnost měření. Výrobci obvykle udávají hodnotu nanesené tloušťky vrstvy okolo 5 μm v závislosti na požadované době sublimace.

V současné době je asi nejperspektivnější použití matných vrstev na bázi cyklododekanu a rýžového škrobu, u kterých se dá vyhnout riziku toxicity a zároveň náročnému procesu čištění měřených dílů. [54]



6.1.1 Volba řešení zmatnění povrchu

Po dlouhém rešeršním výzkumu se vybraly jako vhodné přípravky pro zmatnění povrchu měřených artefaktů produkty společnosti ATTBLIME. V jejich portfoliu byly zastoupeny, jak sublimující přípravky na bázi cyklododekanu, tak i permanentní přípravky na bázi rýžového škrobu. Sublimující přípravky měli odstupňované podle času měření a jsou distribuovány ve formě aerosolových sprejů a tekutých substancí aplikovatelných s nanášecí pistolí. Permanentní přípravky se taktéž vyskytovaly ve formě aerosolových sprejů i tekutých substancí, a navíc zde existovalo řešení ve formě lahvičky s nanášecím štětečkem. Přípravky jsem vybíral dle nejmenší tloušťky vrstvy.

Vybraly se celkem dva přípravky pro zmatnění povrchu. První sublimující na bázi cyklododekanu AB ZERO ve formě aerosolového spreje o objemu 400 ml, kde výrobce uváděl tloušťku vrstvy do 2,9 μm a možnost skenování do jedné hodiny s úplným vypařením od jedné do dvou hodin. Druhým vybraným byl permanentní přípravek na bázi oxidu křemičitého s rýžovým škrobem $\mu\text{Scan liquid}$, dodávaného ve formě lahvičky o objemu 10 ml s nanášecím štětečkem, u kterého výrobce udává tloušťku vrstvy 4,4 μm .



Obr. 61 Zvolené matnící přípravky, vpravo AB ZERO, vlevo $\mu\text{Scan liquid}$

Pro účely porovnání se k zakoupeným prostředkům využil i promobox zmatňujících sprejů ATTBLIME tvořen sadou 4 vzorků zmatňujících 35 ml sprejů ATTBLIME (AB2, AB6, AB24, ABP). Tyto prostředky byly součástí následující analýzy tloušťky vrstvy, ale poté již nebyly součástí experimentu.



Tabulka 6 Vlastnosti testovaných produktů [54]

	AB ZERO	AB 2	AB 6	AB 24	AB P	μScan liquid
Klíčová složka	ATTBLIME® CYCLODODECANE				Obnovitelné přírodní pigmenty	Rýžový škrob + SiO ₂
Báze	Bio-ethanol	Alkohol + uhlovodíky	Alkohol + uhlovodíky	Bez rozpouštědel	Alkohol	Obsahuje rozpouštědla
Typ	Sublimující				Permanentní	Permanentní
Čas skenování	< 1 hodina	1-2 hodiny	2-6 hodin	12-24 hodin	Dočasně trvalý	Dočasně trvalý
Čas sublimace	1-2 hodiny	2-4 hodiny	6-10 hodin	24-48 hodin	Dočasně trvalý	Dočasně trvalý
Tloušťka vrstvy	2,9 μm (sprej)	4,4 μm (sprej) 3,6 μm (airbrush)	6,5 μm (sprej) 4,9 μm (airbrush)	32 μm (sprej)	4,4 μm (sprej) 3,6 μm (airbrush)	4,4 μm

Z údajů vyplývá, že v případě použití airbrushové pistole k vytvoření matnicí vrstvy je možné dosáhnout nižší tloušťky vůči příslušné matnicí vrstvě vytvořené aerosolovým sprejem. Bohužel ústav nedisponuje touto technologií, a proto se sáhlo k alternativnímu způsobu nanesení matnicí vrstvy v podobě aerosolového spreje a nanášecího štětečku, kdy u zvoleného spreje je dosahováno i nejnižší hodnoty z portfolia výrobce.

6.1.2 Analýza tloušťky matnicí vrstvy

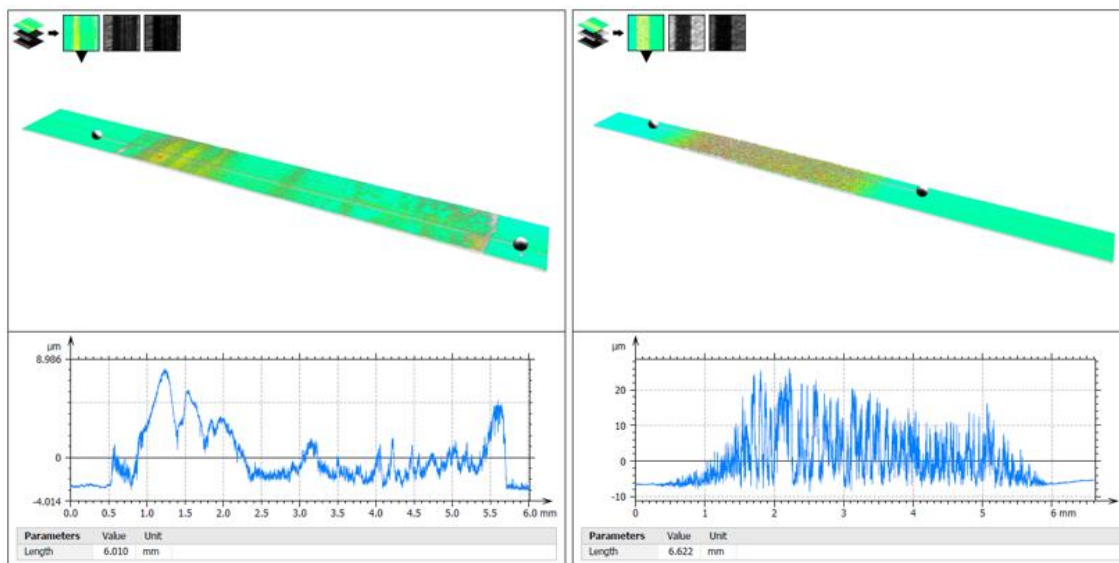
K získání bližší představy o velikosti tloušťky vrstvy byly zvolené matnicí přípravky podrobeny zkušební aplikaci na zadní straně koncové měrky a analyzovány na konfokálním mikroskopu Mahr MarSurf CM expert.



Obr. 62 Testovací nástřiky (zleva μScan liquid, ABP, AB 24, AB 6, AB 2 a AB ZERO)

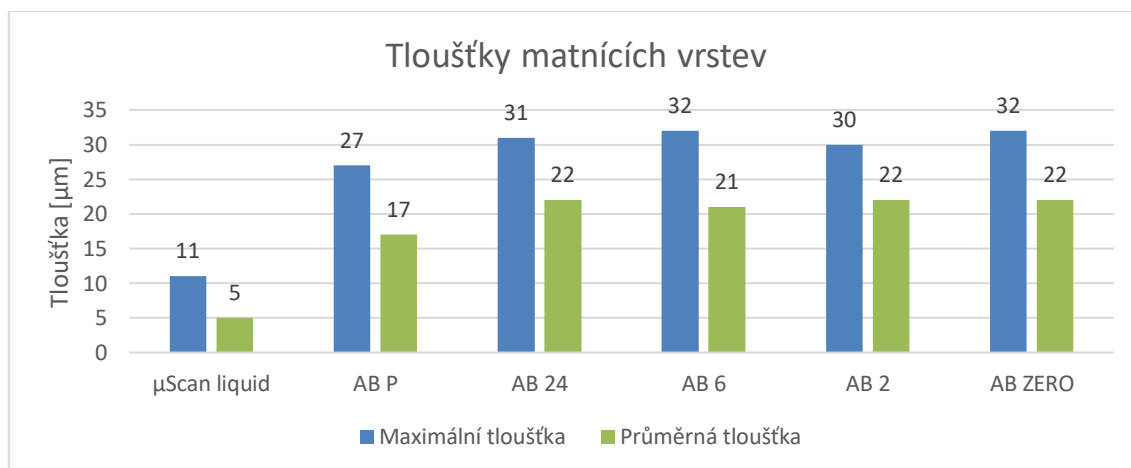


Na zadní stranu koncové měřky byly postupně nanесeny matricí vrstvy jednotlivými přípravky. Následně se koncová měřka vložila do pracovního prostoru mikroskopu a provedlo se měření topografie povrchu. Na obrázku níže jsou zobrazeny výsledky přípravků μ Scan liquid a AB ZERO, které byly pro tuto práci nejpodstatnější.



Obr. 63 Topografie povrchu (vlevo μ Scan liquid, vpravo AB ZERO)

Výsledky vykazovaly celkem významné odchylky vůči hodnotám udávaným výrobcem. Do jisté míry mohly tyto výsledky být ovlivněny nezkušeností obsluhy a dalšími faktory jako je teplota či osvětlení, při kterých výrobce prováděl měření. Výsledky jsou z pohledu maximální a průměrné tloušťky zobrazeny v grafu níže.



Graf 1 Tloušťky matricích vrstev

U výsledků z konfokální mikroskopie prostředku μ Scan liquid se dosahovaná tloušťka pohybovala v průměru okolo 5 μ m, což odpovídá specifikaci výrobce, nicméně v maximum to pak bylo téměř 11 μ m. U přípravku AB ZERO se tloušťka vrstvy pohybovala už v průměru okolo 22 μ m, maximum pak 32 μ m, což představovalo výraznou odchylku oproti hodnotě udávané výrobcem. Výsledky tloušťky vrstvy ostatních aerosolových přípravků se pohybovaly v podobných hodnotách, kdy nejnižší průměrné hodnoty 17 μ m bylo naměřeno u přípravku AB P. Zajímavostí, které bylo možné si povšimnout,

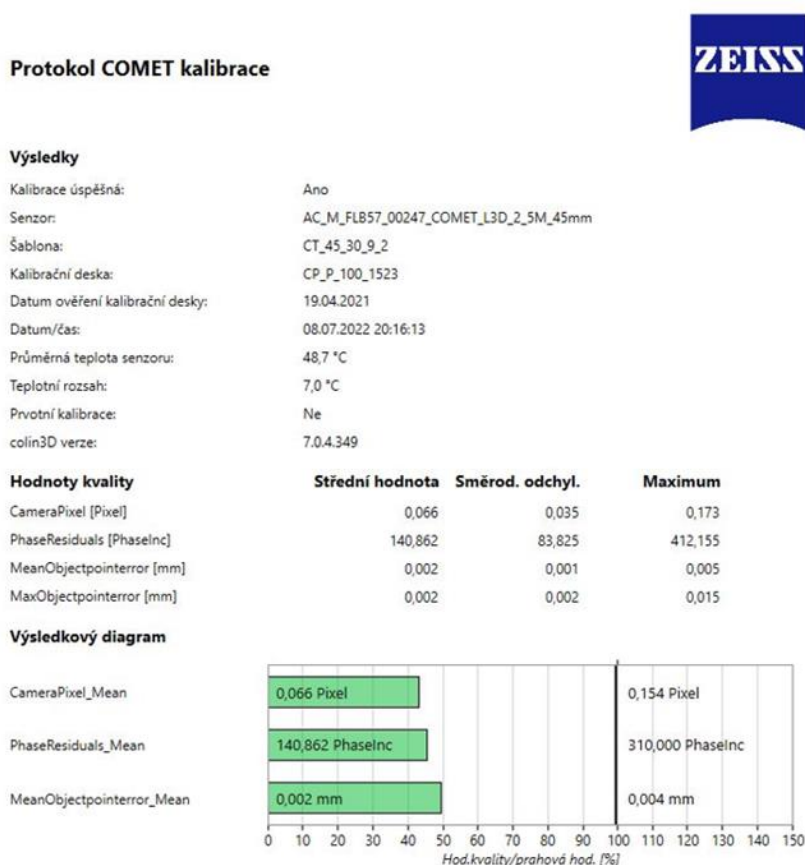


byla výrazně znatelná anizotropie nanesené matnicí vrstvy přípravkem μ Scan liquid způsobená aplikačním štětečkem. Ostatní přípravky použité ve formě aerosolových sprejů nabývaly izotropního povrchu nanesené vrstvy.

6.2 Skenování objektivem s FOV 45 mm

První měření vybraných artefaktů probíhalo sadou projektoru a objektivu se zorným polem 45 mm. Prvním krokem po spuštění ovládacího a měřicího softwaru colin3D byla uživatelská kalibrace zvolené konfigurace. Před samotnou uživatelskou kalibrací se musela zvolená konfigurace instalovat do tělesa skeneru a nechat zahřát projektor na kalibrovanou teplotu. Až poté mohla začít samotná uživatelská kalibrace.

Uživatelská kalibrace spočívala v pozicování kalibrační desky v různých polohách (o velikosti desky a dle kalibrační šablony příslušné pro používaný měřicí objektiv) a rotacích, které určoval software. Po úspěšné uživatelské kalibraci vygeneruje software protokol o kalibraci.



Obr. 64 Protokol o kalibraci objektivu s FOV 45 mm

Po úspěšné uživatelské kalibraci se mohlo přejít k samotnému skenování.

6.2.1 Skenování matné koule

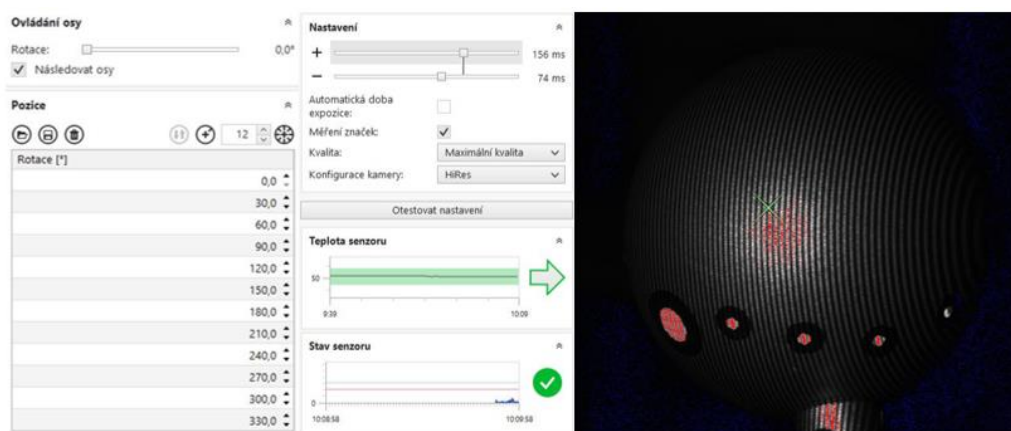
Matná koule je skenovatelná, dle předchozího ověření, bez nutnosti použití matnicí vrstvy. Pro jednodušší skládání jednotlivých snímků se opatřila referenčními značkami.



Referenční značky byla snaha lepit tak, aby co nejméně zasáhly do zkoumaného povrchu a zajistila se dosažitelnost jejich evidence v jednotlivých snímcích.

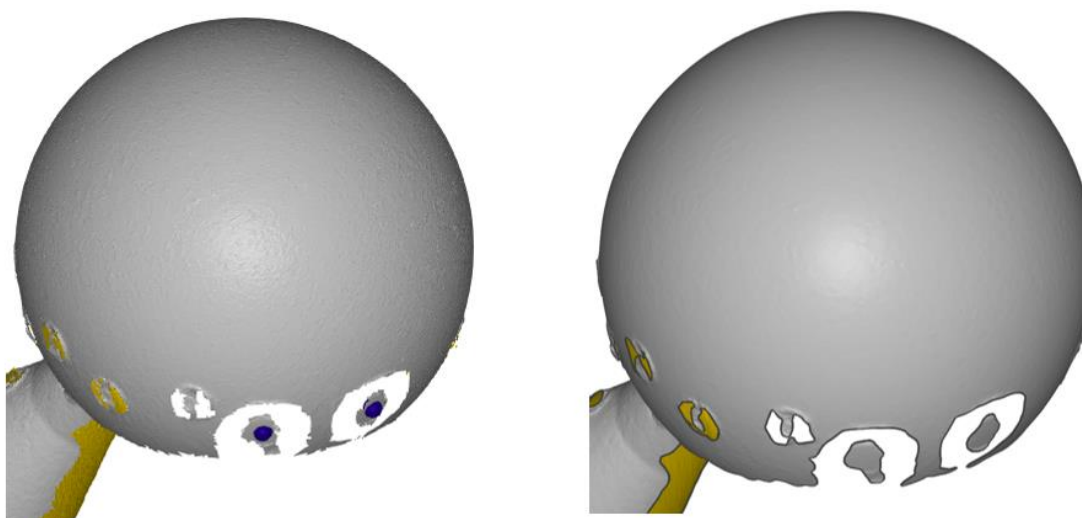
Následně se matná koule umístila na rotační stůl a vůči ní se nastavila pozice skeneru a jeho zaostření na artefakt. Zaostření napomáhají dvě laserová ukazovátka, která jsou vertikálně odsazena a paprsky jsou vysílány do kříže. V ideální měřící vzdálenosti se promítnou ve vertikální ose nad sebou.

Po nastavení pozice skeneru a určení měřící vzdálenosti se přešlo k nastavení parametrů skenování. Zvolilo se, že se matná koule bude skenovat na dvanáct snímků, tedy za každé pootočení rotačního stolu o 30° se zaznamená snímek. Nastavený čas expozice byl určen softwarem, který si pro měření značek přidal druhý čas expozice. Aktivovala se funkce měření značek, která pomůže k vyrovnaní jednotlivých snímků. Kvalita se nastavila na maximální kvalitu a konfigurace kamery na HiRes (vysoké rozlišení).



Obr. 65 Matná koule skenována objektivem s FOV 45 mm (nastavené parametry vlevo, záznam z kamery vpravo)

Výsledkem skenování je mračno bodů, které je možné dále upravovat například odstranit okolní šum či ořezávat získaná data modelu pouze na tu část, která je pro uživatele nejdůležitější. Provedlo se odstranění šumu a ořezání na požadovanou část. Po úpravě se provedla mesh mraku bodů, kdy došlo k jeho převedení na trojúhelníkovou síť.

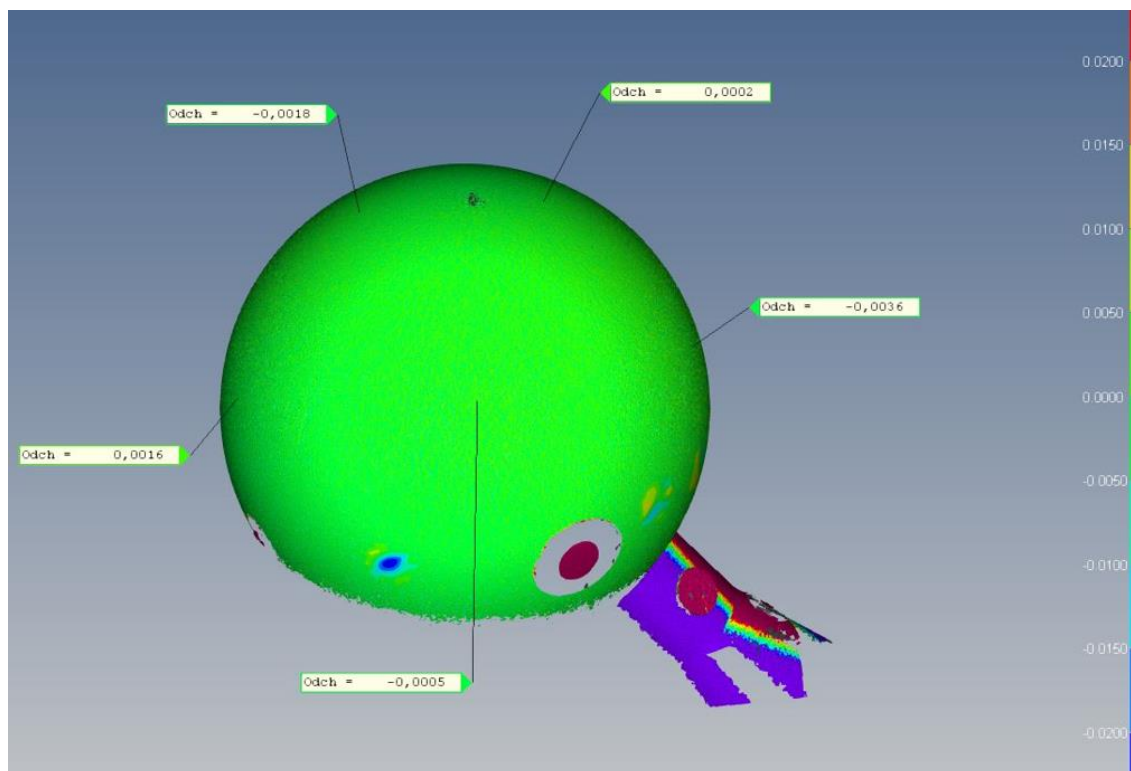


Obr. 66 Mračno bodů vlevo, trojúhelníková síť vpravo



Získaná trojúhelníková síť se zpravidelnila a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Před samotným importem do Calypsa bylo třeba nahrát CAD model zkoumaného artefaktu, až poté se přešlo k importu. Po importování trojúhelníkové sítě se musela tato síť přizpůsobit na CAD model. K přizpůsobení se použila funkce Best fit. Výsledek přizpůsobování se ověřil pomocí barevné mapy.



Obr. 67 Barevná mapa matné koule (FOV 45)

Po ověření přizpůsobování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.4. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 7 Naměřené hodnoty matné koule (FOV 45)

Číslo měření	Průměr [mm]	Tvar [mm]
1	29,9929	0,0153
2	29,9918	0,0203
3	29,9931	0,0154
4	29,9930	0,0189
5	29,9919	0,0175
6	29,9932	0,0165
7	29,9920	0,0192
8	29,9925	0,0240
9	29,9927	0,0197
10	29,9930	0,0160

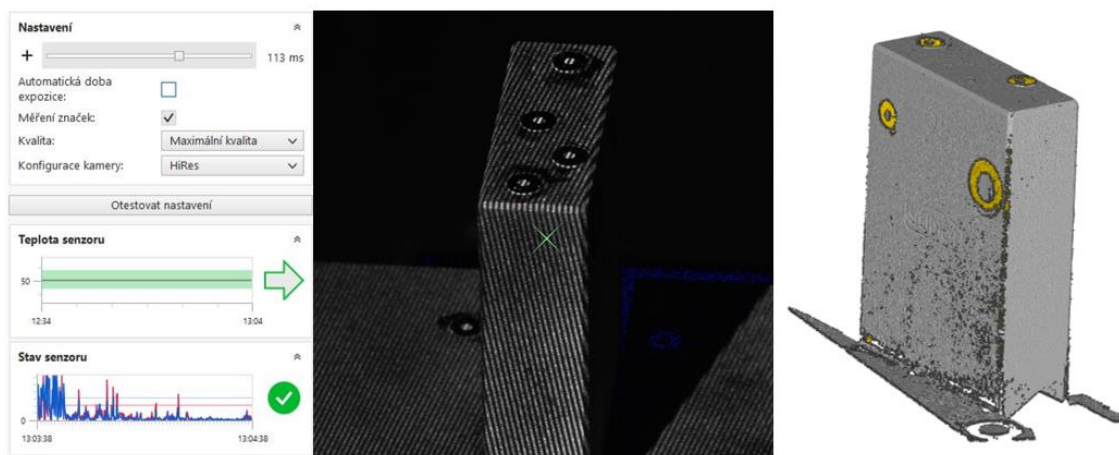


6.2.2 Skenování koncové měrky

Dle předchozího ověření bylo nutné koncovou měrku opatřit zmatňující vrstvou. Pro jednodušší skládání jednotlivých snímků se opatřila referenčními značkami. Referenční značky byla snaha lepit tak, aby co nejméně zasáhly do zkoumaného povrchu a zajistila se dosažitelnost jejich evidence v jednotlivých snímcích. Následně se na skenovaný povrch nanesla matnicí vrstva a očistily se referenční značky.

Sublimující vrstva

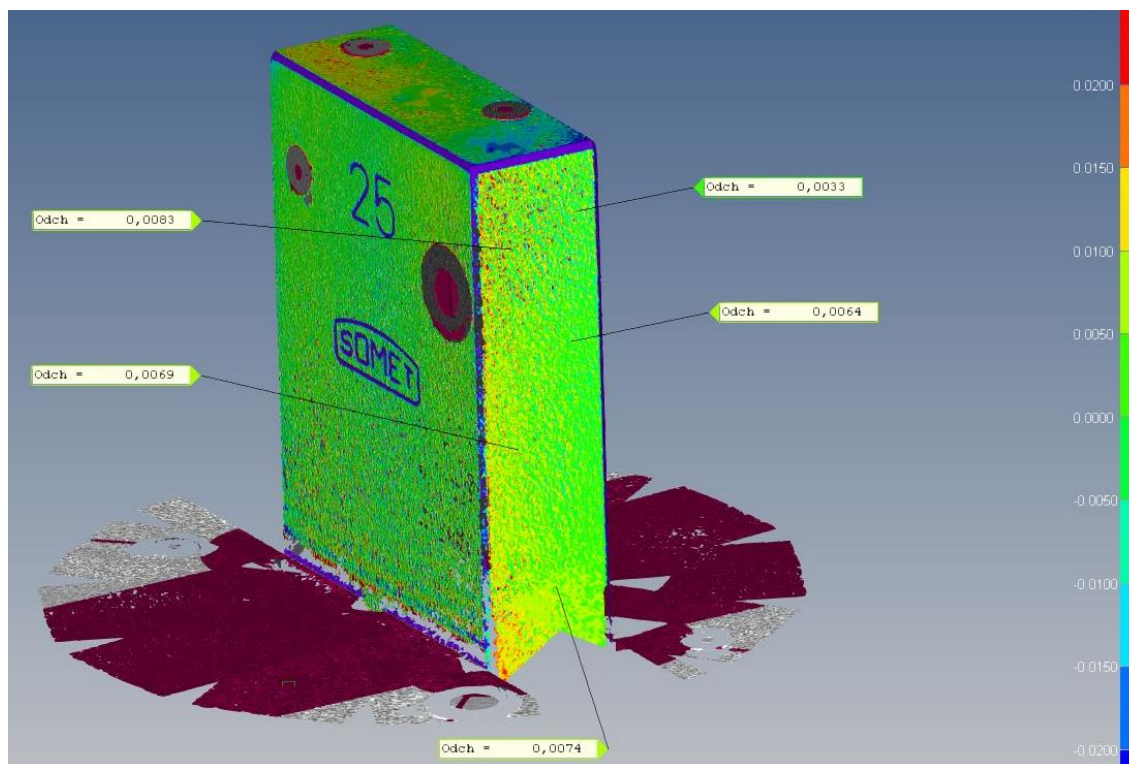
Na koncovou měrku se nejdříve nanesla matnicí vrstva přípravkem AB ZERO, poté se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřící vzdálenost. Následně se přešlo k nastavení parametrů skenování. Zvolilo se, že se artefakt bude skenovat na dvanáct snímků. Nastavený čas expozice byl určen softwarem. Aktivovala se funkce měření značek, která pomohla k vyrovnání jednotlivých snímků. Kvalita se nastavila na maximální kvalitu a konfigurace kamery na HiRes (vysoké rozlišení).



Obr. 68 Koncová měrka se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedla mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů a ověření skenovatelnosti přípravkem AB ZERO se skenování opakovalo po dobu jedné hodiny a naměřilo se celkem dvanáct skenů.

Před samotným importem do Calypsa bylo třeba nahrát CAD model zkoumaného artefaktu, až poté se přešlo k importu. Po importování trojúhelníkové sítě se musela tato síť přizpůsobit na CAD model. K přizpůsobení se použila funkce Best fit. Výsledek přizpůsobení jsem se ověřil pomocí barevné mapy.



Obr. 69 Barevná mapa koncové měřky se sublimující vrstvou (FOV 45)

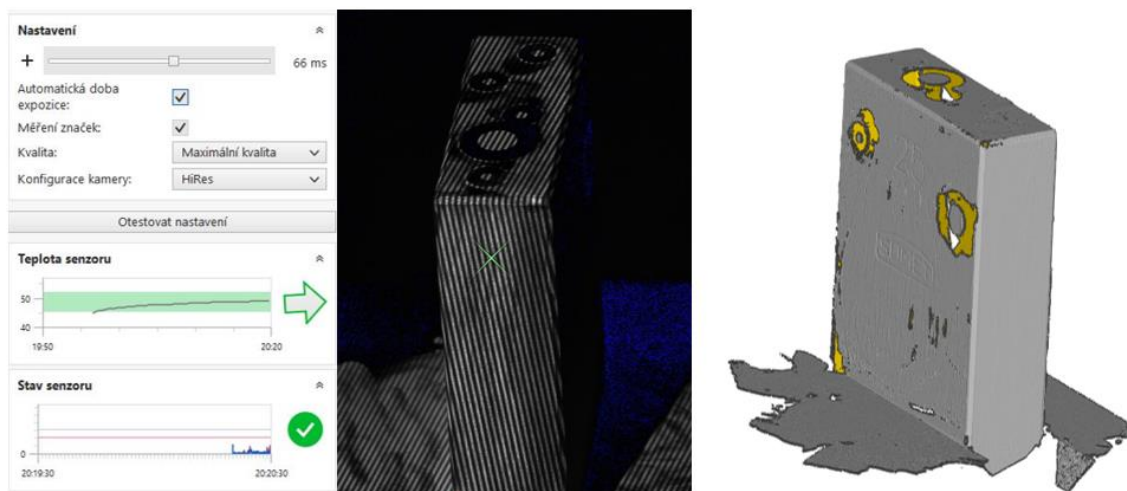
Po ověření připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.2. Provedlo jsem měření pouze prvních šesti skenů, jelikož vlivem sublimace matnicí vrstvy docházelo k poklesu počtu zachycených bodů. Po šestém měření, představují dobu zhruba 30 minut od nástřiku, bylo naměřeno pouze 57 % měřených bodů. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty koncové měřky se sublimující matnicí vrstvou (FOV 45)

Číslo měření	Rovinnost1 [mm]	Rovinnost2 [mm]	Vzdálenost [mm]
1	0,0095	0,0096	25,0096
2	0,0091	0,0113	24,9737
3	0,0142	0,0093	25,0123
4	0,0155	0,0134	24,9705
5	0,0157	0,0122	24,9702
6	0,0179	0,0147	24,9786

Permanentní vrstva

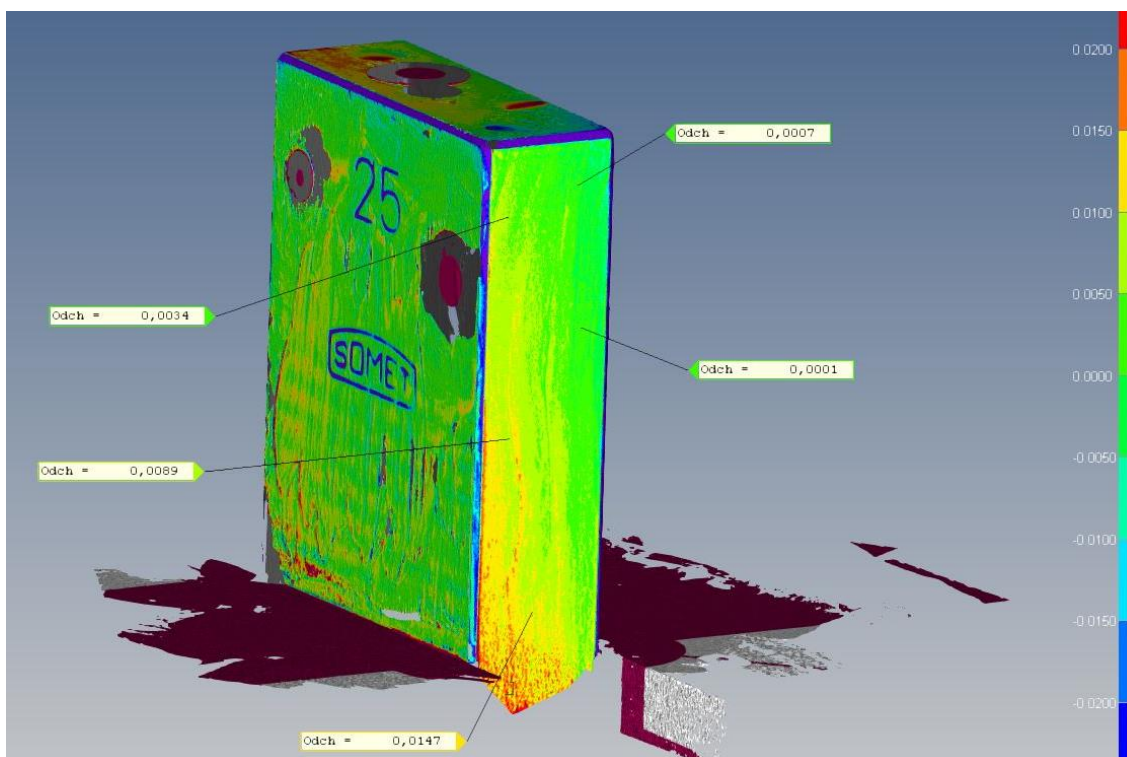
Povrch koncové měřky se zmatnil přípravkem μ Scan liquid, poté se nastavila pozice skeneru, určila se měřící vzdálenost a nastavily se parametry skenování. Zvolilo se skenování artefaktu na dvanáct snímků. Nastavený čas expozice byl určen softwarem. Aktivovala se funkce měření značek, která pomohla s vyrovnáváním jednotlivých snímků. Kvalita se nastavila na maximální kvalitu a konfigurace kamery na HiRes (vysoké rozlišení).



Obr. 70 Koncová měřka s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Před samotným importem do Calypsa bylo třeba nahrát CAD model zkoumaného artefaktu, až poté se přešlo k importu. Po importování trojúhelníkové sítě se musela tato síť připasovat na CAD model. K připasování se použila funkce Best fit. Výsledek připasování jsem se ověřil pomocí barevné mapy.



Obr. 71 Barevná mapa koncové měřky s permanentní vrstvou (FOV 45)



Po ověření připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.2. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty koncové měřky s permanentní matnicí vrstvou (FOV 45)

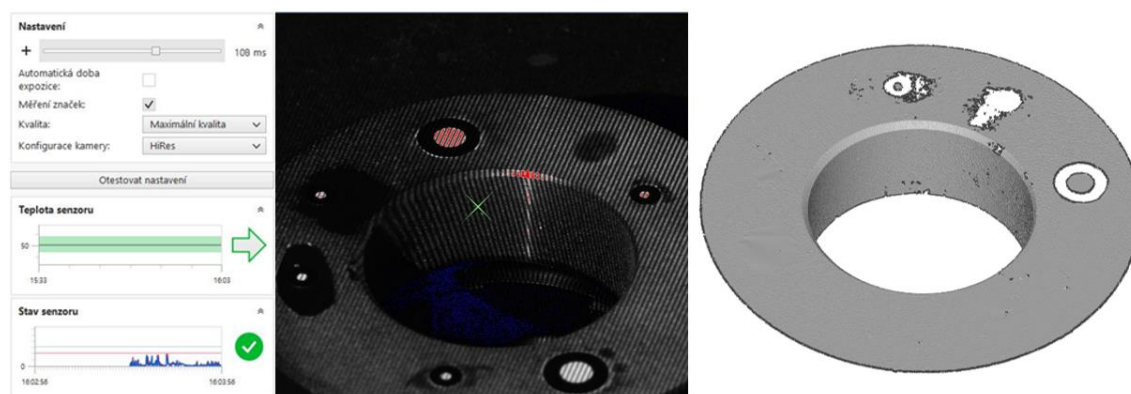
Číslo měření	Rovinnost1 [mm]	Rovinnost2 [mm]	Vzdálenost [mm]
1	0,0036	0,0043	25,0103
2	0,0038	0,0047	24,9923
3	0,0036	0,0049	24,9857
4	0,0035	0,0044	24,9853
5	0,0037	0,0032	24,9914
6	0,0037	0,0043	24,9867
7	0,0037	0,0053	25,0141
8	0,0037	0,0054	24,9847
9	0,0037	0,0055	24,9927
10	0,0038	0,0044	24,9894

6.2.3 Skenování nastavovacího kroužku

Dle předchozího ověření bylo nutné nastavovací kroužek opatřit zmatňující vrstvou. Pro jednodušší skládání jednotlivých snímků se opatřil referenčními značkami. Referenční značky byla snaha lepit tak, abych se co nejméně zasáhlo do zkoumaného povrchu a zajistila se dosažitelnost jejich evidence v jednotlivých snímcích. Následně se na skenovaný povrch aplikovala matnicí vrstva.

Sublimující vrstva

Na nastavovací kroužek se nejdříve nanasla matnicí vrstva přípravkem AB ZERO poté se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřící vzdálenost. Zvolilo se, že se artefakt bude skenovat na dvanáct snímků. Nastavený čas expozice byl určen softwarem. Aktivovala se funkce měření značek, která pomůže k vyrovnání jednotlivých snímků. Kvalita se nastavila na maximální kvalitu a konfigurace kamery na HiRes (vysoké rozlišení).



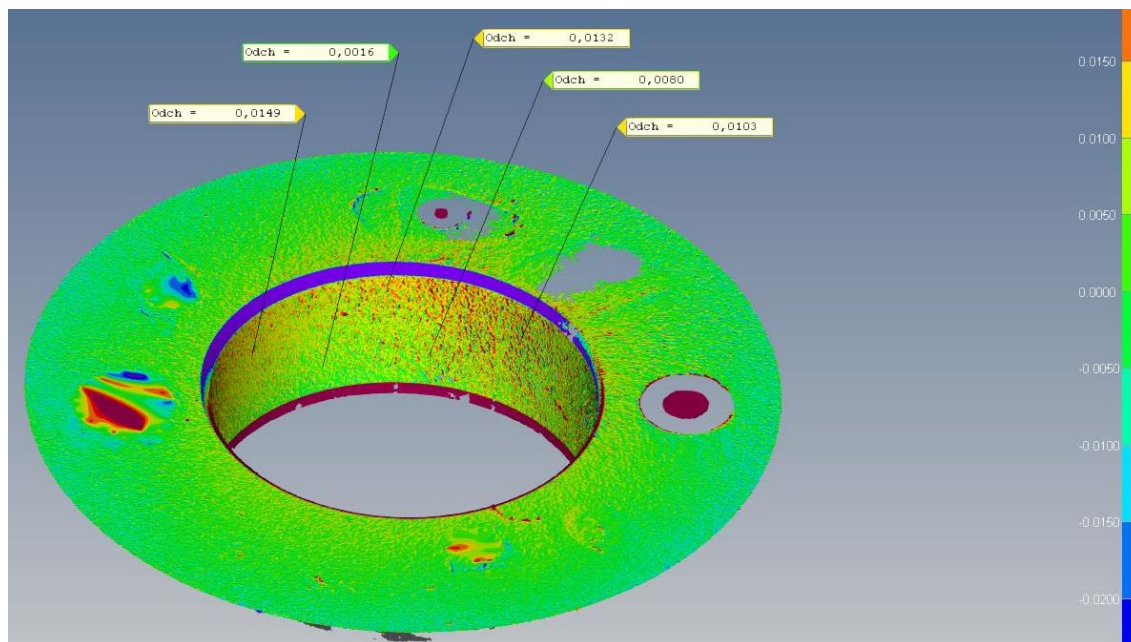
Obr. 72 Nastavovací kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů a vytvořila se tak trojúhelníková síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena



trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů a ověření skenovatelnosti přípravkem AB ZERO se skenování opakovalo po dobu jedné hodiny a bylo naměřeno celkem dvanáct skenů.

Před samotným importem do Calypsa bylo třeba nahrát CAD model zkoumaného artefaktu, až poté se přešlo k importu. Po importování trojúhelníkové sítě se musela tato síť přizpůsobit na CAD model. K přizpůsobení se použila funkce 3-2-1, kdy se trojúhelníková síť vyrovná s CAD daty definováním shodných bodů na obou modelech. Výsledek přizpůsobení se ověřil pomocí barevné mapy.



Obr. 73 Barevná mapa nastavovacího kroužku se sublimující vrstvou (FOV 45)

Po ověření přizpůsobení se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.3. Provedlo se měření pouze prvních šesti skenů, jelikož vlivem sublimace matricí vrstvy docházelo k poklesu počtu zachycených bodů. Po šestém měření, představující dobu zhruba 30 minut od nástřiku, bylo naměřeno pouze 75 % měřených bodů. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže.

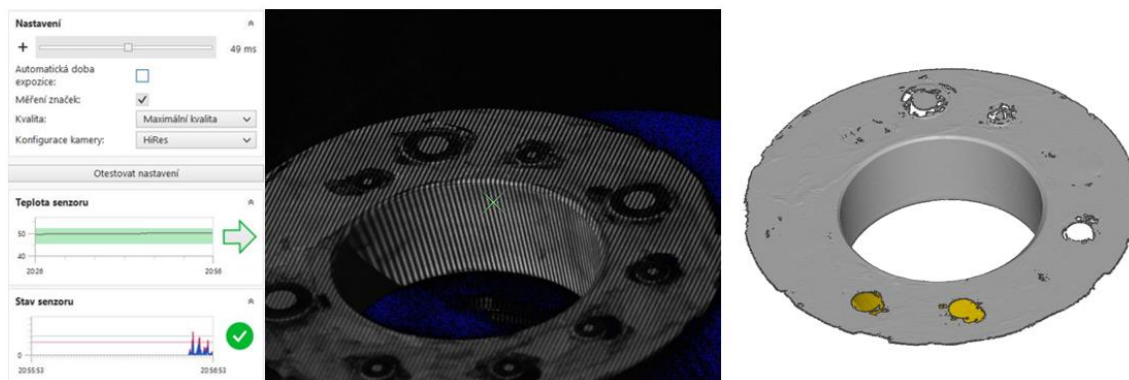
Tabulka 10 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku se sublimující matricí vrstvou (FOV 45)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	25,0095	25,0072	25,0112	0,0174	0,0125	0,0184
2	25,0134	25,0126	25,0156	0,0179	0,0160	0,0211
3	25,0158	25,014	25,0178	0,0201	0,0180	0,0130
4	25,0197	25,0179	25,0216	0,0184	0,0190	0,0204
5	25,0254	25,0244	25,0269	0,0239	0,0173	0,0239
6	25,0377	25,0346	25,0399	0,0333	0,0313	0,0284



Permanentní vrstva

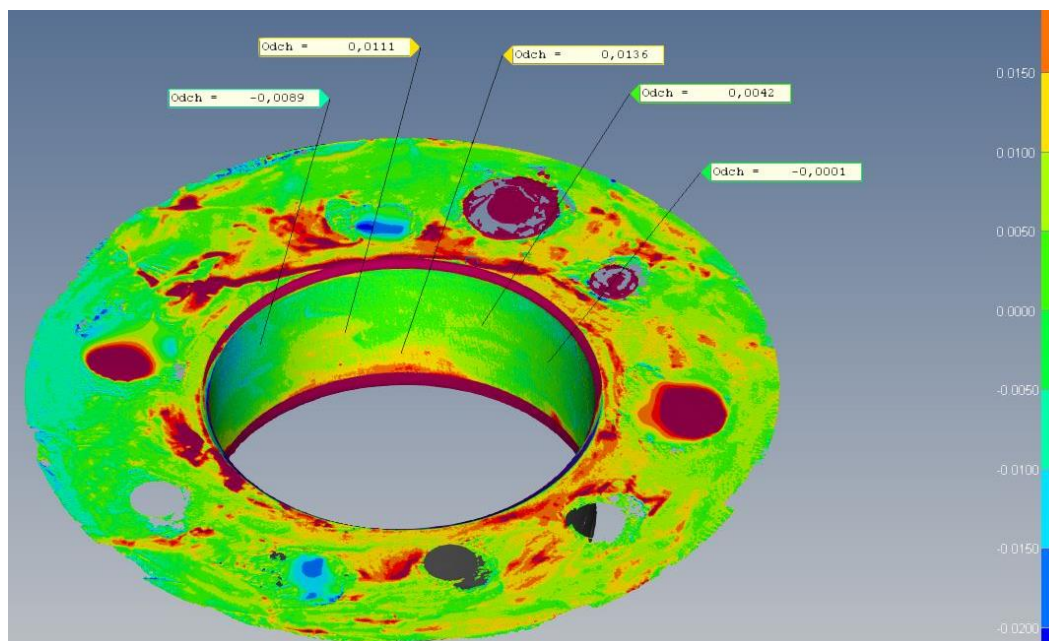
Povrch nastavovacího kroužku se zmatnil přípravkem μ Scan liquid, poté se nastavila pozice skeneru, určila se měřící vzdálenost a nastavily se parametry skenování. Zvolilo se, že se artefakt bude skenovat na dvanáct snímků. Nastavený čas expozice byl určen softwarem. Aktivovala se funkce měření značek, která pomáhá s vyrovnáváním jednotlivých snímků. Kvalita se nastavila na maximální kvalitu a konfigurace kamery na HiRes (vysoké rozlišení).



Obr. 74 Nastavovací kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Před samotným importem do Calypsa bylo třeba nahrát CAD model zkoumaného artefaktu, až poté se přešlo k importu. Po importování trojúhelníkové sítě se musela tato síť přizpůsobit na CAD model. K přizpůsobení se použila funkce 3-2-1, kdy se trojúhelníková síť vyrovná s CAD daty definováním shodných bodů na obou modelech. Výsledek přizpůsobení se ověřil vygenerováním barevné mapy.



Obr. 75 Barevná mapa nastavovacího kroužku s permanentní vrstvou (FOV 45)

Po ověření přizpůsobení se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.3. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 11 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 45)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	25,0058	25,0065	24,9963	0,0270	0,0270	0,0410
2	25,0037	25,0054	24,9947	0,0292	0,0261	0,0412
3	25,0083	25,0099	24,9993	0,0304	0,0271	0,0410
4	25,006	25,0071	24,9965	0,0275	0,0269	0,0410
5	25,0049	25,0065	24,9959	0,0291	0,0267	0,0411
6	25,0053	25,0067	24,9964	0,0294	0,0280	0,0407
7	25,0138	25,0152	25,0057	0,0277	0,0239	0,0431
8	25,0161	25,0177	25,0083	0,0311	0,0281	0,0435
9	25,0108	25,0121	25,0019	0,0317	0,0279	0,0415
10	25,0190	25,0202	25,0109	0,0314	0,0276	0,0439

6.2.4 Skenování kalibračního kroužku

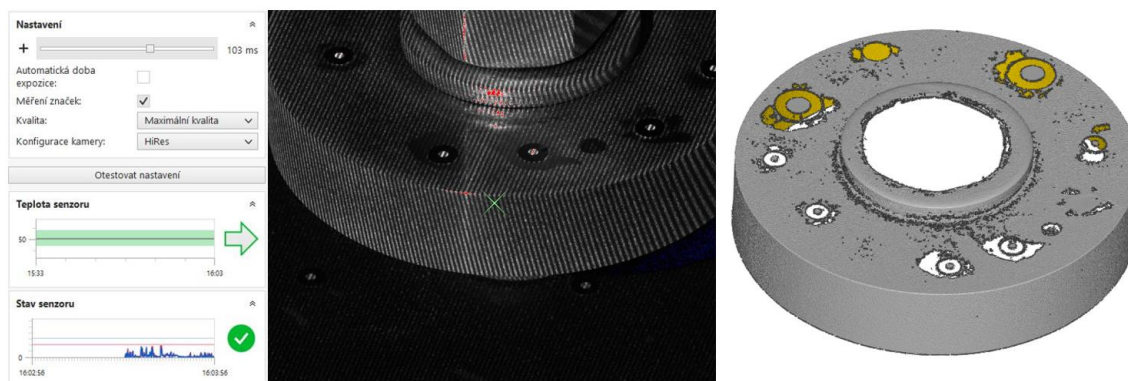
Dle ověření skenovatelnosti bylo nutné kalibrační kroužek opatřit zmatňující vrstvou. Pro jednodušší skládání jednotlivých snímků se opatřil referenčními značkami. Referenční značky se lepily tak, aby co nejméně zasáhly do zkoumaného povrchu a zajistila se dosažitelnost jejich evidence v jednotlivých snímcích. Následně se na skenovaný aplikovala matnicí vrstva.

Sublimující vrstva

Na kalibrační kroužek se nejdříve nanasla matnicí vrstva přípravkem AB ZERO poté se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřicí vzdálenost. Následně se přešlo k nastavení parametrů skenování. Zvolilo se, že se artefakt bude skenovat na dvanáct snímků. Nastavený čas expozice byl určen softwarem. Aktivovala se funkce měření



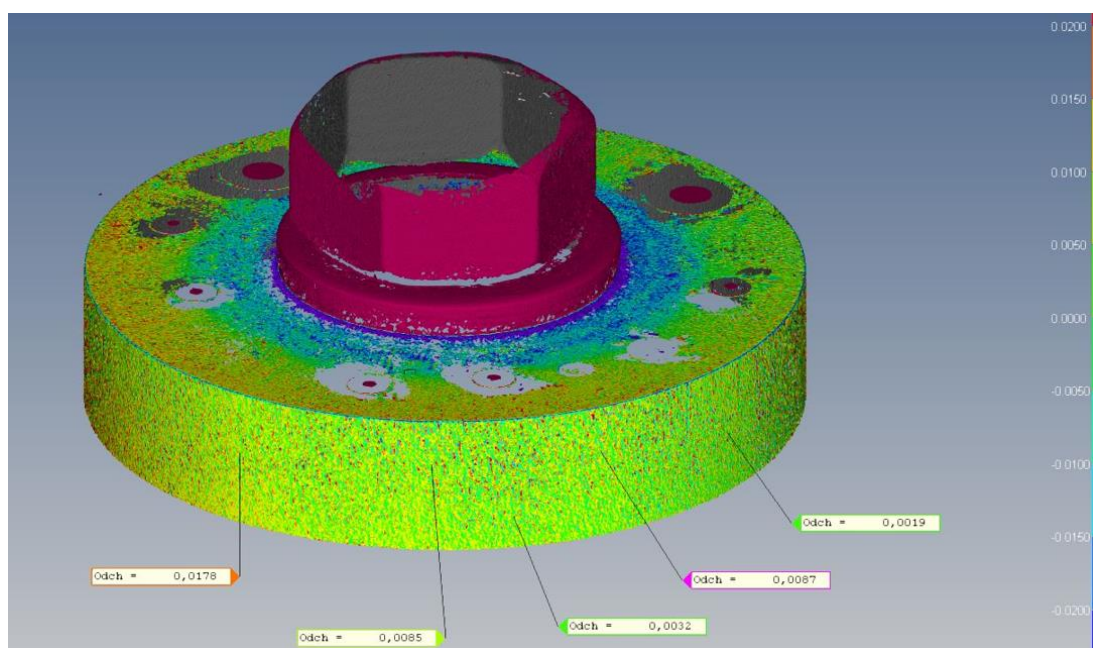
značek, která pomůže k vyrovnaní jednotlivých snímků. Kvalita se nastavila na maximální kvalitu a konfigurace kamery na HiRes (vysoké rozlišení).



Obr. 76 Kalibrační kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů a ověření skenovatelnosti přípravkem AB ZERO se skenování opakovalo po dobu jedné hodiny a naměřilo se celkem dvanáct skenů.

Před samotným importem do Calypsa bylo třeba nahrát CAD model zkoumaného artefaktu, až poté se přešlo k importu. Po importování trojúhelníkové sítě se musela tato síť připasovat na CAD model. K připisování se použila funkce 3-2-1, kdy se trojúhelníková síť vyrovná s CAD daty definováním shodných bodů na obou modelech. Výsledek připisování se ověřil pomocí barevné mapy.



Obr. 77 Barevná mapa kalibračního kroužku se sublimující vrstvou (FOV 45)



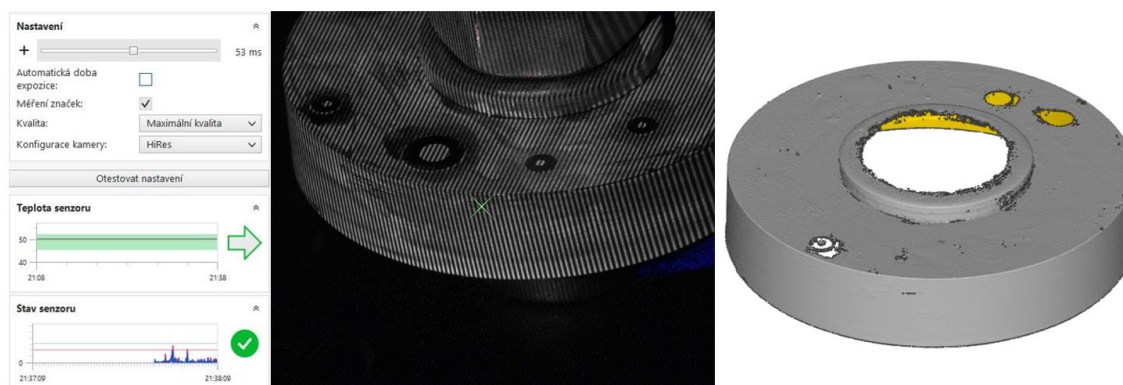
Po ověření připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.1. Provedlo jsem měření pouze prvních šesti skenů, jelikož vlivem sublimace matnicí vrstvy docházelo k poklesu počtu zachycených bodů. Po šestém měření, představují dobu zhruba 30 minut od nástřiku, bylo naměřeno pouze 51 % měřených bodů. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže.

Tabulka 12 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku se sublimující matnicí vrstvou (FOV 45)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	49,9992	49,9987	49,9982	0,0200	0,0213	0,0198
2	49,9982	49,9977	49,9974	0,0231	0,0248	0,0140
3	49,9920	49,9910	49,9918	0,0237	0,0307	0,0254
4	49,9918	49,9906	49,9920	0,0217	0,0282	0,0225
5	49,9928	49,9919	49,9928	0,0328	0,0512	0,0435
6	49,9878	49,9893	49,9868	0,0535	0,0509	0,0451

Permanentní vrstva

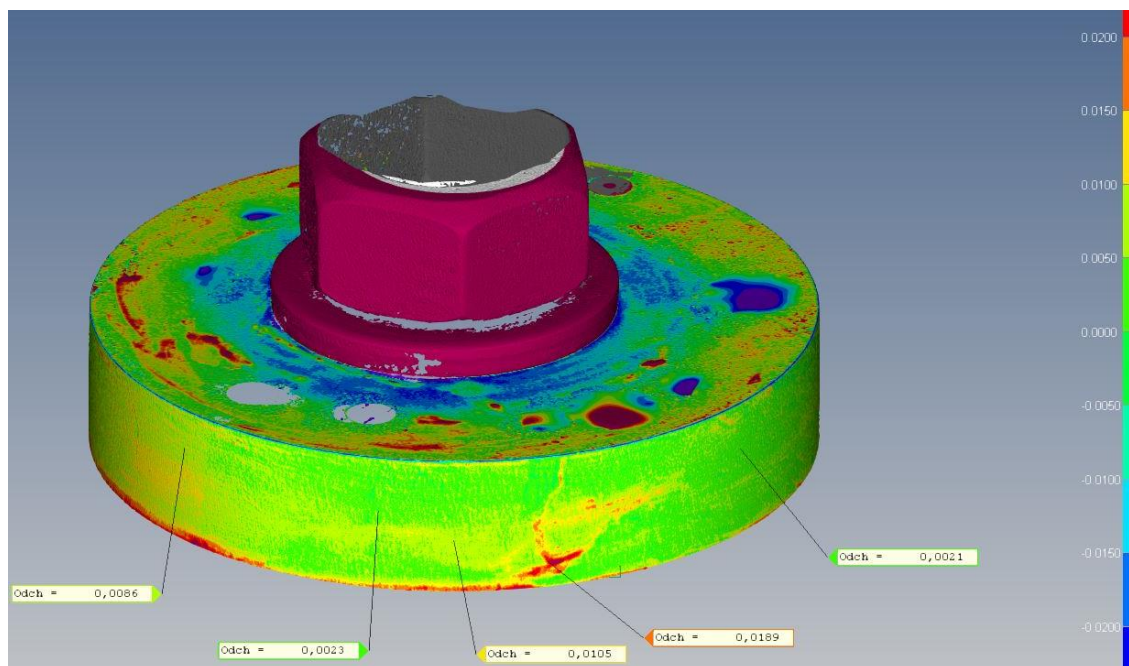
Povrch kalibračního kroužku se zmatnil přípravkem μ Scan liquid, poté se nastavila pozice skeneru, určila se měřicí vzdálenost a nastavily se parametry skenování. Zvolilo se, že se artefakt bude skenovat na dvanáct snímků. Nastavený čas expozice byl určen softwarem. Aktivovala se funkce měření značek, která pomáhá s vyrovnáváním jednotlivých snímků. Kvalita se nastavila na maximální kvalitu a konfigurace kamery na HiRes (vysoké rozlišení).



Obr. 78 Kalibrační kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Před samotným importem do Calypsa bylo třeba nahrát CAD model zkoumaného artefaktu, až poté se přešlo k importu. Po importování trojúhelníkové sítě se musela tato síť připasovat na CAD model. K připasování se použila funkce 3-2-1, kdy se trojúhelníková síť vyrovná s CAD daty definováním shodných bodů na obou modelech. Výsledek připasování se ověřil vygenerováním barevné mapy.



Obr. 79 Barevná mapa kalibračního kroužku s permanentní vrstvou (FOV 45)

Po ověření přizpůsobení se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.1. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 13 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 45)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	49,9931	49,9884	49,9953	0,0150	0,0196	0,0155
2	49,9933	49,9889	49,9956	0,0135	0,0194	0,0149
3	49,9933	49,9887	49,9957	0,0125	0,0146	0,0142
4	49,9931	49,9886	49,9953	0,0150	0,0212	0,0156
5	49,9930	49,9885	49,9952	0,0174	0,0205	0,0165
6	49,9931	49,9886	49,9954	0,0143	0,0203	0,0148
7	49,9928	49,9879	49,9950	0,0154	0,0189	0,0156
8	49,9919	49,9871	49,9943	0,0139	0,0181	0,0145
9	49,9922	49,9878	49,9944	0,0148	0,0190	0,0152
10	49,9918	49,9871	49,9938	0,0165	0,0198	0,0161

6.3 Skenování objektivem s FOV 100 mm

Druhé měření vybraných artefaktů probíhalo sadou projektoru a objektivu se zorným polem 100 mm. Stejně jako v předchozím případě se po spuštění ovládacího a měřicího softwaru colin3D, instalaci konfigurace se zorným polem 100 mm a zahřátí na provozní teplotu, provedla uživatelská kalibrace zvolené konfigurace. Po úspěšné uživatelské kalibraci software vygeneroval protokol o kalibraci.



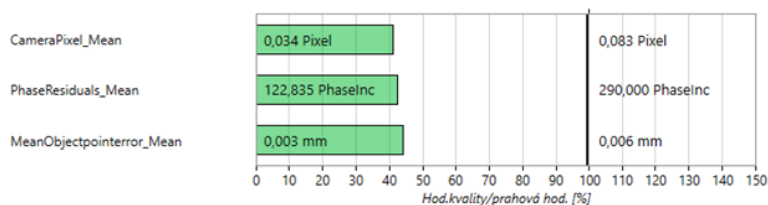
Protokol COMET kalibrace

Výsledky

Kalibrace úspěšná:	Ano
Senzor:	AC_M_FLB57_00247_COMET_L3D_2_5M_100mm
Šablona:	CT_100_60_9_1
Kalibrační deska:	CP_P_100_1523
Datum ověření kalibrační desky:	19.04.2021
Datum/čas:	07.07.2022 18:13:11
Průměrná teplota senzoru:	51,5 °C
Teplotní rozsah:	7,0 °C
Přvotní kalibrace:	Ne
colin3D verze:	7.0.4.349

Hodnoty kvality	Střední hodnota	Směrod. odchyl.	Maximum
CameraPixel [Pixel]	0,034	0,018	0,121
PhaseResiduals [PhaseInc]	122,835	77,523	617,777
MeanObjectpointerror [mm]	0,003	0,001	0,015
MaxObjectpointerror [mm]	0,003	0,002	0,023

Výsledkový diagram

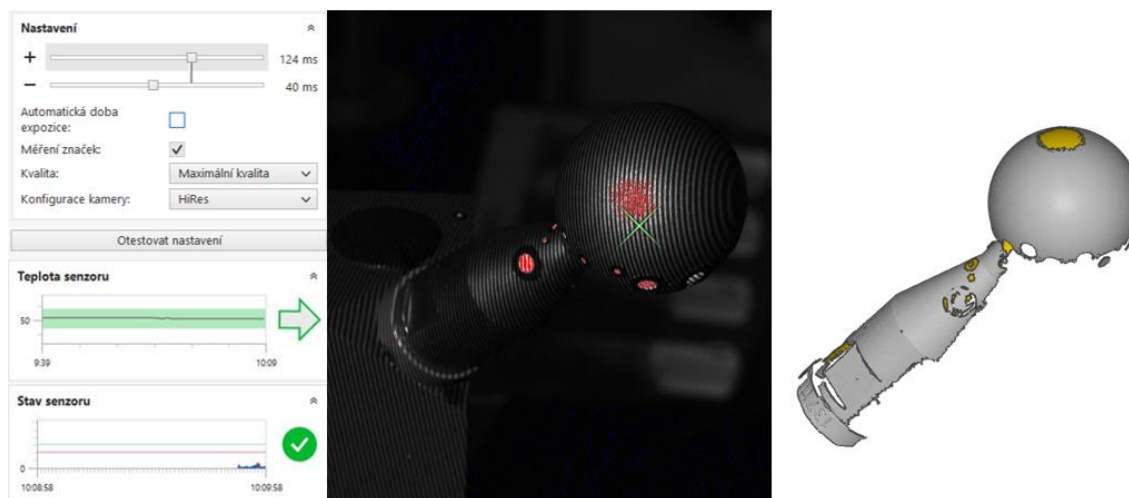


Obr. 80 Protokol o kalibraci objektivu s FOV 100 mm

Po úspěšné uživatelské kalibraci se mohlo přejít k samotnému skenování.

6.3.1 Skenování matné koule

Použila se stejná matná koule z předchozího měření, která již byla polepena referenčními značkami a po umístění matné koule na rotační stůl se mohlo rovnou přejít k nastavení pozice skeneru a parametrů skenování. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice určil software, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 81 Matná koule skenována objektivem s FOV 100 (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)



Výsledné mračno bodů se ořezalo na požadovanou část a odstranil se šum. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů a vytvořila se tak trojúhelníková síť, která se zpravidlnila a data se vyexportovala pro následný import do měřicího software Calypso. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce Best fit. Výsledek připasování se ověřil pomocí barevné mapy. Po ověření připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.4. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 14 Naměřené hodnoty matné koule (FOV 100)

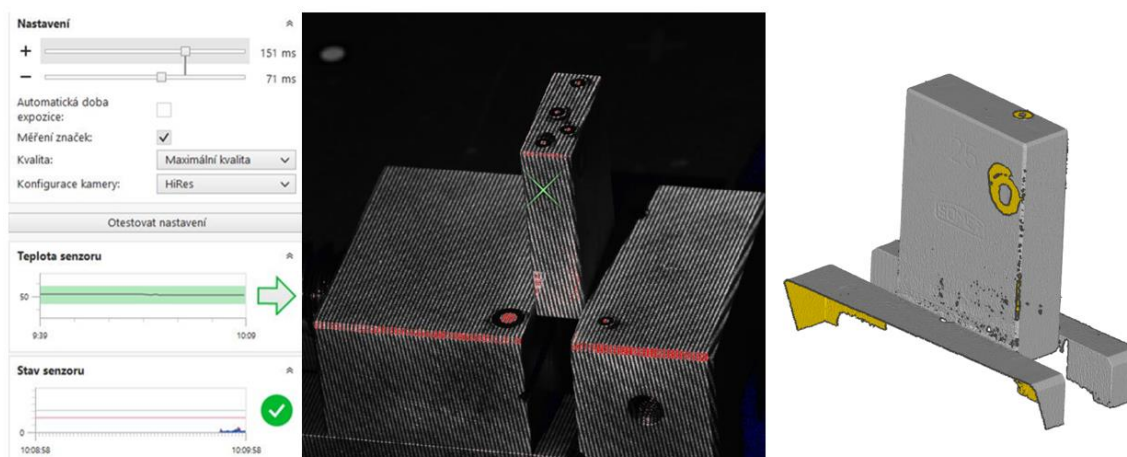
Číslo měření	Průměr [mm]	Tvar [mm]
1	29,9841	0,0245
2	29,9840	0,0363
3	29,9849	0,0255
4	29,9841	0,0328
5	29,9794	0,0294
6	29,9896	0,0311
7	29,9779	0,0280
8	29,9803	0,0264
9	29,9852	0,0319
10	29,9813	0,0323

6.3.2 Skenování koncové měřky

Použila se stejná koncová měřka z předchozích měření, která již byla polepena referenčními značkami.

Sublimující vrstva

Na koncovou měřku se nejdříve nanasla novou matnicí vrstva přípravku AB ZERO, jelikož se jednalo o sublimující vrstvu, tak od minulého skenování již vysublimovala. Po nanesení nové matnicí vrstvy se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřicí vzdálenost. Opět se zvolilo, že výsledný sken bude tvořen z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 82 Koncová měřka se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. Z předchozích výsledků se došlo k závěru, že reálná skenovatelnost artefaktu po aplikaci matnicí vrstvy produktu AB ZERO je okolo dvaceti minut při zajištění naskenování alespoň 70 % povrchu, proto se měření opakovalo pouze osmkrát.

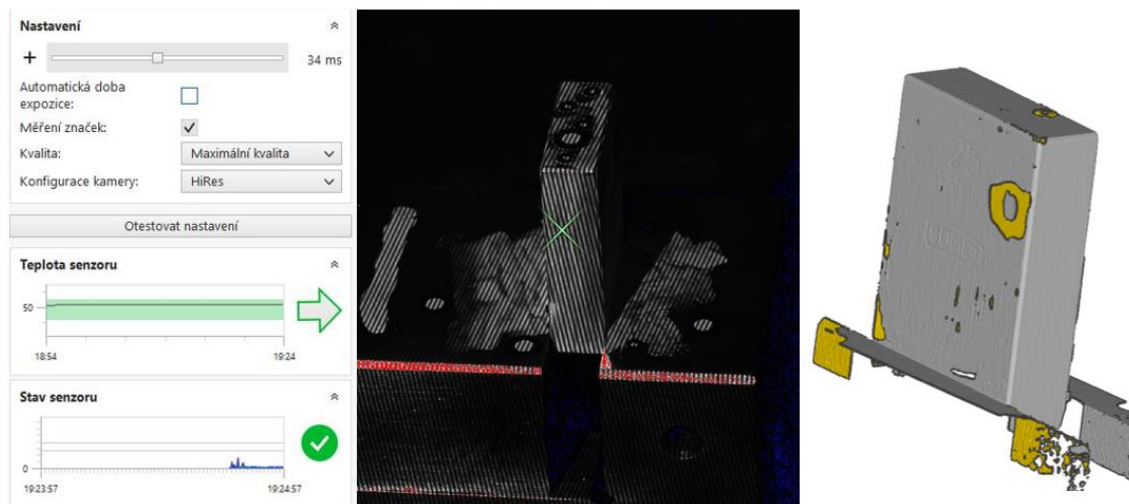
Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připisování se použila funkce Best fit. Po připisování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.2. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech osmi skenů.

Tabulka 15 Naměřené hodnoty koncové měřky se sublimující matnicí vrstvou (FOV 100)

Číslo měření	Rovinnost1 [mm]	Rovinnost2 [mm]	Vzdálenost [mm]
1	0,0109	0,0108	24,9796
2	0,0134	0,0096	24,9704
3	0,0117	0,0116	24,9745
4	0,0120	0,0141	24,9807
5	0,0136	0,0196	24,965
6	0,0226	0,0169	24,9547
7	0,0220	0,0223	24,9618
8	0,0122	0,0341	24,9566

Permanentní vrstva

Použila se stejná koncová měřka použitou v předchozím skenování měřky s permanentní vrstvou objektivem se zorným polem 45 mm, která již byla zmatněna. Přípravek μ Scan liquid je permanentním typem vrstvy, tudíž se nemusel nanášet znovu a přešlo se k dalšímu kroku. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 83 Koncová měřka s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

U výsledného mračna bodů se odstranil okolní šum a ořezal se na požadovanou část. Po úpravě se provedl jeho převod na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce Best fit. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.2. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 16 Naměřené hodnoty koncové měřky s permanentní matnicí vrstvou (FOV 100)

Číslo měření	Rovinnost1 [mm]	Rovinnost2 [mm]	Vzdálenost [mm]
1	0,0071	0,0054	24,9698
2	0,0061	0,0052	24,9718
3	0,0068	0,0051	24,9677
4	0,0068	0,0040	24,9676
5	0,0066	0,0052	24,9674
6	0,0068	0,0056	24,9661
7	0,0061	0,0047	24,9689
8	0,0065	0,0057	24,9687
9	0,0060	0,0049	24,9715
10	0,0048	0,0046	24,9672

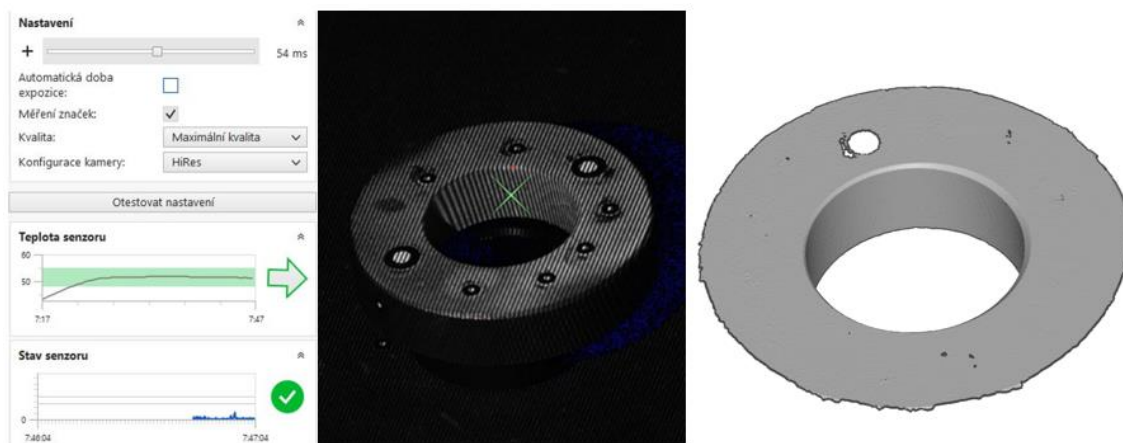
6.3.3 Skenování nastavovacího kroužku

Použil se stejný nastavovací kroužek z předchozích měření, který již byl polepen referenčními značkami.



Sublimující vrstva

Na nastavovací kroužek se nejdříve nanasla nová matná vrstva přípravku AB ZERO, jelikož se jednalo o sublimující vrstvu, tak od minulého skenování již vysublimovala. Po nanesení nové matné vrstvy se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřicí vzdálenost. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavil na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 84 Nastavovací kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. Z předchozích výsledků se došlo k závěru, že reálná skenovatelnost artefaktu po aplikaci matné vrstvy produktu AB ZERO je okolo dvaceti minut při zajištění naskenování alespoň 70 % povrchu, proto se měření opakovalo pouze osmkrát.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce 3-2-1. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.3. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech osmi skenů.

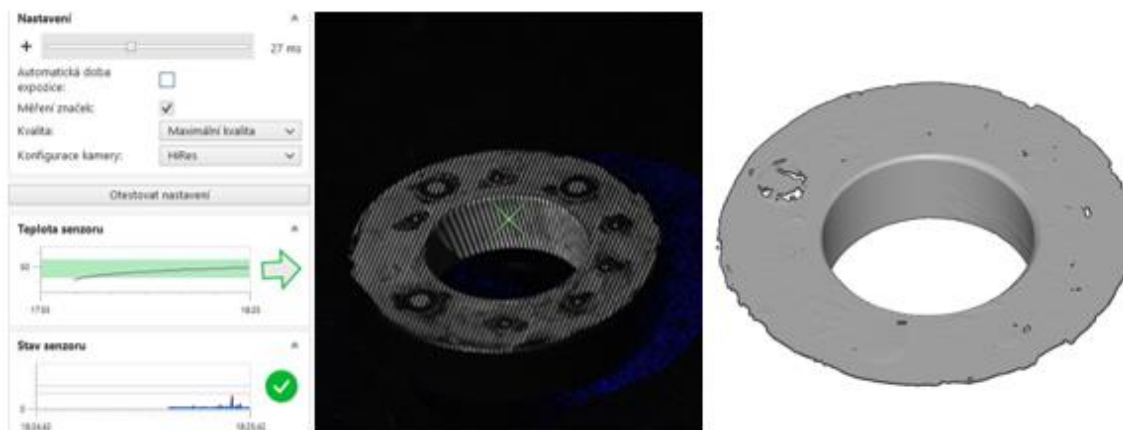
Tabulka 17 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku se sublimující matnou vrstvou (FOV 100)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	25,0236	25,0228	25,0254	0,0106	0,0097	0,0129
2	25,0190	25,0185	25,0214	0,0120	0,0111	0,0114
3	25,0214	25,0210	25,0232	0,0980	0,0850	0,0117
4	25,0240	25,0231	25,0260	0,0128	0,0086	0,0141
5	25,0254	25,0247	25,0271	0,0114	0,0105	0,0116
6	25,0271	25,0270	25,0293	0,0117	0,0113	0,0096
7	25,0327	25,0321	25,0344	0,0104	0,0098	0,0092
8	25,0289	25,0830	25,0307	0,0112	0,0086	0,0122



Permanentní vrstva

Použil se stejný nastavovací kroužek použitý v předchozím skenování s permanentní vrstvou objektivem se zorným polem 45 mm, který již byl zmatněn. Přípravek μ Scan liquid je permanentním typem vrstvy, tudíž se nemusel nanášet znovu a mohlo se přejít k dalšímu kroku. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 85 Nastavovací kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

U výsledného mračna bodů se odstranil okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl jeho převod na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připisování se použila funkce 3-2-1. Po připisování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.3. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 18 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku s permanentní matricí vrstvou (FOV 100)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	25,0228	25,0223	25,0171	0,0287	0,0247	0,0427
2	25,0204	25,0201	25,0144	0,0302	0,0247	0,0427
3	25,0215	25,0202	25,0152	0,0261	0,0240	0,0429
4	25,0217	25,0213	25,0160	0,0292	0,0278	0,0428
5	25,0227	25,0216	25,0163	0,0272	0,0262	0,0422
6	25,0228	25,0223	25,0171	0,0286	0,0241	0,0427
7	25,0193	25,0186	25,0130	0,0266	0,0259	0,0421
8	25,0210	25,0206	25,0152	0,0289	0,0235	0,0422
9	25,0210	25,0209	25,0153	0,0290	0,0254	0,0425
10	25,0227	25,0216	25,0163	0,0268	0,0253	0,0433

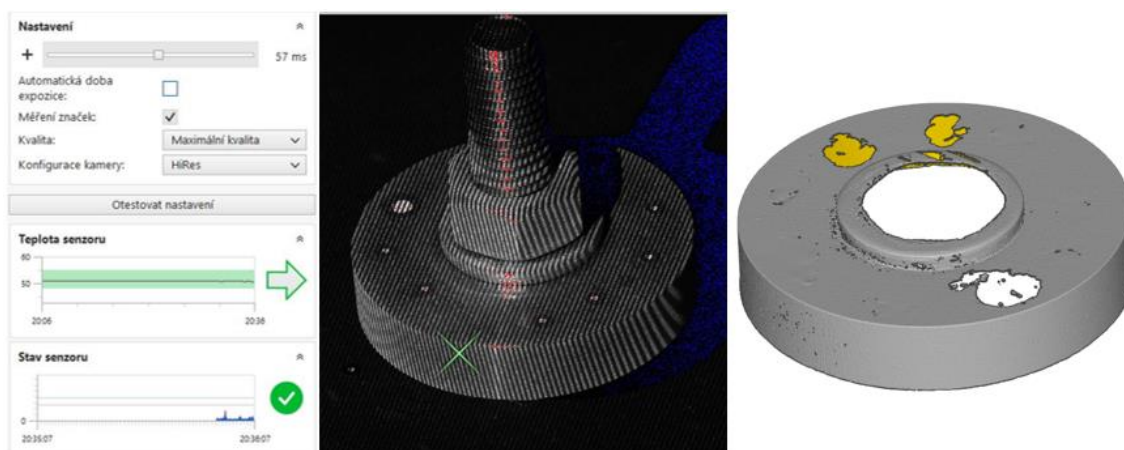


6.3.4 Skenování kalibračního kroužku

Použil se stejný kalibrační kroužek z předchozích měření, který již byl polepen referenčními značkami.

Sublimující vrstva

Na kalibrační kroužek se nejdříve nanasla nová matnicí vrstva přípravku AB ZERO, jelikož se jednalo o sublimující vrstvu, tak od minulého skenování již vysublimovala. Po nanesení nové matnicí vrstvy se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřící vzdálenost. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 86 Kalibrační kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně se importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. Z předchozích výsledků se došlo k závěru, že reálná skenovatelnost artefaktu po aplikaci matnicí vrstvy produktu AB ZERO byla okolo dvaceti minut při zajištění naskenování alespoň 70 % povrchu, proto se měření opakovalo pouze osmkrát.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce 3-2-1. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.1. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech osmi skenů.

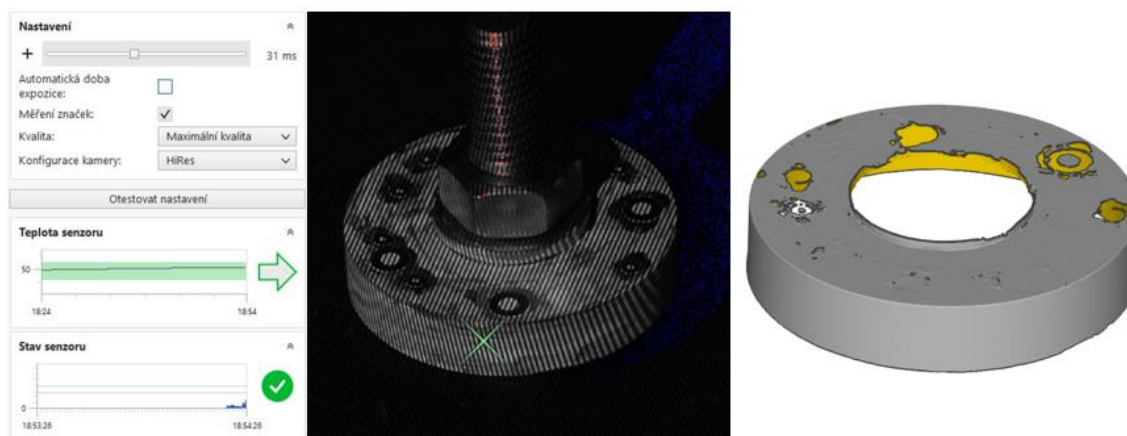


Tabulka 19 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku se sublimující matnou vrstvou (FOV 100)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	49,9820	49,9822	49,9827	0,0187	0,0165	0,0145
2	49,9864	49,9864	49,9870	0,0184	0,0141	0,0173
3	49,9849	49,9848	49,9856	0,0158	0,0129	0,0135
4	49,9791	49,9786	49,9796	0,0170	0,0194	0,0185
5	49,9840	49,9837	49,9844	0,0163	0,0174	0,0194
6	49,9832	49,9824	49,9833	0,0170	0,0175	0,0185
7	49,9806	49,9800	49,9814	0,0205	0,0195	0,0189
8	49,9764	49,9758	49,9777	0,0166	0,0295	0,0230

Permanentní vrstva

Použil se stejný kalibrační kroužek použitý v předchozím skenování s permanentní vrstvou objektivem se zorným polem 45 mm, který již byl zmatněn. Přípravek μ Scan liquid je permanentním typem vrstvy, tudíž se nemusel nanášet znovu a přešlo se k dalšímu kroku. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 87 Kalibrační kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

U výsledného mračna bodů se odstranil okolní šum a ořezal se na požadovanou část. Po úpravě se provedl jeho převod na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce 3-2-1. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.1. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.



Tabulka 20 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 100)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	49,9720	49,9698	49,9732	0,0116	0,0100	0,0118
2	49,9707	49,9684	49,9718	0,0126	0,0108	0,0121
3	49,9723	49,9702	49,9735	0,0118	0,0092	0,0129
4	49,9705	49,9684	49,9719	0,0122	0,0094	0,0143
5	49,9723	49,9703	49,9734	0,0122	0,0093	0,0124
6	49,9712	49,9693	49,9727	0,0116	0,0098	0,0141
7	49,9721	49,9700	49,9733	0,0120	0,0089	0,0121
8	49,9702	49,9683	49,9715	0,0120	0,0101	0,0128
9	49,9726	49,9704	49,9738	0,0107	0,0107	0,0115
10	49,9714	49,9692	49,9727	0,0105	0,0098	0,0116

6.4 Skenování objektivem s FOV 250 mm

Poslední měření vybraných artefaktů probíhalo sadou projektoru a objektivu se zorným polem 250 mm. Stejně jako v předchozím případě se po spuštění ovládacího a měřicího softwaru colin3D, instalaci konfigurace se zorným polem 250 mm a zahřátí na provozní teplotu, provedla uživatelská kalibrace zvolené konfigurace. Po úspěšné uživatelské kalibraci software vygeneruje protokol o kalibraci.

Protokol COMET kalibrace



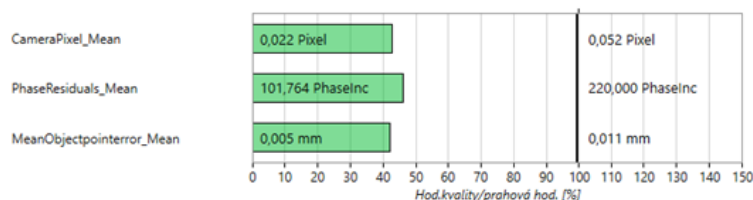
Výsledky

Kalibrace úspěšná:	Ano
Senzor:	AC_M_FLB57_00247_COMET_L3D_2_5M_250mm
Šablona:	CT_250_140_9_1
Kalibrační deska:	CP_P_300_0995
Datum ověření kalibrační desky:	19.04.2021
Datum/čas:	08.07.2022 9:57:11
Průměrná teplota senzoru:	50,5 °C
Teplotní rozsah:	7,0 °C
Prvotní kalibrace:	Ne
colin3D verze:	7.0.4.349

Hodnoty kvality

	Střední hodnota	Směrod. odchyl.	Maximum
CameraPixel [Pixel]	0,022	0,012	0,099
PhaseResiduals [PhaseInc]	101,764	70,552	537,579
MeanObjectpointerror [mm]	0,005	0,003	0,030
MaxObjectpointerror [mm]	0,006	0,003	0,044

Výsledkový diagram



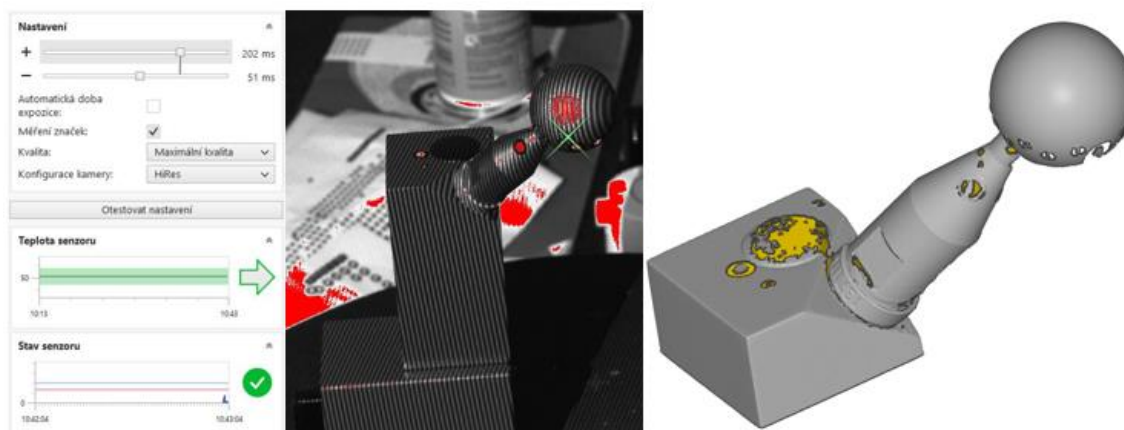
Obr. 88 Protokol o kalibraci objektivu s FOV 250 mm

Po úspěšné uživatelské kalibraci se mohlo přejít k samotnému skenování.



6.4.1 Skenování matné koule

Použila se stejná matná koule z předchozího měření, která již byla polepena referenčními značkami a po umístění matné koule na rotační stůl se mohlo rovnou přejít k nastavení pozice skeneru a parametrů skenování. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice určil software, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 89 Matná koule skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se ořezalo na požadovanou část a odstranil jsem šum. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů a vytvořila se tak trojúhelníkovou sít, která se zpravidelnila a data se vyexportovala pro následný import do měřicího software Calypso. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce Best fit. Výsledek připasování se ověřil pomocí generace barevné mapy. Po ověření připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.4. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 21 Naměřené hodnoty matné koule (FOV 250)

Číslo měření	Průměr [mm]	Tvar [mm]
1	29,9824	0,0353
2	29,9804	0,0414
3	29,9831	0,0348
4	29,9812	0,0305
5	29,9808	0,0794
6	29,9844	0,0808
7	29,9865	0,0887
8	29,9851	0,0857
9	29,9843	0,0876
10	29,9844	0,0875

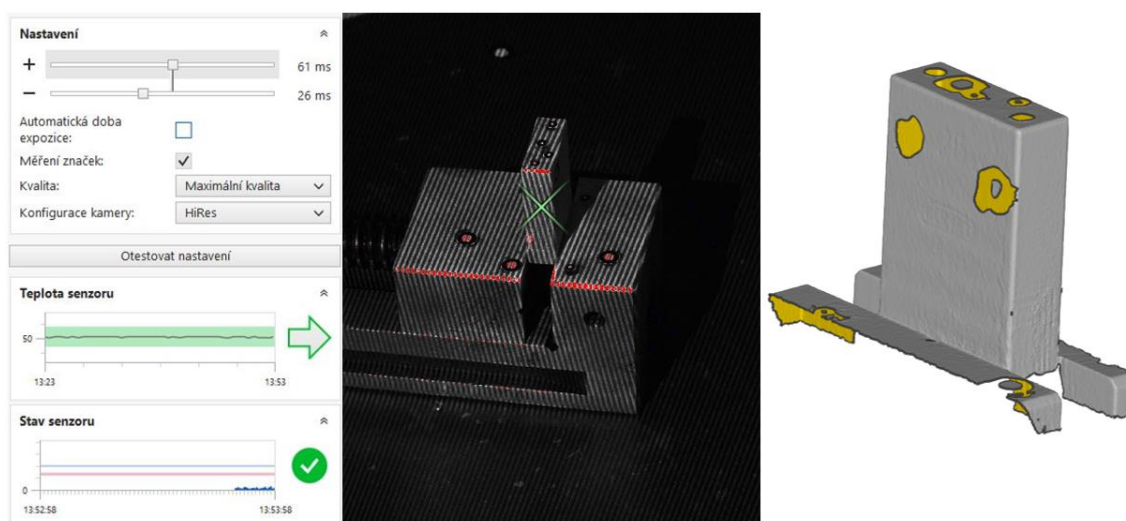


6.4.2 Skenování koncové měrky

Použila se stejná koncová měrka z předchozích měření, která již byla polepena referenčními značkami.

Sublimující vrstva

Na koncovou měrku se nejdříve nanasla nová matnicí vrstva přípravku AB ZERO, jelikož se jednalo o sublimující vrstvu, tak od minulého skenování již vysublimovala. Po nanesení nové matnicí vrstvy se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřicí vzdálenost. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 90 Koncová měrka se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezalo se na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. Z předchozích výsledků se došlo k závěru, že reálná skenovatelnost artefaktu po aplikaci matnicí vrstvy produktu AB ZERO byla okolo dvaceti minut při zajištění naskenování alespoň 70 % povrchu, proto se měření opakovalo pouze osmkrát.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce Best fit. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.2. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech osmi skenů.

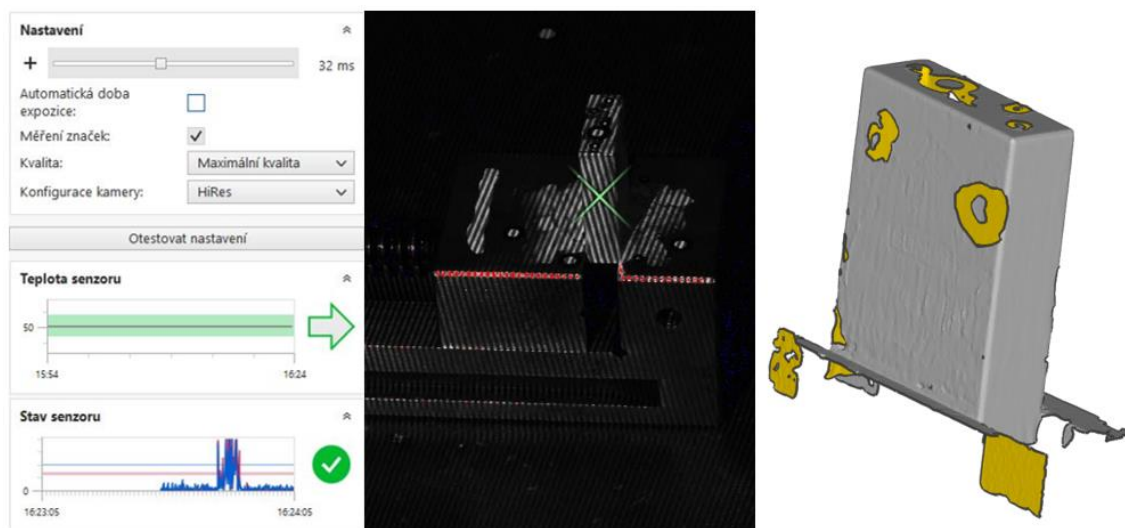


Tabulka 22 Naměřené hodnoty koncové měrky se sublimující matnicí vrstvou (FOV 250)

Číslo měření	Rovinnost1 [mm]	Rovinnost2 [mm]	Vzdálenost [mm]
1	0,0346	0,0277	25,01
2	0,0367	0,0311	25,0049
3	0,0335	0,0314	24,9969
4	0,0428	0,0396	25,0063
5	0,0482	0,0381	24,9995
6	0,0516	0,0498	24,9922
7	0,0485	0,0507	24,9993
8	0,0594	0,0550	24,9948

Permanentní vrstva

Použila se stejná koncová měrka použitá v předchozím skenování měrky s permanentní vrstvou objektivy se zornými poli 45 a 100 mm, která již byla zmatněna. Přípravek μ Scan liquid je permanentním typem vrstvy, tudíž se nemusel nanášet znovu a přešlo se k dalšímu kroku. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavil na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 91 Koncová měrka s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

U výsledného mračna bodů se odstranil okolní šum a ořezal se na požadovanou část. Po úpravě se provedl jeho převod na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce Best fit. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.2. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.



Tabulka 23 Naměřené hodnoty koncové měřky s permanentní matnicí vrstvou (FOV 250)

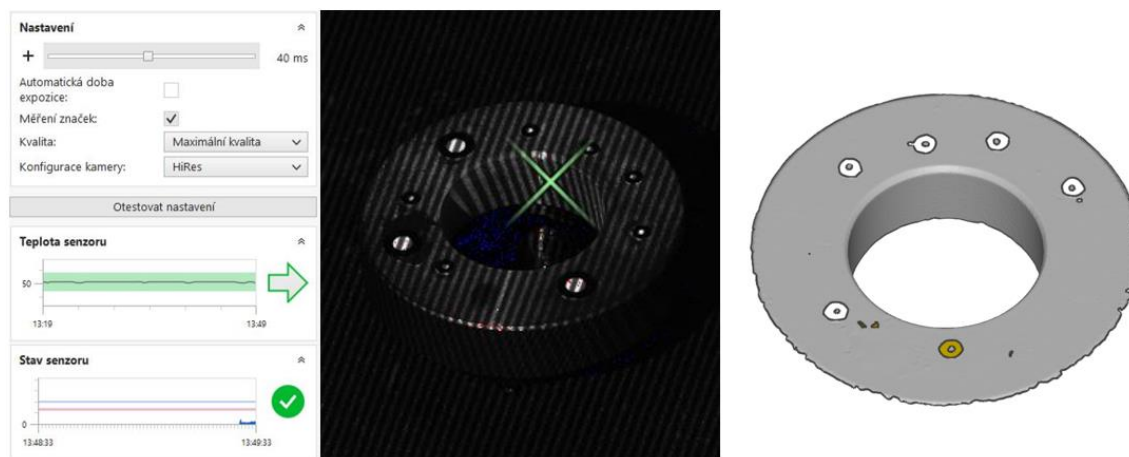
Číslo měření	Rovinnost1 [mm]	Rovinnost2 [mm]	Vzdálenost [mm]
1	0,0168	0,0127	24,9827
2	0,0146	0,0091	24,9768
3	0,0152	0,0113	24,9753
4	0,0126	0,0126	24,9798
5	0,0167	0,0091	24,9786
6	0,0131	0,0090	24,9788
7	0,0146	0,0111	24,9776
8	0,0181	0,0127	24,9789
9	0,0136	0,0129	24,9796
10	0,0127	0,0108	24,9758

6.4.3 Skenování nastavovacího kroužku

Použil se stejný nastavovací kroužek z předchozích měření, který již byl polepen referenčními značkami.

Sublimující vrstva

Na nastavovací kroužek se nejdříve nanasla nová matnicí vrstva přípravku AB ZERO, jelikož se jedná o sublimující vrstvu, tak od minulého skenování již vysublimovala. Po nanesení nové matnicí vrstvy se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřící vzdálenost. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 92 Nastavovací kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezal ho na požadovanou část. Po úpravě se provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. Z předchozích výsledků se došlo k závěru, že reálná skenovatelnost artefaktu po aplikaci matnicí vrstvy produktu AB ZERO byla okolo dvaceti minut při zajištění naskenování alespoň 70 % povrchu, proto se měření opakovalo pouze osmkrát.



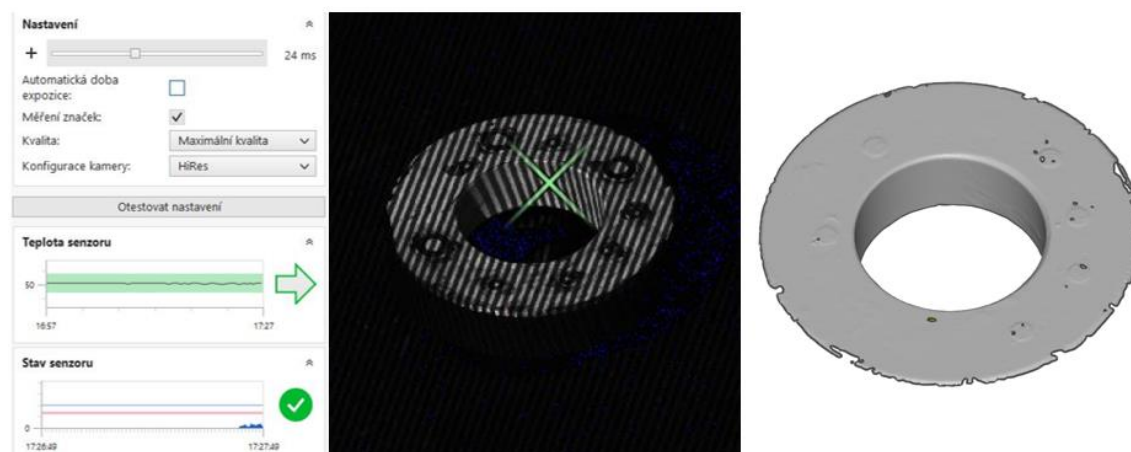
Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce 3-2-1. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.3. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech osmi skenů.

Tabulka 24 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku se sublimující matrní vrstvou (FOV 250)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	25,0139	25,0106	25,0153	0,0118	0,0106	0,0102
2	25,0168	25,0142	25,0194	0,0117	0,0099	0,0129
3	25,0190	25,0159	25,0210	0,0122	0,0120	0,0129
4	25,0246	25,0209	25,0261	0,0091	0,0099	0,0103
5	25,0214	25,0188	25,0233	0,0133	0,0112	0,0117
6	25,0219	25,0187	25,0231	0,0145	0,0134	0,0118
7	25,0222	25,0198	25,0235	0,0108	0,0109	0,0121
8	25,0247	25,0216	25,0264	0,0124	0,0139	0,0135

Permanentní vrstva

Použil se stejný nastavovací kroužek použitý v předchozích skenování s permanentní vrstvou objektivu se zornými poli 45 a 100 mm, který již byl zmatněn. Přípravek μ Scan liquid je permanentním typem vrstvy, tudíž se nemusel nanášet znovu a přešlo se k dalšímu kroku. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 93 Nastavovací kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

U výsledného mračna bodů se odstranil okolní šum a ořezal se požadovanou část. Po úpravě se provedl jeho převod na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických se skenování desetkrát opakovalo.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce 3-2-1. Po připasování se aplikoval identický plán měření



blíže popsany v kapitole 5.3.3. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 25 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 250)

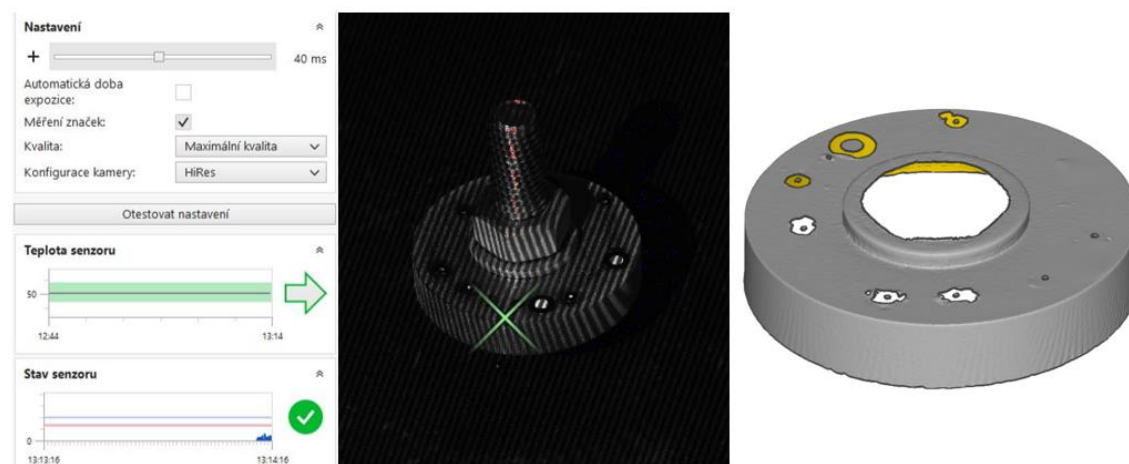
Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	25,0152	25,0145	25,0098	0,0270	0,0245	0,0382
2	25,0148	25,0134	25,0089	0,0292	0,0250	0,0388
3	25,0175	25,0159	25,0118	0,0291	0,0236	0,0363
4	25,0082	25,0075	25,0024	0,0337	0,0281	0,0384
5	25,0163	25,0154	25,0114	0,0305	0,0242	0,0384
6	25,0184	25,0177	25,0132	0,0299	0,0276	0,0400
7	25,0142	25,0138	25,0090	0,0311	0,0263	0,0400
8	25,0171	25,0156	25,0100	0,0293	0,0259	0,0416
9	25,0183	25,0174	25,0134	0,0309	0,0243	0,0380
10	25,0189	25,0176	25,0128	0,0276	0,0249	0,0379

6.4.4 Skenování kalibračního kroužku

Použil se stejný kalibrační kroužek z předchozích měření, který již byl polepen referenčními značkami.

Sublimující vrstva

Na kalibrační kroužek se nejdříve nanasla nová matnicí vrstva přípravku AB ZERO, jelikož se jednalo o sublimující vrstvu, tak od minulého skenování již vysublimovala. Po nanesení nové matnicí vrstvy se provedlo nastavení pozice skeneru a určila se měřící vzdálenost. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 94 Kalibrační kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

Výsledné mračno bodů se upravilo, odstranil se okolní šum a ořezal se na požadovanou část. Po úpravě provedl mesh mraku bodů neboli převedl se na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena



trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. Z předchozích výsledků se došlo k závěru, že reálná skenovatelnost artefaktu po aplikaci matné vrstvy produktu AB ZERO byla okolo dvaceti minut při zajištění naskenování alespoň 70 % povrchu, proto se měření opakovalo pouze osmkrát.

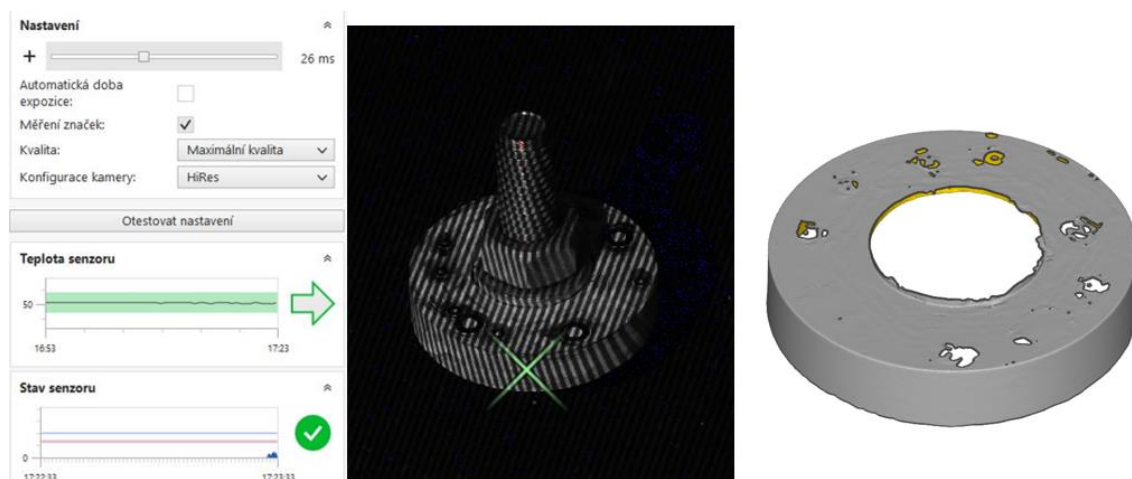
Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce 3-2-1. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.1. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech osmi skenů.

Tabulka 26 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku se sublimující matnou vrstvou (FOV 250)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	49,9900	49,9962	49,9882	0,0184	0,0122	0,0275
2	49,9891	49,9948	49,9880	0,0182	0,0136	0,0264
3	49,9829	49,9876	49,9818	0,0174	0,0118	0,0327
4	49,9822	49,9864	49,9826	0,0227	0,0165	0,0416
5	49,9827	49,9880	49,9834	0,0301	0,0206	0,0423
6	49,9850	49,9907	49,9876	0,0300	0,0204	0,0408
7	49,9785	49,9822	49,9792	0,0292	0,0154	0,0367
8	49,9836	49,9874	49,9836	0,0323	0,0212	0,0385

Permanentní vrstva

Použil se stejný kalibrační kroužek použitý v předchozím skenování s permanentní vrstvou objektivu se zornými poli 45 a 100 mm, který již byl zmatněn. Přípravek μ Scan liquid je permanentním typem vrstvy, tudíž se nemusel nanášet znovu a přešlo se k dalšímu kroku. Opět se zvolilo, že výsledný sken se bude tvořit z dvanácti snímků, čas expozice byl určen softwarem, aktivovala se funkce měření značek, kvalita se nastavila na maximální a konfigurace kamery na vysoké rozlišení.



Obr. 95 Kalibrační kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)

U výsledného mračna bodů se odstranil okolní šum a ořezal se na požadovanou část. Po úpravě se provedl jeho převod na trojúhelníkovou síť. U získané trojúhelníkové sítě se



provedlo zpravidelnění a získaná data tvořena trojúhelníkovou sítí se vyexportovala ve formátu .stl a následně importovala do softwaru Calypso, kde došlo ke změření zkoumaných charakteristik. K získání statistických údajů se skenování desetkrát opakovalo.

Po importování CAD dat a trojúhelníkové sítě se musely tyto modely připasovat. K připasování se použila funkce 3-2-1. Po připasování se aplikoval identický plán měření blíže popsany v kapitole 5.3.1. Výsledná naměřená data jsou v tabulce níže. Provedlo se měření všech deseti skenů.

Tabulka 27 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 250)

Číslo měření	Průměr1 [mm]	Průměr2 [mm]	Průměr3 [mm]	Kruhovitost1 [mm]	Kruhovitost2 [mm]	Kruhovitost3 [mm]
1	49,9756	49,9778	49,9758	0,0135	0,0142	0,0127
2	49,9764	49,9782	49,9766	0,0116	0,0136	0,0119
3	49,9736	49,9754	49,9733	0,0114	0,0106	0,0137
4	49,9738	49,9758	49,9740	0,0126	0,0117	0,0139
5	49,9756	49,9781	49,9757	0,0112	0,0129	0,0113
6	49,9772	49,9795	49,9772	0,0124	0,0136	0,0121
7	49,9747	49,9772	49,9751	0,0129	0,0112	0,0125
8	49,9758	49,9780	49,9761	0,0121	0,0132	0,0102
9	49,9764	49,9788	49,9767	0,0135	0,0125	0,0122
10	49,9824	49,9849	49,9826	0,0109	0,0137	0,0117

7. Zpracování a vyhodnocení naměřených dat

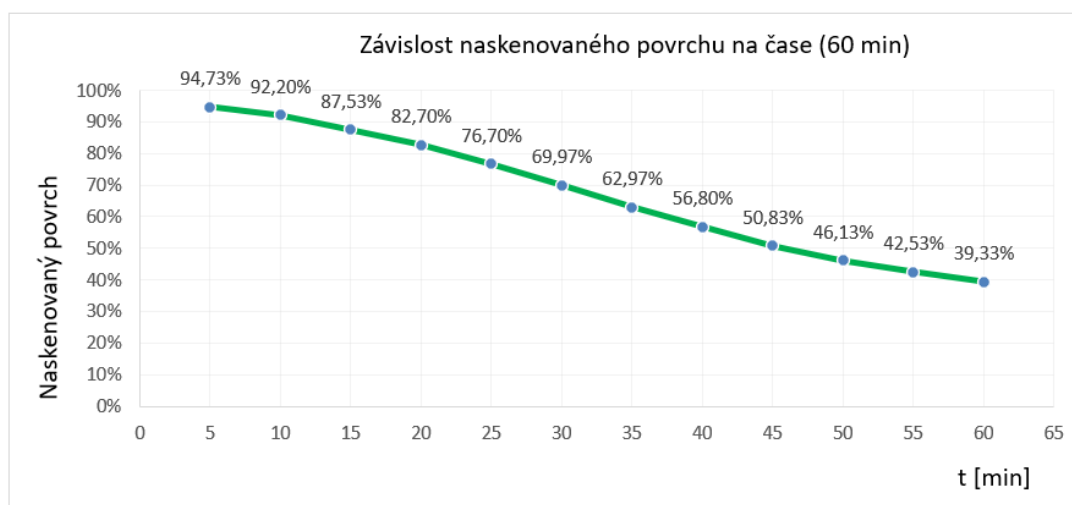
7.1 Vliv sublimace matnicí vrstvy na podíl naskenovaného povrchu

Vedlejším cílem této práce bylo posouzení vlivu sublimace matnicí vrstvy vytvořené nástřikem produktu AB ZERO na podíl naskenovaného povrchu. U tohoto produktu výrobce deklaruje schopnost skenovat měřenou součást do jedné hodiny. K ověření této schopnosti byly, po aplikaci matnicí vrstvy, artefakty koncové měřky, kalibračního kroužku a nastavovacího kroužku skenovány po dobu jedné hodiny. Skenování po dobu jedné hodiny bylo provedeno pouze u konfigurace objektivu FOV 45 mm. Artefakty byly skenovány po dobu jedné hodiny, kdy každý sken trval 5 minut a celkem bylo zaznamenáno 12 skenů. Vzniklé modely tvořené trojúhelníkovou sítí získané ze skenování optickým skenerem byly porovnány s CAD modely daných artefaktů. Výsledky jsou zaznamenány níže v tabulce a graficky znázorněny v grafu závislosti naskenovaného povrchu na čase.



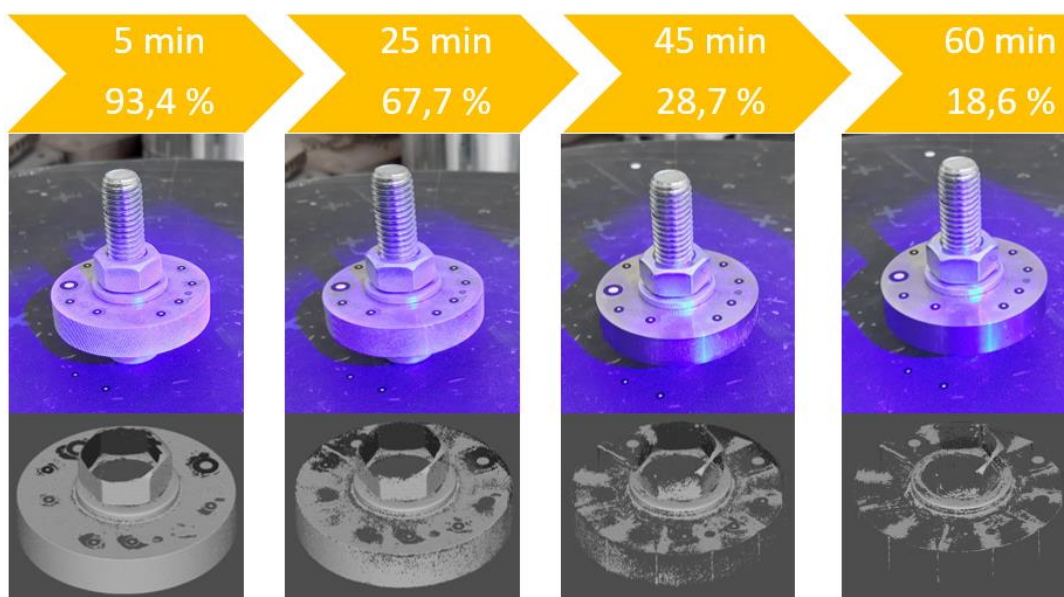
Tabulka 28 Podíl naskenovaného povrchu (60 min, FOV 45 mm)

		Čas [min]											
Artefakt		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Naskenovaný povrch [%]	Koncová měrka	95,0	93,0	87,2	81,7	74,8	68,1	61,2	54,1	45,7	40,1	34,6	28,6
	Nastavovací kroužek	95,8	93,6	91,4	90,1	87,6	84,6	81,5	80,0	78,1	75,0	73,0	70,8
	Kalibrační kroužek	93,4	90,0	84,0	76,3	67,7	57,2	46,2	36,3	28,7	23,3	20,0	18,6
	Průměr	95,0	93,0	87,2	81,7	74,8	68,1	61,2	54,1	45,7	40,1	34,6	28,6



Graf 2 Podíl naskenovaného povrchu (60 min, FOV 45 mm)

Příklad vlivu rychlosti sublimace na podíl naskenovaného povrchu měřeného artefaktu kalibračního kroužku, skenovaného objektivem s FOV 45 mm, je prezentován na obrázku níže.



Obr. 96 Podíl naskenovaného povrchu kalibračního kroužku (60 min, FOV 45 mm)

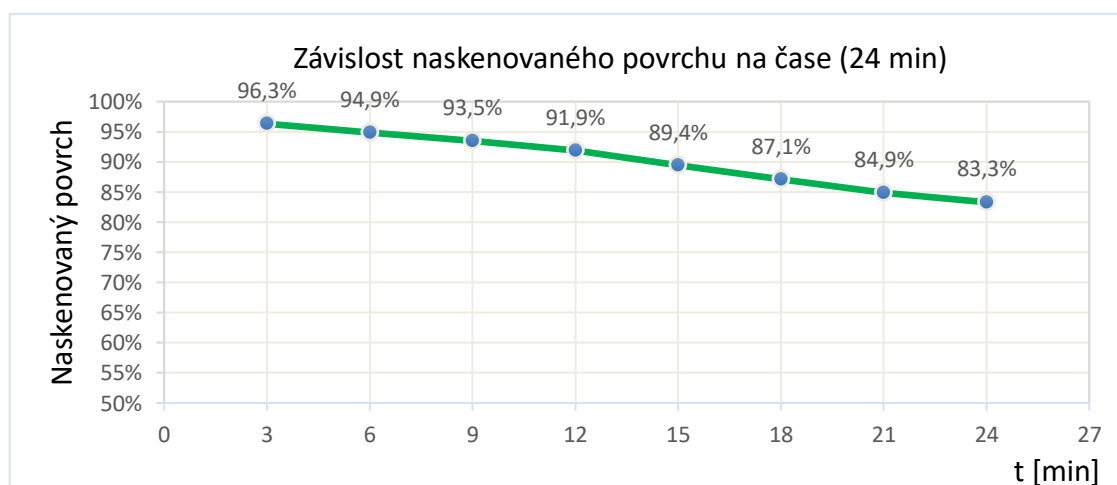


Výsledky vůbec nepoukazovaly na možnost skenovat měřené artefakty po dobu jedné hodiny. Ve dvou ze tří měřených artefaktů byl po uplynutí jedné hodiny podíl naměřeného povrchu menší než 30 %. Tím třetím byl artefakt nastavovací kroužek, u kterého byl podíl naskenovaného povrchu 70 %. Nicméně to bylo bohužel také způsobeno větším vzájemným překrytím vrstev, což také poukazuje na problematiku aplikace matných vrstev na povrch otvorů. Z těchto výsledků bylo dále stanoveno další měření, kdy pro konfigurace objektivů s FOV 100 a 250 mm, byl omezen čas skenování na hodnotu 25 minut, kdy by měl být podíl naskenovaného povrchu okolo 75 %.

Následující skenování proběhlo s konfiguracemi objektivů FOV 100 a 250 mm. Artefakty byly skenovány po dobu 24 minut, kdy každý sken trval 3 minuty a celkem bylo zaznamenáno 8 skenů. Vzniklé modely tvořené trojúhelníkovou sítí získané ze skenování optickým skenerem byly porovnány s CAD modely daných artefaktů. Výsledky jsou zaznamenané níže v tabulce a graficky znázorněné v grafu závislosti naskenovaného povrchu na čase.

Tabulka 29 Podíl naskenovaného povrchu (24 minut)

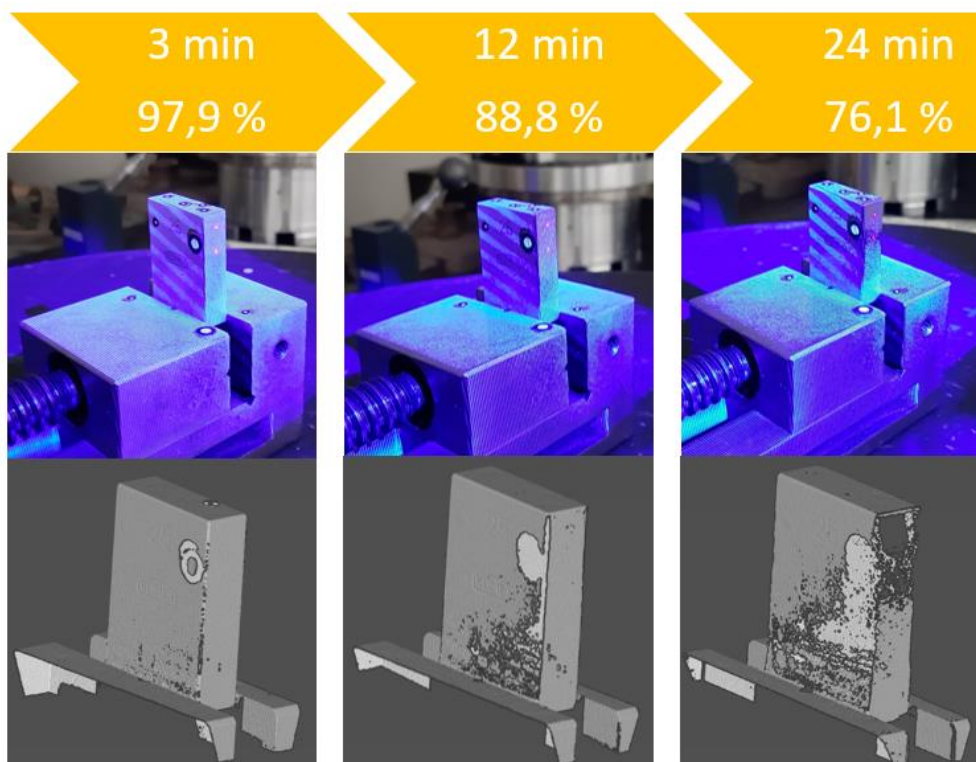
FOV_Artefakt		Čas [min]							
		3	6	9	12	15	18	21	24
Naskenovaný povrch [%]	100_Kalibrační kroužek	94,5	92,5	91,4	88,6	84,7	80,8	77,3	74,7
	100_Nastavovací kroužek	95,2	94,7	94,4	93,6	92,9	92,7	92,1	90,9
	100_Koncová měrka	97,9	94,2	91,5	88,8	85,4	82,1	78,4	76,1
	250_Kalibrační kroužek	96,1	95,7	94,2	91,9	88,4	86,1	83,9	82,1
	250_Nastavovací kroužek	98,2	97,8	97,5	97,3	96,8	95,2	94,4	94,0
	250_Koncová měrka	96,1	94,3	92,1	91,0	88,2	85,6	83,4	81,8
	Průměr	96,3	94,9	93,5	91,9	89,4	87,1	84,9	83,3



Graf 3 Podíl naskenovaného povrchu (24 min)



Příklad vlivu rychlosti sublimace na podíl naskenovaného povrchu měřeného artefaktu koncové měřky, skenované objektivem s FOV 100 mm, je prezentován na obrázku níže.



Obr. 97 Podíl naskenovaného povrchu koncové měřky (24 min, FOV 100 mm)

Výsledky poukazyvaly na to, že reálnější by byl údaj o skenovatelnosti do dvaceti minut, kdy je zajištěn podíl skenovatelnosti nad 80 %. Z výsledků bylo opět možné si povšimnout vyššího podílu skenovatelnosti u nastavovacího kroužku související s již výše zmíněnou problematikou zmatnění povrchu otvorů.

Velikost rychlosti sublimace matnicí vrstvy velmi ovlivňovala schopnost opakovaně změřit měřenou součást. U produktu AB ZERO výrobce deklaroval schopnost skenovat měřenou součást do jedné hodiny. Při provádění skenování bylo zjištěno, že reálná skenovatelnost se ani zdaleka neblížila udávané hodnotě.

7.2 Analýza výsledků měření 3D optickým skenerem

V této části se zpracovávaly výsledky měření modelů tvořených trojúhelníkovou sítí. STL modely byly získány opakovaným měřením daných artefaktů sadou tří objektivů s FOV 45, 100 a 250 mm. Tyto STL modely byly vytvořeny v softwaru colin3D a změřeny v softwaru Calypso. Jako referenční hodnota posloužily výsledky z měření jednotlivých artefaktů na souřadnicovém měřicím stroji, změřeny taktéž za pomoci software Calypso. Výsledky byly prezentovány pomocí základních statistických charakteristik a krabicových grafů.

7.2.1 Měření matné koule

Měřený artefakt matné koule jako jediný nevyžadoval, k možnosti naskenování, aplikaci matnicí vrstvy na svůj povrch. Tyto výsledky tak, jako jediné, nebyly zatíženy vlivem



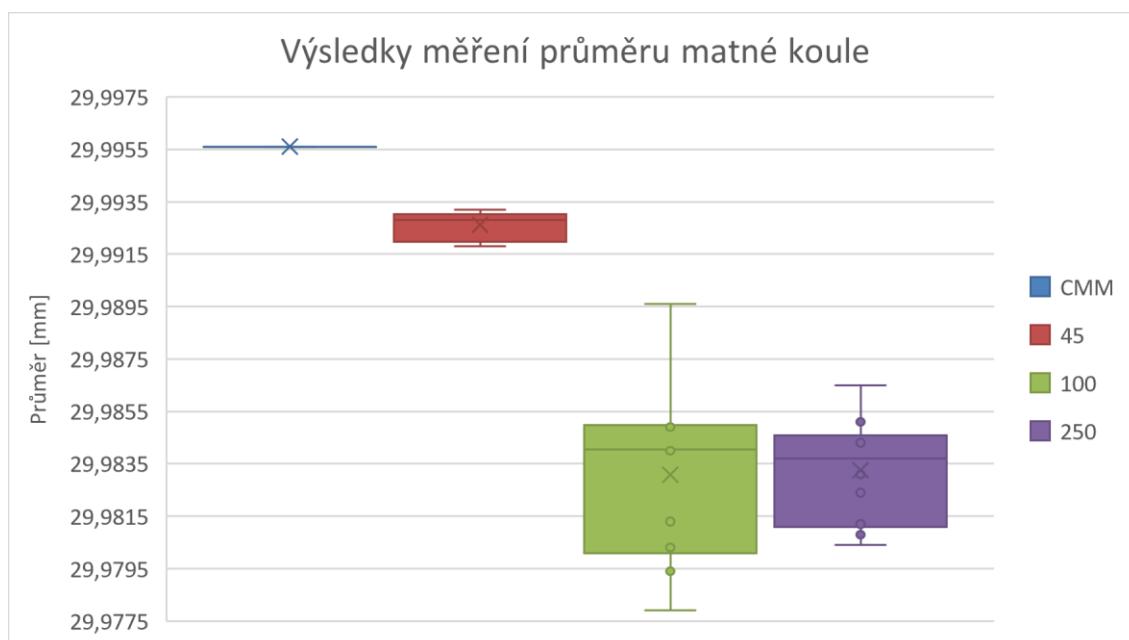
matnicí vrstvy. Vyhodnocované charakteristiky v tomto případě představoval průměr koule a chyba tvaru koule.

Průměr matné koule

Výsledky měření průměru koule, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.

Tabulka 30 Základní statistické charakteristiky - průměr matné koule

	CMM	FOV 45	FOV 100	FOV 250
\bar{x} [mm]	29,9956	29,9926	29,9831	29,9833
s [mm]	0,0000	0,0005	0,0034	0,0020
Me [mm]	29,9956	29,9928	29,9841	29,9837
x_{\max} [mm]	29,9956	29,9932	29,9896	29,9865
x_{\min} [mm]	29,9956	29,9918	29,9779	29,9804
R [mm]	0,0000	0,0014	0,0117	0,0061



Graf 4 Krabicový graf výsledků měření průměru matné koule

Výsledky vykazují, že referenční hodnota průměru koule 29,9956 mm byla určena velmi přesně, kdy směrodatná odchylka tohoto měření byla prakticky nulová. Nejbližší k této hodnotě byly výsledky získané objektivem s FOV 45, které vykazovaly odchylku průměrné hodnoty průměru koule 0,5 μm , a i opakovatelnost výsledku byla poměrně dobrá, jelikož byly naměřené hodnoty v rozpětí 1,4 μm . Největší odchylku vykazovaly hodnoty naměřené objektivy s FOV 100 a 250, kde průměrná hodnota nabývala odchylky přes 12 μm . Z pohledu opakovatelnosti na tom byla hůře konfigurace FOV 100, kdy směrodatná odchylka byla 3,4 μm a rozpětí hodnot 11,7 μm . Získávaná odchylka byla záporná, lze tak tvrdit, že optický skener udával nižší hodnoty průměru koule čili tento element zmenšoval.

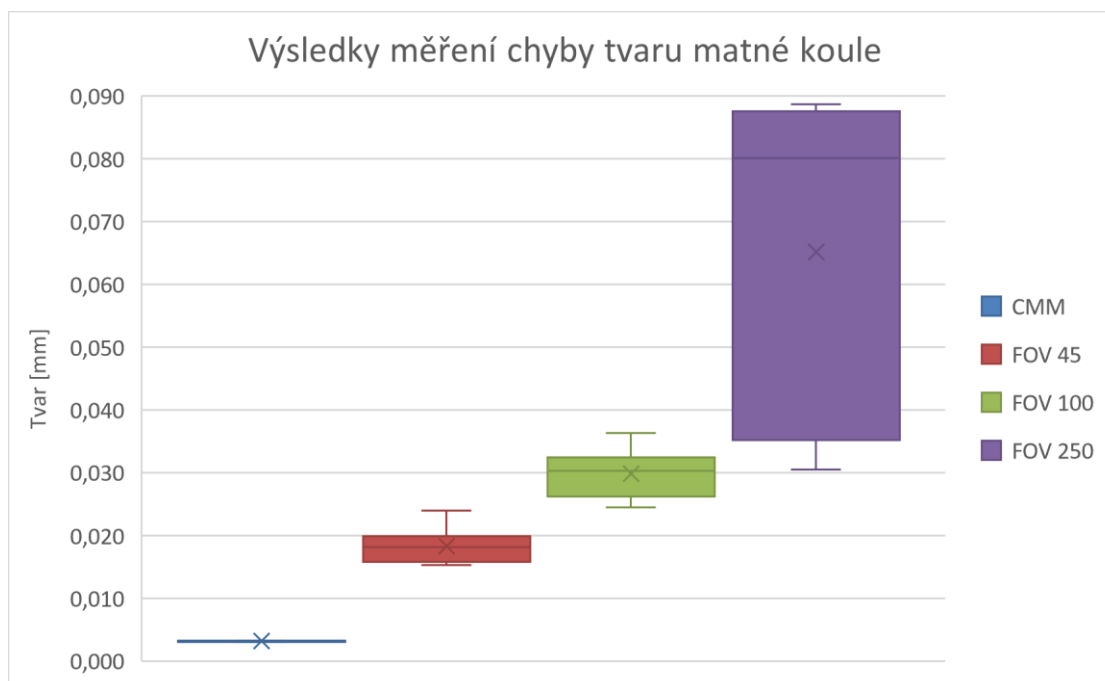


Chyba tvaru matné koule

Výsledky měření chyby tvaru matné koule, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.

Tabulka 31 Základní statistické charakteristiky – chyba tvaru matné koule

	CMM	FOV 45	FOV 100	FOV 250
\bar{x} [mm]	0,0032	0,0183	0,0298	0,0652
s [mm]	0,0001	0,0027	0,0037	0,0258
Me [mm]	0,0032	0,0182	0,0303	0,0801
x_{\max} [mm]	0,0033	0,0240	0,0363	0,0887
x_{\min} [mm]	0,0030	0,0153	0,0245	0,0305
R [mm]	0,0003	0,0087	0,0118	0,0582



Graf 5 Krabicový graf výsledků měření chyby tvaru matné koule

Referenční hodnota chyby tvaru matné koule byla dle výsledků 3,2 μm . Tato hodnota byla určena se směrodatnou odchylkou 0,1 μm a rozpětím hodnot 0,3 μm . Pozoroval se zde postupný nárůst odchylky všech charakteristických hodnot od reference s nárůstem velikosti zorného pole. Kdy FOV 45 byl odchýlen o 15,1 μm se směrodatnou odchylkou 2,7 μm a rozpětím hodnot 8,7 μm , FOV 100 o 26,6 μm se směrodatnou odchylkou 3,7 μm a rozpětím hodnot 11,8 μm . Velké odchylky 62 μm dosahoval FOV 250 se směrodatnou odchylkou 25,7 μm a rozpětím hodnot 58,2 μm .

7.2.2 Měření kalibračního kroužku

Kalibrační kroužek již představoval artefakt potřebující nanesení matnící vrstvy k dosažení možnosti být naskenován. Na kalibrační kroužek se nanasla jak sublimující, tak poté i permanentní matnící vrstva. Měřené charakteristiky u kalibračního kroužku byly průměr, vytvořený zprůměrováním hodnot průměrů tří kružnic z rozdílných



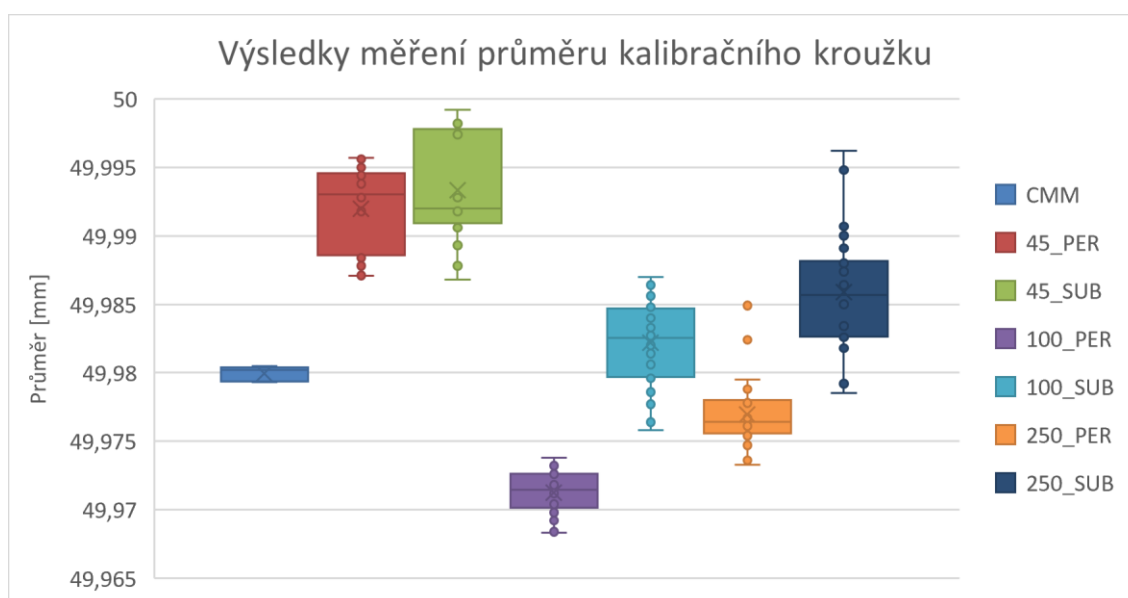
výškových úrovní, a kruhovitost tvořena zprůměrování jednotlivých kruhovitostí právě těchto kružnic.

Průměr kalibračního kroužku

Výsledky měření průměru kalibračního kroužku, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.

Tabulka 32 Základní statistické charakteristiky – průměr kalibračního kroužku

	CMM	45_PER	45_SUB	100_PER	100_SUB	250_PER	250_SUB
\bar{x} [mm]	49,9800	49,9920	49,9933	49,9712	49,9822	49,9769	49,9859
s [mm]	0,0005	0,0030	0,0039	0,0016	0,0032	0,0027	0,0044
Me [mm]	49,9802	49,9931	49,9920	49,9715	49,9826	49,9764	49,9857
x_{\max} [mm]	49,9805	49,9957	49,9992	49,9738	49,9870	49,9849	49,9962
x_{\min} [mm]	49,9793	49,9871	49,9868	49,9683	49,9758	49,9733	49,9785
R [mm]	0,0012	0,0086	0,0124	0,0055	0,0112	0,0116	0,0177



Graf 6 Krabicový graf výsledků měření průměru kalibračního kroužku

Z předchozí tabulky a grafického znázornění byla určena referenční hodnota měřením na souřadnicovém měřicím stroji 49,98 mm se směrodatnou odchylkou 0,5 μm . V případě měření objektivem FOV 45 vycházely poměrně srovnatelné průměrné hodnoty odchylky, 12 μm v případě permanentní vrstvy a 13,3 μm v případě sublimující vrstvy, a jednalo se o kladnou odchylku, což poukazovalo na tloušťku nanesených matnicích vrstev. Nicméně tento trend již nebyl pozorován u FOV 100 a 250, kde v případě permanentních vrstev se dostávala odchylka oproti referenci do záporné hodnoty o 8,8 μm , resp. 2,2 μm . V případě sublimující vrstvy byla pak odchylka od vrstvy permanentní u FOV 100 11,2 μm a u FOV 250 9 μm . Tyto výsledky pak poukazovaly na to, že sublimující vrstva dosahuje větší tloušťky než vrstva permanentní. Když se bude vycházet z výsledků měření matné koule, tak sledovaný rozměr by měl být v základu menší než referenční hodnota, a pouze rozšířený o tloušťku matnicí vrstvy. Toto vychýlení mohl způsobovat například faktor okolního osvětlení.

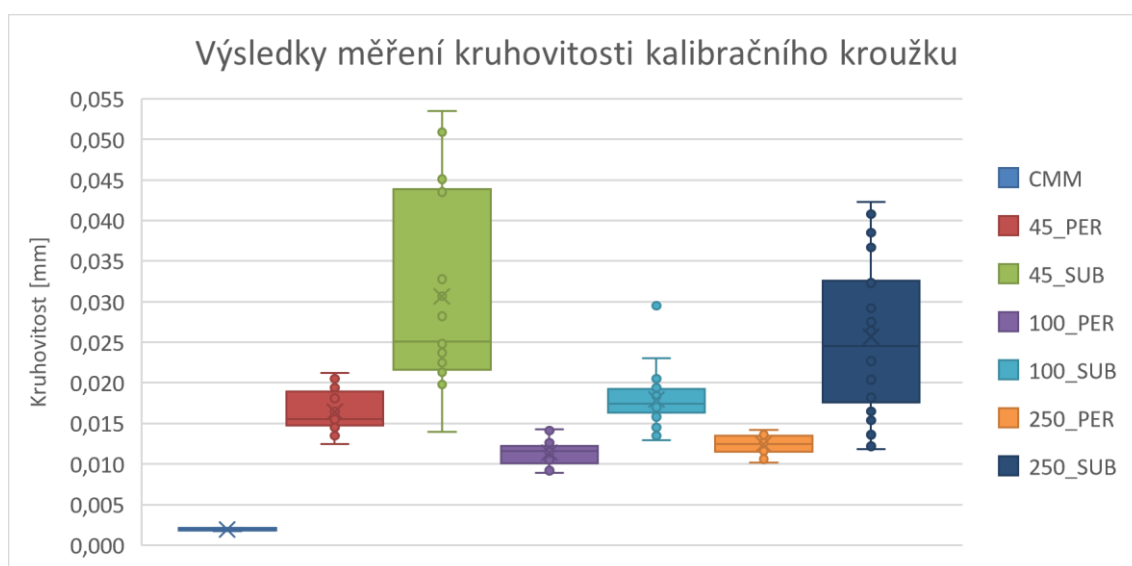


Kruhovitost kalibračního kroužku

Výsledky měření kruhovitosti kalibračního kroužku, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.

Tabulka 33 Základní statistické charakteristiky – kruhovitost kalibračního kroužku

	CMM	45_PER	45_SUB	100_PER	100_SUB	250_PER	250_SUB
\bar{x} [mm]	0,0019	0,0164	0,0307	0,0114	0,0179	0,0124	0,0257
s [mm]	0,0001	0,0024	0,0125	0,0014	0,0034	0,0011	0,0097
Me [mm]	0,0019	0,0156	0,0251	0,0116	0,0175	0,0125	0,0246
x_{\max} [mm]	0,0021	0,0212	0,0535	0,0143	0,0295	0,0142	0,0423
x_{\min} [mm]	0,0017	0,0125	0,0140	0,0089	0,0129	0,0102	0,0118
R [mm]	0,0004	0,0087	0,0395	0,0054	0,0166	0,0040	0,0305



Graf 7 Krabicový graf výsledků měření kruhovitosti kalibračního kroužku

Z výsledků měření kruhovitosti byla patrná shoda u hodnot permanentní vrstvy, kdy se kruhovitost pohybovala v rozmezí 9 až 21 μm , nicméně i to představovalo minimální odchylku od reference o 7 μm . Výrazně rozptýlené byly pak hodnoty kruhovitosti u sublimujících vrstev, především u FOV 45 a FOV 250, kde rozpětí hodnot bylo 39,5 μm se směrodatnou odchylkou 12,5 μm resp. 30,5 μm se směrodatnou odchylkou 9,7 μm . V případě FOV 100 to nebylo tak signifikantní, ale přesto bylo rozpětí 16,6 μm a směrodatná odchylka 3,4 μm . Tyto rozpětí pak byly patrně ovlivněny sublimací vrstvy, kdy z postupně prosvítavých míst vznikaly odlesky a tvořil se šum.

7.2.3 Měření koncové měřky

Koncová měřka byla opět artefakt potřebující potřebu nanesení matnicí vrstvy pro zajištění možnosti její skenovatelnosti. Na koncovou měřku se nanasla jak sublimující, tak poté i permanentní matnicí vrstva. Vyhodnocované charakteristiky koncové měřky byly vzdálenost, představující rozměr mezi dvěma rovinami, a velikosti rovinnosti právě těchto rovin.

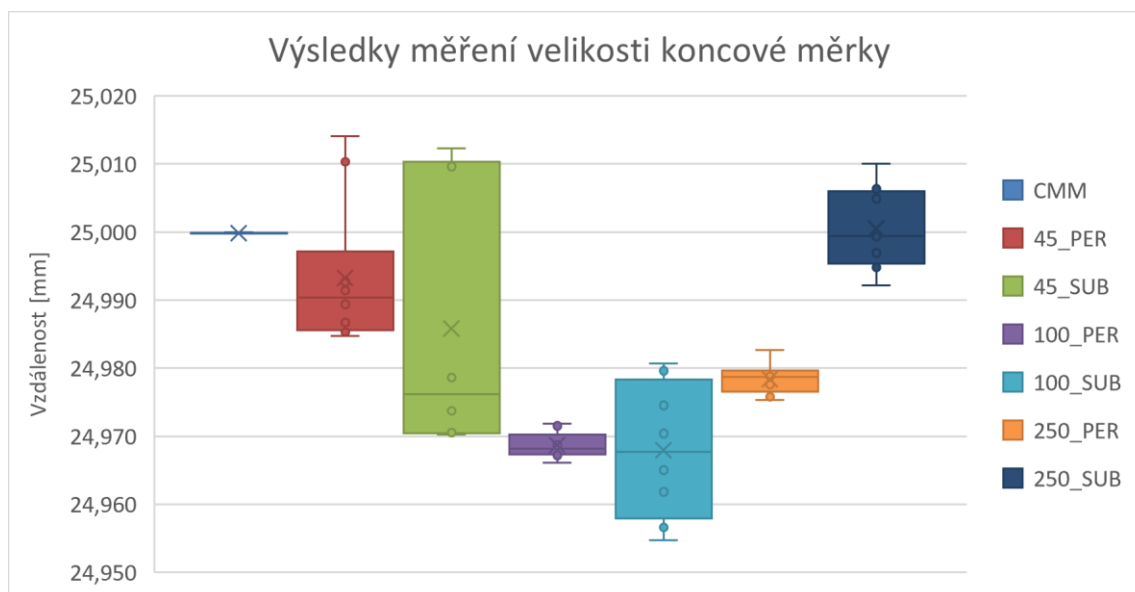


Velikost koncové měřky

Výsledky měření velikosti koncové měřky, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.

Tabulka 34 Základní statistické charakteristiky – velikost koncové měřky

	CMM	45_PER	45_SUB	100_PER	100_SUB	250_PER	250_SUB
\bar{x} [mm]	24,9999	24,9933	24,9858	24,9687	24,9679	24,9784	25,0005
s [mm]	0,0001	0,0104	0,0197	0,0019	0,0100	0,0022	0,0061
Me [mm]	24,9998	24,9904	24,9762	24,9682	24,9677	24,9787	24,9994
x_{\max} [mm]	25,0000	25,0141	25,0123	24,9718	24,9807	24,9827	25,0100
x_{\min} [mm]	24,9998	24,9847	24,9702	24,9661	24,9547	24,9753	24,9922
R [mm]	0,0002	0,0294	0,0421	0,0057	0,0260	0,0074	0,0178



Graf 8 Krabicový graf výsledků měření velikosti koncové měřky

Z výsledků bylo patrné, že referenční hodnota 24,9999 mm byla stanovena se směrodatnou odchylkou 0,1 μm . U výsledků z FOV 45 s permanentní vrstvou byla zjištěna celkem nízká odchylka 6,6 μm , ale se směrodatnou odchylkou 10,4 μm a rozpětím naměřených hodnot 29,4 μm . Hodnoty zaznamenané s FOV 100 nabývaly sobě blízké odchylky 31,2 μm resp. 32 μm , opět bylo ale u sublimující vrstvy zaznamenáno téměř pětinasobně vyšší rozpětí hodnot oproti vrstvě permanentní. Nejblíže se k referenční hodnotě průměru přiblížily hodnoty z FOV 250 se sublimující vrstvou. Výsledná odchylka činila pouze 0,6 μm se směrodatnou odchylkou 6,1 μm , což i vzhledem ke kladné hodnotě odchylky poukazovalo na to, že byla nanesena větší tloušťka vrstvy. Opět si zde šlo povšimnout trendu zaznamenaného u matné koule i u kalibračního kroužku, kdy i s přihlédnutím k tloušťce matnicích vrstev udával skener hodnotu velikosti koncové měřky menší, než byla skutečná hodnota.

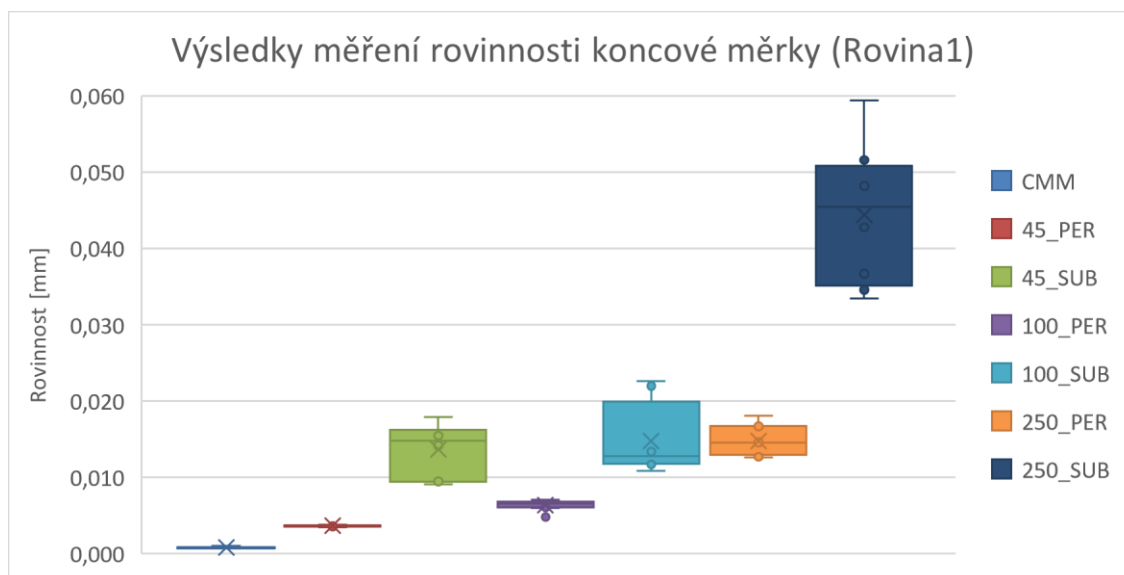
Rovinnost koncové měřky (Rovina1)

Výsledky měření rovinnosti elementu Rovina1 na koncové měřce, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.



Tabulka 35 Základní statistické charakteristiky – rovinnost koncové měrky (Rovina1)

	CMM	45_PER	45_SUB	100_PER	100_SUB	250_PER	250_SUB
\bar{x} [mm]	0,0008	0,0037	0,0137	0,0064	0,0148	0,0148	0,0444
s [mm]	0,0001	0,0001	0,0036	0,0007	0,0047	0,0019	0,0091
Me [mm]	0,0008	0,0037	0,0149	0,0066	0,0128	0,0146	0,0455
x_{\max} [mm]	0,0010	0,0038	0,0179	0,0071	0,0226	0,0181	0,0594
x_{\min} [mm]	0,0007	0,0035	0,0091	0,0048	0,0109	0,0126	0,0335
R [mm]	0,0003	0,0003	0,0088	0,0023	0,0117	0,0055	0,0259



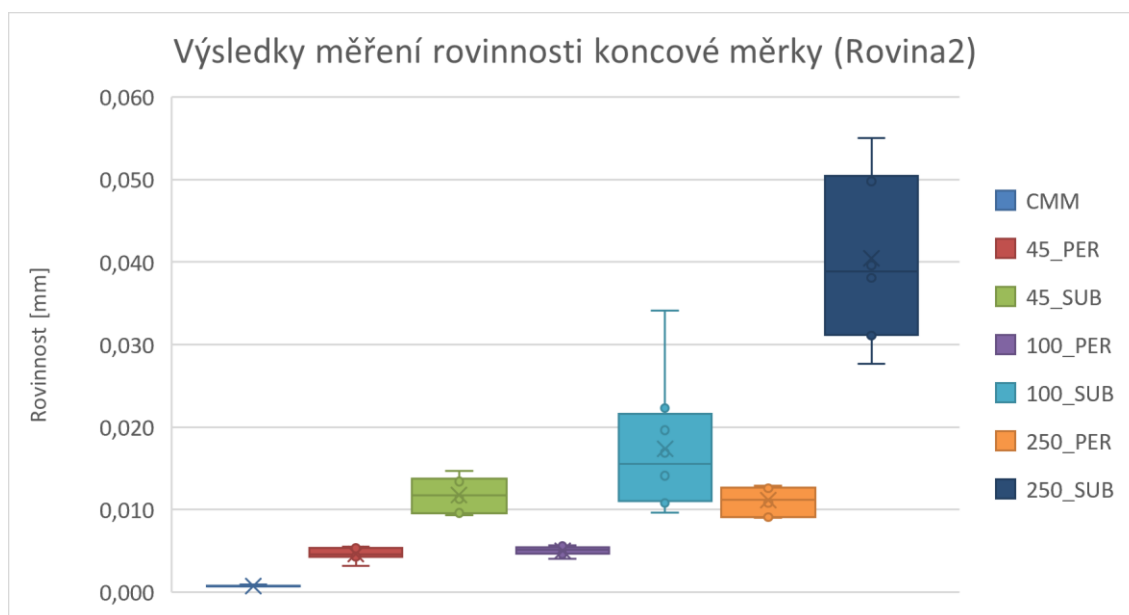
Graf 9 Krabicový graf výsledků měření rovinnosti koncové měrky (Rovina1)

Rovinnost koncové měrky (Rovina2)

Výsledky měření rovinnosti elementu Rovina2 na koncové měrce, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.

Tabulka 36 Základní statistické charakteristiky – rovinnost koncové měrky (Rovina2)

	CMM	45_PER	45_SUB	100_PER	100_SUB	250_PER	250_SUB
\bar{x} [mm]	0,0007	0,0046	0,0118	0,0050	0,0174	0,0111	0,0404
s [mm]	0,0001	0,0007	0,0021	0,0005	0,0081	0,0016	0,0103
Me [mm]	0,0007	0,0046	0,0118	0,0052	0,0155	0,0112	0,0389
x_{\max} [mm]	0,0009	0,0055	0,0147	0,0057	0,0341	0,0129	0,0550
x_{\min} [mm]	0,0007	0,0032	0,0093	0,0040	0,0096	0,0090	0,0277
R [mm]	0,0002	0,0023	0,0054	0,0017	0,0245	0,0039	0,0273



Graf 10 Krabicový graf výsledků měření rovinnosti koncové měrky (Rovina2)

U výsledků rovinností obou měřených rovin bylo možné sledovat podobný trend zaznamenaný již u předchozího vyhodnocení chyby tvaru u matné koule. Také zde docházelo k navýšování odchylky způsobené zvyšujícím se FOV, přičemž tento jev nebyl ovlivněn typem matnicí vrstvy. Docházelo k němu u permanentní i u sublimující vrstvy s tím rozdílem, že sublimující vrstvy nabývaly vyšších odchylek a rozpětí hodnot rovinnosti. Referenční hodnota u obou rovin byla stanovena poměrně přesně, směrodatná odchylka činí 0,1 μm . Nejnižší hodnoty odchylky od referenční hodnoty se v obou případech dosáhlo u FOV 45 s permanentní matnicí vrstvou, kdy u Roviny1 byla odchylka rovinnosti 2,9 μm a u Roviny2 3,9 μm .

7.2.4 Měření nastavovacího kroužku

I nastavovací kroužek patřil mezi artefakty, které pro potřeby skenovatelnosti musely být zmatněny. Na nastavovací kroužek se nanasla jak sublimující, tak poté i permanentní matnicí vrstva. Měřené charakteristiky u nastavovacího kroužku byly průměr, vytvořený zprůměrováním hodnot průměrů tří kružnic z rozdílných výškových úrovní, a kruhovitost zprůměrovaná kruhovitostí jednotlivých kružnic.

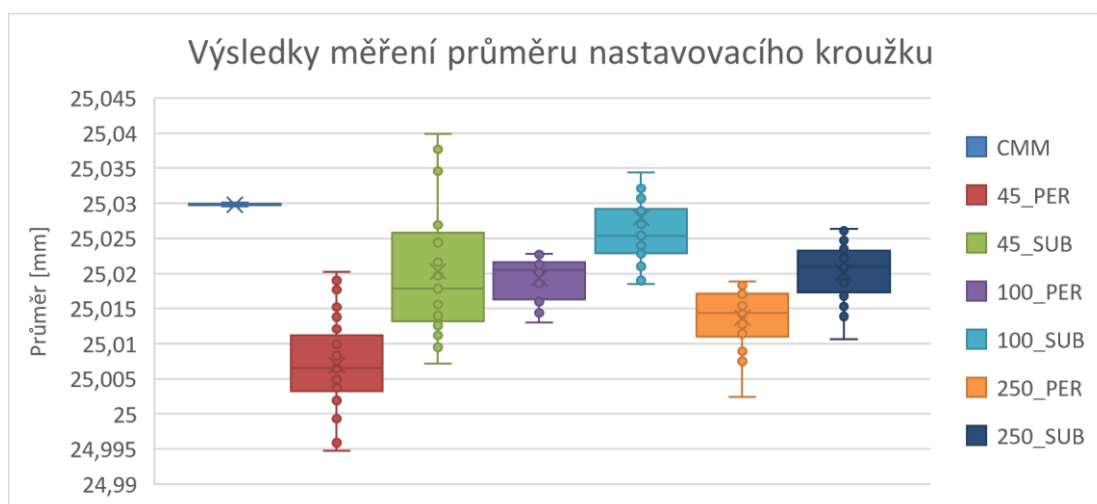
Průměr nastavovacího kroužku

Výsledky měření průměru nastavovacího kroužku, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.



Tabulka 37 Základní statistické charakteristiky – průměr nastavovacího kroužku

	CMM	45_PER	45_SUB	100_PER	100_SUB	250_PER	250_SUB
\bar{x} [mm]	25,0298	25,0069	25,0203	25,0194	25,0280	25,0137	25,0201
s [mm]	0,0001	0,0070	0,0096	0,0030	0,0124	0,0039	0,0041
Me [mm]	25,0298	25,0065	25,0179	25,0205	25,0254	25,0144	25,0210
x_{\max} [mm]	25,0301	25,0202	25,0399	25,0228	25,0830	25,0189	25,0264
x_{\min} [mm]	25,0296	24,9947	25,0072	25,0130	25,0185	25,0024	25,0106
R [mm]	0,0005	0,0255	0,0327	0,0098	0,0645	0,0165	0,0158



Graf 11 Krabicový graf výsledků měření průměru nastavovacího kroužku

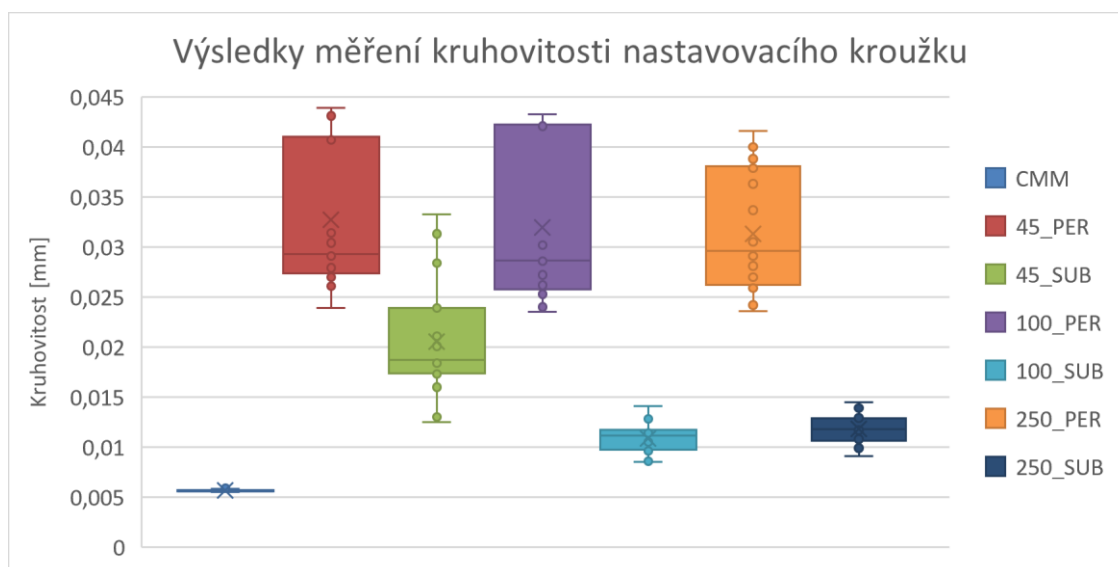
Z měření na souřadnicovém měřicím stroji se stanovila referenční hodnota průměru nastavovacího kroužku 25,0298 mm, určena se směrodatnou odchylkou 0,1 μm . Nejbližší hodnota průměru kroužku vzhledem k referenční byla zaznamenána u FOV 100 se sublimující vrstvou, kdy odchylka činila 1,8 μm . Z hlediska rozpětí hodnot byla nejnižší hodnota zaznamenána u FOV 100 s permanentní vrstvou, které bylo 9,8 μm . Z výsledků bylo možné si povšimnout nezvykle více odchýlených hodnot permanentní vrstvy oproti vrstvě sublimující. Ten to jev byl po bližším zkoumání způsoben působením gravitace. Po aplikaci matricí vrstvy se kapalná báze nestihla úplně vypařit a došlo k jejímu stečení ve směru působení gravitační síly.

Kruhovitost nastavovacího kroužku

Výsledky měření kruhovitosti nastavovacího kroužku, prezentované základními statistickými charakteristikami, jsou v tabulce a graficky zpracované v krabicovém grafu níže.

Tabulka 38 Základní statistické charakteristiky – kruhovitost nastavovacího kroužku

	CMM	45_PER	45_SUB	100_PER	100_SUB	250_PER	250_SUB
\bar{x} [mm]	0,0057	0,0327	0,0206	0,0320	0,0109	0,0313	0,0118
s [mm]	0,0001	0,0067	0,0057	0,0078	0,0015	0,0059	0,0014
Me [mm]	0,0056	0,0293	0,0187	0,0287	0,0112	0,0296	0,0118
x_{\max} [mm]	0,0060	0,0439	0,0333	0,0433	0,0141	0,0416	0,0145
x_{\min} [mm]	0,0055	0,0239	0,0125	0,0235	0,0085	0,0236	0,0091
R [mm]	0,0005	0,0200	0,0208	0,0198	0,0056	0,0180	0,0054



Graf 12 Krabicový graf výsledků měření kruhovitosti nastavovacího kroužku

Z výsledků bylo patrné, že referenční hodnota kruhovitosti 5,7 μm byla stanovena se směrodatnou odchylkou 0,1 μm . Z tabulky hodnot a grafického znázornění bylo patrné ještě výraznější ovlivnění výsledků měření s permanentní vrstvou popsáno u průměru nastavovacího kroužku. Dosahované hodnoty průměrné kruhovitosti měřené s permanentní vrstvou byly v rozmezí 31,3 až 32,7 μm . Nejnižší hodnoty odchylky kruhovitosti od referenční hodnoty byly zaznamenány u FOV 100 a FOV 250 se sublimující vrstvou. Kdy u FOV 100 byla v průměru kruhovitost 10,9 μm , se směrodatnou odchylkou 1,5 μm a rozpětím hodnot 5,6 μm a u FOV 250 je v průměru kruhovitost 11,8 μm , se směrodatnou odchylkou 1,4 μm a rozpětím hodnot 5,4 μm .



Závěr

Předložená diplomová práce se zabývala problematikou optického bezkontaktního měření.

V úvodní části se práce zabývala rozdělením metod snímání, rozebraly se metody dělení, a poté se blíže popsalo rozdělení na kontaktní a bezkontaktní metody, kde byly uvedeni jednotliví zástupci. Dále se přešlo k uvedení do problematiky 3D skenování, zde byly popsány jednotlivé principy bezkontaktního snímání, dále pak byly představeny struktury promítaných vzorů a plynule se přešlo na faktory ovlivňující měření. Zde byly uvedeny jednotlivá úskalí při skenování a popsány postupy pro správné měření za pomoci optický 3D skenerů.

Dále se práce zabývala volbou měřených artefaktů a řešerší souvisejících publikací. Poté bylo popsáno získání dat. Nejprve za pomoci souřadnicového měřicího stroje, a poté z optického skeneru. Následně byla popsána volba tvorby matnicích vrstev a jejich analýza. Nakonec se práce věnovala zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

Prvním vyhodnocením byla analýza tloušťky matnicích vrstev vybraných produktů společnosti ATTBLIME (AB ZERO, AB 2, AB 6, AB 24, AB P a μ Scan liquid). Zvolené pro tuto práci byly AB ZERO a μ Scan liquid. Z výsledků z konfokální mikroskopie prostředku μ Scan liquid se dosahovaná tloušťka pohybovala v maximum kolem 11 μ m, v průměru pak okolo 4,5 μ m, což odpovídalo specifikaci výrobce, který uváděl hodnotu 4,4 μ m, nicméně otázkou zůstávala schopnost překrytí povrchu při takto tenkém nánosu.

U přípravku AB ZERO se tloušťka vrstvy pohybovala už v průměru okolo 22 μ m, maximum pak 32 μ m, což představovalo výraznou odchylku oproti hodnotě udávané výrobcem. Výsledky tloušťky vrstvy ostatních aerosolových přípravků se pohybovaly v podobných hodnotách, kdy nejnižší průměrné hodnoty 15 μ m bylo naměřeno u přípravku AB P. Zajímavostí, které bylo možné si povšimnout, byla výrazně znatelná anizotropie nanosené matnicí vrstvy přípravkem μ Scan liquid způsobená aplikačním štětečkem. Ostatní přípravky použité ve formě aerosolových sprejů nabývaly izotropního povrchu nanosené vrstvy.

Výsledky analýzy tloušťky vrstvy zvolených produktů vykazovaly celkem významné odchylky vůči hodnotám udávaným výrobcem. Do jisté míry mohly tyto výsledky být ovlivněny nezkušeností obsluhy a dalšími faktory jako je teplota či osvětlení, při kterých výrobce prováděl měření, ale blíže tento postup nespecifikoval.

Vedlejším cílem této práce bylo posouzení vlivu sublimace matnicí vrstvy vytvořené nástřikem sublimačního produktu AB ZERO na podíl naskenovaného povrchu. U tohoto produktu výrobce deklaroval schopnost skenovat měřenou součást do jedné hodiny. K ověření této schopnosti byly, po aplikaci matnicí vrstvy, artefakty koncové měřky, kalibračního kroužku a nastavovacího kroužku skenovány po dobu jedné hodiny konfigurací objektivu FOV 45.

Výsledky vůbec neprokázaly možnost skenovat měřené artefakty po dobu jedné hodiny. Ve dvou ze tří měřených artefaktů byl po uplynutí jedné hodiny podíl naměřeného



povrchu menší než 30 %. Tím třetím byl artefakt nastavovací kroužek, u kterého byl podíl naskenovaného povrchu 70 %. Nicméně to bylo způsobeno větším vzájemným překrytím vrstev, což také poukazuje na problematiku aplikace matnicích vrstev na povrch otvorů.

Při dalším pokusu, tentokrát provedenou konfigurací objektivů FOV 100 a 250, probíhalo skenování po dobu 24 minut. Výsledky poukázaly na to, že reálnější by byl údaj o skenovatelnosti do 20 minut, kdy byl zajištěn podíl skenovatelnosti nad 80 %. Opět bylo možné si povšimnout vyššího podílu skenovatelnosti u nastavovacího kroužku související s již výše zmíněnou problematikou zmatnění povrchu otvorů.

Výsledky měření bez aplikace matnicích nástřiků na matné kouli udávaly, že nejbližší k referenční hodnotě byly výsledky získané objektivem s FOV 45, které vykazovaly odchylku průměrné hodnoty průměru koule 0,5 μm . Největší odchylky vykazovaly hodnoty naměřené objektivy s FOV 100 a 250, kde průměrná hodnota nabývala odchylky přes 12 μm . Přijatelná opakovatelnost byla získána u FOV 45 a 100, kdy směrodatná odchylka byla 2,7 μm resp. 3,7 μm . Získávaná odchylka byla ale záporná, což znamená že optický skener udával nižší hodnoty průměru koule čili tento element zmenšoval. Z výsledků chyby tvaru matné koule byl pozorován postupný nárůst odchylky všech charakteristických hodnot od reference s nárůstem velikosti zorného pole.

Kalibrační kroužek, koncová měrka a nastavovací kroužek již představovaly artefakty potřebující nanesení matnicí vrstvy k dosažení skenovatelnosti. U těchto artefaktů vyšlo jako optimálnější, především z pohledu opakovatelnosti, použití permanentní matnicí vrstvy. Výjimku představoval nastavovací kroužek, u kterého vlivem nedostatečné zaschlé vrstvy došlo k jejímu stečení což ovlivnilo výsledek. U těchto artefaktů se nedal jasně určit jaký je nejpřesnější. Z výsledků ale vyplývalo, že co se týče stability měřených parametrů, dosahovala v celkovém pohledu nejlepších hodnot konfigurace FOV 100.

Ve spojitosti se současným a předpokládaným budoucím vývojem optického 3D skenování, rostoucí spolehlivostí a přesností těchto systémů je pravděpodobné, že budou tato zařízení stále více expandovat do mnoha dalších oborů a oblastí lidské činnosti. Dá se předpokládat, že v určitých zjednodušených modifikacích dojde k jejich masovému nasazení i v běžné spotřebě, například jako doplněk k domácím 3D tiskárnám, které se velmi rozšířily. Profesionální systémy budou i nadále nepostradatelnou alternativou konvenčních dotykových způsobů měření a postupně je v některých odvětvích zcela nahradí. To povede k dalšímu zvyšování produktivity, flexibility a kvality výroby, stejně tak jako ke zvyšování rychlosti inovace stávajících a vývoje nových produktů.



Zdroje

- [1] KÁLOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. *Optické metody měření 3D objektů* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [2] MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. *3D skenery pro použití v průmyslu*. AUTOMA-časopis pro automatizační techniku. 2015, **2015**(12), 34–374. ISSN 1210-9592.
- [3] RASTOGI, Pramod K., ed. *Holographic Interferometry* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994 [cit. 2022-06-29]. Springer Series in Optical Sciences. ISBN 978-3-662-13990-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-48078-5
- [4] MENDŘICKÝ, Radomír. *Faktory ovlivňující přesnost měření optickými 3D skenery*. Liberec, 2020. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [5] *HandOnMetrology*. Zeiss [Online] [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: https://www.handsonmetrology.com/products/gom-scan-1/#GOM_Inspect
- [6] *Skenery se strukturovaným světlem* [Online] [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/structured-light-scanners>
- [7] *PROFESSIONAL AND INDUSTRIAL PORTABLE 3D SCANNERS*. Creaform 3D [Online] [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanners>
- [8] GORTHI, Sai Siva a Pramod RASTOGI. *Fringe projection techniques: Whither we are?*. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2010, 48(2), 133-140 [cit. 2022-06-21]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2009.09.001
- [9] GEISSLER, Peter, Tobias DIERIG a Hanspeter A. MALLOT. *Three-Dimensional Imaging Algorithms*. *Computer Vision and Applications* [online]. Elsevier, 2000, 2000, s. 397-438 [cit. 2022-06-21]. ISBN 9780123797773. Dostupné z: doi:10.1016/B978-012379777-3/50012-1
- [10] SALVI, Joaquim, Jordi PAGÈS a Joan BATLLE. *Pattern codification strategies in structured light systems*. *Pattern Recognition* [online]. 2004, 37(4), 827-849 [cit. 2022-06-21]. ISSN 00313203. Dostupné z: doi:10.1016/j.patcog.2003.10.002
- [11] PAGES, J., J. SALVI, R. GARCIA a C. MATABOSCH. *Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling*. In: 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422) [online]. IEEE, 2003, s. 133-138 [cit. 2022-06-21]. ISBN 0-7803-7736-2. Dostupné z: doi:10.1109/ROBOT.2003.1241585
- [12] PAGÈS, J. a J. SALVI. *Coded light projection techniques for 3D reconstruction*. *J3eA* [online]. 2005, 4 [cit. 2022-06-21]. ISSN 1638-5705. Dostupné z: doi:10.1051/bib-j3ea:2005801
- [13] GENG, Jason. *Structured-light 3D surface imaging: a tutorial*. *Advances in Optics and Photonics* [online]. 2011, 3(2) [cit. 2022-06-21]. ISSN 1943-8206. Dostupné z: doi:10.1364/AOP.3.000128
- [14] POSDAMER, J.L a M.D ALTSCHULER. *Surface measurement by space-encoded projected beam systems*. *Computer Graphics and Image Processing* [online]. 1982, 18(1), 1-17 [cit. 2022-06-21]. ISSN 0146664X. Dostupné z: doi:10.1016/0146-664X(82)90096-X
- [15] HALL-HOLT, O. a S. RUSINKIEWICZ. *Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects*. In: Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001 [online]. IEEE Comput.



- Soc, 2001, s. 359-366 [cit. 2022-06-21]. ISBN 0-7695-1143-0. Dostupné z: doi:10.1109/ICCV.2001.937648
- [16] LI ZHANG, B. CURLESS a S.M. SEITZ. *Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming*. In: Proceedings. First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission [online]. IEEE Comput. Soc, 2002, s. 24-36 [cit. 2022-06-21]. ISBN 0-7695-1521-5. Dostupné z: doi:10.1109/TDPVT.2002.1024035
- [17] TAJIMA, J. a M. IWAKAWA. *3-D data acquisition by Rainbow Range Finder*. In: [1990] Proceedings. 10th International Conference on Pattern Recognition [online]. IEEE Comput. Soc. Press, 1990, s. 309-313 [cit. 2022-06-21]. ISBN 0-8186-2062-5. Dostupné z: doi:10.1109/ICPR.1990.118121
- [18] LONG, Ben. *Getting Started with Camera Raw: How to make better pictures using Photoshop and Photoshop Elements (2nd Edition)*. 1. Peachpit Press, 2009. ISBN 9780321602411
- [19] FENG, Hsi-Yung, Yixin LIU a Fengfeng XI. *Analysis of digitizing errors of a laser scanning system*. Precision Engineering [online]. 2001, 25(3), 185-191 [cit. 2022-06-23]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/S0141-6359(00)00071-4
- [20] BERÁNEK, Libor. ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE. Průmyslová metrologie. Praha, 2021.
- [21] FLACK, David. *Measurement Good Practice Guide No. 43, CMM probing*, ISSN 1368-6550 [online] 2014 [cit. 2022-06-16]. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/specialpages/guides/gpg43_cmm
- [22] CHRISTOPH, Ralf a NEUMANN, Hans Joachim. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti – opticky, dotykově a rentgenovou tomografií*. 4. Přeprac. a rozš. Vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík, 2008.
- [23] CHRISTOPH, Ralf a NEUMANN, Hans Joachim. *Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice: přesná, hospodárná a univerzální*. Uherský Brod: PRIMA Bilavčík, c2011.
- [24] PFEIFER, Tilo; IMKAMP, Dietrich; SCHMITT, Robert. *Coordinate Metrology and CxApplication in Industrial Production : Basics, Interfaces and Integration*. Munich : Carl Hanser Verlag, 2006. 205 s.
- [25] BOSH, John. *Coordinate measuring machines and systems*. New York: MARCELL DEKKER, 1995. 444 s.
- [26] POKORNÝ, Přemysl. *Souřadnicové měřicí stroje*. Liberec: Technická univerzita, 1999. 76 s. ISBN 80-7083-326-2
- [27] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava, 2011. Studijní opora. VŠB-TU Ostrava.
- [28] KATUCH, Peter. *Industrial Computed Tomography: by Zeiss* [online]. In: . s. 43 [cit. 2021-11-16]
- [29] *Informační magazín výzkumné skupiny Rentgenová mikrotomografie a nanotomografie*. CEITEC VUT v Brně [online], 2017. léto 2017 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <http://ctlab.ceitec.cz/files/271/176.pdf>
- [30] KNAP, Petr. *METROTOMOGRFIE JAKO NOVÝ NÁSTROJ ZAJIŠŤOVÁNÍ JAKOSTI VE VÝROBĚ* [online], 2007 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/23956895-Metrotomografie-jako-novy-nastroj-zajistovani-jakosti-ve-vyrobe.html>



- [31] *Informační magazín výzkumné skupiny Rentgenová mikrotomografie a nanotomografie*. CEITEC VUT v Brně [online], 2014. [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <http://ctlab.ceitec.cz/files/252/157.pdf>
- [32] *Leica geosystems* [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/products/laser-tracker-systems>
- [33] VOJÁČEK, Antonín. *Velmi přesné optické měření s konfokálními snímači* [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz//komponenty/velmi-presne-opticke-mereni-s-konfokalnimi-snimaci.html>
- [34] *AZoSensors* [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.azosensors.com/>
- [35] *Vysoce přesný chromatický lineární senzor pro měření rozličných povrchů*. PRIMA BILAVČÍK [Online] 27. 1.2010. [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <http://www.mericipristroje.cz/novinky/detail/chromaticky-linearni-senzor-pro-rychle-mereni.htm>.
- [36] ZUZA, Mikolas. *Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu* [online], 2018. [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>
- [37] *Point Clouds at the Speed of Light – ZEISS LineScan*. Zeiss [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/optical-sensors-cmm/linescan.html>
- [38] *Laser tracker API RADIANT CORE*. Topmes s.r.o [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.topmes.cz/cs/produkty/radian-core>
- [39] *Otočný senzor s bílým světlem – ZEISS DotScan*. Zeiss [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/optical-sensors-cmm/zeiss-dotscan.html>
- [40] *Přesnost rozhoduje – Rodina ZEISS PRISMO*. Zeiss [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/prismo.html>
- [41] *3D rentgenové měření pro zajištění kvality – ZEISS METROTOM*. Zeiss [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/rentgenove-systemy/metrotom.html>
- [42] RAJA, Vinesh a Kiran J. FERNANDES, ed. *Reverse Engineering* [online]. London: Springer London, 2008 [cit. 2022-07-03]. Springer Series in Advanced Manufacturing. ISBN 978-1-84628-855-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-84628-856-2
- [43] *The next small thing* [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.handsonmetrology.com/products/gom-scan-1/>
- [44] *Zaostřeno na 2D rozměry – ZEISS ViScan*. Zeiss [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/optical-sensors-cmm/viscan.html>
- [45] Hocken, Robert J. a Pereira, Paul H. *Coordinate Measuring Machines and Systems Second Edition*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [46] *Souřadnicové měřicí stroje*. Technická univerzita v Liberci – katedra výrobních systémů a automatizace. [Online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z:



- www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522.
- [47] PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. CERM 1.vyd. 246 s.2009. ISBN 978-80-214-4025.
- [48] SLOTA, J., MANTIČ, M., GAJDOŠ, I. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Košice: Edícia študijnej literatúry, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.
- [49] MM průmyslové spektrum. Digitalizace [online]. 2004 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [50] 3D skenery. SolidVision. [online]. 2021 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/3d-skenery/>
- [51] Referenční body pro 3d skenování. 3Dees [online]. 2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/e-shop/referencni-body>
- [52] Interní dokumenty firmy Carl Zeiss
- [53] GOM Inspect Professional. GOM, mbH. [online]. 2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/gom-suite/gom-inspect-pro>
- [54] ATTBLIME-Brochure. Graichen Produktions- und Vertriebs GmbH [online]. 2021 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://attblime.com/download/?lang=en>
- [55] Oxid titaničitý | TiO₂. Nano4house [online]. 2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: https://nano4house.cz/pojem/oxid_titanicity/
- [56] VÁLKOVÁ, Hana. Oxid titaničitý podezřelý z toxicity [online]. 2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.vitalia.cz/clanky/oxid-titanicity-toxicita-zakaz-v-doplncich-stravy/>
- [57] PALOUSEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNY, Josef BEDNAR, Tomas KOUTECKY a Filip DOKOUPIL. *Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy*. Optical Materials [online]. 2015, 40, 1-9 [cit. 2022-06-25]. ISSN 09253467. Dostupné z: doi:10.1016/j.optmat.2014.11.020
- [58] IULIANO, Luca, Paolo MINETOLA a Alessandro SALMI. *Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers*. Measurement Science and Technology [online]. 2010, 21(10) [cit. 2022-06-26]. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/21/10/105102
- [59] BRAJLIH, Tomaz, Tadej TASIC, Igor DRSTVENSEK, Bogdan VALENTAN, Miodrag HADZISTEVIC, Vojko POGACAR, Joze BALIC a Bojan ACKO. Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection. *Strojníški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2011, 57(11), 826-833 [cit. 2022-07-26]. ISSN 00392480. Dostupné z: doi:10.5545/sv-jme.2010.152
- [60] MARTÍNEZ-PELLITERO, Susana, Eduardo CUESTA, Sara GIGANTO a Joaquín BARREIRO. New procedure for qualification of structured light 3D scanners using an optical feature-based gauge. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2018, 110, 193-206 [cit. 2022-06-26]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2018.06.002
- [61] MONGON, Bill, Jürgen PFEIFER a Erik KLAAS. What light color should a White-Light-Scanner use? In: *Coordinate Metrology Society Conference*. 2012, s. 11.
- [62] BERNAL, C., B. DE AGUSTINA, M.M. MARÍN a A.M. CAMACHO. Performance Evaluation of Optical Scanner Based on blue LED Structured Light. *Procedia Engineering* [online]. 2013, 63, 591-598 [cit. 2022-06-26]. ISSN 18777058.



- Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.08.261
- [63] NÁVRAT, Jakub. *Porovnání měřících metod pro kontrolu kvality dílů*. Ostrava, 2019. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie.
 - [64] DOKOUPIL, Filip. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké čení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
 - [65] LEVÍNSKÁ, Barbora. *Vliv zmatňujících nástřiků na přesnost optické 3D digitalizace*. Liberec, 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
 - [66] Statistika. Matematika polopatě [online]. 2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.matweb.cz/kategorie-statistika/>
 - [67] DROZDOVÁ, Jarmila. *Statistika*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2017. ISBN 978-80-248-4066-6.



Seznam obrázků

Obr. 1 Souřadnicový měřicí stroj ZEISS PRISMO [40]	11
Obr. 2 Rozdělení snímacích systémů [20]	12
Obr. 3 Kinematický typ [21]	14
Obr. 4 Elektronický (tenzometrický) typ [21]	15
Obr. 5 Skenovaací systém výrobce ZEISS [21]	16
Obr. 6 2D obrazový senzor ZEISS ViScan [44]	17
Obr. 7 Pružový projektor GOM Scan 1 [44].....	18
Obr. 8 Schéma fotogrammetrie [36]	19
Obr. 9 Chromatický senzor bílého světla ZEISS DotScan [39].....	20
Obr. 10 Laser scanner ZEISS LineScan [37]	21
Obr. 11 Laser tracker API RADIAN CORE [1038]	22
Obr. 12 Ultrazvukový skener Freepoint [27]	22
Obr. 13 Vizualizace počítačového tomografu [28]	23
Obr. 14 Vizualizace voxelu [31]	23
Obr. 15 Počítačový tomograf Zeiss Metrotom 1500 [41].....	24
Obr. 16 Princip triangulace [1]	25
Obr. 17 Skener Comet L3D 2 pracující na principu projekce modrého světla [5]	26
Obr. 18 Výpočet souřadnice bodu A pomocí triangulace [2]	27
Obr. 19 Metoda pasivní triangulace – stereoidění [4]	28
Obr. 20 Základní princip laserových skenerů [4]	29
Obr. 21 Základní princip interferometru (Michelsonův interferometr) [4]	30
Obr. 22 Dělení vzorů dle struktury [10].....	31
Obr. 23 Binární kódování [13].....	32
Obr. 24 Ukázka vzorů s n-árním kódem [13]	33
Obr. 25 Kombinace G kódu a fázového posuvu [13].....	34
Obr. 26 Kódování vzorů na hranicích pruhů [15]	34
Obr. 27 Vzor neformální kodifikace [13]	35
Obr. 28 Projekce de Bruijnova vzoru [16].....	36
Obr. 29 Kódování barevnými tečkami [13].....	36
Obr. 30 Ternární kódování vzorů [11]	37
Obr. 31 Vzor s úrovněmi šedé [18].....	38



Obr. 32 Parametry ovlivňující přesnost inspekce [4]	38
Obr. 33 Kalibrační desky [51]	42
Obr. 34 Vliv lesklého povrchu	43
Obr. 35 Referenční body (vlevo nekodované lepící; vpravo kodované magnetické) [51]	44
Obr. 36 Detail polygonální sítě.....	45
Obr. 37 Příklad funkce zpravidelnění sítě.....	45
Obr. 38 Příklad funkce úpravy otvorů	46
Obr. 39 Barevná mapa při vyrovnání BestFit.....	46
Obr. 40 Zvolené artefakty (vlevo nahoře koncová měrka ,vlevo dole kalibrační kroužek, vpravo nahoře matná koule, vpravo dole nastavovací kroužek).....	48
Obr. 41 Krabicový graf [67]	49
Obr. 42 Referenční CAD model (a) a seznam referenčních prvků (b) [58].....	49
Obr. 43 Zeiss UMC 1000 Carat	52
Obr. 44 Měřicí konfigurace	53
Obr. 45 Průběh verifikace	54
Obr. 46 Upnutí měřených součástí (vlevo nahoře kalibrační kroužek, vlevo dole nastavovací kroužek, vpravo nahoře koncová měrka, vpravo dole matná koule)	55
Obr. 47 Vyrovnání kalibračního kroužku	56
Obr. 48 Parametry strategie a vyhodnocení kalibračního kroužku	57
Obr. 49 Vícenásobný protokol kalibračního kroužku (Kružnice1)	57
Obr. 50 Vyrovnání koncové měrky.....	58
Obr. 51 Parametry strategie a vyhodnocení koncové měrky	59
Obr. 52 Vícenásobný protokol koncové měrky (Rovina 1).....	59
Obr. 53 Vyrovnání nastavovacího kroužku	60
Obr. 54 Parametry strategie a vyhodnocení nastavovacího kroužku	61
Obr. 55 Vícenásobný protokol nastavovacího kroužku (Kružnice1)	61
Obr. 56 Vyrovnání matné koule	62
Obr. 57 Parametry strategie a vyhodnocení matné koule	63
Obr. 58 Vícenásobný protokol matné koule.....	63
Obr. 59 CAD modely zkoumaných artefaktů (vlevo nahoře kalibrační kroužek, vlevo dole koncová měrka, vpravo nahoře matná koule, vpravo dole nastavovací kroužek)	64
Obr. 60 Využitá konfigurace.....	65
Obr. 61 Zvolené matnicí přípravky, vpravo AB ZERO, vlevo μ Scan liquid	67
Obr. 62 Testovací nástřiky (zleva μ Scan liquid, ABP, AB 24, AB 6, AB 2 a AB ZERO)	68



Obr. 63 Topografie povrchu (vlevo μ Scan liquid, vpravo AB ZERO)	69
Obr. 64 Protokol o kalibraci objektivu s FOV 45 mm	70
Obr. 65 Matná koule skenována objektivem s FOV 45 mm (nastavené parametry vlevo, záznam z kamery vpravo)	71
Obr. 66 Mračno bodů vlevo, trojúhelníková síť vpravo	71
Obr. 67 Barevná mapa matné koule (FOV 45)	72
Obr. 68 Koncová měrka se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	73
Obr. 69 Barevná mapa koncové měrky se sublimující vrstvou (FOV 45)	74
Obr. 70 Koncová měrka s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	75
Obr. 71 Barevná mapa koncové měrky s permanentní vrstvou (FOV 45)	75
Obr. 72 Nastavovací kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	76
Obr. 73 Barevná mapa nastavovacího kroužku se sublimující vrstvou (FOV 45)	77
Obr. 74 Nastavovací kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	78
Obr. 75 Barevná mapa nastavovacího kroužku s permanentní vrstvou (FOV 45).....	79
Obr. 76 Kalibrační kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	80
Obr. 77 Barevná mapa kalibračního kroužku se sublimující vrstvou (FOV 45).....	80
Obr. 78 Kalibrační kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 45 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	81
Obr. 79 Barevná mapa kalibračního kroužku s permanentní vrstvou (FOV 45)	82
Obr. 80 Protokol o kalibraci objektivu s FOV 100 mm	83
Obr. 81 Matná koule skenována objektivem s FOV 100 (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	83
Obr. 82 Koncová měrka se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	85
Obr. 83 Koncová měrka s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	86
Obr. 84 Nastavovací kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	87
Obr. 85 Nastavovací kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	88
Obr. 86 Kalibrační kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	89



Obr. 87 Kalibrační kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 100 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	90
Obr. 88 Protokol o kalibraci objektivu s FOV 250 mm	91
Obr. 89 Matná koule skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)	92
Obr. 90 Koncová měrka se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	93
Obr. 91 Koncová měrka s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	94
Obr. 92 Nastavovací kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	95
Obr. 93 Nastavovací kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí)96	
Obr. 94 Kalibrační kroužek se sublimační vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	97
Obr. 95 Kalibrační kroužek s permanentní vrstvou skenována objektivem s FOV 250 mm (zleva nastavení parametrů, obraz z kamery, model tvořený trojúhelníkovou sítí).....	98
Obr. 96 Podíl naskenovaného povrchu kalibračního kroužku (60 min, FOV 45 mm) ...	100
Obr. 97 Podíl naskenovaného povrchu koncové měrky (24 min, FOV 100 mm).....	102

Seznam tabulek

Tabulka 1 Měřicí objemy dostupné pro systém Comet L3D 2 [51].....	39
Tabulka 2 Naměřená data kalibračního kroužku	58
Tabulka 3 Naměřená data koncové měrky	60
Tabulka 4 Naměřená data nastavovacího kroužku	62
Tabulka 5 Naměřená data matné koule	64
Tabulka 6 Vlastnosti testovaných produktů [54]	68
Tabulka 7 Naměřené hodnoty matné koule (FOV 45)	72
Tabulka 8 Naměřené hodnoty koncové měrky se sublimující matnicí vrstvou (FOV 45)	74
Tabulka 9 Naměřené hodnoty koncové měrky s permanentní matnicí vrstvou (FOV 45)	76
Tabulka 10 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku se sublimující matnicí vrstvou (FOV 45)	77



Tabulka 11 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 45)	79
Tabulka 12 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku se sublimující matnicí vrstvou (FOV 45).....	81
Tabulka 13 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 45)	82
Tabulka 14 Naměřené hodnoty matné koule (FOV 100)	84
Tabulka 15 Naměřené hodnoty koncové měrky se sublimující matnicí vrstvou (FOV 100)	85
Tabulka 16 Naměřené hodnoty koncové měrky s permanentní matnicí vrstvou (FOV 100)	86
Tabulka 17 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku se sublimující matnicí vrstvou (FOV 100)	87
Tabulka 18 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 100)	88
Tabulka 19 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku se sublimující matnicí vrstvou (FOV 100).....	90
Tabulka 20 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 100)	91
Tabulka 21 Naměřené hodnoty matné koule (FOV 250)	92
Tabulka 22 Naměřené hodnoty koncové měrky se sublimující matnicí vrstvou (FOV 250)	94
Tabulka 23 Naměřené hodnoty koncové měrky s permanentní matnicí vrstvou (FOV 250)	95
Tabulka 24 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku se sublimující matnicí vrstvou (FOV 250)	96
Tabulka 25 Naměřené hodnoty nastavovacího kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 250)	97
Tabulka 26 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku se sublimující matnicí vrstvou (FOV 250).....	98
Tabulka 27 Naměřené hodnoty kalibračního kroužku s permanentní matnicí vrstvou (FOV 250)	99
Tabulka 28 Podíl naskenovaného povrchu (60 min, FOV 45 mm)	100
Tabulka 29 Podíl naskenovaného povrchu (24 minut)	101
Tabulka 30 Základní statistické charakteristiky - průměr matné koule	103
Tabulka 31 Základní statistické charakteristiky – chyba tvaru matné koule	104
Tabulka 32 Základní statistické charakteristiky – průměr kalibračního kroužku.....	105
Tabulka 33 Základní statistické charakteristiky – kruhovitost kalibračního kroužku ...	106



Tabulka 34 Základní statistické charakteristiky – velikost koncové měrky	107
Tabulka 35 Základní statistické charakteristiky – rovinnost koncové měrky (Rovina1)	108
Tabulka 36 Základní statistické charakteristiky – rovinnost koncové měrky (Rovina2)	108
Tabulka 37 Základní statistické charakteristiky – průměr nastavovacího kroužku	110
Tabulka 38 Základní statistické charakteristiky – kruhovitost nastavovacího kroužku	110

Seznam grafů

Graf 1 Tloušťky matnicích vrstev.....	69
Graf 2 Podíl naskenovaného povrchu (60 min, FOV 45 mm)	100
Graf 3 Podíl naskenovaného povrchu (24 min)	101
Graf 4 Krabicový graf výsledků měření průměru matné koule	103
Graf 5 Krabicový graf výsledků měření chyby tvaru matné koule	104
Graf 6 Krabicový graf výsledků měření průměru kalibračního kroužku	105
Graf 7 Krabicový graf výsledků měření kruhovitosti kalibračního kroužku.....	106
Graf 8 Krabicový graf výsledků měření velikosti koncové měrky	107
Graf 9 Krabicový graf výsledků měření rovinnosti koncové měrky (Rovina1).....	108
Graf 10 Krabicový graf výsledků měření rovinnosti koncové měrky (Rovina2).....	109
Graf 11 Krabicový graf výsledků měření průměru nastavovacího kroužku	110
Graf 12 Krabicový graf výsledků měření kruhovitosti nastavovacího kroužku	111