



Posouzení hledisek ovlivňujících přesnost 3D optické digitalizace

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T049 – Výrobní systémy a procesy
Autor práce: **Bc. Jakub Mařan**
Vedoucí práce: Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Mařan**
Osobní číslo: **S14000313**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní systémy a procesy**
Název tématu: **Posouzení hledisek ovlivňujících přesnost 3D optické digitalizace**
Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Hlavním cílem práce je posouzení různých aspektů ovlivňujících přesnost, kvalitu a opakovatelnost měření pomocí optického 3D skeneru ATOS II 400.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s vybavením a zařízením laboratoře potřebným k realizaci praktické části práce (3D bezkontaktní skener Atos II 400, SW GOM Inspect apod.) a s principy optické digitalizace.
2. Provést rešerši prací na podobné téma. Zaměřit se především na problematiku přesnosti optických 3D skenerů a podmínky, které mohou korektnost 3D digitalizace negativně ovlivnit.
3. Opakovaně provést digitalizaci vhodných prvků (modelů) za různých vstupních a okolních podmínek (provozní teplota skeneru, počet skenů, použití referenčních bodů, úhel skenování, parametry skenování apod.)
4. Provést analýzu a vyhodnocení naměřených dat a posoudit vliv jednotlivých aspektů na kvalitu a přesnost (opakovatelnost) 3D skenování.
5. Vyhodnocení, doporučení, závěr.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] HLAVÁČ, V. a M. ČONKA. Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992. ISBN 8085424-67-3.
[2] ZHANG, S. Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN: 978-1-4398-7219-2.
[3] GOM MbH. Inspection: V8 Manual Basic. Braunschweig (Germany): GOM MbH, 2014.
[4] GOM MbH. Atos V7 - Hardware: User manual. Braunschweig (Germany): GOM MbH, 2010.
[5] HOFMAN, J. Analýza přesnosti 3D digitalizace s využitím optických skenerů. Liberec, 2013. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů.
[6] Frkal, M. Návrh kalibračního etalonu pro stanovení přesnosti měření optických 3D skenerů. Liberec, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace.

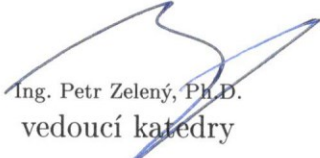
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **1. února 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Radomíru Mendřickému, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

TÉMA: POSOUZENÍ HLEDISEK OVLIVŇUJÍCÍCH PŘESNOST 3D OPTICKÉ DIGITALIZACE

ANOTACE: Tato diplomová práce se zabývá posouzením jednotlivých hledisek ovlivňujících přesnost 3D optické digitalizace na zařízení ATOS II 400 v laboratořích katedry KSA. Teoretická část se věnuje úvodu do problematiky prostorové 3D digitalizace, kde je zmínka o metodách, principech a snímačích obrazu. Dále věnuje pozornost i správnému měření a řešerším na podobné téma. Praktická část je zaměřena na analýzu jednotlivých hledisek ovlivňujících přesnost měření, kde samotná přesnost skenování je podrobena porovnání s daty získanými z SMS (souř. měř. stroj). Celkové shrnutí obsahuje souhrn všech analýz a vyhodnocuje nejzásadnější hlediska mající vliv na přesnost 3D optické digitalizace.

KLÍČOVÁ SLOVA: 3D optická digitalizace, ATOS, CCD kamery, Měření, Triangulace

THEME: ASSESSMENT OF THE ASPECTS AFFECTING THE ACCURACY OF 3D OPTICAL DIGITALIZATION

ANNOTATION: This master thesis deals with the assessment of individual aspects influencing the precision of 3D optical digitization on the ATOS II 400 device in laboratories of KSA. The theoretical part deals with the introduction to spatial 3D digitization, where there are mentioned methods, principles and image sensors. The work devotes attention to the correct measurement and research on a similar topic. The practical part is focused on the analysis of the individual aspects influencing the accuracy of the measurement, where the scanning accuracy itself is compared with the data obtained from the CMM. The overall summary summarizes all analyzes and evaluates the most critical aspects that affect the accuracy of 3D optical digitization.

KEYWORDS: 3D optical digitalization, ATOS, CCD camera, Measuring, Triangulation

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace

Počet stran: 66

Počet tabulek: 10

Počet příloh: 7

Počet grafů: 27

Počet obrázků: 36

nebo jiných příloh: -

Obsah

Zkratky	9
Úvod	10
1 3D skenery a jejich rozdělení	11
1.1 Dotykové skenery (CMM).....	11
1.2 Bezkontaktní laserové skenery	12
1.3 Optické skenery.....	12
2 Základní principy optického skenování	13
2.1 Triangulace	13
2.1.1 Aktivní triangulace.....	14
2.1.2 Pasivní triangulace.....	15
2.1.3 Stereovidění	16
3 Snímače obrazu a jejich rozdělení.....	17
3.1 CCD senzor	17
3.2 Princip fungování CCD senzoru	17
3.3 Citlivost CCD senzoru	18
4 Skener Atos II 400 a GOM Inspect	18
4.1 GOM Inspect	21
4.2 Postup pro vyhodnocení měřených objektů	22
4.3 Acceptance test	22
4.3.1 Parametr probing error.....	22
4.3.2 Parametr spacing error.....	23
5 Zásady správného měření	24
5.1 Měřicí objem (MV)	24
5.2 Matnicí nástřik.....	24
5.3 Expozice a čas snímání	25
5.4 Referenční body.....	26
5.4.1 Správné vlastnosti referenčního bodu.....	26
5.4.2 Správné umístění referenčních bodů	27

5.5	Kalibrace senzoru	27
5.5.1	Kalibrační podmínky.....	28
6	Rešerše	29
7	Praktická část	31
7.1	Základní pojmy při měření	32
7.2	Geometrické a tvarové tolerance	32
7.3	Co se bude měřit?.....	33
7.4	Etalon s koulemi analýza v GOM Inspect.....	34
7.4.1	Chebyshev – best - fit	35
7.5	Kalibr analýza v GOM Inspect.....	36
7.6	Postup měření na ATOS II 400	36
7.7	Příprava předmětů k měření s aplikací titanového nástřiku.....	37
7.8	Kalibrace skeneru ATOS II 400	38
7.9	Vyhodnocení referenční hodnoty	38
7.10	Analýza vlivu kalibrace	41
7.11	Analýza měření při změně časové expozice	44
7.12	Analýza podle počtu snímků	47
7.13	Analýza měření podle úhlu skenování	50
7.14	Analýza měření za studena	51
7.15	Analýza s vlivem změny clony kamery	54
7.16	Analýza referenčních bodů	57
8	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	62
8.1	ETALON	62
8.2	KALIBR.....	64
9	Závěr.....	66
	Použitá literatura	67
	Obrázky	70
	Grafy.....	71
	Tabulky	72
	Přílohy	72

Zkratky

3D – 3- Dimensional (trojrozměrný)

A/D – Analogový/Digitální

ATOS – Advanced Topometric Sensor

CAD – Computer aided design (Počítačem podporované konstruování)

CCD – Charge Coupled Device (el.součást pro snímání obrazové informace)

CMM – Coordinate Measuring Machine (Souřadnicově měřící stroj)

EV – Exposition Value (Expoziční hodnota)

KSA – Katedra Výrobních Systémů a Automatizace

PC – Personal Computer (osobní počítač)

SW – Software (Aplikace/program)

VM – Volume Measuring (měřící objem)

Úvod

3D optické bezkontaktní skenování již není úplně nová technologie, ale pořád se dá zařadit k těm relativně mladším technologiím ve strojírenství, protože její velký progres začal v 90. letech 20. století. Díky svým technickým vlastnostem postupně vytlačuje zažitě konvenční metody, které často svou časovou náročností omezovaly rychlejší vývoj kteréhokoliv produktu. V dnešní době jsou 3D optické bezkontaktní skenery využívány především v strojírenském průmyslu, stavebnictví, fotogrammetrii, topografii, dálkový průzkum Země, dokumentace památkových objektů, archeologie a mnoha dalších.

Jednou z oblastí využití skenování je v dnešní době rozměrová kontrola ve strojírenském průmyslu, nasnímaná data se porovnávají s teoretickým CAD modelem a tím konkuruje konvenčnímu měření a i samotná přesnost je mnohdy přesnější. Je to způsobeno tím, že tento typ měření lze plně zautomatizovat, tím pádem se lze vyhnout chybám způsobených člověkem. Vyhodnocení lze získat jako barevnou mapu odchylek nebo nominální vyčíslení odchylek. Tato metoda je rovněž schopna rozpoznat geometrické tolerance a změřit velmi členité povrchy těles nebo součástí.

Další samostatnou kapitolou je reverzní inženýrství, ke kterému se přistupuje v daný okamžik, kdy k výrobku či formě nemáme technickou dokumentaci či samotný 3D model. Samotným skenováním lze poměrně v rychlém čase získat digitální data, která jsou snadno převeditelná do plošného nebo do parametrického modelu. Samotné 3D skenování je schopno firmě ušetřit velké finanční částky a také je až 5x rychlejší než běžné bodové měření. [1] [2]

Když jsme si teď takto vyjmenovali možnosti a uplatnění 3D optického bezkontaktního skenování, tak může na povrch vyplynout otázka: Jak ovlivní samotné měření vnější vlivy prostředí či samotné seřízení skeneru před měřením? Samozřejmě, že výrobce udává přesnost přístroje, ale ne každý uživatel ji musí respektovat. Toto je cílem této diplomové práce, která se zabývá problematikou přesnosti měření a jaké podmínky mohou mít vliv na přesnost měření.

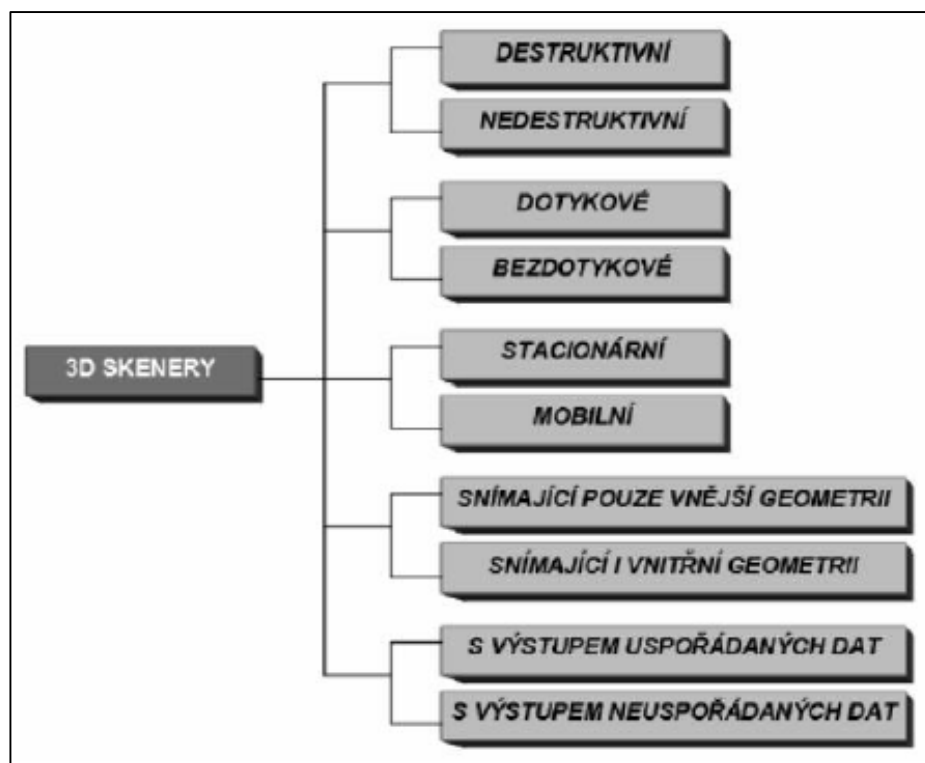
V diplomové práci se dozvíte, kterým vlivům jsme měřící zařízení vystavili a jaká přesnost byla jednotlivými měřeními dosažena. Na základě těchto analýz vzniklo celkové vyhodnocení.

1 3D skenery a jejich rozdělení

3D optické bezkontaktní skenování je metoda, při které zaznamenaný obraz převedeme na 3D počítačová data, většinou s cílem zpětného navrhování součástí nebo tvorbě prototypů. V dnešní době se 3D skenery dají rozdělit do 3 skupin.

- Dotykové skenery (CMM)
- Bezkontaktní laserové skenery
- Optické skenery
- a další 3D skenery (CT, destruktivní, ultrazvukové)

Podle tohoto rozdělení lze usoudit, že se skenery liší v mnoha parametrech, jako jsou například: výchozí data, velikost skenovaného prostoru, mobilita, časová náročnost, textura skenování a software ve kterém se budou data zpracovávat. A je pouze na uživateli, aby si zvolil, který skener bude vhodný pro jeho záměry. [3][4]



Obrázek 1: Rozdělení 3D skenerů [4]

1.1 Dotykové skenery (CMM)

Je to nejstarší metoda skenování vhodná pro kontrolu či zachycení geometrických prvků. Pomocí tohoto zařízení lze i bodově kontrolovat náročnější tvary. Nezachycuje

tvar celé součásti. Obsluha proměřuje / zachycuje pouze určená místa. V dnešní době výrobci CMM strojů nabízí rozšiřující zařízení formou laserových sond, které se upínají na místo dotykového hrotu s kuličkou (rychlejší). [3][4]

- Mechanické řízené
- Mechanické ruční



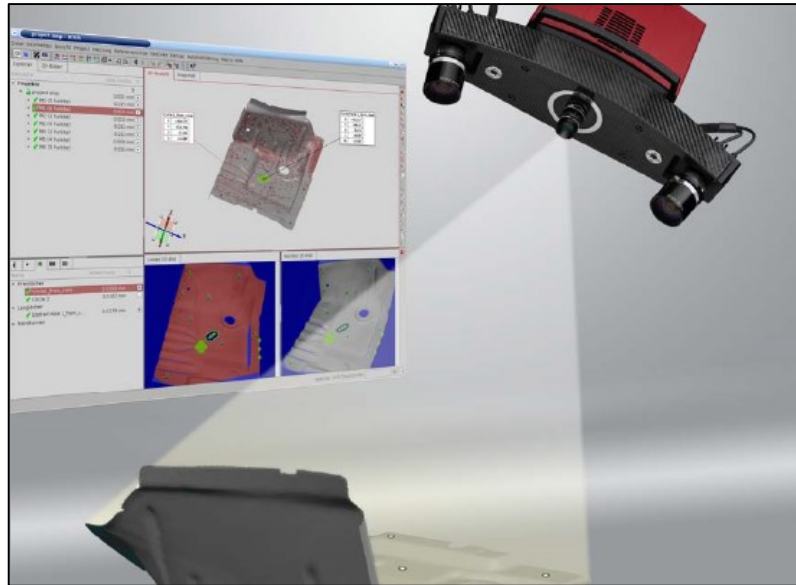
Obrázek 2: Zařízení Micro Scribe (modrý) a SMS 3D souřadnicový přístroj [13][14]

1.2 Bezkontaktní laserové skenery

Ideální zařízení pro komplexní kontrolu součástí s vysokou přesností. Pomocí těchto zařízení lze snímat celé tvary i pro reverzní inženýrství. Pro orientaci v prostoru jsou využity dvě metody - metoda „trackování“ a metoda referenčních značek. [3][4]

1.3 Optické skenery

Velmi rychlé skenování s texturou. Při samotném skenování se používá světlo o určité vlnové délce. Dříve byla projekce světla bílá, ale v dnešní době se přešlo na projekci světla modrého z důvodu snížení vlivu světla denního a také protože modré světlo má lepší zaznamenávací vlastnosti, když měříme lehce lesklý povrch, než světlo bílé. Skenery nedosahují stejně vysoké přesnosti jako laserové, ale při nižších nárocích na přesnost ušetří mnoho času a urychlí celý proces. [3][4]



Obrázek 3: Měřicí zařízení ATOS II 400 od německé firmy GOM GmbH [12]

2 Základní principy optického skenování

3D optická měřicí zařízení v dnešní době využívají tři základních principů pomocí kterých lze snímat povrch objektu.

- Triangulace
- Optická interferometrie
- Měření doby letu modulovaného světla

Nejrozšířenější je metoda založena na principu optické triangulace, která je hojně aplikována v automobilovém a leteckém průmyslu, ať už je to v oblasti kvality, kontroly nebo i reverzního inženýrství. O tom, kterou metodu s daným principem měření zvolit rozhoduje nespočetně mnoho faktorů, které mohou přesnost měření ovlivnit (vzdálenost, velikost, prostředí,...). [3][4]

2.1 Triangulace

Samotný způsob triangulace spočívá ve vyhodnocování souřadnic a vzdáleností nacházejících se na povrchu tělesa. Princip vychází z trojúhelníku, kde je nutné dopočítat jednu zbylou hodnotu, což může být délka strany, úhel nebo bod. Při 3D optickém měření se souřadnice získávají z triangulační metody pomocí kosinové věty. Tato metoda si klade vysoké nároky na konstrukci a měřicí aparaturu, s kterou potom roste přesnost zařízení. Metodu triangulace můžeme rozdělit na následující techniky:

- Aktivní triangulace
- Pasivní triangulace
- Měřicí systémy s teodolitem
- Fokusovací techniky
- Techniky “podoba ze stínování“

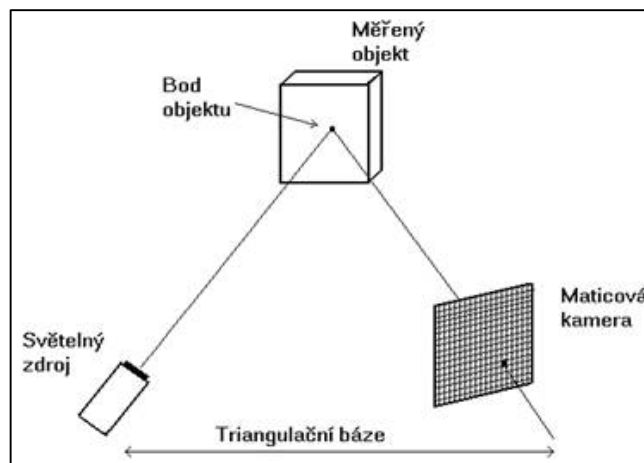
Z nichž poslední tři jsou speciální metody, o kterých zde nebude více zmíněno.

2.1.1 Aktivní triangulace

Z technického hlediska může být řečeno, že aktivní triangulace je založena na metodě fotogrammetrické rekonstrukce, kde nasvícený povrch objektu je snímán CCD kamerami (snímači obrazu).

Rozdělení:

- Světelný paprsek (1D)
- Světelný pruh (2D)
- Strukturovaný světelný svazek (3D)



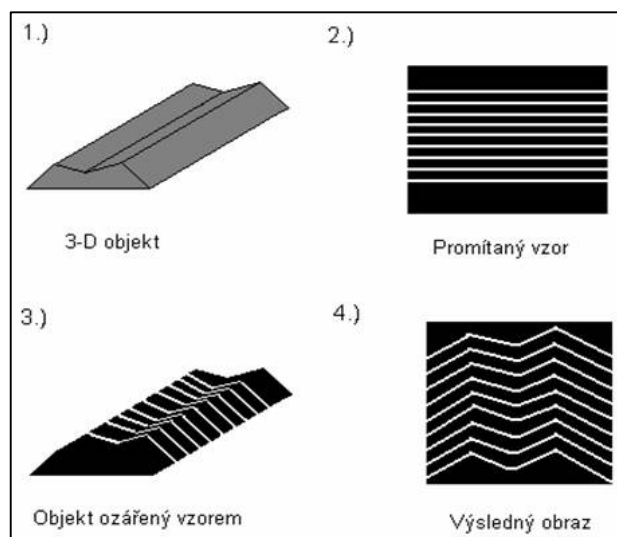
Obrázek 4: Aktivní triangulace (světelný paprsek) [6]

Triangulační senzor skeneru je tvořen třemi podsystemy: zářičem, přijímačem a elektronickým procesorem, tak jak je znázorněno na obrázku 4. Bod světla je promítnut na měřený objekt a následně odražená část světla procházející skrz čočku je detekována pomocí CCD, CMOS nebo PSD pole. Úhel alfa je přepočítán v závislosti na místě dopadu paprsku světla na pole detektoru a pomocí procesoru získáme danou vzdálenost. Úplně stejný princip se dá aplikovat s použitím dvou kamer.

Princip 1D triangulace znázorněný na obrázku 4 je základním kamenem pro 2D a 3D triangulaci. Výhodou strukturovaného světelného svazku je, že je celý objekt osvětlen a zaznamenán najednou, což snižuje náročnost měření a dobu trvání. Samotnou 3D triangulaci lze rozdělit do daných metod:

- Moiré
- Světelný vzor
- Barevný kód
- Fázový posun

Na obrázku 5 je znázorněn princip 3D aktivní triangulace, který je aplikován na zařízení ATOS II 400. [4] [6] [8]



Obrázek 5: Technika světelného vzoru (3D aktivní triangulace) [6]

2.1.2 Pasivní triangulace

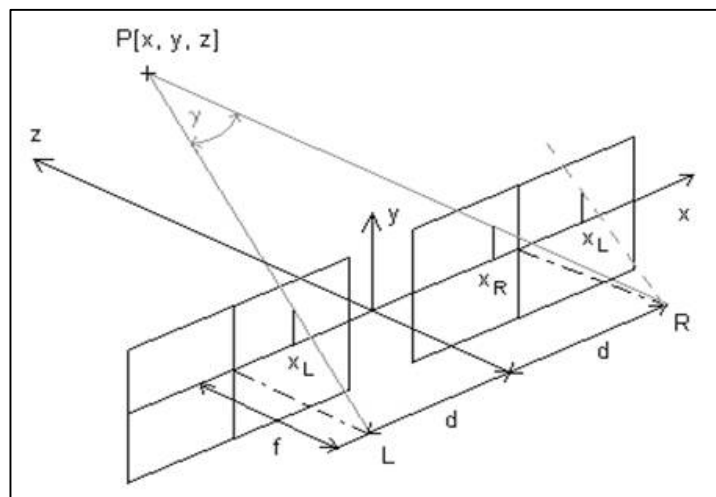
Tato metoda je založena na nepravidelném geometrickém uspořádání osvětlení (nemá vlastní zdroj záření), kam lze zahrnout různé formy digitální fotogrammetrie. Tento princip zaznamenávání obrazu je možno aplikovat jako dynamický systém nebo statickou scénu, rozdíl je v použitém počtu kamer a postupu měření. U dynamických systémů se využívá samokalibračních metod nebo se vychází ze znalosti relativních poloh. Snadnou a používanou technikou v praxi je stereovidění, což je metoda využívající více kamer. [6]

2.1.3 Stereovidění

Stereovidění se snaží napodobit funkci lidského oka, kde za pomoci dvou CCD kamer, které jsou rovnoběžné s jejich optickými osami a vzdáleny od sebe asi 65 mm, což představuje vzdálenost lidských očí, vytvoří dva stereoskopické snímky. U této metody skenování je využito triangulační metody, pomocí které je program schopný dopočítat prostorové souřadnice všech zaznamenaných bodů.

Stereovidění dále využívá variantu s jednou či více kamerami, kde varianta s jednou kamerou je založena na principu samokalibrace, což znamená, že není nutné znát přesnou polohu kamer/kamery, vzájemná pozice je odvozena a určena z naměřených dat. Při této metodě se velmi často využívá tzv. kalibračního předmětu, u kterého jsou známy přesné rozměry, a který je nutný skenovat zároveň s měřeným předmětem. Následně z jednotlivých měření a měřítka kalibračního předmětu lze odvodit velikost a tvar skenované součásti.

U varianty dvou a více kamer je využito principu digitální fotogrammetrie. Jedna možnost s více snímači se známou vzájemnou polohou a druhá možnost s více snímači, kde je odbourána nutnost znát přesnou polohu snímače (samokalibrace). Důležité je, aby každý získaný snímek obsahoval minimálně 3 referenční body a další podmínkou je znát polohu minimálně 4 ze všech použitých bodů.



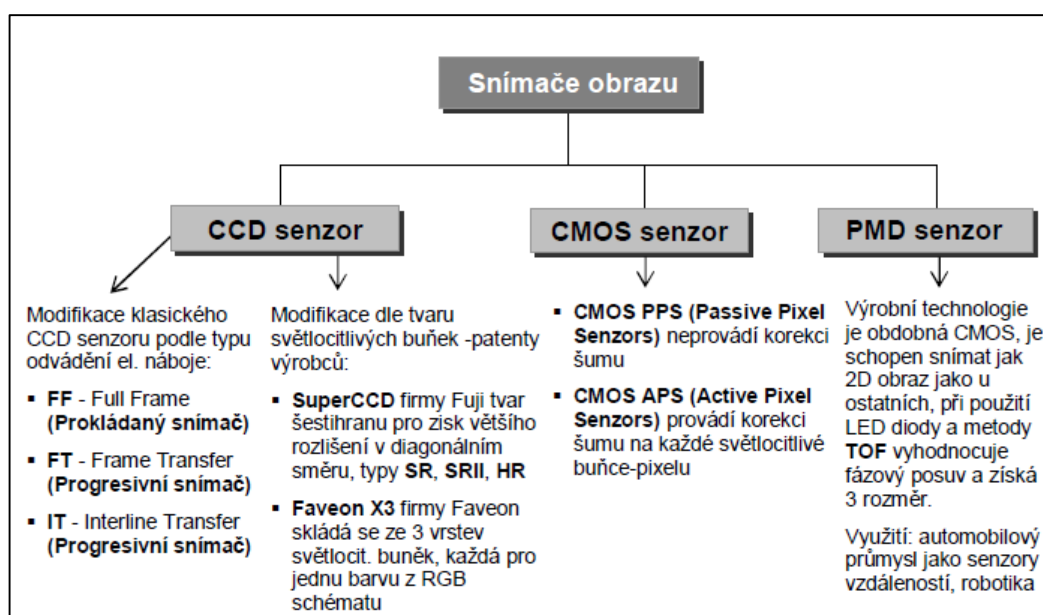
Obrázek 6: Stereoskopické snímky (schéma stereovidění) [6]

Důležitá je úhlová paralaxa γ , kterou svírají dva paprsky (Obrázek 6), pomocí které lze získat chybějící vzdálenost od povrchu objektu vzhledem ke středu pohledu obou

snímačů. Paralaxa pro daný měřicí objem je stálá a definovaná. Bod P značí měřenou souřadnici a body L a R značí ohniska CCD kamer. [5] [6] [15] [22]

3 Snímače obrazu a jejich rozdělení

Snímače obrazu slouží k převodu světelného záření do digitální podoby. V současnosti jsou nejpoužívanější snímače CCD a CMOS. Další senzory, na které lze narazit jsou PMD, které vycházejí z technologie CMOS. Nejdůležitějšími parametry snímačů jsou rozlišení, doba zpracování snímků, velikost šumu, kvantová účinnost a bitové rozlišení A/D převodníku. [4]



Obrázek 7: Rozdělení snímačů obrazu [4]

3.1 CCD senzor

Je to obrazový senzor, který je velice citlivý na světlo a v kombinaci s dalšími zařízeními vytváří obraz. Samotný obraz je tvořen z bodů, kterým se v digitálním obrazu říká pixely. CCD senzory jsou malé destičky z polovodičových buněk, které velmi dobře reagují na světlo. [9]

3.2 Princip fungování CCD senzoru

V jednoduchosti se jedná o proces, v kterém figurují fotony a elektrony. Cílem je dosáhnout digitálního záznamu, to znamená, že se musí zjistit velikost elektrického náboje dopadajícího světla na jednotlivé buňky senzoru a pomocí převodníku a procesoru vyjádřit jeho číselnou hodnotu. Nutné je podotknout, že CCD senzory

nemají schopnost měřit barvu dopadajícího světla ani vlnovou délku světla, rozpoznávají jenom světlo a stín. [9]

3.3 Citlivost CCD senzoru

Každý prvek CCD senzoru měří intenzitu dopadajícího světla nezávisle na sousedovi. Elektrický náboj roste s intenzitou dopadajících paprsků, ale neroste do nekonečna. Je omezen dolním i horním limitem. Vlivem vnějších podmínek jako jsou rozhlasové a televizní vysílání se nachází v každé buňce náboj, šum. Šum představuje samotné dno citlivosti snímače. Horní limit je omezen technickými vlastnostmi snímače a udává se mV. [9]

4 Skener Atos II 400 a GOM Inspect

Atos II 400 je mobilní bezdotykový optický 3D skener od firmy GOM GmbH, který slouží k rychlé digitalizaci reálných objektů v rozmezí několika milimetrů až několika metrů. Zařízení je používáno pro kontrolu kvality výroby, analýzu, inspekci a reverzní inženýrství. Nejčastější využití systému ATOS je v oblasti CAD, CAM a FEM, kde můžeme nasbíraná data porovnávat s rozměrově přesným modelem nebo pokračovat v modifikaci daného modelu (barevná mapa odchylek, řezy, obrysové a kontrastní křivky). Výstupními daty je mračno bodů, které pomocí příslušného softwaru převedeme do formátu výrobního stroje. Samotná digitalizace povrchu využívá metodu projekční moiré topografie, za pomoci dvou snímajících digitálních kamer s vysokým rozlišením optických čipů (1,4 mil. bodů každá). [7] [10]

Optický skener ATOS II 400	
Hmotnost	5 200 g
Rozměry	490 x 260 x 170 mm
Čas na 1 sken	1 sekunda
Měřený objem	700 x 560 x 560 mm 250 x 200 x 200 mm 55 x 40 x 33 mm
Počet bodů z jednoho skenu	až 1 400 000
Hustota bodů	0,04 - 0,18 - 0,5 mm
Přesnost měření	cca 30 μm

Tabulka 1: Specifikace zařízení ATOS II 400 na katedře KSA [5]

Tabulka 1 prezentuje technické parametry skeneru na katedře KSA, kde je doplněn i parametr „Měřený objem“. Katedra disponuje třemi variantami měřicích objemů, které se liší svou velikostí, kde každý měřicí objem má jinou hustotu bodů na 1 mm². Viz tabulka 1 „Hustota bodů“.

Výhody:

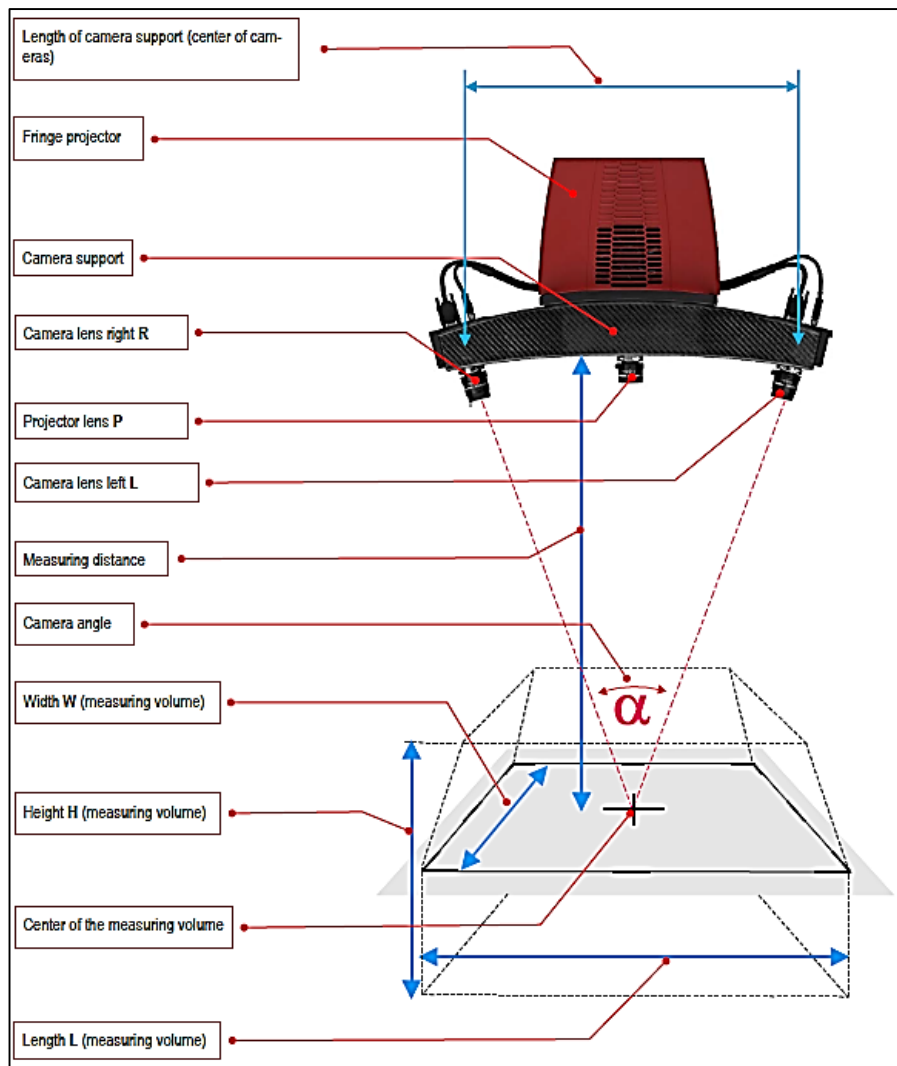
- Rychlé měření
- Vysoká hustota dat až 28 bodů na 1mm² a 1,4 milionu bodů na jeden záběr
- Flexibilita systému (spojování jednotlivých snímků do jednoho)
- Možnost měřit i lesklé a průhledné objekty (po bezpečné úpravě povrchu)
- Možnost měřit i měkké objekty a horké formy

Proces měření:

- Rychlé měření s vysokou hustotou dat (velká rozlišitelnost detailů)
- Proces měření je založen na principech optické triangulace, fotogrammetrii a metody Fringe Projection (promítání proužků)
- Na povrch objektu jsou promítány pruhy světla, které jsou snímány pomocí dvou kamer s CCD čipem
- Software z těchto záběrů vypočítá prostorové souřadnice jednotlivých bodů
- Automatické složení jednotlivých záběrů do jednoho celku je zajištěno referenčními značkami nebo metodou Best-fit na skenovaný tvar
- Za účelem naskenování celého objektu lze pohybovat skenerem i měřeným objektem

Výstupy z digitalizace:

- Optimalizovaná polygonální síť (STL)
- Mrak bodů
- Řezy (body)
- Obrysové a kontrastní křivky (body)
- Barevná mapy odchylek od CAD modelu (obrázky)
- Délkové a úhlové kóty, tolerance tvaru a polohy (GD&T), primitiva (roviny, válce, koule, ...)
- Protokol měření (ASC, CSV, PDF)
- Export do prohlížeče GOM Inspect



Obrázek 8: Popis zařízení ATOS II 400 [16]

Oblasti využití digitalizovaných dat:

- Kontrola kvality (Quality Control)
- Reverzní inženýrství (Reverse Engineering)
- Rychlá výroba prototypů (Rapid Prototyping)
- Virtuální realita (Virtual Reality)
- Přímé obrábění (Direct Milling)
- Simulace vstřikování plastů (Simulation of Injection Molding)
- Simulace tažení plechu (Simulation of Sheet Metal Forming)
- Kontrola kolizí dílu (Digital Mock Up)

4.1 GOM Inspect

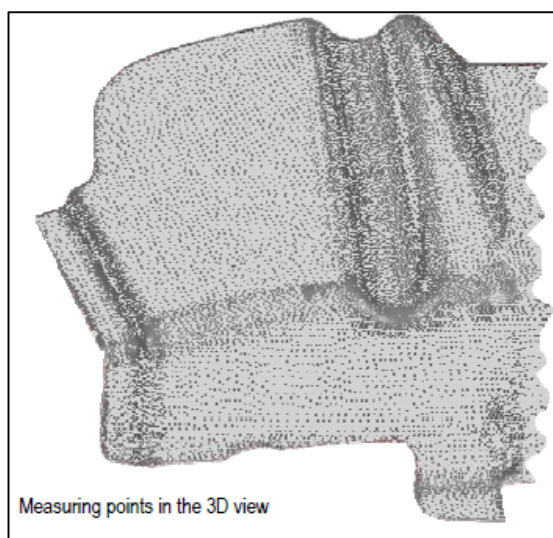
Program GOM Inspect byl primárně vyvinut pro 3D inspekci mraku bodů a zpracování sítě. Je to softwarový balíček pro analýzy 3D naměřených dat zaměřený na kontrolu kvality, vývoj produktu a samotnou výrobu produktu. Využívá se pro hodnocení 3D naměřených dat získaných z GOM systémů, 3D skenerů, laserových skenerů a dalších měřících zařízení, která produkují jako výstupní data mračno bodů. Umožňuje vytváření polygonální sítě a její optimalizaci. [10]

Nachází se v něm tři základní moduly:

- Inspekce – slouží k porovnávání originálních CAD dat s digitalizovaným modelem
- Report – v tomto modulu je možné přehledně vytvářet výstupní formuláře
- Editování sítě – funkce zadělávání děr, vyhlazování, oprava, ztenčení sítě

Základní funkce:

- Načtení CAD dat ve formátech STL, G3D, JT Open, ASCII a PLY
- Ustavení dat, zahlazování nedostatků v modelu
- Porovnávání originálních CAD dat s mrakem bodů – barevná mapa, řezy, odchylky
- Tolerance tvaru a polohy
- Vytváření geometrie na mraku bodů – křivky, roviny, prostorové obrazce
- Kótování a rozměrové analýzy v řezech
- Export mraku bodů do STL



Obrázek 9: Mračno bodů – výstupní data z ATOS II 400 [12]

4.2 Postup pro vyhodnocení měřených objektů

V této diplomové práci se budou rozměry z části vyhodnocovat podle německé směrnice VDI/VDE 2634, která pojednává o ověřování přesnosti 3D optických systémů na základě jejího Acceptance testu. To znamená, že jeden z kroků Acceptance testu jsme si zvolili jako jednotný měřicí postup pro všechna měření. V případě etalonu s koulemi nás budou zajímat parametry: chyba na průměru (probing error size), chyba tvaru (probing error form) a chyba rozteče (sphere spacing error). U kalibru do díry se zaměříme na chybu tvaru a rozměru. [5]

4.3 Acceptance test

Tento test slouží pro ověřování přesnosti měření, přesněji ověřuje způsobilost skeneru vykonávat dostatečně přesné prostorové měření. Test vychází z konkrétních náměrů na originálním kalibračním objektu, ze kterých je následně vyhodnocena správnost měření. Pro zařízení ATOS II 400 je výrobcem stanovena forma testu vycházející z německé směrnice VDI/VDE 2634 a tato norma se vztahuje téměř ke všem optickým skenerům. [5]

Parametry při Acceptance testu:

- Chyba na průměru (probing error size)
- Chyba tvaru (probing error form)
- Chyba rozteče (sphere spacing error)
- Chyba vnější vzdálenosti (length measurement error)

4.3.1 Parametr probing error

Je to jeden z parametrů Acceptance testu, na kterém si ověřujeme schopnost měřicího systému. Měří se zde jednotlivé průměry kuliček a jejich tvarová přesnost „kulovitost“ a dále se zjišťuje schopnost systému sloučit jednotlivé na sobě nezávislé snímky do jednoho obrazu. Z těchto kritérií se potom vyvozují chyby vlastního zařízení a chyby způsobené překládáním jednotlivých snímků. [5]

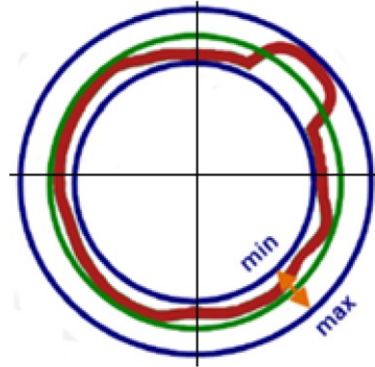
Probing error form (PF)

Ukazuje tvarovou odchylku „kulovitost“ jejímž ekvivalentem v GOM Inspect je hodnota s názvem Range. Její výpočet vychází z největší a nejmenší odchylky od

ideální koule, identifikované ze všech naskenovaných bodů viz ověřující experiment kapitola 4.7 na straně 35. [5]

$$PF(\sigma) = \sigma$$

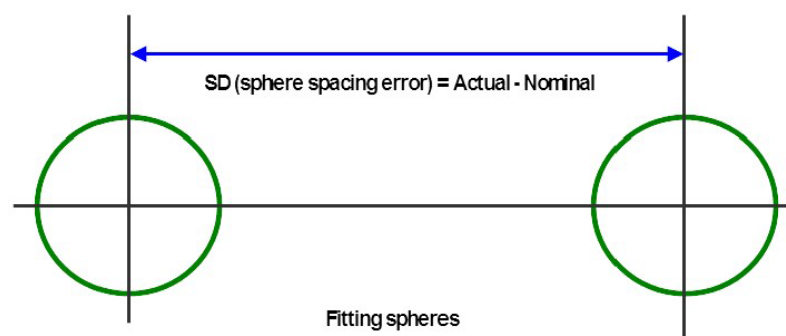
$$PF(Range) = |max - min|$$



Obrázek 10: Schéma prezentující výpočet Probing error form [5]

4.3.2 Parametr spacing error

V tomto případě se taktéž jedná o jeden parametr z Acceptance testu, kde je cílem změřit vzdálenost dvou koulí, kde ze získané hodnoty lze porovnáním s nominální hodnotou vypočítat chybu rozteče. Tento test je úzce spjatý ještě s jedním parametrem a tím je parametr length measurement error, kde se volí způsob měření vzdálenosti, kde je na výběr vnější vzdálenost, rozteč a vnitřní vzdálenost koulí. V našem případě se vyhodnocuje rozteč koulí měřena ze středů kuliček. [5]



Obrázek 11: Schéma znázorňující výpočet Sphere spacing error [5]

5 Zásady správného měření

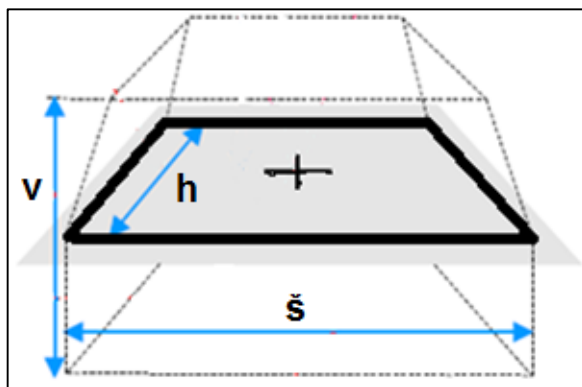
Samotný výrobce měřicího zařízení doporučuje ve svém manuálu pro uživatele pár podstatných rad, které je důležité co nejvíce dodržovat, aby výsledek měření byl co nejpřesnější. [12]

Vlivy:

- Měřicí objem – dle velikosti měřeného objektu
- Povrch (lesklý, čirý) – matnící nástřik (prášek oxidu titanu, křídový prášek, cyklododekanový prášek) → zvětší měřený rozměr o vrstvu nástřiku
- Expozice – prostředí (tmavé, světlé)
- Referenční body – velikost a druh

5.1 Měřicí objem (MV)

Skener ATOS disponuje několika měřicími objemy, které se volí v závislosti na velikosti objektu. S rostoucím objemem se zvětšuje rozestup bodů (mění se rozlišení kamery). Hustší síť bodů nutně neznamená vyšší přesnost, ale lepší schopnost vykreslovat menší detaily.



Obrázek 12: Specifikace měřicího objemu [16]

5.2 Matnící nástřik

Cílem matnícího nástřiku je vyvarovat se nežádoucím vlivům při skenování povrchů, které jsou lesklé, velmi tmavé nebo průhledné. Matnící nástřik se aplikuje, když měřicí objekt nezaručuje dostatečný kontrast (tmavý nebo průhledný povrch), to znamená, že kamera není schopná zachytit projekci proužků na povrchu. Matnící povrch také zajišťuje celistvý barevný povrch, též podporující kontrast rastru proužků od

projektoru. Důležitá je vrstva nástřiku, měla by být rovnoměrně nanesená po celém povrchu a její vrstva by neměla být příliš vysoká. Na základě odborného článku od autora Davida Palouška [7], který se zabýval tloušťkou nástřiků, je vidět rozdíl vrstev mezi titanovým práškem a křídou, a tak si lze představit dopad na měření s pomocí těchto nástřiků.



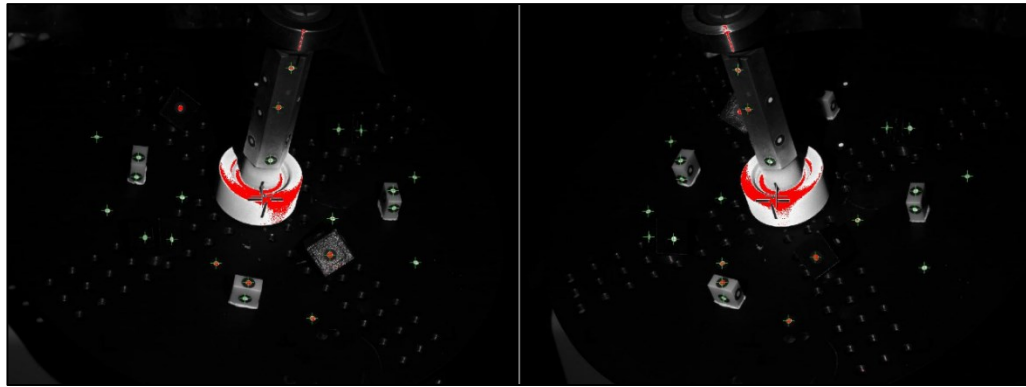
Obrázek 13: Měřený etalon – promítnutý rastr na povrchu

5.3 Expozice a čas snímání

Expozice má za cíl správně nastavit světelné podmínky, tak aby kamery byly schopné zaznamenat celý povrch tělesa s adekvátní kvalitou zaznamenaného povrchu. Tento parametr lze ovlivnit softwarově (čas snímání), hardwarově (seřízení clony) a také okolním osvětlením (např. zhasnutí světel). Objekt je doporučeno měřit na tmavém pozadí, aby kontrast vynikl.

Například na obrázku 14 je vidět přexponovaný snímek, kde změnou času snímání je zřetelně vidět špatně zaznamatelná oblast (červená barva). Špatně nastavený čas vede k podexponovaným nebo přexponovaným snímkům tzn., že zaznamenaný povrch může obsahovat prázdná místa, která nebudou vyhodnocena.

Další možná úprava expozice je seřízení clony objektivu (průchod světla objektivem), kde se na expoziční stupnici upravuje její hodnota.



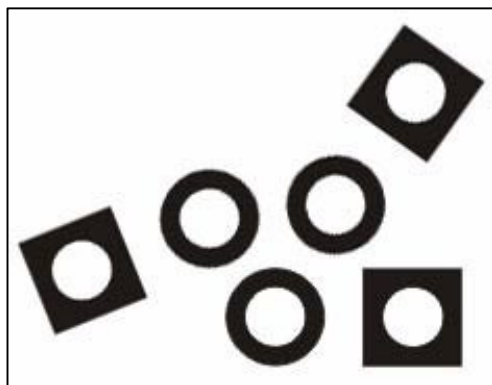
Obrázek 14: Přeexponovaný snímek, vizualizace v Gom Inspect

5.4 Referenční body

Referenční body (dále jen RB) jsou samolepící nebo magnetické značky, které se umisťují na měřený objekt. Mají definovanou geometrii a vysoký kontrast (bílý kruh na černém pozadí). Samotné RB slouží jako připojovací body jednotlivých měření, kde samotný bod v systému představuje přesnou polohu v prostoru a díky tomu je možno transformovat skenované snímky dohromady a získat tak 3D data v podobě mračna bodů. [12]

Rozdělení:

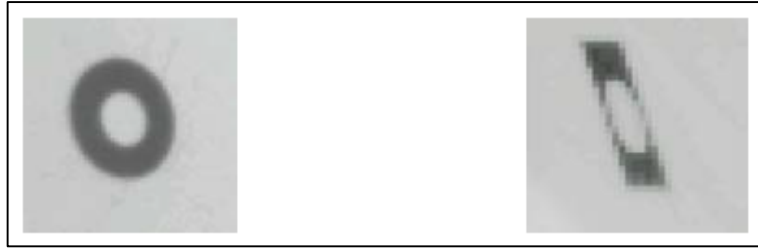
- Nekódované (pracují se zařízením ATOS)
- Kódované (používají se pro fotogrammetrii pro zařízení TRITOP)



Obrázek 15: Varianty referenčních bodů (nekódované) [12]

5.4.1 Správné vlastnosti referenčního bodu

Důležité je zvolit správnou velikost referenčního bodu, která je dána podle velikosti měřicího objemu. Velikost RB zaznamenaná kamerou by měla být alespoň 6-10 pixelů, tuto velikost je systém schopný rozpoznat a identifikovat jako dobrou kvalitu. [12]



Obrázek 16: Kamerou rozlišitelné a nerozlišitelné referenční body [12]

5.4.2 Správné umístění referenčních bodů

Správné umístění referenčních bodů je velmi důležité, abychom zajistili vhodné podmínky pro měření. Nedodržením těchto zásad se můžeme uchýlit k nežádoucím chybám měření a zbytečné práci navíc s opravou. [12]

Doporučení:

- Ujistit se, že jsou RB umístěny na rovné či mírně zakřivené ploše a mají dostatečnou vzdálenost od ostrých hran
- Správná viditelnost a rozmístění v celém měřicím objemu (vyvarovat se umístění bodů v jedné přímce)
- Množství RB je doporučeno min. 3 a více (čím více RB neznámá větší přesnost) v závislosti na měřicím objemu
- RB umístění na předmětu vs. v okolí (otáčecí stůl) nebo kombinace



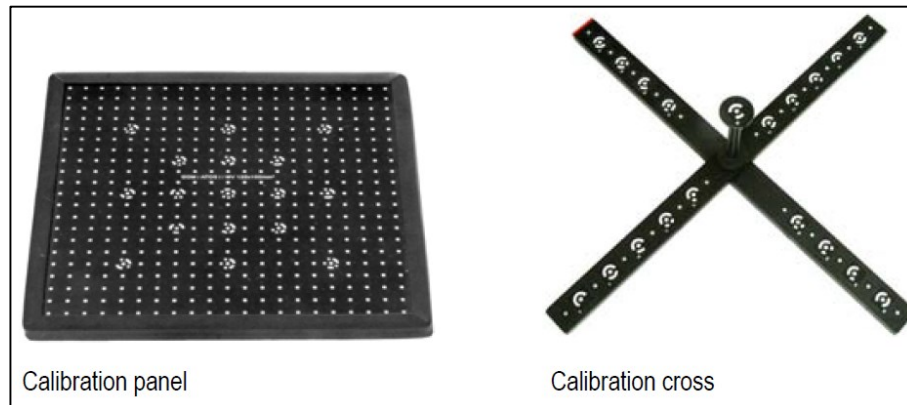
Obrázek 17: Příklad doporučeného umístění referenčních značek [12]

5.5 Kalibrace senzoru

Kalibrace je měřicí proces během, kterého probíhá nastavení měřicího systému za pomoci kalibračního objektu s cílem zajistit dimenzionální konzistenci měřicího zařízení stanovenou výrobcem skeneru. Při splnění těchto podmínek systém ATOS II z bodů kalibračního objektu vypočítá jejich 3D souřadnice.

5.5.1 Kalibrační podmínky

U zařízení ATOS II je doporučeno provádět kalibraci vždy před každým měřením. Pro samotnou kalibraci je výrobcem doporučeno uvést skener do provozní teploty 20-30 minut. Dále je důležité správné seřízení senzorů, správné zvolení měřícího objemu pro kalibrační objekt a správné seřízení měřící vzdálenosti.



Obrázek 18: Kalibrační objekty pro zařízení ATOS [12]

Kalibrovat:

- Před začátkem prvního měření (v případě výměny měřícího objemu)
- Při změně nastavení kamerových objektivů nebo vzájemné pozici kamer
- V případě, kdy systém upozorní na ztrátu kalibrace

6 Rešerše

Daná rešerše se bude zabírat pracemi mých předchůdců a závěrečnými pracemi v cizině, kde se taktéž zabývají problematikou 3D optického měření. Tento obor je celkem nový, a tak se stále seznamujeme s vedlejšími vlivy při měření, které mají dopad na přesnost. Tyto rešerše byly vybrány z důvodu, že se jejich témata taktéž zabývají problematikou přesnosti 3D bezkontaktního měření a měli by rozšířit ještě více celkový pohled na diplomovou práci.

Autor Martin Frkal [5] se ve své diplomové práci zabýval návrhem a realizací etalonu pro kalibraci 3D bezkontaktního optického skeneru ATOS II 400, kde se v závěru práce věnoval i samotné přesnosti měřícího zařízení. Autor se zaměřil na kvalitu nástřiku, konkrétně na hloubku vrstvy nástřiku a rovnoměrnost nanesení nástřiku. A jako další experimenty zvolil vliv kalibrace na přesnost, kde podrobil zkoumaný předmět sérií měření před kalibrací a po kalibraci a vliv zpracování dat. Kvalita a přesnost provedení etalonu byla vyhodnocena jako velmi uspokojivá a experimenty prokázaly, že vrstva nástřiku má vliv na přesnost, ale jenom v řádech 0,003 mm (v prvním případě se jednalo o nedostatečně silnou vrstvu nástřiku a v druhém případě byla vrstva nástřiku ideální) a na vliv rozteče nemá žádný dopad. Kalibrace zařízení projevila větší chybu měření v řádech 0,025 mm. Tento etalon bude využíván pro kalibraci na katedře KSA a bude velkým přínosem v oblasti finanční úspory, protože běžná kalibrace od autorizovaného výrobce je velmi drahá.

Jako další práci blízkí se problematice je odborný článek od autora Davida Palouška [19]. Ten se ve své práci zaměřil na dva druhy pomocných nástřiků, jeden byl křídový a druhý titanový a porovnával jejich vliv na nepřesnost měření na zařízení ATOS III. Autor se v závěru zmiňuje, že množství zmatňujícího materiálu (křídový nástřik) má velký dopad na reflexivní vlastnosti a hodnotu střední vrstvy až o 0,010 mm. Výsledkem bylo zjištění, že titanový povlak je až 10x tenčí než křídový a tím pádem jím jsme schopni docílit přesnějšího měření. Nejistota měření typu A byla statisticky vyhodnocena z 15 měření, u křídvy vyšla $u_A = 0,039$ mm a u titanu $u_A = 0,0044$ mm.

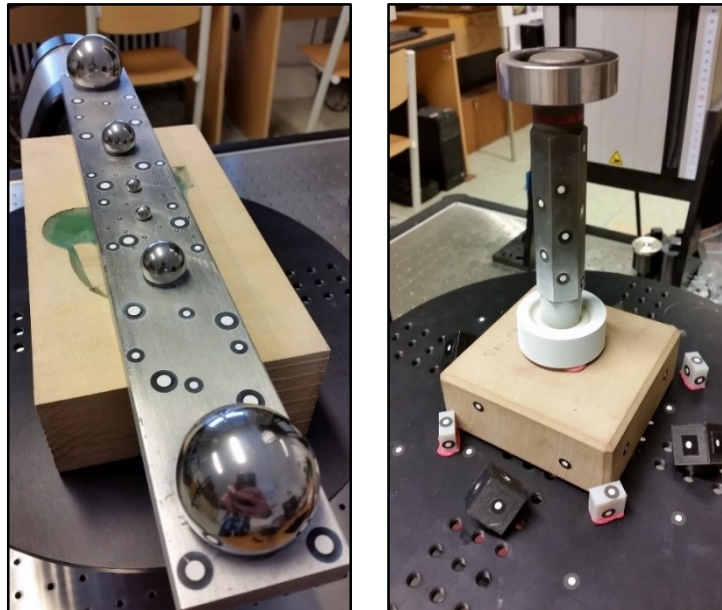
Další odborně-technický článek od autora Radomíra Mendřického [18] je zaměřený na experiment, který se týká přesnosti měření malých prvků. Měření probíhalo na dvou zařízeních, přesněji na bezkontaktním optickém skeneru ATOS II 400 a na ručním

skeneru RevScan. Cílem byla komplexní analýza zkoumaného objektu, která by mohla posloužit jako instruktážní pomůcka pro měření těchto malých prvků. Na základě této práce by měl být uživatel těchto optických skenerů schopný správně zvolit vhodný skener a u ATOS i správný měřicí objem. Pro důvěryhodnost výsledků celé analýzy byl zkoumaný objekt proměřen na CMM zařízení, které splňuje vyšší přesnost, než použité skenery a výsledky z něj vstupují do vyhodnocujících analýz jako jmenovité hodnoty.

Poslední článek od Juraje Vagovského [20] pojednává o měřících schopnostech optického 3D skeneru, konkrétně ATOS Triple Scan II. Autor se zabýval měřením malého objektu, jímž byla velmi tvrdá ocelová tyč o \varnothing 12 mm, která může být například polotovarem pro řezné nástroje. Cílem bylo zjistit dosažitelnou přesnost skeneru. Měření bylo vyhodnocováno podle statistické metody, provedly se dva experimenty s jiným měřicím objemem (MV 100, MV 170) a dvěma jinými způsoby vyhodnocení průměru. Digitalizovaný objekt obsahoval 3 řezy ve vzdálenostech 10, 25, 40 mm od základny kolmo k ose rotace. První způsob vyhodnocení průměru bylo aritmetické zprůměrování všech 3 řezů při jednom měření a po 50x měření byla vypočtena celková hodnota průměru, druhá možnost vypočetla průměrnou hodnotu průměru z 50x změřené hodnoty konkrétního řezu, poté z těchto tří řezů vzešel výsledek. Experiment zjistil, že naměřené hodnoty nejsou schopny poskytnout přijatelný výsledek při měření malých a přesných objektů s definovanou tolerancí například h6. U tolerance nižší jako je h9 jsou výsledky uspokojivé. Tento experiment prokázal vhodnost a nevhodnost měření opravdu malých a přesných objektů.

7 Praktická část

Tato část diplomové práce se bude zabývat experimentálním měřením dvou etalonů, které budou vystaveny různým vlivům a podmínkám měření. Jejím cílem bude vyhodnotit nejlepší podmínky pro měření a bude tak sloužit pro ostatní uživatele jako možná příručka, kam by se ostatní mohli podívat, aby se vyvarovali možným a zbytečným chybám.

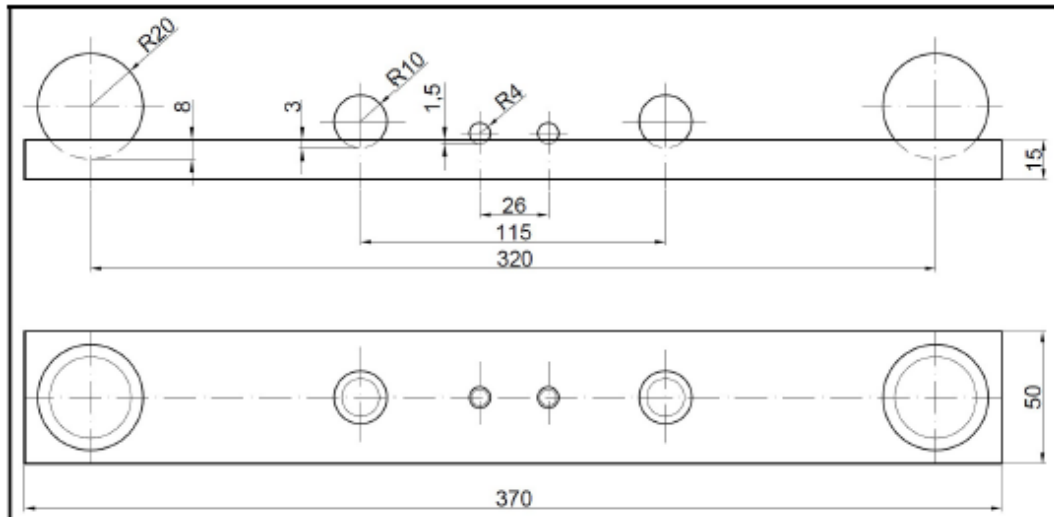


Obrázek 19: Měřené etalony (vlevo etalon s koulemi, vpravo kalibr)

Jako etalony pro měření budou sloužit kalibr do díry (48H7, +0 až +25 μm) a přípravek s kalibračními koulemi z minulé diplomové práce [5], která se zabývala návrhem samotného etalonu. Tyto objekty svou deklarovanou přesností, která byla ověřena i na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA GLOBAL Status 7.10.5, podloží důvěryhodnost celého pokusu.

Druhy experimentů:

- Počet snímků
- Světelnost (expozice)
- Vliv kalibrace přístroje
- Vliv úhlů
- Vliv zahřátí přístroje
- Kvalita referenčních značek
- Hardwarové seřízení (clona)



Obrázek 20: Etalon vyrobený pro Acceptance test - autor Martin Frkal [5]

Sphere L Ø20 mm	20.000 ± 0.005 [mm]
Sphere R Ø20 mm	20.000 ± 0.005 [mm]
Sphere spacing 115 mm	115.005 ± 0.006 [mm]

Tabulka 2: Nominální rozměry měřicí stroj DEA GLOBAL Status 7.10.5 – ETALON [5]

7.1 Základní pojmy při měření

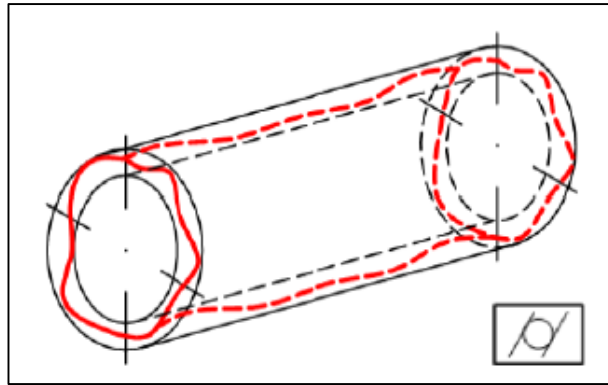
Měření - v této diplomové práci znamená sérii snímků, které jsou následně proloženy do jednoho snímku, vznikne tak 3D model představující celkový obraz předmětu.

Série – v dalším případě počet snímků, opravdu představuje konkrétní číslo, kolik snímků bylo potřeba provést, aby vznikl 3D model. Jejich počet může být od jednotek až do desítek snímků, vše záleží na velikosti skenovaného tělesa.

Nominální hodnota – je vyznačena ve všech grafech jako číslo nula a jsou k ní vztaženy naměřené odchylky.

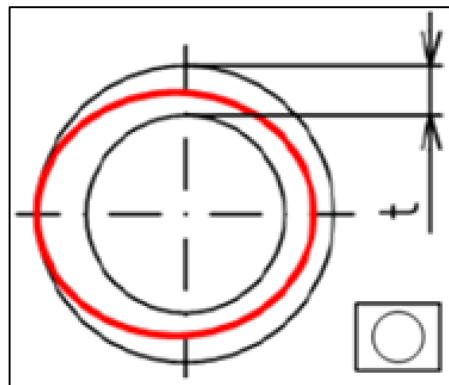
7.2 Geometrické a tvarové tolerance

- *Válcovitost* – tolerance je vyhovující v případě, když reálná válcová plocha leží mezi dvěma soustřednými válci (viz obrázek 21).[17]



Obrázek 21: Toleranční oblast válcovitosti a její značení [17]

- *Kulovitost* – tento termín v metrologii neexistuje, ale dá se odvodit z geometrické tolerance pro kruhovitost, kde konkrétně GOM Inspect pomocí metody Chebyshev nebo Gausse (pro kulovitý prvek), má možnost tento parametr vyhodnotit. „Kulovitost“ je v tomto případě označena jako Range viz obrázek 23 a 24. [17]

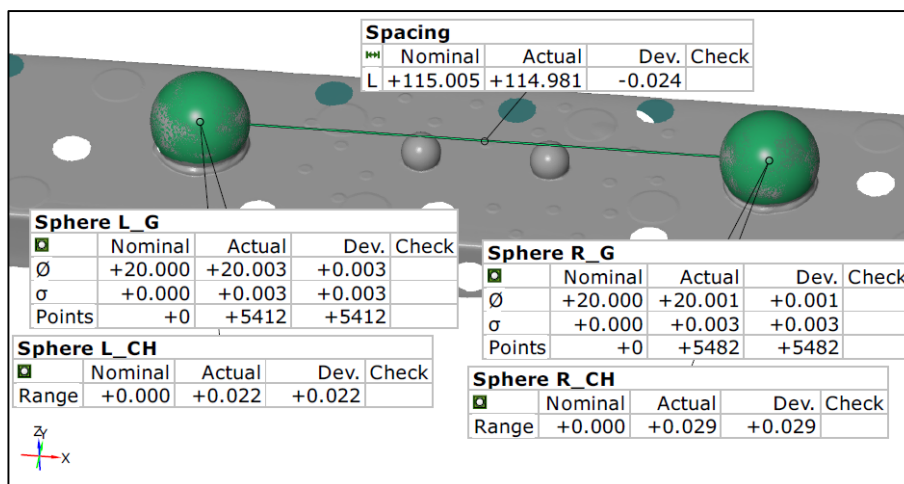


Obrázek 22: Toleranční oblast kruhovitosti a její značení [17]

- *Kruhovitost* - viz obrázek 22 vyhovuje, když reálný profil kruhu leží mezi dvěma soustřednými kružnicemi. Toleranci představuje hodnota t , je to rozdíl průměrů 2 soustředných kružnic. [17]

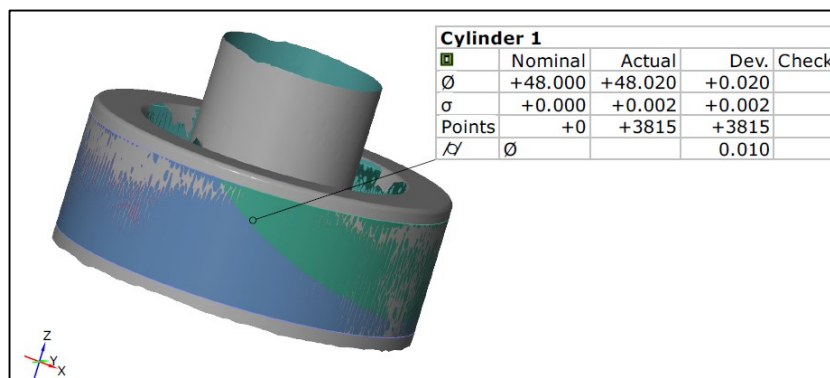
7.3 Co se bude měřit?

Na našem etalonu s koulemi (Obrázek 23, str. 34) byly zvoleny tři parametry, které se budou vyhodnocovat, na koulích o průměru 20 mm to bude jejich rozměr a tvarová tolerance. A dalším parametrem bude rozteč koulí, vztažený k jejich středům.



Obrázek 23: Výstřížek z reportu ze SW Gom Inspect (ETALON)

U kalibru do díry (Obrázek 24) se bude měřit průměr válce a tvarová tolerance.



Obrázek 24: Výstřížek z reportu ze SW GOM Inspect (KALIBR)

Všechny tyto parametry se promítnou v grafech jednotlivých analýz, které se budou zabývat různými vlivy na měřicí proces.

7.4 Etalon s koulemi analýza v GOM Inspect

V programu GOM Inspect se vytvořil vzorový protokol, který posloužil pro vyhodnocování všech měření. To znamená, že objekt je ustavený v námi zvoleném souřadnicovém systému, v tomto případě na CAD modelu o nominálních hodnotách. Tento postup vyhodnocování se hojně využívá při kontrolních měření např. v sériové výrobě, kde se jedná především o zkrácení času inspekce.

Nejprve bylo zapotřebí vyhodnotit rozměry u levé a pravé koule. To znamená, že levá koule byla pomocí funkce Local-best-fit vybrána a ustavena na levou kouli v CAD modelu a stejný postup následoval i u pravé koule. Poté mohla nastat inspekce průměru a tvarové tolerance (především barevná mapa odchylek a hodnoty).

Dále bylo nutné vyhodnotit rozteč koulí, zde byla opět využita funkce Local-best-fit, kde do jednoho výběru patřila levá i pravá koule současně, software pak automaticky co nejpřesněji proloží naměřená data na CAD model. Tím byla zaručena správná inspekce pro rozteč.

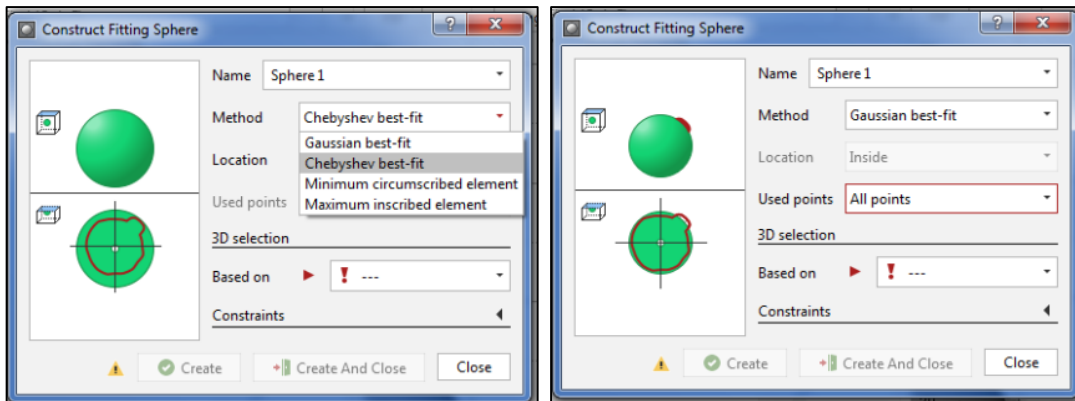
7.4.1 Chebyshev – best - fit

Chebyshev je jedna z možných funkcí v SW GOM Inspect, která slouží pro odvození rozměrů tvarových útvarů (válec, koule, atd.). Pro tvar koule je Chebyshev odvozen z geometrické tolerance pro kruhovitost. Jde o co nejmenší kružnici opsanou a vepsanou (získanou z mračna bodů) se stejným středem, jejich rozdíl poloměrů pak tvoří toleranci „kulovitost“. Tato metoda pracuje se 100% dat z mračna bodů, kdežto metoda podle Gaussian je založena na statistickém principu, kde určité procento anomálií je z výběru vyřazeno, to závisí na velikosti indexu σ .

Vedlejším experimentem bylo ověřeno, že parametr Range, který lze vygenerovat při analýze rozměrů při aplikaci Chebysheva je ekvivalentem „kulovitosti“. Test proběhl na kouli o \varnothing 20 mm, kde se vyhodnocoval parametr Range pomocí dvou metod (Gaussova metoda, Chebyshevova metoda). Jako první proběhl test při použití Gauss, kde byla získána hodnota Range 3σ a ALL σ . Další test analyzoval „kulovitost“ pomocí Chebysheva, kde hodnota Range vyšla 39,5 μm . Tento výsledek šel ověřit pomocí definice kruhovitosti, kde se změřila max. opsaná a max. vepsaná kružnice, z jejichž rozdílu poloměru vyšla totožná hodnota Range viz tabulka níže. Proto bylo v této práci upřednostněno metody podle Chebysheva před metodou Gaussian viz kapitola 4.3.1.

KOULE \varnothing 20 mm					
Kulovitost podle Gaussian best - fit			Kulovitost podle Chebyshev best - fit		
	\varnothing [mm]	Range [mm]		\varnothing [mm]	Range [mm]
3σ	20,0091	0,0267	middle	20,0131	0,0395
ALL σ	20,0091	0,0485	inside	19,9736	0,0395
			outside	20,0527	0,0395
			Range = (Outside - inside)/2		

Tabulka 3: Ekvivalent Range a „kulovitost“



Obrázek 25: Volba metody proložení geometrického útvaru GOM Inspect

7.5 Kalibr analýza v GOM Inspect

Opět jako v případě etalonu s koulemi byl vytvořen vzorový protokol, který měl za cíl každou analýzu vyhodnocovat ve stejném souřadnicovém systému, z důvodu rychlejší inspekce. U kalibru do díry byl postup zřetelně jednodušší, na vytvořený CAD model o nominálních hodnotách se ustaví naskenovaná data pomocí základní funkce Prealignment (předustavení), v níž ještě využijeme podfunkce volby jednoho pomocného bodu na objektu, tak aby skenovaná data měla správnou orientaci.

7.6 Postup měření na ATOS II 400

Zvolený postup byl vybrán tak, že každé měření bylo pro jistotu ještě jednou opakováno, aby se ověřila předchozí změřená hodnota. Nebylo zde uplatněno statistického vyhodnocování chyby měření s ohledem na to, že výsledky skenerů jsou při stálých podmínkách takřka neměnné.

Měřený díl se upevní nebo stabilně ustaví na měřicí podložku v lepším případě na automatický polohovací stůl a provede se určitý počet snímků z různých úhlů pohledu, tak abychom nasníмали celý objekt dokola. Samotný proces skenování probíhá tak, že projektor osvětluje povrch měřené součásti přes vestavěný rastr, který je umístěný před žárovkou projektoru. A ten vytváří proužky o konstantní velikosti na povrchu objektu, které jsou snímány dvěma CCD kamerami. Doba pořízení jednoho snímku činí méně než 1s, což opravdu dokazuje jednu z velkých výhod této technologie oproti ostatním variantám měření. Během jednoho snímku dostaneme 3D souřadnice mračna bodů a to díky optickým zobrazovacím rovnicím, které celý snímek vyhodnotí v daném softwaru stroje. Dále, když je zvolený počet snímků zaznamenám, tak vyhodnocovací SW GOM

Inspect proloží všechny snímky dohromady a tím vytvoří prostorový snímek, v našem případě jedno měření.

Jako ideální podmínky pro všechna měření v této diplomové práci byly zvoleny níže zmíněné parametry nastavení skeneru s ohledem na prováděný experiment, kde musel být změněn jeden konkrétní parametr.

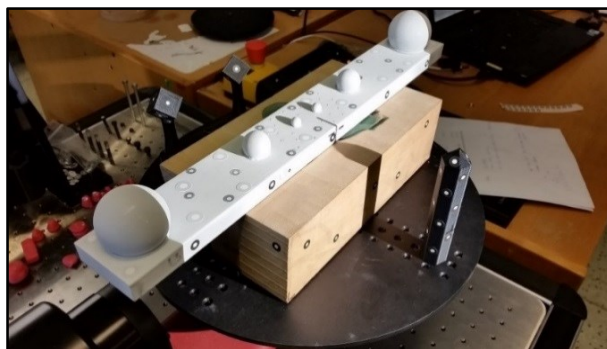
- Standardní počet snímků 10 ks
- Čas expozice 10-11 ms
- Kalibrace, správné nastavení clony a projektoru

7.7 Příprava předmětů k měření s aplikací titanového nástřiku

Na námi testované etalony byly nalepeny originální referenční značky o průměru 3mm, přesně tak, jak doporučuje výrobce pro danou velikost předmětu. Značky byly umístěny rovnoměrně po celém objemu tělesa na rovinných plochách, které zaručují kvalitní provedení měření (viz 5.4.2). U kalibru do díry byly referenční body aplikovány jak na samotný kalibr, tak i v jeho okolí. U etalonu s koulemi se referenční značky nalepily pouze na zkoumaný předmět.

Dále se na povrch obou předmětů nanese titanový nástřik, kde je důležité dbát na rovnoměrné nanešení v celém jeho objemu. V našem experimentu se zabýváme vlivem jednotlivých podmínek na měření, přičemž vrstva nástřiku pro všechna měření je stejná, a tak nástřik nebude mít žádný vliv na námi prováděný experiment.

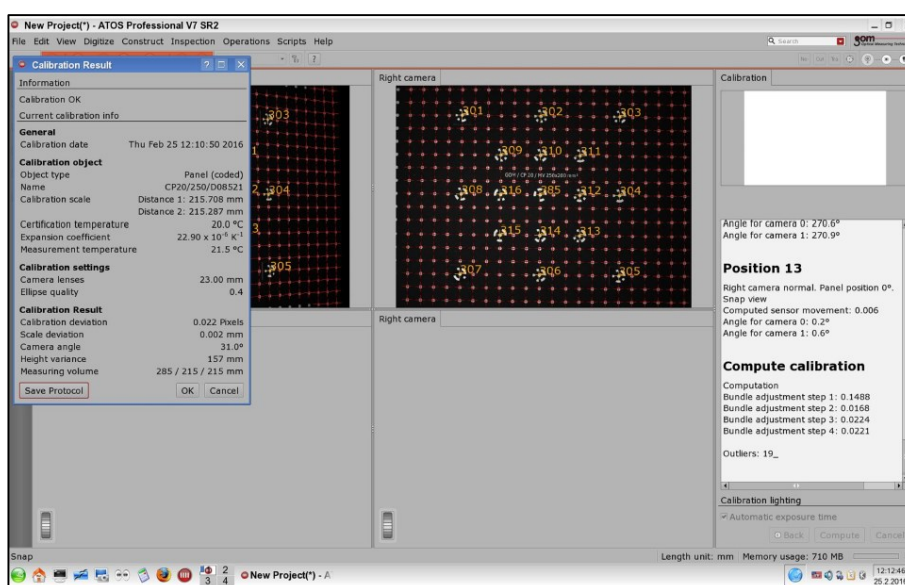
Referenční značky překryté titanovým práškem, jsme šetrně očistili pomocí vatových tyčinek, tak aby bylo zřetelně rozpoznatelné rozhraní mezi černou a bílou barvou. Následně na to mohlo nastat samotné měření. Na obrázku 26 je vidět námi měřený etalon s koulemi, na kterém je aplikovaný matný titanový nástřik, který zamezuje odlesku a zároveň zvyšuje kontrast součásti vůči okolí.



Obrázek 26: Testovaný etalon s titanovým nástřikem a ref. body

7.8 Kalibrace skeneru ATOS II 400

Kalibrace skeneru probíhá podle instrukcí, které v sobě má zabudovaný průvodce kalibrací, v programu GOM Inspect. Podle velikosti měřeného objektu je nutné zvolit správný měřicí objem a teprve podle toho zvolit správný kalibrační objekt (kalibrační deska nebo kalibrační kříž). V našem případě byla zvolena kalibrační deska. Nesmíme zapomenout i na správnou vzdálenost projektoru pro zvolený měřicí objem, která je v našem případě nastavena na 730 mm, dále je potřeba seřadit úhel kamer, seřízení 2 laserových ukazovátek, seřízení zaostření projektoru a zaostření snímacích kamer. Jako poslední krok následuje kalibrační postup, který se skládá z 13 pozic, kde každá z nich představuje různé kombinace natočení a úhlů sklonu skeneru vůči kalibračnímu předmětu.



Obrázek 27: Prostředí GOM Inspect – Kalibrace

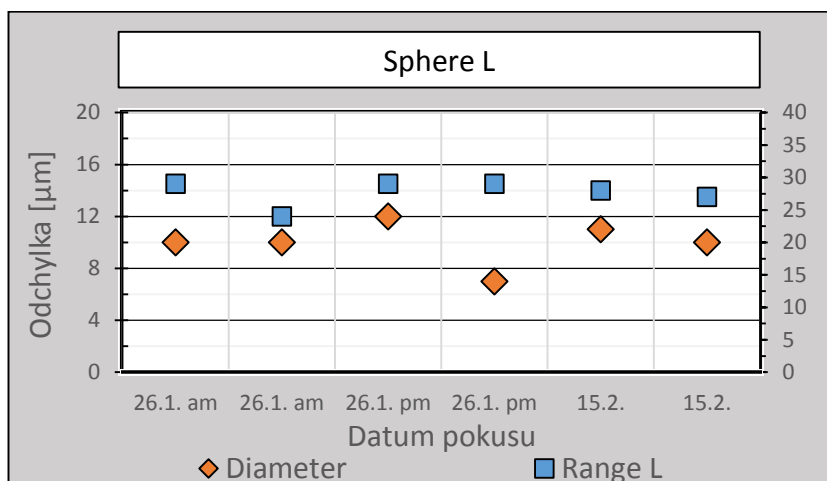
7.9 Vyhodnocení referenční hodnoty

Toto měření mělo za cíl analyzovat námi měřené etalony za provozních podmínek, které doporučuje výrobce. To znamená, že skener musí být zkalibrován a musí být zahřátý na provozní teplotu cca 20 minut od spuštění. Dále, toto měření bude vstupní referenční hodnotou do dalších experimentů této práce, kde bude tento vzorek označen v grafech jako „Ref. vz.“. Bude tak možné ihned z grafu zjistit dopad jednotlivých vlivů při měření, aniž by se muselo odkazovat na tuto kapitolu.

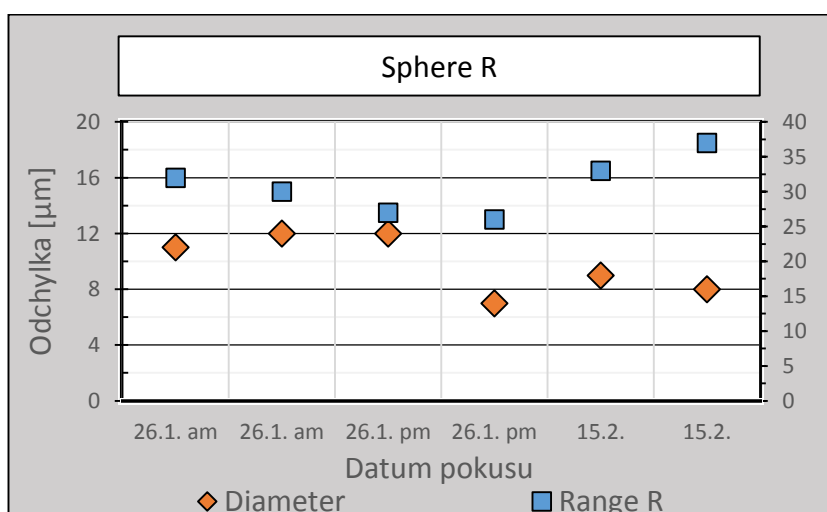
Časový interval (Tabulka 4) této analýzy pokrývá 20 dní, to znamená, že první uživatelská kalibrace pomocí kalibrační desky proběhla ráno 26. 1. a na ní po několika následných experimentálních měření následovala celková kalibrace, která zahrnovala seřízení clony a zaostření kamery, to bylo 26. 1. odpoledne. Další kalibrace tentokrát opět uživatelská proběhla 15. 2., kdy v laboratoři byli prováděny další měření. Měření probíhalo za stálých laboratorních podmínek. Každé měření bylo provedeno 2x, především z důvodu ověření si výsledků prvního měření.

Legenda	
26. 1. am	Základní kalibrace skeneru, pomocí kalibrační desky dne 26. 1. ráno
26. 1. pm	Celková kalibrace skeneru, zahrnující seřízení clony a zaostření kamery
15.2.	Základní kalibrace skeneru, pomocí kalibrační desky dne 15. 2. (úprava nástřiku pravá koule)

Tabulka 4: Legenda – Referenční měření

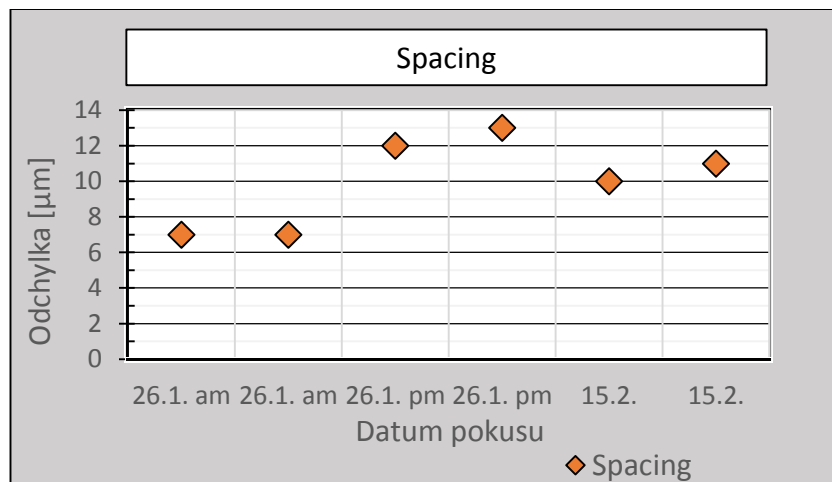


Graf 1: Kalibrace – Levá koule



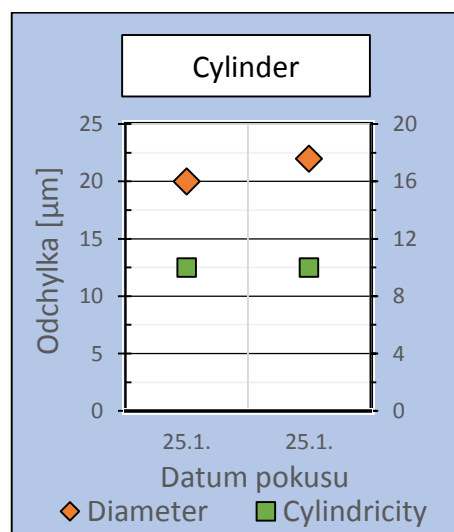
Graf 2: Kalibrace – Pravá koule

Z obou grafů (Graf 1, Graf 2) je vidět, jak se průměry obou koulí chovají velmi podobně, dá se říct bez žádných velkých odchylek. U „kulovitosti“ je už změna, levá koule vykazuje menší rozsah 24 - 29 μm všech hodnot, než pravá 26 - 37 μm . Chyba se projevila hlavně u pravé koule u vzorku (15.2.). Na to mohla mít vliv tloušťka matricího nástřiku, která byla dodatečně aplikována na pravou kouli z důvodu, že koule po cca 20 dnech, kdy byla uschována, vykazovala mírné narušení nástřiku, pravděpodobně kvůli špatné manipulaci při uskladnění. Z výsledků levé koule v tentýž den lze usoudit, že tak opravdu bylo, protože tento vzorek nevykazuje žádné změny parametrů.



Graf 3: Kalibrace – Rozteč

Z grafu (Graf 3) lze vidět, že se rozteče kuliček podle data kalibrace mírně liší, jejich rozsah je 7 – 13 μm , což je velmi přesný výsledek v rozmezí 1 setiny milimetru. Ale je patrné, že se mírně vzdaluje od jmenovité hodnoty etalonu.



Graf 4: Kalibrace – Kalibr

Experiment (Graf 4) prezentuje naměřené hodnoty pro kalibr, kde cílem bylo zjistit průměr a toleranci tvaru. Z hodnot lze usoudit, že druhý náměr ověřil přesnost prvního měření.

Pro jednotlivé analýzy jako je například levá koule, byly získané hodnoty aritmeticky zprůměrovány a jejich hodnota byla dále prezentována pod názvem referenční vzorek. Tak, jak je zmíněno v prvním odstavci této kapitoly.

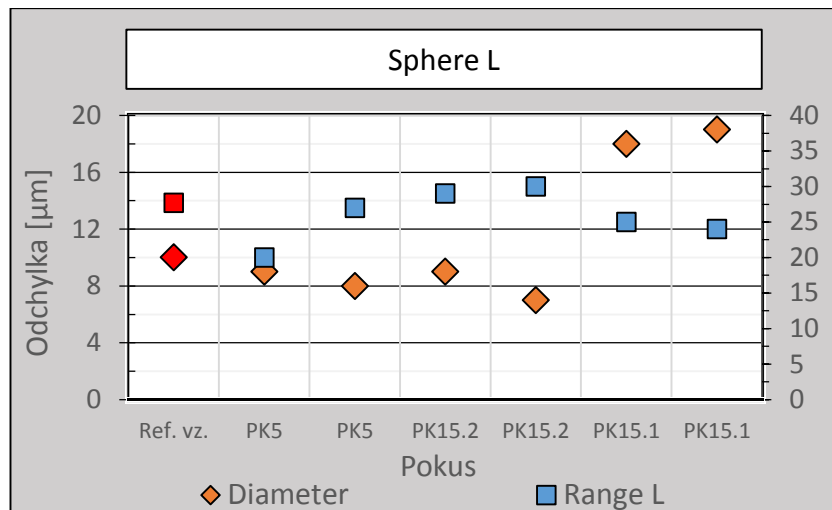
7.10 Analýza vlivu kalibrace

Cílem této analýzy bylo zjistit, jaký vliv na měření má časový interval od provedení kalibrace. Obecně je doporučováno provádět kalibraci zařízení (míněno uživatelskou kalibraci, pomocí kalibrační desky nebo kalibračního kříže) pravidelně v určitých časových intervalech, dále po každém transportu zařízení, výrazné změně teploty okolí či výměně optiky skeneru. Systém též na základě interní kontroly dokáže autonomně uživatele upozornit, že je skener rozkalibrován a je třeba provést novou kalibraci.

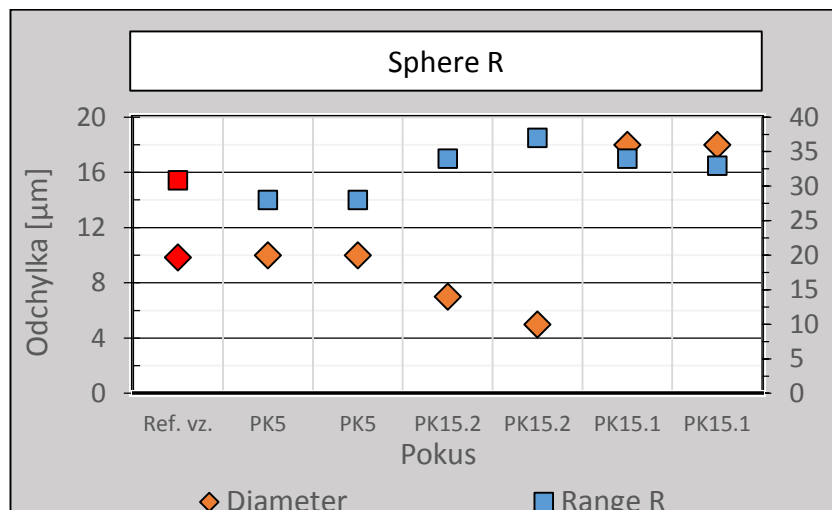
Při prvním měření jsme provedli dle dříve uvedených postupů digitalizaci etalonu s vyhodnocením parametrů jako je průměr kuliček a jejich rozteč. Měření korespondovalo s Acceptance testem. Digitalizace byla provedena nejprve na zařízení, u kterého již uběhla doba cca 15 dní od poslední kalibrace. Přístroj byl však celou tuto dobu ve stálých laboratorních podmínkách a občas na něm probíhalo měření. Měření bylo opakováno dvakrát. Následně byla provedena nová uživatelská kalibrace přístroje a proces digitalizace byl opět zopakován. Po naměření všech experimentů v diplomové práci a uplynutí 15 dní byla opět provedena uživatelská kalibrace a proces měření byl znovu zopakován. Pro průměry kuliček jsou výsledky uvedeny v grafu (Graf 5, Graf 6), roztečná vzdálenost je na grafu (Graf 7).

Legenda	
Ref. vz.	Referenční vzorek je hodnota za ideálních podmínek měření
PK 5	doba od poslední kalibrace, 5 dní
PK 15.1	PŘED (doba od poslední kalibrace, více jak 15 dní s vlivem několikanásobné rychlé kalibrace)
PK 15.2	PO (doba od poslední kalibrace, přesně 15 dní)

Tabulka 5: Legenda - Vliv kalibrace

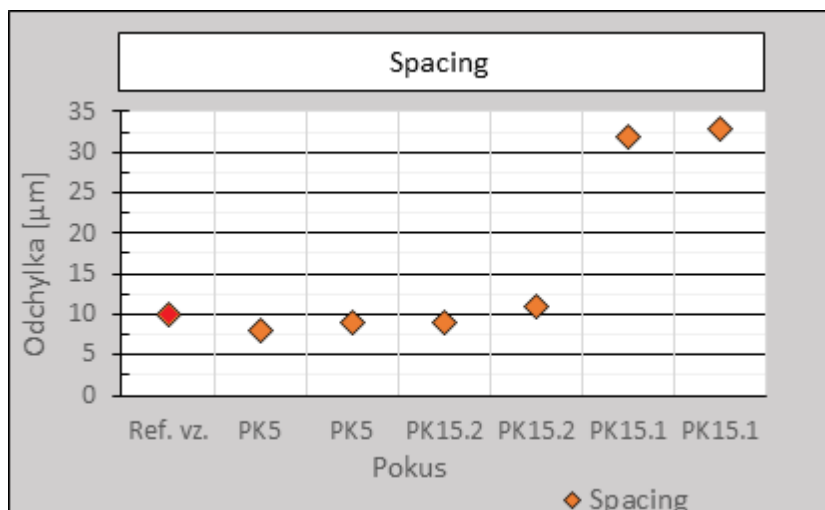


Graf 5: Vliv kalibrace – Levá koule



Graf 6: Vliv kalibrace - Pravá koule

Z výsledků pro průměr a tvar kuliček (Graf 5, Graf 6) je vidět velká podobnost. Tolerance tvaru se v průměru pohybuje na referenční hodnotě cca 27 – 30 μm . Průměr kuliček vykazuje větší změny oproti referenční hodnotě, je zde i patrné, že nepřesnost průměru s delší dobou od kalibrace roste, především u vzorku PK15.1, kde je zahrnutý i vliv vyššího počtu uživatelských kalibrací a kde hodnota tohoto vzorku dosahuje až 2x (9 μm) vyšší odchyly než referenční hodnota.

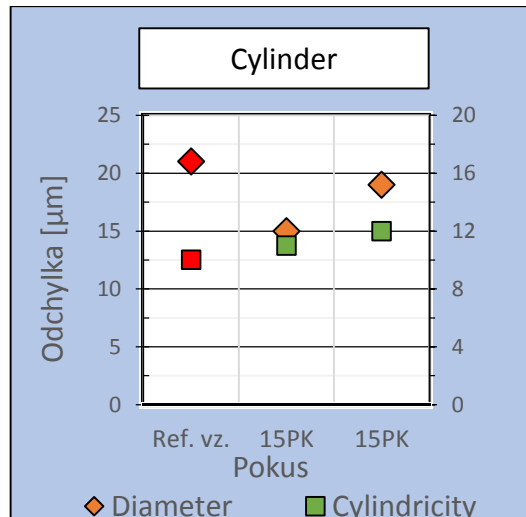


Graf 7: Vliv kalibrace – Rozteč

U rozteče kuliček (Graf 7) je vidět, že vzorky, které nebyly vystaveny velkému počtu uživatelských kalibrací, nevykazují změny hodnot vůči referenční hodnotě. Zatímco vzorek PK 15.1 je až 3x větší než ostatní měření.

Z celkového pohledu pro etalon s koulemi plyne, že vzorek PK15.1 vykazuje změny rozměrů, jak u průměrů, tak i roztečí. Příčinou je s velkou pravděpodobností vliv rychlých kalibrací, tyto kalibrace byli prováděny náhodně během časového intervalu delšího jak 15 dní. Rychlá kalibrace se zpravidla provádí před každým měřením, avšak z naměřených hodnot je vidět, že vyšší počet rychlých kalibrací má vliv na rozměrovou přesnost (průměr, rozteč). Z toho lze usoudit, že pravidelná celková kalibrace je schopna pozitivně ovlivnit přesnost skeneru.

U výsledků pro válcovou plochu kalibru (Graf 8, str. 44) jsme se dostali k hodnotám, které se pohybují v blízkosti referenčního rozměru, jak u průměru, tak i u válcovitosti. Zde nebylo měření vystaveno vlivům jako u vzorku 15.2 v experimentu pro etalon. A z analýzy jde vidět, že vliv více jak 15 dní s větším počtem rychlých kalibrací nemá, tak velký dopad na měření válcové plochy jako u etalonu s koulemi.

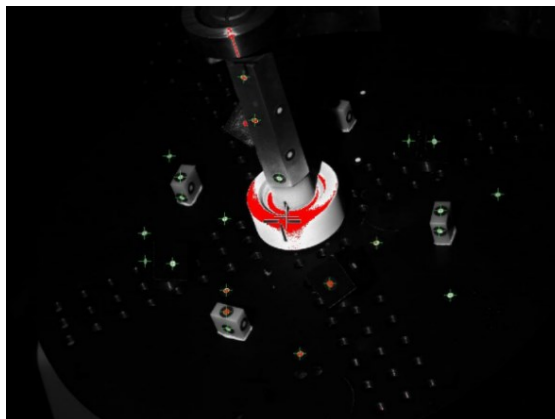


Graf 8: Vliv kalibrace - Kalibr

Z výsledků analýzy pro kalibr plyne, že výsledky jsou si velmi podobné, a že v tomto případě velký počet uživatelských kalibrací nemá tak velký vliv na přesnost měření. To, že výsledky jsou tak dobré, může být způsobeno tím, že skener zaznamenával jednodušší tvarovou plochu, a že objekt zabíral menší objem než etalon s koulemi.

7.11 Analýza měření při změně časové expozice

Toto měření bylo zaměřeno na problematiku časové expozice, kde jsme pomocí SW GOM Inspect volili časovou prodlevu v řádu milisekund [ms]. Pomocí časové expozice jsme schopni ovlivnit výsledek digitalizace, buď objekt přeexponujeme nebo podexponujeme a tím omezíme schopnost kamery zaznamenat výsledný obraz. Čas expozice se upravuje pomocí kolečka na myši a ihned se vizuálně promítá na obrazovku PC, kde podle červených map na objektu rozpoznáme přeexponovaná místa. A když je objekt zase tmavý, tak to znamená, že je objekt podexponovaný.

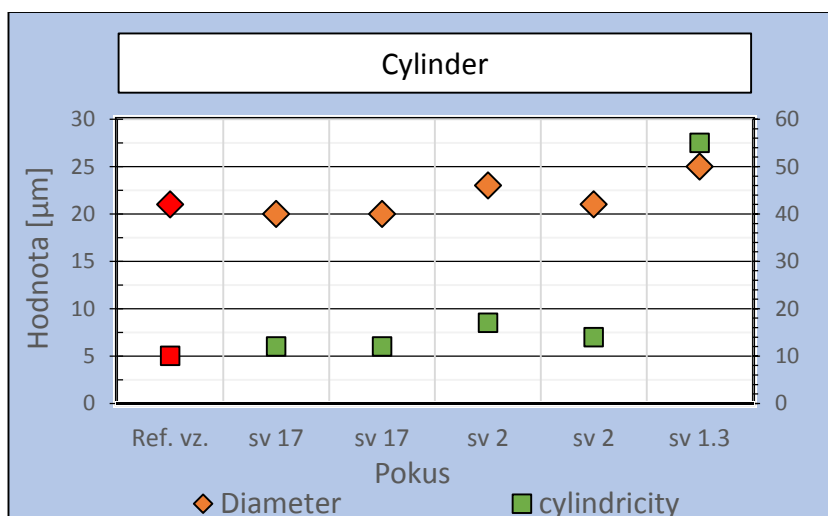


Obrázek 28: Přeexponovaný objekt – obraz PC

Experiment probíhal v laboratorních podmínkách, kde měření korespondovalo pravidlům Acceptance testu. Bylo provedeno pouze na kalibru do díry, protože bylo vzato v potaz, že tvarová náročnost nebude mít vliv na měření. Byly provedeny 3 varianty měření, kde první byla zaměřena na přeexponovaný objekt (17ms), druhá na podexponovaný objekt (2ms) a třetí ještě více podexponovaný (1,3ms), v tomto pořadí jak jsou vyjmenovány. Ke každému vzorku bylo provedeno měření 2x, z důvodu ověření si prvního měření. Až na experiment (sv 1.3), kde bylo provedeno pouze jedno měření, u této hodnoty času expozice se nastavený parametr už extrémně vymykal. Ideální časová expozice pro naše laboratorní podmínky činila hodnotu mezi 10 - 11 ms.

Legenda	
Ref. vz.	Referenční vzorek je hodnota za ideálních podmínek měření, čas expozice 11ms
sv 17	Světlo, čas expozice 17ms
sv 2	Světlo, čas expozice 2ms
sv 1.3	Světlo, čas expozice 1,3ms

Tabulka 6: Legenda – Čas expozice

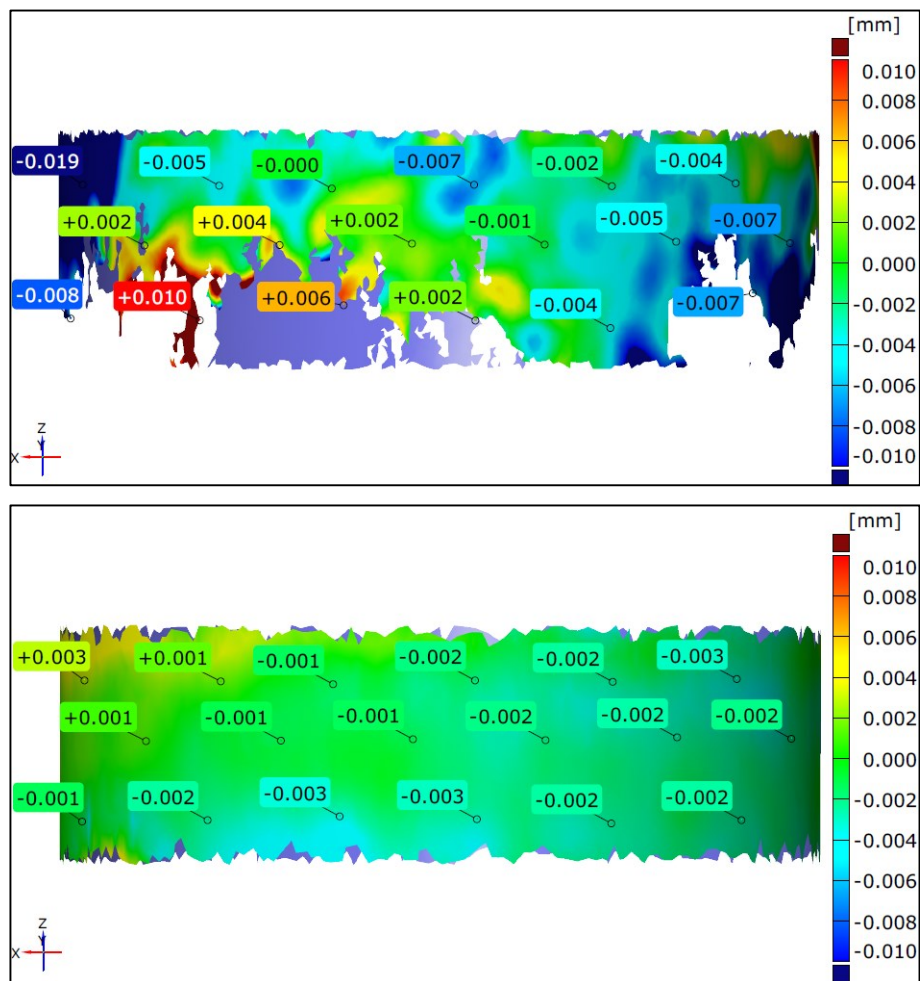


Graf 9: Časová expozice

Z výsledků kalibru (Graf 9) plyne, že varianty při přeexponovaném prostředí (sv 17) či podexponovaném prostředí (sv 2) jsou stále hodně přesné a pohybují se v blízkosti referenční hodnoty. Na průměr válce nemá změna expozice téměř žádný vliv. U vzorku (sv 1.3) je zřetelně vidět, jak se válcovitost extrémně zhoršila až 5,5x.

Hlavním aspektem, který ovlivňuje přesnost měření při změně expozice je neúplnost naskenovaných dat. To znamená, že kamera není schopna správně zaznamenat celý

povrch objektu a při neúplnosti dat nemusí být měření relevantní. Tento jev lze vidět na obrázku 29 nahoře.



Obrázek 29: Barevná mapa vyjadřující chybu válcovitosti (nahore - 1,3ms), kalibrace (dole - 11ms)

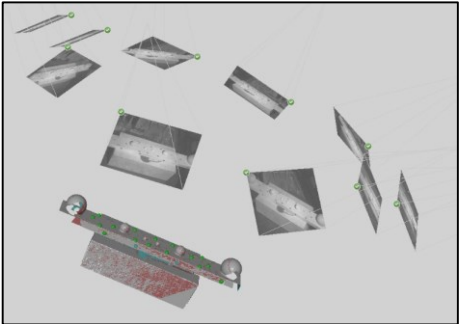
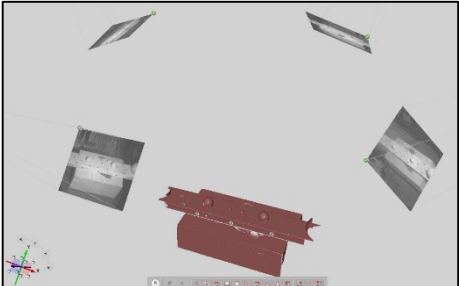
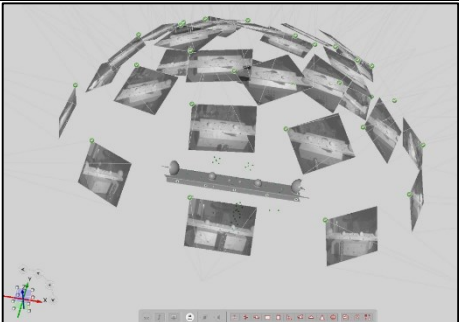
Na obrázku 29 znázorňujícím barevnou mapu odchylek válcovitosti pro čas expozice 1,3 ms a pro čas expozice 11 ms, představuje úplnost a neúplnost zaznamenaných dat. Je důležité zmínit, že hodnota expozice 1,3 ms je opravdu extrémní hodnota nastavení, kterému by se měla běžná obsluha skeneru určitě vyvarovat.

Tento experiment prokázal, že špatně zvolená expozice má velký vliv na celistvost naskenované plochy objektu, ale zároveň prokázal, že přesnost měření je velmi dobrá. To na tom nic nemění, že cílem je správně naskenovaná plocha, která nám zaručuje co možná nejpřesnější výsledky vzhledem k počtu získaných dat.

7.12 Analýza podle počtu snímků

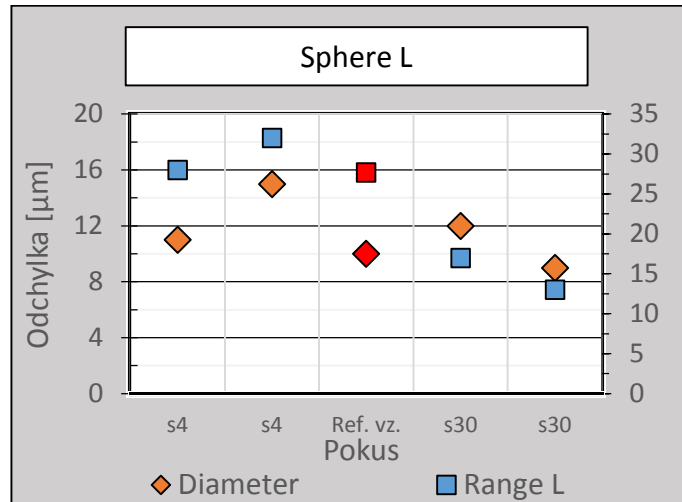
Cíl této analýzy byl zjistit vliv počtu snímků na celkový výsledek měření. Obecně je doporučeno volit počet snímků přiměřeně v závislosti na velikosti a tvarové složitosti objektu, zpravidla si je možno vystačit s 10 snímky pořízenými z vrchní části objektu. Tak, jak to je v našem případě.

Počet snímků, které byly zvoleny, je v prvním případě 4 snímky a v druhém případě 30 snímků. Každé měření proběhlo 2x, opět z důvodu ověření si předchozího výsledku, tak jak je tomu ve všech případech této práce. Tentokrát byl experiment proveden na obou dvou etalonech za stálých laboratorních podmínek a optimálního nastavení skeneru. U měření etalonu s koulemi s počtem snímků 30 byl průběžně po 10 snímcích nastaven i jiný úhel náklonu skeneru vůči objektu, tak aby došlo k zachycení povrchu objektu z co nejvíce míst pohledu (Tabulka 7, s30).

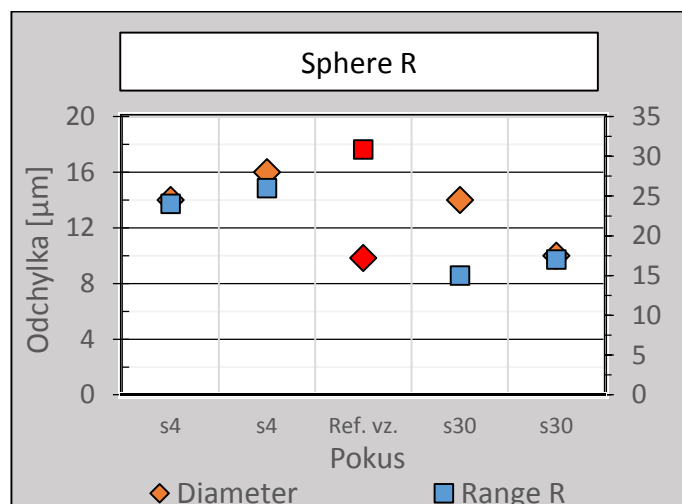
Legenda		
Ref. vz.	Referenční vzorek je hodnota za ideálních podmínek měření, 10 snímků, koresponduje s Acceptance testem	
s4	Počet snímků při měření, 4 snímky	
s30	Počet snímků při měření, 30 snímků	

Tabulka 7: Legenda- Počet snímků

U kalibru s počtem snímků 30 jsme si vystačili s jedním úhlem naklonění, kde snímky byly v jedné řadě dokola, viz příloha 3 a stejně tak tomu bylo i u varianty se 4 snímky u obou etalonů, kde nedošlo k měření z více úhlu naklonění (Tabulka 7, s4, str. 47).



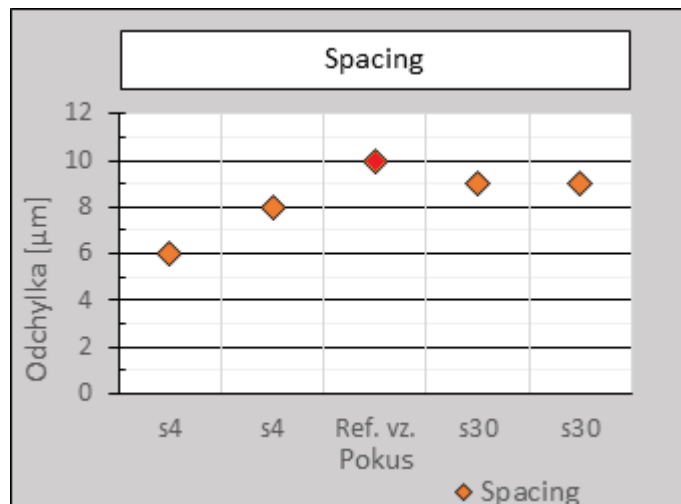
Graf 10: Počet snímků – Levá koule



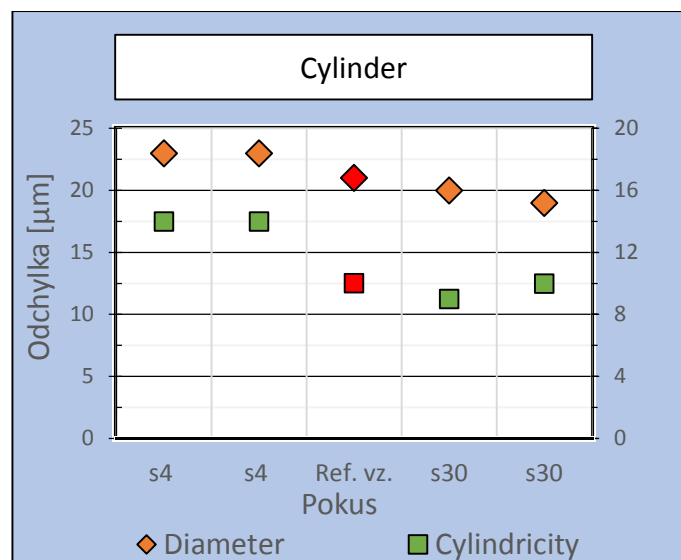
Graf 11: Počet snímků – Pravá koule

Z výsledků pro rozměry koulí (Graf 10, Graf 11) je možno zhodnotit, že změna počtu snímků nemá výrazný vliv na jejich průměr. U samotné „kulovitosti“ je patrné, že hodnoty vykazují větší odchylky měření než je tomu u průměrů koulí, jejich rozpětí je v rozmezí 15 μm. Výsledky „kulovitosti“ u počtu snímků 30 se nejvíce blíží nominální hodnotě ze všech provedených analýz v této práci.

U výsledku pro rozteč kuliček (Graf 12) je vidět, že počet snímků na měření nemá vůbec žádný vliv. Rozdíly mezi hodnotami se pohybují v řádech jednotek μm, což při přesnosti skeneru +/- 30 μm nemá vliv.



Graf 12: Počet snímků – Rozteč



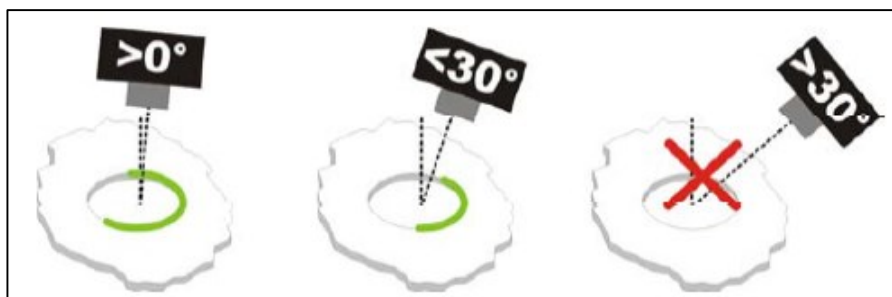
Graf 13: Počet snímků – Kalibr

U kalibru do díry (Graf 13) je vidět u obou dvou parametrů (průměr, válcovitost) mírně se zlepšující přesnost měření. Tyto rozdíly jsou však tak malé, že počet snímků na celkový výsledek nemá téměř žádný vliv.

Tento experiment prokázal, že změna počtu snímků nemá velký vliv na přesnost měření. Jediný poznatek, který se dá zmínit je, že počet snímků měl patrnější vliv na geometrickou toleranci kuliček, která i tak vykazovala malé změny.

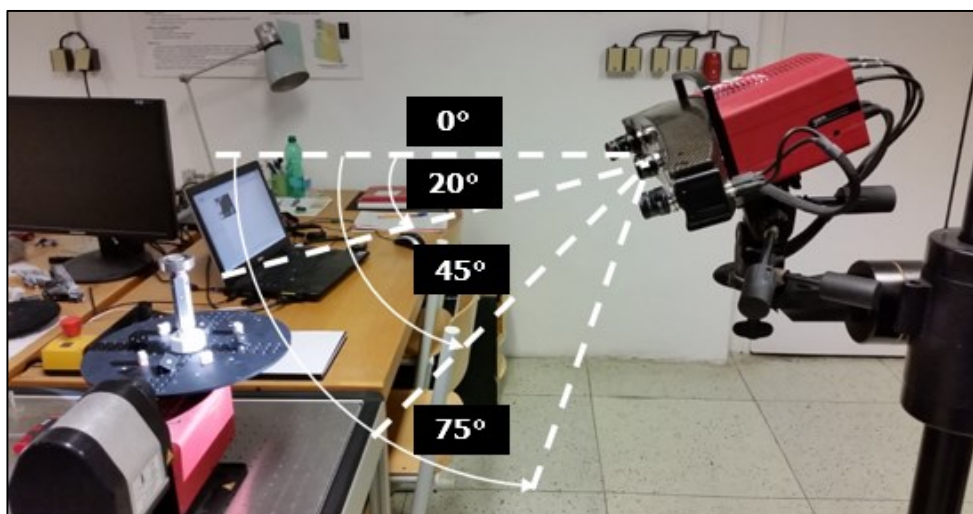
7.13 Analýza měření podle úhlu skenování

Toto měření bylo zaměřeno na problematiku úhlu natočení skeneru, kde výrobcem je doporučený rozsah v rozmezí 0° až 60° a námi zvolený rozsah byl 0° až 75° . V této analýze byla použita i funkce kvality bodů v případech úhlu natočení 70° a 75° . Funkce nastavení kvality bodů se zpravidla používá při velmi členitých tvarech či skenerem špatně přístupných míst, což mohou být opravdu velmi malé a členité objekty či hluboké a úzké díry, kam paprsek projektoru nemá šanci zacílit (slepá místa). Aktivací této funkce je možno zaznamenat i méně kvalitní body (méně osvětlená místa), které za optimálních podmínek skener nevyhodnocuje, takto jsme schopni zaznamenat větší objem dat, ale za podmínky, že rozměrová přesnost může být horší než za běžného měření.

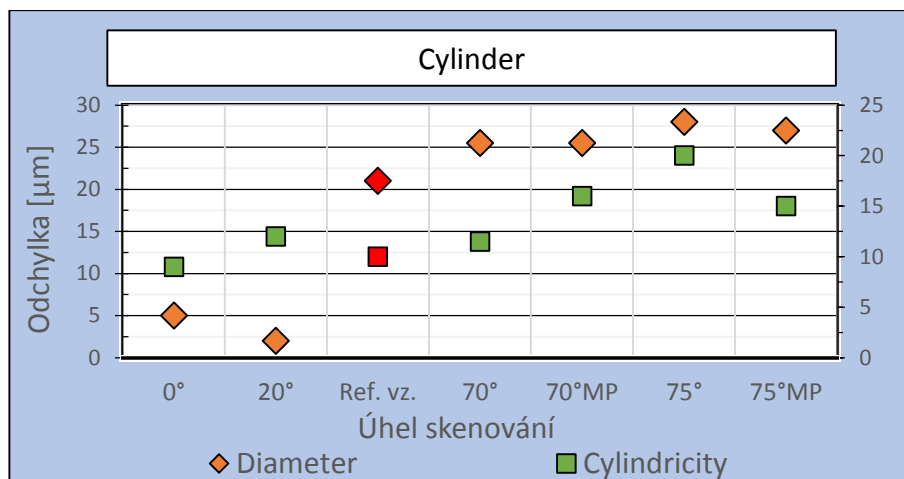


Obrázek 30: Doporučený úhel pro skenování kruhových i tvarových děr a výstřihků [12]

Pro vyhodnocení této úlohy byl zvolen kalibr do díry, kde jsme spoléhali, že tvarová plocha válce po celé délce skenované plochy zaručí i důvěryhodné porovnání s ostatními měřeními pod různými úhly znázorněnými na obrázku 31.



Obrázek 31: Úhel naklopení skeneru



Graf 14: Úhel skenování - Kalibr

Z výsledků pro průměr a válcovitost kalibru lze odvodit, že se odchylky s rostoucím nakloněním skeneru zvětšují. Odchylky v rozmezí 0° - 20° vykazují, že toto pásmo nemá žádný vliv na válcovitost, ale je zde problém s průměrem kalibru, kde odchylky vykazují až 19 µm rozdíl od referenční hodnoty. Odchylky válcovitosti v rozmezí 70° - 75° taktéž nemají velký vliv na přesnost oproti referenčnímu vzorku, kde je největší rozdíl 10 µm. A průměr válce je větší než referenční hodnota, ale pouze v řádech jednotek µm. Nastavení kvality bodů (zkratka MP v Graf 14) prokázalo, že výsledky v rozmezí 70° - 75° nevykazují velký vliv na přesnost průměru a válcovitosti kalibru oproti základnímu nastavení bez MP.

Celkové shrnutí experimentu se dá hodnotit tak, že se válcovitost za všech podmínek naklonění skeneru pohybuje kolem hodnoty referenčního vzorku, a že na ní tento aspekt nemá velký vliv. Odchylky průměru vykazují větší rozdíl, ten činí 24 µm, z těchto výsledků se dá odvodit, že správné měření se pohybuje, někde mezi testovanými úhly náklonu, v místě referenční hodnoty. Experiment ověřil, že náklon skeneru má vliv na přesnost měření, především v oblasti průměru válce. Kde odchylky vykazovaly rozdíl 19 µm. Optimální náklon dle výsledků měření by měl být 45°, tak jak doporučuje výrobce.

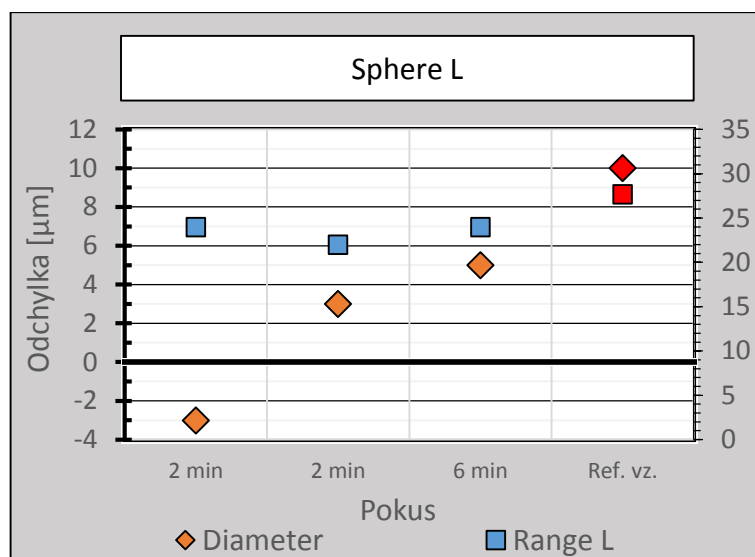
7.14 Analýza měření za studena

Tento experiment má za cíl zhodnotit dopad na přesnost skeneru při měření za studena, v terminologii pro skener ATOS to znamená, že zařízení není zahřáto na provozní teplotu. Kde výrobcem doporučený čas zahřátí se pohybuje kolem 20 minut od spuštění, kdy skener upozorní uživatele, že lze začít měřit.

Měření probíhalo standardně při laboratorních podmínkách za stálé teploty v místnosti. Postup opět korespondoval s Acceptance testem, kde měření obsahovalo 10 snímků při úhlu naklonění 45°. První měření proběhlo 2 minuty po spuštění skeneru, provedla se digitalizace objektu, poté byla provedena další digitalizace s časovým odstupem 6 minut od spuštění. Další vzorek 2 minuty po startu byl pořízen jiný den, kdy byl skener opět spuštěn před zahájením měření.

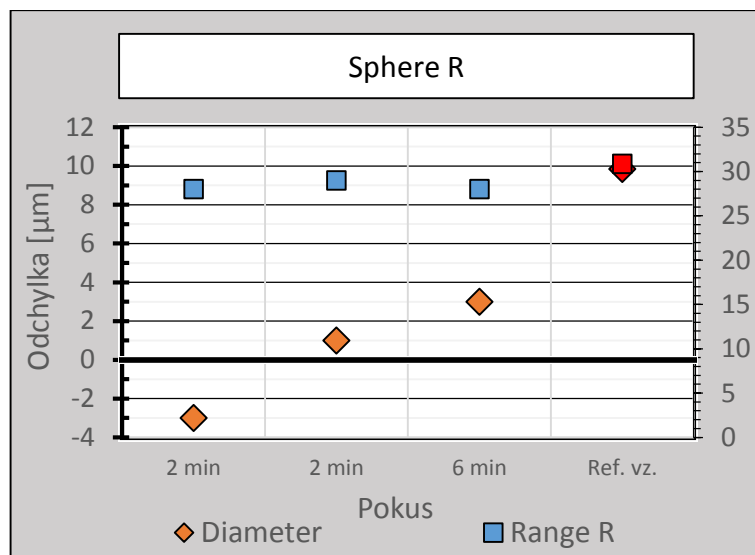
Legenda	
Ref. vz.	Referenční vzorek je hodnota za ideálních podmínek měření, 25 minut po zapnutí skeneru
2 min.	Doba od zapnutí skeneru, 2 minuty
6 min.	Doba od zapnutí skeneru, 6 minut

Tabulka 8: Legenda – Za studena



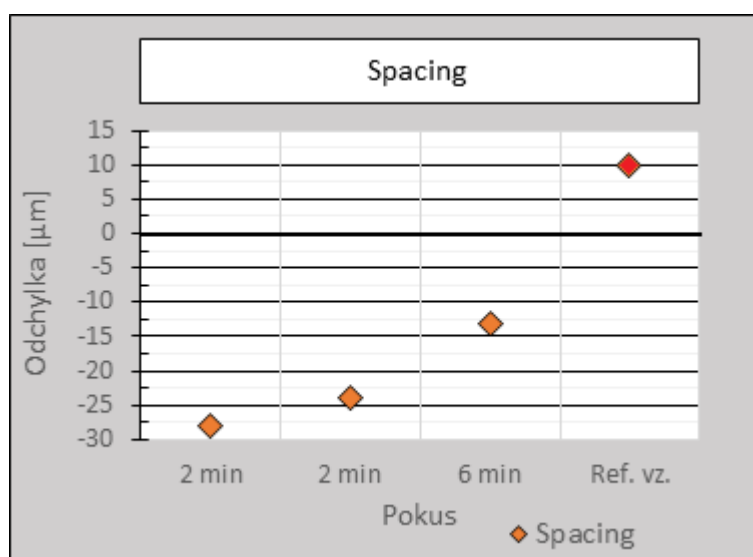
Graf 15: Měření za studena – Levá koule

Z grafů pro levou i pravou kouli (Graf 15,16) můžeme vyčíst, že jsou téměř podobné. Rozměrové odchylky s delší dobou zahřátí jsou přesnější a blíží se k referenční hodnotě. V případě průměru kuliček při době zahřátí 2 minuty se odchylky nacházejí i v záporných hodnotách. U „kulovitosti“ je rozdíl mezi referenční odchylkou a naměřenou odchylkou všech hodnot téměř žádný, jsou to jednotky μm.



Graf 16: Měření za studena – Pravá koule

U parametru rozteč (Graf 17) je ještě více zřetelné, jak hodnoty skoro exponenciálně rostou v závislosti na době zahřátí skeneru. Zpočátku se dostáváme až na spodní hranu přesnosti skeneru, což je $-30 \mu\text{m}$ a blížíme se postupně k referenční hodnotě.



Graf 17: Měření za studena - Rozteč

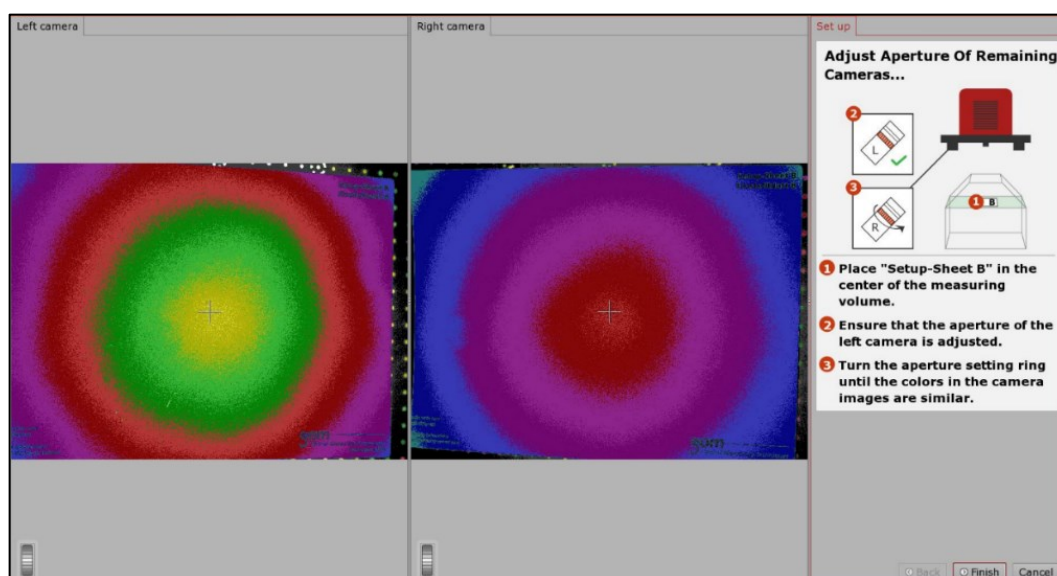
Z celkového shrnutí tohoto experimentu je už na první pohled patrné, že měření za studena zdaleka nedosahuje referenční hodnoty u průměru kuliček. Z grafů je velmi dobře vidět, jak se hodnoty s delší dobou zahřátí skeneru blíží k referenční hodnotě. U geometrické tolerance tvaru je zase vliv zahřátí skeneru nepatrný. Tento pokus ověřil výrobcem doporučené zásady pro správné měření.

7.15 Analýza s vlivem změny clony kamery

Tento experiment je zaměřený na změnu clony snímací CCD kamery. Seřízení clony je jedna z úloh celkové kalibrace skeneru a tímto jsme chtěli ukázat vliv špatně seřízené clony skeneru na přesnost měření.

V daném případě jsme změnili hodnotu clony na pravé kameře o jednu expoziční hodnotu (EV) do plusu z 8 EV na 11 EV, což se provádí pomocí šroubovacího objektivu na kameře, který na sobě má číselnou stupnici, viz příloha č. 4. Z obrázku 32 níže je jistě patrné, jak se barevná mapa levé kamery liší od pravé. Ve správném případě by se měla barevná mapa pravé kamery blížit té levé.

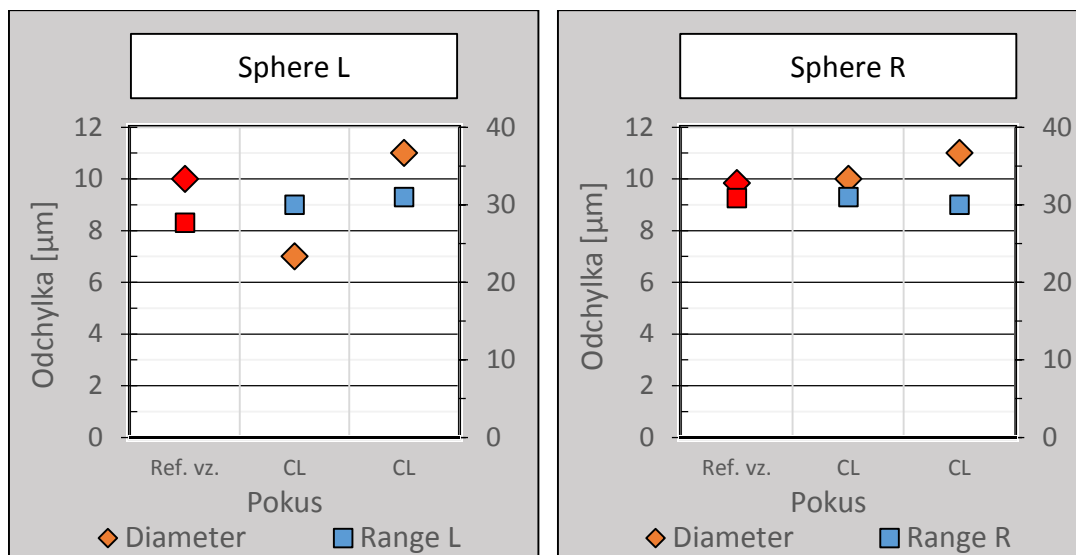
Samotné měření probíhalo na námi testovaném etalonu za běžných podmínek, pouze za vlivu změny clony kamery. Byla zrealizována dvě měření se standardním počtem 10 snímků. Kde tato metoda byla brána jako zajímavost, která taktéž stojí za připomenutí při vypracování této diplomové práce.



Obrázek 32: Změna clony – Vizuální znázornění v Gom Inspect + 1 EV

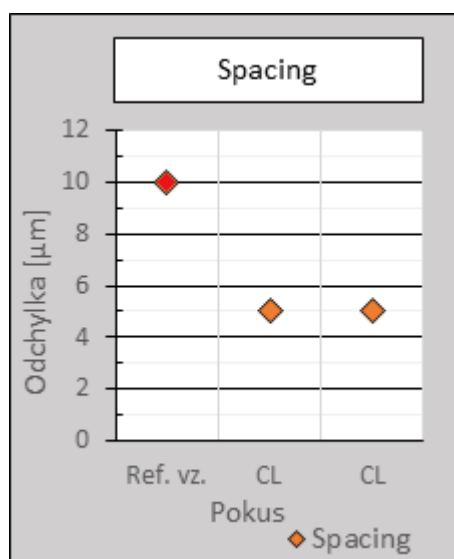
Legenda	
Ref. vz.	Referenční vzorek je hodnota za ideálních podmínek měření, při správně nastavené cloně
CL	Nastavení clony kamery – z 8 EV na 11 EV

Tabulka 9: Legenda – Změna expoziční hodnoty



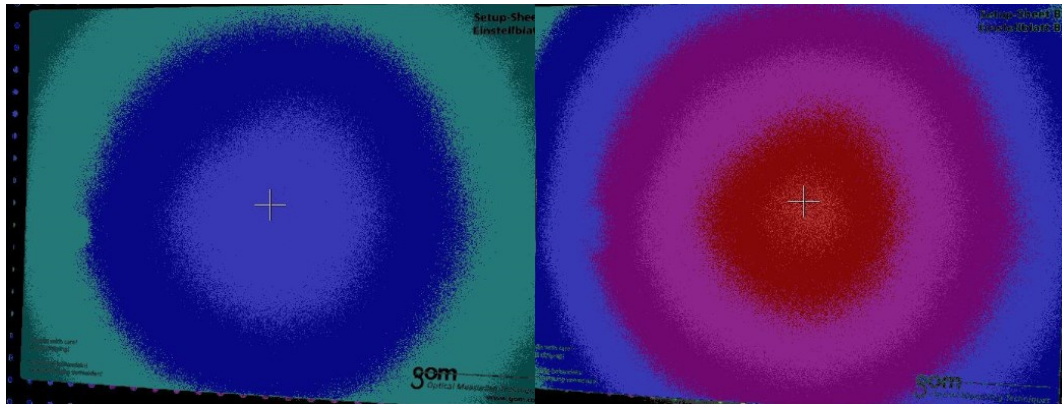
Graf 18: Změna clony kamery – Levá i Pravá koule

Výsledky měření u obou dvou parametrů jako jsou průměr a „kulovitost“ vykazují, že seřízení clony o jednu hodnotu (EV) nemá na měření téměř žádný dopad. To, že měření vyšlo celkem dobře, je způsobeno ostatními parametry skeneru, kdy čas expozice byl optimální 10 - 11 ms a kontrast objektu byl taktéž optimálně zvolený (matnicí nástřík).



Graf 19: Změna clony kamery – Rozteč

Z grafu rozteče (Graf 19) je vidět, že obě hodnoty mají velikost 5 μm a jsou přesně mezi referenční hodnotou a jmenovitou hodnotou objektu.



Obrázek 33: Změna clony – Vlevo EV 11+, vpravo EV 11

Toto měření prokázalo, že změna clony o jednu expoziční hodnotu do plusu nemá velký vliv na přesnost měření, v průběhu tohoto experimentu bylo provedeno ještě jedno měření, kde se clona zvětšila ještě o vyšší expoziční hodnotu (přes 11 EV) a výsledkem bylo, že skener nebyl schopný vytvořit obraz naskenovaného objektu, tudíž měření nemohlo být vyhodnoceno. Z obrázku 33 je vidět rozdíl mezi 11 EV a 11+ EV. Kde z průběhu experimentu zelené pole znázorňuje velmi špatně nastavenou clonu.



Obrázek 34: Změna clony – EV 8 (vpravo) EV 11+ (vlevo)

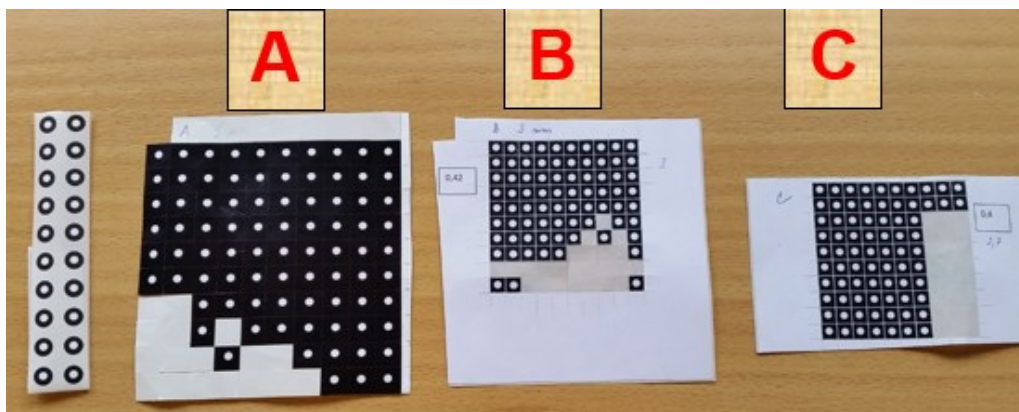
Tento experiment zjistil jaký vliv má nesprávné seřízení clony o jednu expoziční hodnotu a o dvě expoziční hodnoty na stupnici clony kamery. Měření prokázalo, že menší seřízení nemá na přesnost žádný vliv, ale výraznější seřízení clony, už může výsledky úplně znehodnotit a to až v řádu desítek μm .

7.16 Analýza referenčních bodů


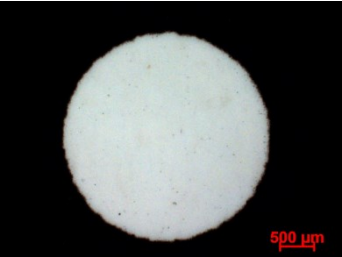




Myšlenka tohoto experimentu vzešla ze vzájemných konzultací osob, které se o 3D optické skenování zajímají a pracují s ním. Zajímalo nás, jaký vliv na přesnost bude mít to, že si zhotovíme vlastní referenční značky na běžné tiskárně. Je známo, že výrobce doporučuje pouze jeho vlastní referenční značky, které splňují tvarovou a rozměrovou přesnost. V případě referenčních značek se jedná o kontrast mezi černou a bílou barvou a o správný kruhový tvar, na který se následně jednotlivé snímky prokládají, tak aby jejich odchylka byla co nejpřesnější, vše je vyhodnoceno softwarem GOM Inspect.

Naše referenční body označeny písmeny **B** až **E** jsme vytiskli ve více variantách (rozměrech) na domácí laserové tiskárně značky HP LaserJet Pro MFP M 125nw na samolepící papír od firmy Océ (dnes CANON). Referenční bod s označením **A** byl vytištěn na velmi odolný papír od firmy Avery Zweckwork, který se vyznačuje odolností vůči vodě, mastnotě a teplotě od -20°C až $+80^{\circ}\text{C}$, na tiskárně Konica Minolta Bizhub C35. Následně byly vzorky přemístěny do laboratoře, kde byly podrobeny zkoušce pod mikroskopem, abychom si ověřili jejich velikost a tvar (Tabulka 10, str. 58).

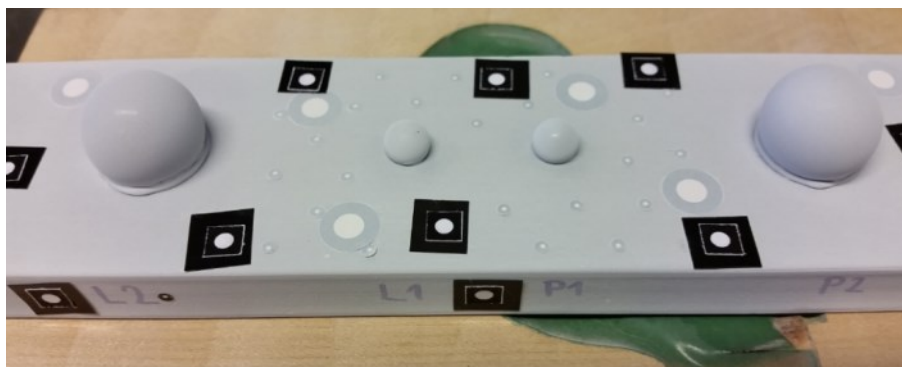
Z detailů jednotlivých obrázků (Tabulka 9, str. 58) je patrné, jak se mění tvarová a rozměrová velikost referenčních bodů, zejména podle druhu papíru, který byl použit. V tabulce na obrázku (označení **C**) je nejvíce patrné, jak rozhraní mezi černou a bílou barvou není zcela spojité, jak má být a i na bílém pozadí jde vidět, že hustota papíru není taková, jako u zbylých vzorků označených **A** a **B**.



Obrázek 35: Originální ref. body a vytištěné ref. body

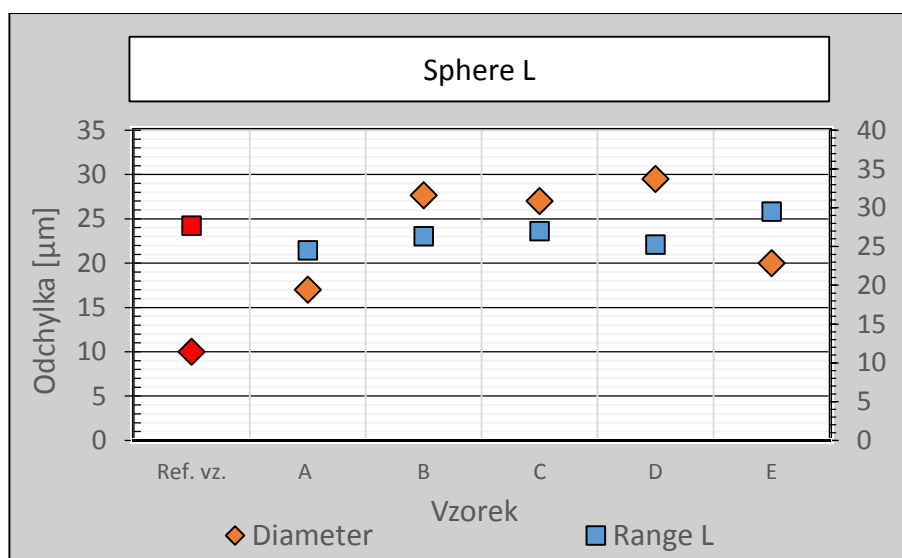
Označení	Počet měření	Popis	
Ref. vz.	6	Referenční vzorek je hodnota za ideálních podmínek měření s originálním bodem s úhlem skenování 45°	
A	2	Neoriginální vytištěný referenční bod na kvalitnější papír o Ø3mm	
B	3	Neoriginální vytištěný referenční bod na méně kvalitní papír o Ø3mm	
C	2	Neoriginální vytištěný referenční bod na méně kvalitní papír o Ø2,7mm	
D	4	Neoriginální vytištěný referenční bod na méně kvalitní papír o Ø3,1mm	
E	2	Neoriginální vytištěný referenční bod na méně kvalitní papír o Ø3mm, stejný vzorek jako B , naměřený o 15 dní později s rozdílem, že černé okolí tentokrát zabíralo větší plochu kolem bodu.	

Tabulka 10: Legenda – Referenční body

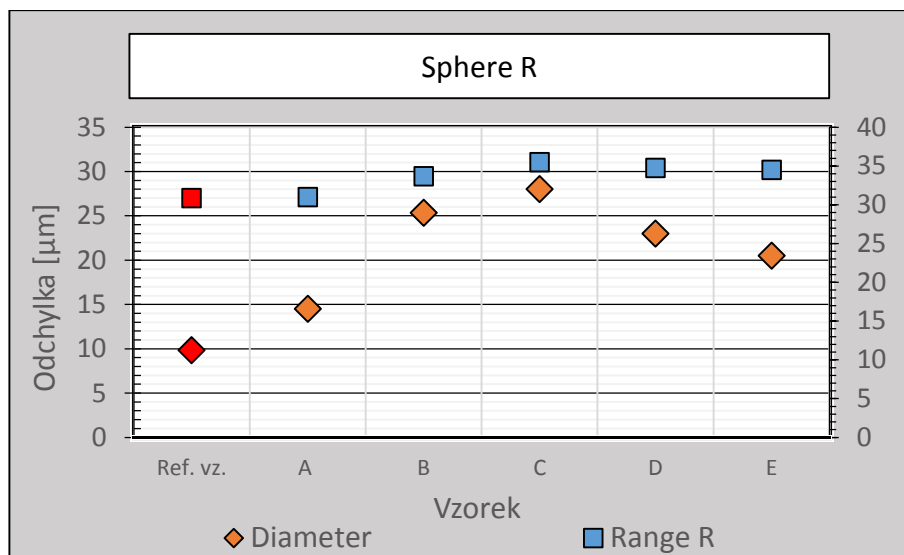


Obrázek 36: Aplikace neoriginálních bodů (Typ B) na objektu ETALON

Měřilo se v prostorách laboratoří KSA, na etalonu s koulemi (Obrázek 36), za stálých teplotních podmínek, při standardním počtu snímků 10 ks a časové prodlevě 10 - 11 ms. Už v průběhu prvních měření bylo z výsledků patrné, jak se hodnoty průměru koulí zvětšují, a tak u vzorku **D** byla zpětně provedena rychlá uživatelská kalibrace, která mírně zlepšila výsledky a zároveň potvrdila, že referenční značky mají vliv na měření. Podezření padlo na to, že naše referenční značky nemají dostatečně velké černé okolí kolem bílé značky nebo na kvalitu papíru (průsvitnost), a tak po 2 týdnech bylo provedeno nové měření referenčních bodů s označením **E**, které byly svým průměrem totožné se vzorkem **B**, lišily se pouze velikostí černého pozadí.

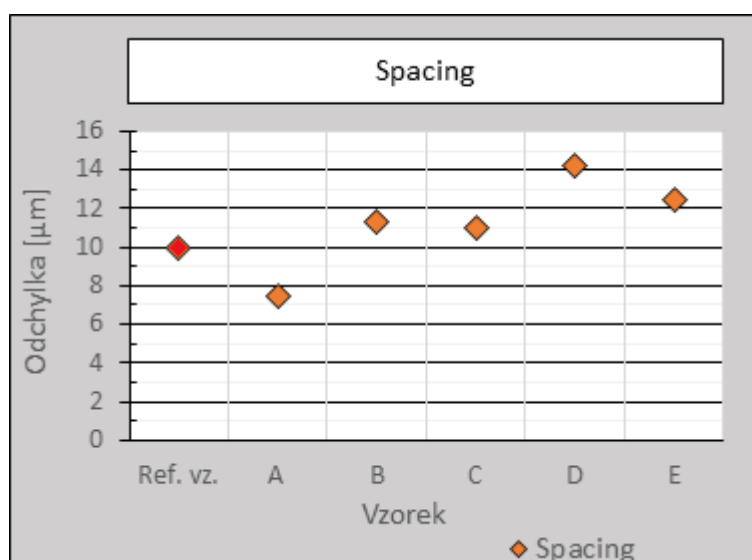


Graf 20: Referenční body – Levá koule



Graf 21: Referenční body – Pravá koule

Z grafů (Graf 20,21) je možné vyčíst, že vliv referenčních značek ovlivnil především hodnotu průměru koulí a to zásadně. Největší odchylka rozměru na levé kouli činí 19,5 μm a vykazuje ji vzorek **D**, ale ostatní vzorky vykazují taktéž změny v desítkách μm . U pravé koule je největší odchylka u vzorku **C** a blíží se hodnotě 18 μm . Z porovnání obou grafů je u vzorku **D** mírný rozdíl, kde u levé koule vykazuje největší odchylku a u pravé až třetí nejvyšší odchylku v rozsahu 6,5 μm . U „kulovitosti“ jsou hodnoty všech vzorků v blízkosti referenční hodnoty, takže zde vliv referenčních značek nehraje tak výraznou roli, jako u průměru koulí, pohybujeme se v rozsahu 5 μm .



Graf 22: Referenční body - Rozteč

Z grafu pro rozteč (Graf 22) lze ihned vidět, že zde není tak markantní rozdíl, jako u rozměru koulí. Největší odchylku vykazuje opět vzorek **D**, který má hodnotu 4,24 μm od referenční hodnoty.

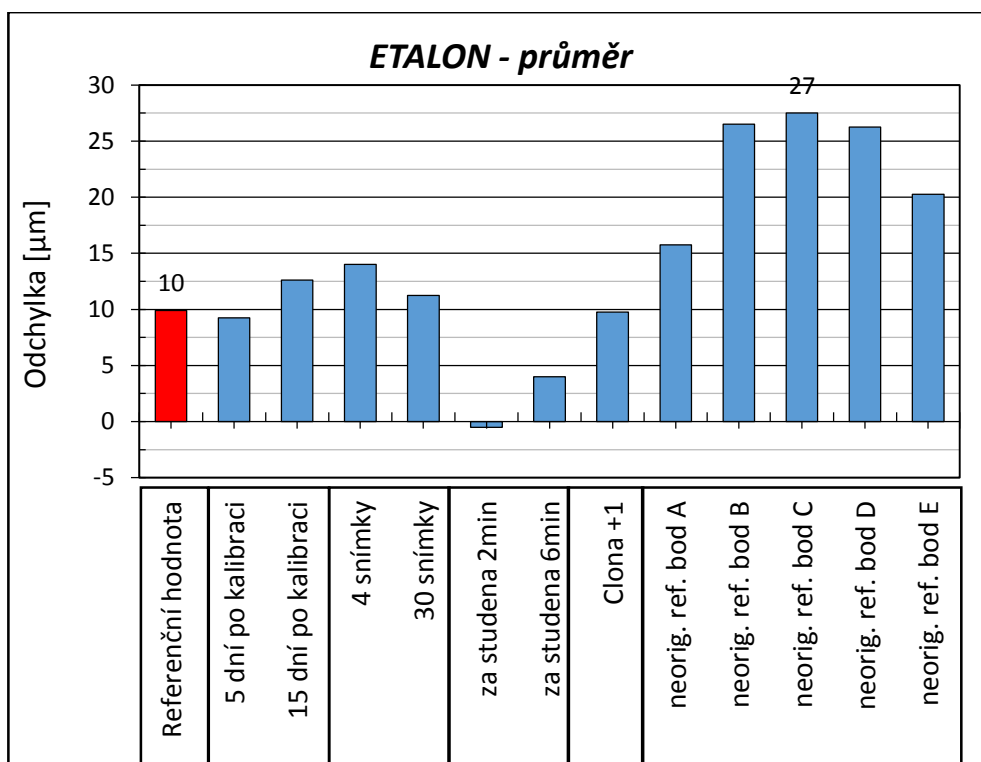
Z testu s neoriginálními značkami vyplynulo, že na přesnost měření nemá vliv průměru referenčního bodu, ale spíše kvalita papíru a kvalita tisku, viz vzorek **B**, **C** a **D** stejné výsledky. Vzorek **D** vykazuje největší chyby měření a vzorek **A**, který je z kvalitnějšího papíru vykazuje oproti ostatním vzorkům přesvědčivější výsledky. Tento pokus zároveň objasnil, že neoriginální referenční značky značně ovlivní přesnost měření, hlavně u rozměru průměru koulí.

8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tato kapitola má za cíl porovnat všechny experimenty, které byly provedeny. Znamená to, že vznikly dvě kategorie Etalon a Kalibr. Každý objekt zahrnuje analýzy, které na něm byly prováděny. Výsledky jednotlivých dílčích měření při konkrétní analýze byly aritmeticky zprůměrovány a vyneseny do grafu, kde byly porovnány s referenční hodnotou.

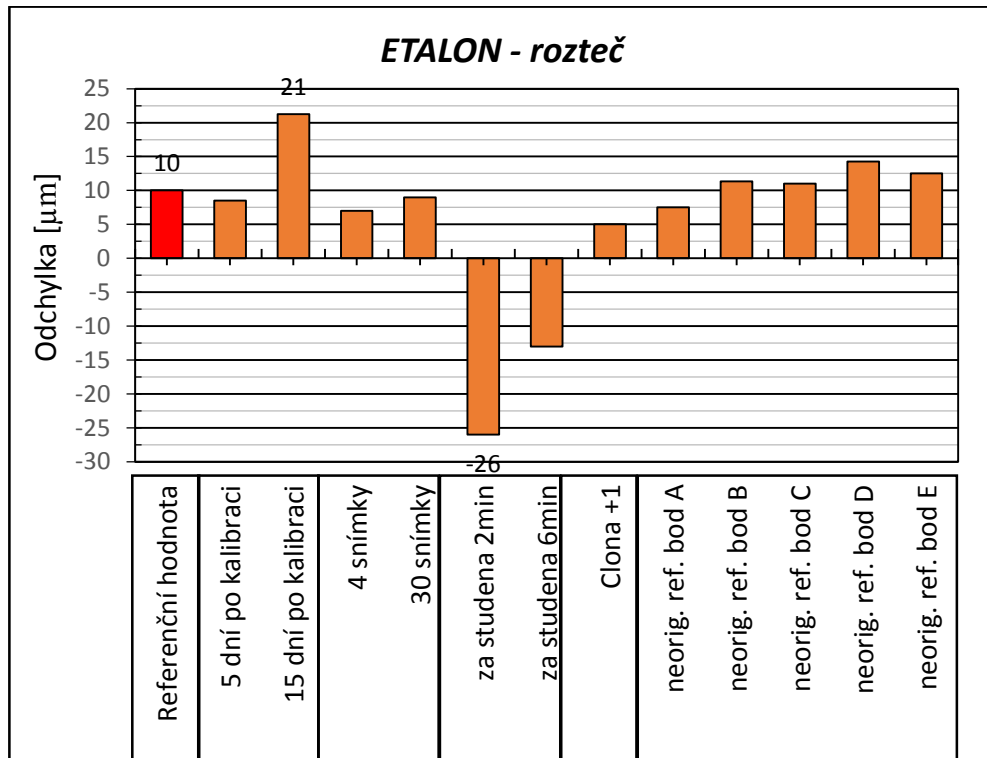
8.1 ETALON

Z grafu (Graf 23) celkového shrnutí odchylky průměru koulí vyplývá, že velký vliv na přesnost měření má kvalita referenčních bodů a vliv měření za studena. U kvality referenčních bodů jsou odchylky v kladných hodnotách, vykazující až 2,7x vyšší odchylku a naopak odchylky u měření za studena se pohybují na hranici nominální hodnoty, ale dokonce i v záporných hodnotách, kde nejnižší hodnota je $-0,5 \mu\text{m}$. Ostatní aspekty nevykazují takřka žádný vliv na přesnost měření, kde největší rozdíl jsou $4 \mu\text{m}$ u parametru 4 snímky.



Graf 23: Celkové shrnutí etalon – Odchylka průměru

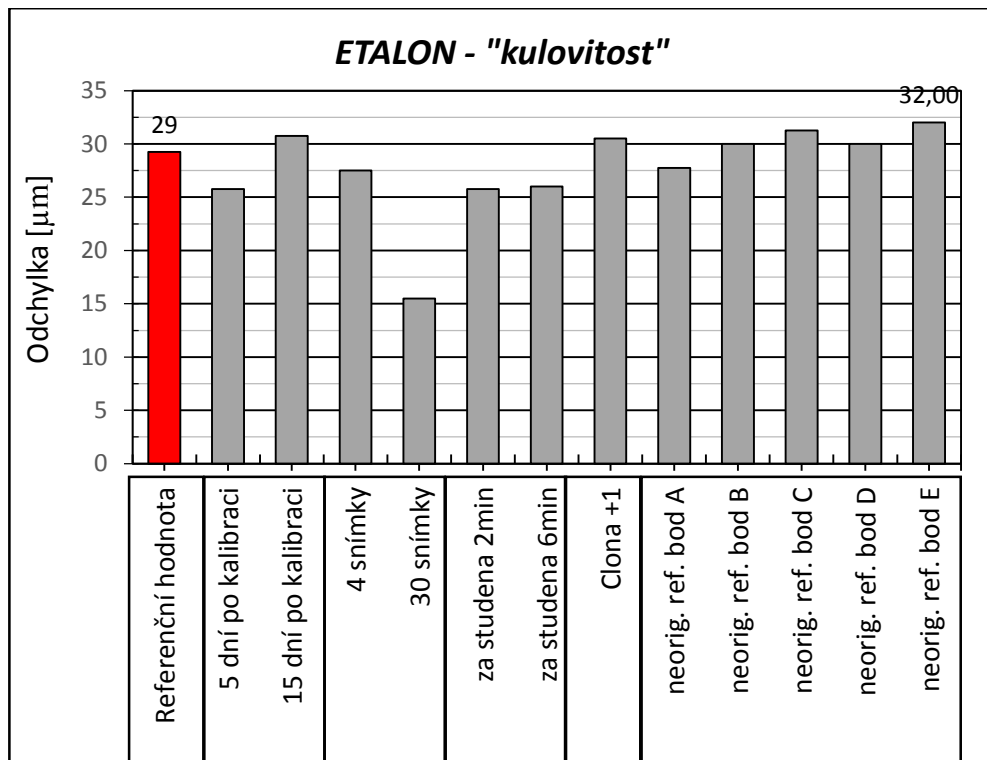
Z grafu (Graf 24) zohledňujícího přesnost měření rozteče na etalonu je patrné, jaký aspekt má zásadní dopad na přesnost. Je to vliv měření za studena, kde se dostáváme až skoro k 4x větší odchylce měření od referenční hodnoty směrem do mínusu a vliv doby kalibrace, kde s rostoucí dobou klesá její přesnost*. U měření za studena je z grafu patrné, jak se odchylka s rostoucím časem zahřátí skeneru zlepšuje a blíží se k referenční hodnotě. Jinak ostatní aspekty nevykazují citelné změny, pohybují se v rozsahu +/- 5 μm .



Graf 24: Celkové shrnutí etalon – Rozteč

*V našem případě byl vzorek (15 dní po kalibraci) zaveden do aritmetického průměru se vzorkem (15 dní po kalibraci – zahrnuje i aspekt rychlých kalibrací).

Z grafu (Graf 25) je zřetelně vidět, že jediný vliv na přesnost tvaru koule má počet snímků. Je viditelné, že s větším počtem snímků roste i vyšší přesnost. Jinak je zajímavé, že neoriginální body dosahují podobných hodnot jako referenční vzorek v rozsahu +/- 3 μm . A vliv měření za studena, který v průběhu ostatních testů vykazoval vysoký vliv, tentokrát žádný citelný vliv nemá, rozdíl od referenční hodnoty činí pouhých 5 μm .



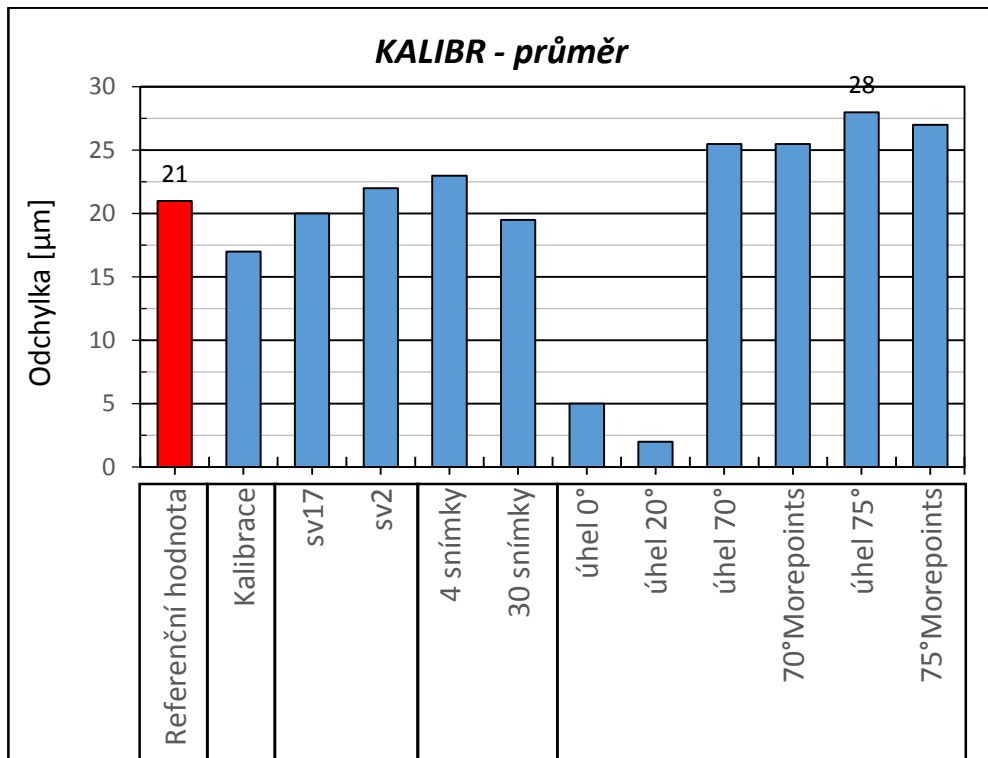
Graf 25: Celkové shrnutí etalon – „kulovitost“

8.2 KALIBR

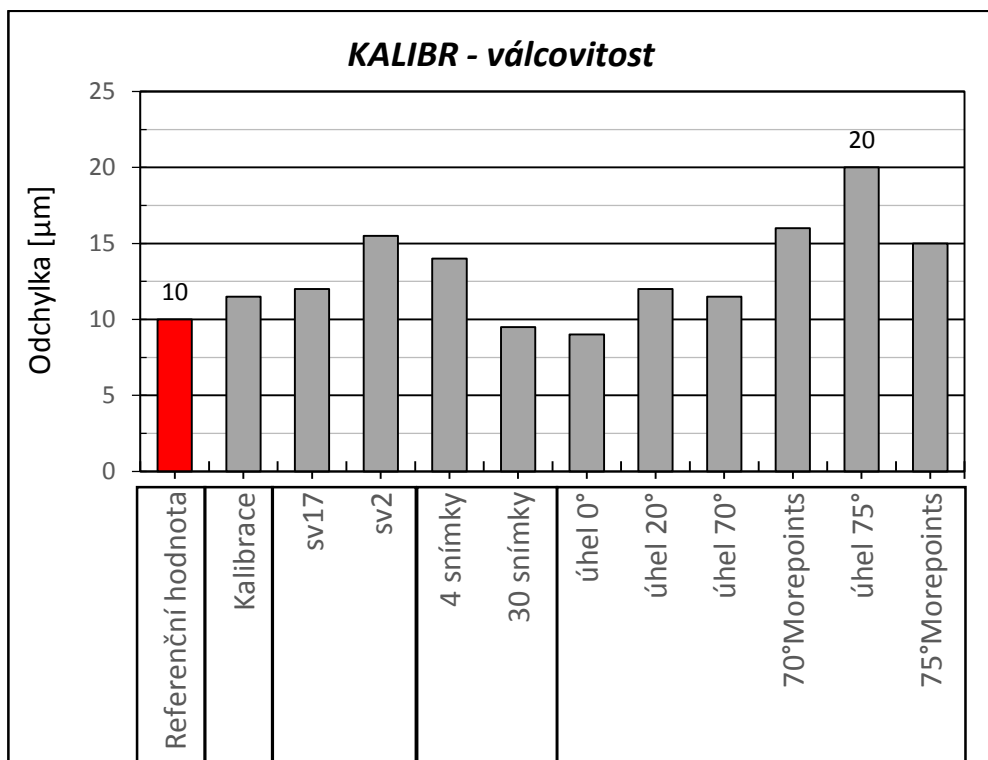
U kalibru byly vyhodnocovány pouze dva parametry a to průměr a válcovitost. Analýza zabývající se měřením průměru (Graf 26) vykazuje, že největší vliv na přesnost má úhel skenování. Přesněji to jsou úhly 0° a 20°, kde rozdíl vůči referenční hodnotě činí více jak 10x tolik. Úhly s vyšší hodnotou jak 70°, i ty s jiným nastavením kvality snímání bodů, nevykazují vysokou nepřesnost, největší rozdíl oproti referenční hodnotě činí 8µm.

U analýzy válcovitosti z grafu (Graf 27) vyplývá, že vliv na přesnost měření mají aspekty, jako jsou expozice a úhel skenování. Zde je zase vidět, jaký dopad na přesnost mají vysoké hodnoty úhlu skenování, konkrétně 75°, v tomto případě má skener značně ztížené podmínky pro zaznamenání válcové plochy, a tím i jeho nepřesnost roste. Z tohoto experimentu plyne, že úhel 45° je optimálním řešením pro měření. Další vliv na měření vykazuje i špatně nastavená expozice (sv2), kde byl celý snímek velmi podexponovaný, rozdíl se blížil 6 µm. Pro zajímavost mimo experiment bylo provedeno ještě jedno měření při expozici (sv1.3) viz kapitola 7.11, kdy nepřesnost byla až 5,5x větší. Nelze také zapomenout na vliv počtu snímků, kde v tomto případě malý počet snímků má nepatrný vliv na přesnost měření, z tohoto experimentu je vidět, proč je optimální počet snímků 10, například při Acceptance testu je taktéž 10 snímků.

K této analýze se dá dodat, že výsledky jsou víc než uspokojivé, kde největší rozdíl činní pouze 10 μm .



Graf 26: Celkové shrnutí kalibr – Průměr



Graf 27: Celkové shrnutí kalibr 48H7- Válcovitost

9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jaké vlivy přesněji aspekty mají vliv na přesnost měření skeneru ATOS II 400. V této práci bylo provedeno několik referenčních měření, z kterých byla zjištěna průměrná referenční hodnota a sedm experimentů, z nichž každý byl zvlášť vyhodnocen.

Z celkového pohledu se dá říci, že všechny vlivy, kterým jsme měření vystavili, splňují přesnost skeneru. Nás zde však zajímalo, jaký dopad bude na námi změřenou referenční hodnotu a v tomto případě lze shrnout, že měření za studena má značný vliv na přesnost měření a to při měření průměrů a vzdáleností (rozteče), zase v případě tvarové tolerance nevykazuje velkou změnu.

Další dopad na rozměrovou přesnost (průměr) má vliv neoriginálních referenčních bodů, kde výsledné hodnoty jsou až 3x větší než referenční hodnota. U ostatních parametrů, jako jsou rozteč a tvar, nemají neoriginální referenční body žádný dopad.

Vliv na přesnost má i úhel skenování, kde naklonění skeneru v rozmezí 0° - 20° vykazovalo až 10,5x menší hodnotu průměru kalibru vůči referenčnímu vzorku. Úhly v rozmezí 70° - 75° mají zase dopad na tvarovou přesnost válcové plochy kalibru, kde je rozdíl vůči referenčnímu vzorku 2x větší.

Dále je důležité zmínit i fakt špatně nastavené expozice, kde podexponovaný snímek vykazuje vysoké nepřesnosti.

Jako závěr této práce se dá říct, že měření na skeneru ATOS II 400, dosahuje ve všech případech deklarované přesnosti $\pm 30\mu\text{m}$. Z toho vyplývá, že je měření málo náchylné na vliv vnějších parametrů a na chyby obsluhy. To znamená, že výsledky jsou poměrně objektivní a robustní u všech analýz. Tomu napomáhají i různé SW kontroly při samotném měření, které uživatele upozorní na možné problémy (pohyb skeneru/objektu, nevhodné světelné podmínky, rozkalibrování skeneru, chyba transformace snímků, atd.). Nicméně v celé práci byly aspekty uvažovány samostatně, pokud by se vyskytlo více nevhodných aspektů dohromady, mohlo by to již výrazně ovlivnit výslednou přesnost. Proto pro dosažení nejvyšší kvality a přesnosti měření je třeba dodržovat zásady a doporučené postupy měření.

Použitá literatura

[1] *3d skenování v průmyslu* [online]. [cit. 2017-01-30].

Dostupné z: <http://www.3d-sken.cz/9-clanky/21-3d-skenovani-v-prumyslu.html>

[2] *3D laserové skenování - teorie* [online]. Praha [cit. 2017-01-30].

Dostupné z: <http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/vvt/s1/laserteorie3d.pdf>

[3] *Rozdělení 3D skenerů a jejich využití* [online]. Brno [cit. 2017-01-30].

Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/rozdeleni-3d-skeneru>

[4] ŠNAJDÁREK, LADISLAV. *METODY 3D LASEROVÉHO ..* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-03-29].

Dostupné z: www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6001.

Bakalářská. Vysoké technické učení v Brně. Vedoucí práce Ing. MIROSLAV OPL.

[5] FRKAL, MARTIN. *Návrh kalibračního etalonu ..* Liberec, 2016. Diplomová.

Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. RADOMÍR MENDŘICKÝ Ph.D.

[6] *Optické metody měření 3D objektů* [online]. Brno, 2005 [cit. 2017-01-30].

Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap4>

[7] *Optický skener ATOS* [online]. Josef Mačák [cit. 2017-01-30].

Dostupné z: <http://www.mcae.cz/data/files/atos-final-25.pdf>

[8] RIVAS, Moises, Wendy FLORES, Javier RIVERA, Oleg SERGIYENKO, Daniel HERNANDEZ-BALBUENA a Alejandro SANCHEZ-BUENO. A Method and Electronic Device to Detect the Optoelectronic Scanning Signal Energy Centre. *Optoelectronics - Advanced Materials and Devices* [online]. InTech, 2013 [cit. 2017-01-30]. DOI: 10.5772/51993. ISBN 978-953-51-0922-8.

Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/optoelectronics-advanced-materials-and-devices/a-method-and-electronic-device-to-detect-the-optoelectronic-scanning-signal-energy-centre>

[9] *CCD senzory* [online]. Pavla Žbáňková [cit. 2017-01-30].

Dostupné z:

http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace_2002/07_ccd_senzory.pdf

[10] *ATOS Triple Scan - Revolutionary scanning technique* [online]. Germany [cit. 2017-01-30].

Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>

[11] *What is GOM Inspect?* [online]. Germany [cit. 2017-01-30].

Dostupné z: <http://www.gom-inspect.com/en/overview.php>

[12] GOM MbH. *Atos V7 - Software v 6.1: User manual*. Braunschweig (Germany): GOM MbH, 2010

[13] *Hexagonmi* [online]. Great Britain: Hexagon AB, 2017 [cit. 2017-03-29].

Dostupné z: <http://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/shop-floor-cmms/7107-sf>

[14] *APLIKACE MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ ..* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-03-29].

Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52865.

Bakalářská. Vysoké technické učení v Brně. Vedoucí práce Ing. Josef SEDLÁK, Ph.D.

[15] HÁDEK, JAKUB. *Vliv dokončovacích operací ..* Liberec, 2016. Diplomová. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. RADOMÍR MENDŘICKÝ Ph.D.

[16] GOM MbH. *Atos V7 – Hardware: User manual*. Braunschweig (Germany): GOM MbH, 2010

[17] *E-konstrukter: Geometrické tolerance* [online]. Praha: Petr Filip, 2014 [cit. 2017-04-03].

Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance>

[18] MENDRICKY, Radomir. ANALYSIS OF MEASUREMENT ACCURACY OF CONTACTLESS 3D OPTICAL SCANNERS. *MM Science Journal* [online]. 2015, **2015**(03), 711-716 [cit. 2017-04-03]. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_10_201541. ISSN 18031269.

Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/october-2015.html#201541>

[19] PALOUŠEK, David. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials*. 2014, **2015**(40), 1-9.

[20] VAGOVSÝ, Juraj. Evaluation of Measuring Capability of the Optical 3D Scanner. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **2015**(100), 1198-1206 [cit. 2017-04-06].

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815005111>

[21] FAQ - vysvětlení DMLS, SLS, SLM, EBM, Laser

Cusing. *Www.innomia.cz* [online]. Jaroměř, 2012 [cit. 2017-04-23].

Dostupné z: <http://www.innomia.cz/faq-vysvetleni-dmls-sls-slm-ebm-laser-cusing>

[22] ČERMÁK, Jan. *Metody 3D skenování objektů* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2015 [cit. 2017-05-02].

Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103850

Obrázky

OBRÁZEK 1: ROZDĚLENÍ 3D SKENERŮ [4]	11
OBRÁZEK 2: ZAŘÍZENÍ MICRO SCRIBE (MODRÝ) A SMS 3D SOUŘADNICOVÝ PŘÍSTROJ [13][14].....	12
OBRÁZEK 3: MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ ATOS II 400 OD NĚMECKÉ FIRMY GOM GMBH [12].....	13
OBRÁZEK 4: AKTIVNÍ TRIANGULACE (SVĚTELNÝ PAPERSEK) [6]	14
OBRÁZEK 5:TECHNIKA SVĚTELNÉHO VZORU (3D AKTIVNÍ TRIANGULACE) [6] .	15
OBRÁZEK 6: STEREOSKOPICKÉ SNÍMKY (SCHÉMA STEREOVIDĚNÍ) [6]	16
OBRÁZEK 7: ROZDĚLENÍ SNÍMAČŮ OBRAZU [4]	17
OBRÁZEK 8: POPIS ZAŘÍZENÍ ATOS II 400 [16]	20
OBRÁZEK 9: MRAČNO BODŮ – VÝSTUPNÍ DATA Z ATOS II 400 [12].....	21
OBRÁZEK 10: SCHÉMA PREZENTUJÍCÍ VÝPOČET PROBING ERROR FORM [5]	23
OBRÁZEK 11: SCHÉMA ZNÁZORŇUJÍCÍ VÝPOČET SPHERE SPACING ERROR [5]	23
OBRÁZEK 12: SPECIFIKACE MĚŘICÍHO OBJEMU [16].....	24
OBRÁZEK 13: MĚŘENÝ ETALON – PROMÍTNUTÝ RASTR NA POVRCHU	25
OBRÁZEK 14: PŘEEXPONOVANÝ SNÍMEK, VIZUALIZACE V GOM INSPECT.....	26
OBRÁZEK 15: VARIANTY REFERENČNÍCH BODŮ (NEKÓDOVANÉ) [12]	26
OBRÁZEK 16: KAMEROU ROZLIŠITELNÉ A NEROZLIŠITELNÉ REFERENČNÍ BODY [12].....	27
OBRÁZEK 17: PŘÍKLAD DOPORUČENÉHO UMÍSTĚNÍ REFERENČNÍCH ZNAČEK [12].....	27
OBRÁZEK 18: KALIBRAČNÍ OBJEKTY PRO ZAŘÍZENÍ ATOS [12]	28
OBRÁZEK 19: MĚŘENÉ ETALONY (VLEVO ETALON S KOULEMI, VPRAVO KALIBR)	31
OBRÁZEK 20: ETALON VYROBENÝ PRO ACCEPTANCE TEST - AUTOR MARTIN FRKAL [5]	32
OBRÁZEK 21: TOLERANČNÍ OBLAST VÁLCOVITOSTI A JEJÍ ZNAČENÍ [17].....	33
OBRÁZEK 22: TOLERANČNÍ OBLAST KRUHOVITOSTI A JEJÍ ZNAČENÍ [17]	33
OBRÁZEK 23: VÝSTŘIŽEK Z REPORTU ZE SW GOM INSPECT (ETALON).....	34
OBRÁZEK 24: VÝSTŘIŽEK Z REPORTU ZE SW GOM INSPECT (KALIBR)	34
OBRÁZEK 25: VOLBA METODY PROLOŽENÍ GEOMETRICKÉHO ÚTVARU GOM INSPECT	36
OBRÁZEK 26: TESTOVANÝ ETALON S TITANOVÝM NÁSTŘIKEM A REF. BODY	37
OBRÁZEK 27: PROSTŘEDÍ GOM INSPECT – KALIBRACE	38
OBRÁZEK 28: PŘEEXPONOVANÝ OBJEKT – OBRAZ PC.....	44

OBRÁZEK 29: BAREVNÁ MAPA VYJADŘUJÍCÍ CHYBU VÁLCOVITOSTI (NAHOŘE - 1,3MS), KALIBRACE (DOLE - 11MS).....	46
OBRÁZEK 30: DOPORUČENÝ ÚHEL PRO SKENOVÁNÍ KRUHOVÝCH I TVAROVÝCH DĚR A VÝSTŘIŽKŮ [12]	50
OBRÁZEK 31: ÚHEL NAKLOPENÍ SKENERU	50
OBRÁZEK 32: ZMĚNA CLONY – VIZUÁLNÍ ZNÁZORNĚNÍ V GOM INSPECT +1 EV	54
OBRÁZEK 33: ZMĚNA CLONY – VLEVO EV 11, VPRAVO EV 8	56
OBRÁZEK 34: ZMĚNA CLONY – EV 8 (VPRAVO) EV 11+ (VLEVO).....	56
OBRÁZEK 35: ORIGINÁLNÍ REF. BODY A VYTIŠTĚNÉ REF. BODY	57
OBRÁZEK 36: APLIKACE NEORIGINÁLNÍCH BODŮ (TYP B) NA OBJEKTU ETALON	59

Grafy

GRAF 1: KALIBRACE – LEVÁ KOULE	39
GRAF 2: KALIBRACE – PRAVÁ KOULE	39
GRAF 3: KALIBRACE – ROZTEČ	40
GRAF 4: KALIBRACE – KALIBR	40
GRAF 5: VLIV KALIBRACE – LEVÁ KOULE	42
GRAF 6: VLIV KALIBRACE - PRAVÁ KOULE.....	42
GRAF 7: VLIV KALIBRACE – ROZTEČ	43
GRAF 8: VLIV KALIBRACE - KALIBR	44
GRAF 9: ČASOVÁ EXPOZICE	45
GRAF 10: POČET SNÍMKŮ – LEVÁ KOULE	48
GRAF 11: POČET SNÍMKŮ – PRAVÁ KOULE	48
GRAF 12: POČET SNÍMKŮ – ROZTEČ	49
GRAF 13: POČET SNÍMKŮ – KALIBR.....	49
GRAF 14: ÚHEL SKENOVÁNÍ - KALIBR	51
GRAF 15: MĚŘENÍ ZA STUDENA – LEVÁ KOULE.....	52
GRAF 16: MĚŘENÍ ZA STUDENA – PRAVÁ KOULE.....	53
GRAF 17: MĚŘENÍ ZA STUDENA - ROZTEČ	53
GRAF 18: ZMĚNA CLONY KAMERY – LEVÁ I PRAVÁ KOULE.....	55
GRAF 19: ZMĚNA CLONY KAMERY – ROZTEČ	55
GRAF 20: REFERENČNÍ BODY – LEVÁ KOULE	59
GRAF 21: REFERENČNÍ BODY – PRAVÁ KOULE	60
GRAF 22: REFERENČNÍ BODY - ROZTEČ.....	60
GRAF 23: CELKOVÉ SHRNU TÍ ETALON – ODCHYLKA PRŮMĚRU	62

GRAF 24: CELKOVÉ SHRNUÍ ETALON – ROZTEČ	63
GRAF 25: CELKOVÉ SHRNUÍ ETALON – „KULOVITOST“	64
GRAF 26: CELKOVÉ SHRNUÍ KALIBR – PRŮMĚR.....	65
GRAF 27: CELKOVÉ SHRNUÍ KALIBR 48H7– VÁLCOVITOST	65

Tabulky

TABULKA 1: SPECIFIKACE ZAŘÍZENÍ ATOS II 400 NA KATEDŘE KSA [5]	18
TABULKA 2: NOMINÁLNÍ ROZMĚRY MĚŘÍCÍ STROJ DEA GLOBAL STATUS 7.10.5 – ETALON [5]	32
TABULKA 3: EKVIVALENT RANGE A „KULOVITOST“	35
TABULKA 4: LEGENDA – REFERENČNÍ MĚŘENÍ.....	39
TABULKA 5: LEGENDA - VLIV KALIBRACE	41
TABULKA 6: LEGENDA – ČAS EXPOZICE.....	45
TABULKA 7: LEGENDA- POČET SNÍMKŮ	47
TABULKA 8: LEGENDA – ZA STUDENA	52
TABULKA 9: LEGENDA – ZMĚNA EXPOZIČNÍ HODNOTY	54
TABULKA 10: LEGENDA – REFERENČNÍ BODY	58

Přílohy

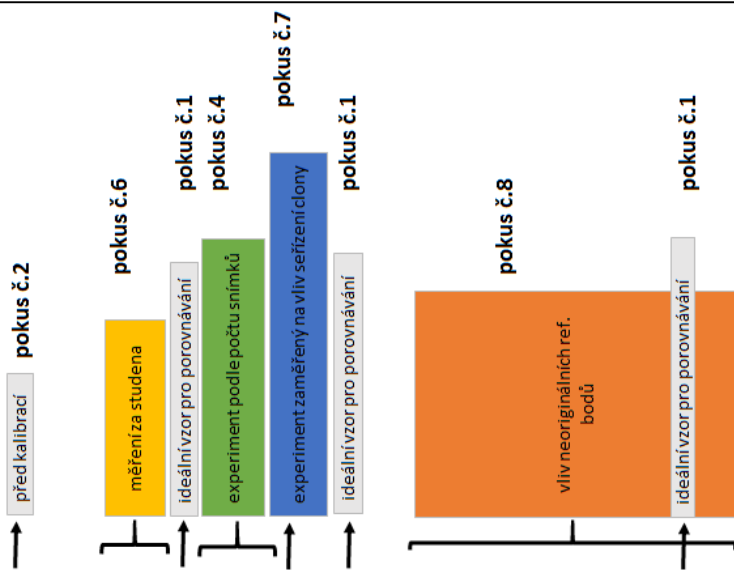
PŘÍLOHA 1: HARMONOGRAM MĚŘENÍ – KALIBR 48H7.....	73
PŘÍLOHA 2: HARMONOGRAM MĚŘENÍ – ETALON S KOULEMI	74
PŘÍLOHA 3: ÚHEL NÁKLONU SKENERU 75°.....	75
PŘÍLOHA 4: CLONA KAMERY – DETAIL NA NASTAVITELNOU STUPNICI.....	76
PŘÍLOHA 5: UMÍSTĚNÍ NEORIGINÁLNÍCH REFERENČNÍCH BODŮ (TYP A)	76
PŘÍLOHA 6: PRT SCR KALIBRU 48H7 – 30 SNÍMKŮ S TABULKOU PRO NASTAVENÍ KVALITY BODŮ.....	76
PŘÍLOHA 7: DETAIL NA TITANOVÝ NÁSTŘIK	77

Přílohy

Válcový kalibr do díry 48H7						
25.1.2017						
světelné podmínky	čas body	čas expozice				
měření č.	počet snímků	úhel snímání [°]	poznámky	čas body	čas expozice	
více než 15 dní od kalibrace skeneru						
2	2	45°		10,4ms	13ms	před kalibrací pokus č.2
kalibrace zařízení (protokol)						
3	2	45°		10,4ms	11ms	ideální vzor pro porovnávání pokus č.1
4	2	45°		10,4ms	17ms	experiment zaměřený na různou dobu měření pokus č.3
5	2	45°		10,4ms	2ms	
6	2	45°		10,4ms	1,3ms	experiment podle počtu snímků pokus č.4
7	2	45°		10,4ms	11ms	
8	2	45°		10,4ms	11ms	experiment zaměřený na úhel skenování pokus č.5
9	2	70°		10,4ms	11ms	
10	2	70°	more points	10,4ms	11ms	
11	2	75°		10,4ms	11ms	
12	2	75°	more points	10,4ms	11ms	
13	2	20°		10,4ms	11ms	
14	2	0°		10,4ms	11ms	

Příloha 1: Harmonogram měření – Kalibr 48H7

Etalon s koulemi						
26.1.2017 - 31.1.2017 (15.2.2017)				světelné podmínky		
měření č.	počet skenů	počet snímků	úhel snímání [°]	poznámky	čas body	čas expozice
více než 15 dní od kalibrace skeneru						
1	2	10	45°		10,4ms	11ms
kalibrace 25.1.2017						
měření 26.1.2017						
15	2	10	45°	za studena 2min.	10,4ms	11ms
16	1	10	45°	za studena 6min.	10,4ms	11ms
17	2	10	45°		10,4ms	11ms
18	2	4	45°		10,4ms	11ms
19	2	30	70°, 45°, 20°		10,4ms	11ms
20	2	10	45°	clona +1	10,4ms	11ms
celková kalibrace skeneru 26.2.2017						
21	2	10	45°	po seřízení a kalibraci	10,5ms	11ms
5 dní od kalibrace 31.1.2017						
22	2	10	45°	ref.b. vzorek A	10,5ms	11ms
23	3	10	45°	ref.b. vzorek B	10,5ms	11ms
24	2	10	45°	ref.b. vzorek C	10,5ms	11ms
kalibrace 31.1.2017						
25	2	10	45°		10,5ms	11ms
26	4	10	45°	ref.b. vzorek D	10,5ms	11ms
17 dní od kalibrace 15.2.2017						
27	2	10	45°	orig.ref.body	10,5ms	11ms
kalibrace 15.2.2017						
28	2	10	45°	orig.ref.body	10,5ms	11ms
29	2	10	45°	ref.b.vzorek B → E větší černé okraje	10,5ms	11ms



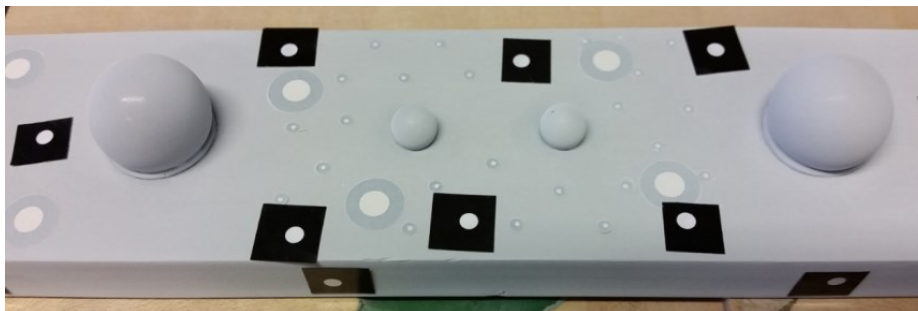
Příloha 2: Harmonogram měření – Etalon s koulemi



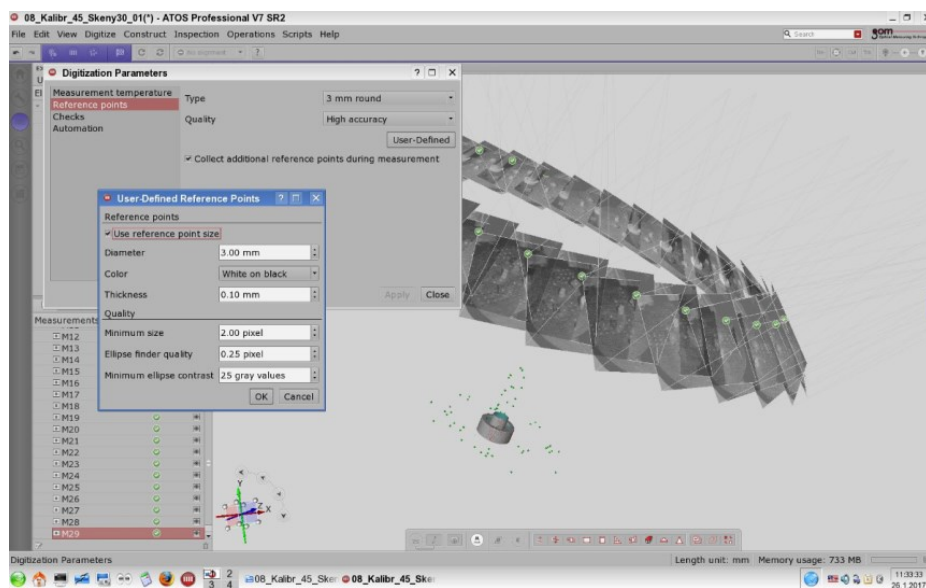
Příloha 3: Úhel náklonu skeneru 75°



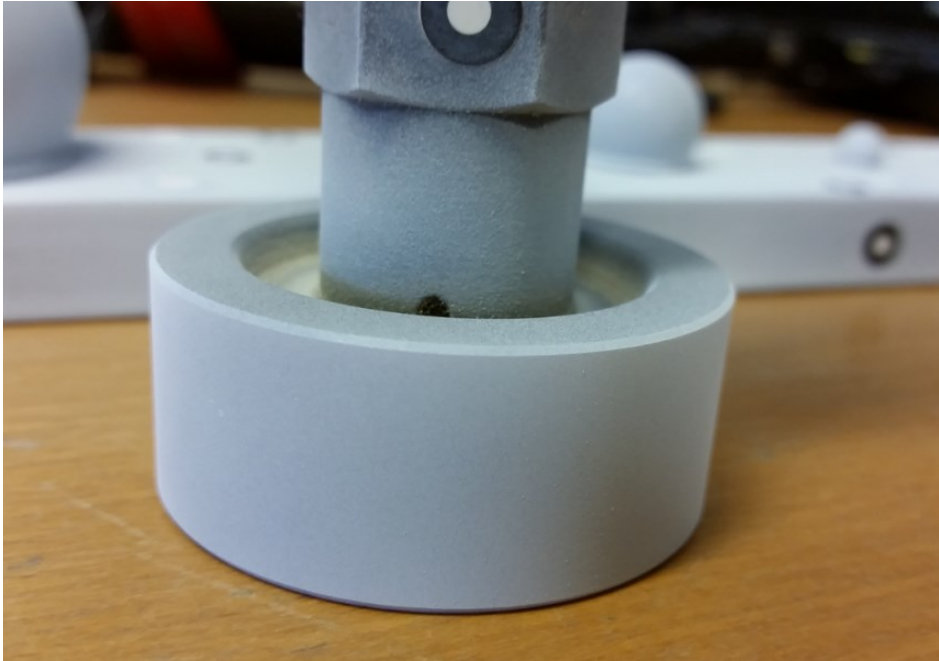
Příloha 4: Clona kamery – detail na nastavitelnou stupnici



Příloha 5: Umístění neoriginálních referenčních bodů (Typ A)



Příloha 6: Prt Scr kalibru 48H7 – 30 snímků s tabulkou pro nastavení kvality bodů



Příloha 7: Detail na titanový nástřik