



Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.

FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST MĚŘENÍ OPTICKÝMI 3D SKENERY

HABILITAČNÍ PRÁCE

Liberec 2020



FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST MĚŘENÍ OPTICKÝMI 3D SKENERY

HABILITAČNÍ PRÁCE

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 190

Počet obrázků: 174

Počet tabulek: 19

Počet příloh: 0

Anotace

Předkládaná habilitační práce se věnuje problematice bezkontaktních měřicích systémů, a to především z pohledu jejich praktického využití pro rozměrovou kontrolu dílů.

V první části jsou shrnuty teoretické poznatky o 3D digitalizaci s využitím bezkontaktních skenerů. Je uvedeno základní členění těchto systémů jak z pohledu principu snímání obrazu, tak z pohledu transformace změřených bodů do globálního souřadného systému. Dále je vysvětleno, jak jsou tyto systémy v současné době využívány v praxi, jaké jsou jejich výhody, případně nevýhody v porovnání s konvenčními způsoby měření. Hlavní pozornost je zaměřena na oblast přesnosti snímání těchto systémů a faktory, které ji ovlivňují. Na základě autorovy vlastní zkušenosti a mnohaleté praxe v tomto oboru, je objasněna základní metodika měření, jsou popsány relevantní postupy pro dosažení nejspolehlivějších výsledků při inspekci, případně je poukázáno na chyby, kterých se obsluha často dopouští. Je zdůrazněna důležitost volby vhodného systému pro měření a vysvětleny postupy při seřízení a kalibraci přístroje. Z pohledu samotného procesu digitalizace je dále věnována pozornost postupům přípravy dílu pro měření, parametrům a okolním podmínkám, jež ovlivňují přesnost snímání a především strategii při samotné digitalizaci. V neposlední řadě je přiblížen způsob zpracování naměřených dat, který zahrnuje vyrovnání souřadného systému, korektní selektování mraku bodů a výběr vhodné výpočetní metody pro konstrukci inspekčních elementů.

Praktická část práce se zaměřuje na experimentální výzkum jednotlivých faktorů, jež mohou ovlivňovat přesnost měření optickými 3D skenery. Většina experimentů byla realizována na optickém 3D skeneru ATOS II, resp. ATOS Triple Scan, který patří v současnosti k jednomu z nejpresnějších a praxí velmi často používaných systémů pro bezkontaktní inspekci. První fází ověření přesnosti byl návrh a výroba etalonu pro realizaci speciálního akceptačního testu. Po jeho ověření bylo přikročeno k analýze přesnosti digitalizace s využitím několika měřicích objemů a to včetně posouzení limitů skenovatelnosti detailních prvků v závislosti na použitém rozlišení přístroje. Další kapitoly přináší výsledky vlivu materiálu, antireflexních nástřiků a mnoha dalších parametrů na přesnost digitalizace. Ukázalo se, že mnoho aspektů má poměrně zanedbatelný vliv na výsledné charakteristiky a systém se chová velmi robustně. Byly však odhaleny i faktory, kterým je z důvodu spolehlivého měření třeba věnovat zvýšenou pozornost.

Práce shrnuje poznání a zkušenosti autora, které získal při řešení projektů VaV, realizaci smluvního výzkumu a při pedagogické činnosti. Poznatky uvedené v této práci jsou výsledkem autorova téměř desetiletého vědeckého a pedagogického působení v oblasti bezkontaktní 3D digitalizace. Experimentální výzkum probíhal nejčastěji v rámci řešení vědecko-výzkumných projektů, projektů studentské grantové soutěže nebo vlastních interních aktivit. Některé výzkumy probíhaly v kooperaci s dalšími členy nebo spoluřešiteli týmu daného projektu. Dílčí výsledky byly prezentovány na mezinárodních odborných konferencích nebo publikovány v indexovaných mezinárodních periodikách.

Klíčová slova

Optická 3D digitalizace, 3D skener, Proužková projekce, Přesnost měření, Inspekce, Kalibrace, Acceptance test, ATOS, Antireflexní nástřik.

Annotation

The submitted habitation thesis deals with the issue of contactless measuring systems, especially from the perspective of their practical use for dimensional inspection of parts.

The first part summarizes theoretical knowledge about 3D digitization using contactless scanners. The basic classification of these systems is presented from the perspective of the principle of image acquisition as well as from the perspective of transformation of measured points into the global coordinate system. It is also explained how these systems are currently used in practice, what are their advantages or disadvantages compared to conventional methods of measurement. The main attention is focused on the area of scanning accuracy of these systems and the factors that influence it. Based on the author's own experience and many years of practice in this field, the basic measurement methodology is clarified, relevant procedures for achieving the most reliable results during the inspection are described, or it is pointed out errors that the operator often makes. The importance of choosing a suitable measurement system is emphasized and the procedures for adjusting and calibrating the device are explained. From the perspective of the digitization process attention is also paid to the procedures of preparation of the part for measurement, to the parameters and ambient conditions that affect the accuracy of scanning and especially to the strategy during the digitization itself. Finally, the data processing method is described, which includes alignment of the coordinate system, correct selection of point cloud and selection of a suitable calculation method for the construction of inspection elements.

The practical part of the thesis focuses on experimental research of individual factors that can influence the accuracy of measurement by optical 3D scanners. Most of the experiments were performed on the ATOS II optical 3D scanner, respectively ATOS Triple Scan, which is currently one of the most accurate and very frequently used system for contactless inspection. The first stage of verification of accuracy was the design and production of a standard for the implementation of a special acceptance test. After its verification, the analysis of the digitization accuracy was carried out using several measuring volumes, including the assessment of the limits of scan ability of detailed elements depending on the used resolution of the device. The next chapters present results of the influence of the work piece material, of the anti-reflection coatings and many other parameters on the accuracy of digitization. Many aspects have been shown to have a relatively negligible effect on the resulting characteristics and the system behaves very robustly. However, factors that need more attention for reliable measurement have also been identified.

The thesis summarizes the knowledge and experience of the author, which he gained in solving R&D projects, the implementation of contract research and pedagogical activities. The findings presented in this work are the result of the author's almost ten years of scientific and pedagogical work in the field of contactless 3D digitization. Experimental research was most often carried out within the solution of scientific research projects, projects of student grant competition or own internal activities. Some researches were conducted in cooperation with other members or co-researchers of the project team. Partial results were presented at international professional conferences or published in indexed international periodicals.

Key words

Optical 3D digitization, 3D scanner, Fringe Projection, Measurement accuracy, Inspection, Calibration, Acceptance test, ATOS, Antireflection coating.

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mě podpořili a ochotně pomohli při vzniku této práce. Poděkování patří především spolupracovníkům z Technické univerzity v Liberci a kolegům z katedry Výrobních systémů a automatizace za spolupráci na výzkumných aktivitách, při řešení projektů, za cenné rady a konzultace. Speciální poděkování patří rodině a mé manželce Evě za trpělivost a morální podporu při psaní této práce.

OBSAH

Anotace.....	3
Klíčová slova	3
Annotation	4
Key words.....	4
Poděkování.....	5
OBSAH.....	6
Seznam použitých zkratk, symbolů a značek	9
1 ÚVOD.....	11
1.1 Cíle a náplň práce.....	11
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	14
2.1 Přehled souvisejících publikací	15
2.1.1 Se zaměřením na základní principy, použití systémů	16
2.1.2 Se zaměřením na projekci světla, kódování.....	17
2.1.3 Se zaměřením na přesnost, kalibraci, vnější faktory.....	20
2.1.4 Se zaměřením na antireflexní nástřiky.....	31
3 TEORETICKÁ ČÁST	35
3.1 Úvod do 3D digitalizace	35
3.1.1 Základní pojmy - terminologie	35
3.1.2 Chyby při skenování	37
3.1.3 Výhody a nevýhody	38
3.1.4 Oblast využití 3D skenování.....	39
3.2 Systémy pro 3D skenování.....	44
3.2.1 Principy bezkontaktního snímání.....	44
3.2.1.1 Projekce rastru světla	44
3.2.1.2 Stereovidění.....	47
3.2.1.3 Detekce laserového paprsku	48
3.2.2 Transformace do globálního souřadného systému	50
3.2.2.1 Měřicí ramena, SMS	50
3.2.2.2 Tracker systém	51
3.2.2.3 Referenční body	52
3.2.2.4 Geometrie, textura	53
3.2.3 Skenovatelnost vnitřních geometrií	53
3.3 Skenery použité v práci.....	57
3.3.1 3D skener ATOS.....	57
3.4 Faktory ovlivňující rozměrovou přesnost	59
3.4.1 Měřicí systém.....	60
3.4.1.1 Volba systému	60

3.4.1.2	Seřazení a kalibrace přístroje	64
3.4.2	Digitalizace	69
3.4.2.1	Příprava dílu pro měření	69
3.4.2.2	Parametry a okolní podmínky při digitalizaci.....	75
3.4.2.3	Postup a strategie při digitalizaci	75
3.4.2.4	Procesní parametry digitalizace	77
3.4.3	Zpracování a vyhodnocení dat.....	81
3.4.3.1	Editace meshe	82
3.4.3.2	Vyrovnaní souřadného systému dílu	83
3.4.3.3	Výběr bodů pro výpočet prvku	85
3.4.3.4	Metoda výpočtu rozměru, GD&T.....	90
3.4.3.5	Metody při měření vzdálenosti.....	91
4	PRAKTICKÁ ČÁST.....	96
4.1	Acceptance test	98
4.1.1	Popis acceptance testu	98
4.1.2	Parametry acceptance testu.....	99
4.1.3	Výpočet odchylky tvaru koule.....	101
4.1.4	Kalibrační etalon.....	104
4.1.4.1	Stanovení nominálních rozměrů.....	105
4.1.5	Digitalizace etalonu	105
4.1.6	Vyhodnocení dat	107
4.1.6.1	Výsledky acceptance testu.....	108
4.1.7	Diskuze	110
4.2	Analýza přesnosti digitalizace	111
4.2.1	Etalon pro měření	111
4.2.2	Měření na souřadnicovém měřicím stroji	113
4.2.3	Digitalizace modelu a inspekce rozměrů	113
4.2.4	Výsledky měření.....	114
4.2.5	Limity skenování detailních prvků	117
4.2.6	Diskuze	120
4.3	Vliv materiálu	121
4.3.1	Výroba vzorků	121
4.3.2	Výsledky měření.....	125
4.3.2.1	Materiály neskenovatelné (do 50%).....	126
4.3.2.2	Materiály částečně skenovatelné (50 – 80%).....	126
4.3.2.3	Materiály skenovatelné (nad 80 %)	127
4.3.2.4	Přesnost naměřených rozměrů.....	127
4.3.3	Diskuze	131
4.4	Vliv antireflexních nástřiků.....	135
4.4.1	Popis experimentů	137
4.4.2	Výsledky měření.....	141
4.4.2.1	Válcový etalon.....	141
4.4.2.2	Kulový etalon	144
4.4.2.3	Shrnutí.....	147
4.4.3	Diskuze	150
4.5	Vliv ostatních parametrů.....	151
4.5.1	Zásady správného měření	151

4.5.2	Popis experimentů	153
4.5.3	Výsledky měření	155
4.5.3.1	Referenční měření	155
4.5.3.2	Kalibrace skeneru	156
4.5.3.3	Čas expozice	159
4.5.3.4	Počet snímků	160
4.5.3.5	Úhel skeneru	162
4.5.3.6	Zahřátí skeneru	163
4.5.3.7	Clona kamer	165
4.5.3.8	Referenční body	166
4.5.3.9	Shrnutí výsledků	168
4.5.4	Diskuze	171
4.6	Shrnutí.....	172
5	ZÁVĚR	174
5.1	Vlastní přínos práce	174
5.1.1	Shrnutí výsledků práce.....	175
5.2	Slovo závěrem	176
6	LITERATURA.....	178
6.1	Seznam použitých zdrojů.....	178
6.2	Vybrané vlastní publikace související s řešenou problematikou.....	186

Seznam použitých zkratk, symbolů a značek

1D	Jednodimenzionální
2D	Dvojdimenzionální
3D	Třidimenzionální
AKL	Akreditovaná kalibrační laboratoř
ATOS	Advanced Topometric Sensor (Pokročilý topometrický snímač) - označení pro optický skener společnosti GOM
CCD	Charge-Coupled Device (Čip pro snímání obrazové informace)
CMM	Coordinate-Measuring Machine (Souřadnicový měřicí stroj)
c_p, c_{pk}	Indexy způsobilosti procesu
ČIA	Český institut pro akreditaci
ČSN	Česká technická norma
DIN	Deutsches Institut für Normung (Německý institut pro normalizaci)
EN	Euripäischen Normen (Evropská norma)
FDM	Fused Deposition Modeling (Technologie 3D tisku)
GD&T	Geometric Dimensioning and Tolerancing (Geometrické kótování a tolerance)
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik (společnost pro optickou měřicí techniku)
HDR	High Dynamic Range (Vysoký dynamický rozsah)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro standardizaci)
KSA	Katedra výrobních systémů a automatizace
LCD	Liquid Crystal Display (Displej z tekutých krystalů)
MKP	Metoda konečných prvků
Mpx	Megapixel
MV	Measuring Volume (Měřicí objem)
PC	Personal Computer (Osobní počítač)
RGB	Red Green Blue (Barevný model červená-zelená-modrá)
RPS	Reference Point System (Systém referenčních bodů)
SLA	Stereolithography Apparatus (Stereolitografie - technologie 3D tisku)

SLS		Selective Laser Sintering (Selektivní laserové slinování – technologie 3D tisku)
SO		Small Objects (Pozice kamer pro malé měřicí objemy)
STL		STereoLithography (Datový formát polygonální sítě)
SW		Software
TRITOP		Systém pro fotogrammetrii od společnosti GOM
VDI/VDE		Vereins Deutscher Ingenieure / Verbands der Elektrotechnik (Asociace německých inženýrů / Asociace elektrotechniky)
d	<i>[mm]</i>	Průměr otvoru
D_a	<i>[mm]</i>	Naměřený průměr (Acceptance test)
D_n	<i>[mm]</i>	Referenční průměr (Acceptance test)
E	<i>[mm]</i>	Length measurement error (Chyba vnější vzdálenosti)
h	<i>[mm]</i>	Hloubka naskenované plochy otvoru
L	<i>[mm]</i>	Délka měřené součásti
MPE_{xx}	<i>[mm]</i>	Maximum Permissible Error (Maximální přípustná chyba)
o	<i>[mm]</i>	Obvod otvoru
PF	<i>[mm]</i>	Probing error Form (Chyba tvaru)
PS	<i>[mm]</i>	Probing error Size (Chyba průměru)
Range_{CH}	<i>[mm]</i>	Rozdíl mezi max. a min. poloměrem kružnice vypočítané metodou Chebyshev
R_G	<i>[mm]</i>	Poloměr kružnice vypočtené z datového vzorku metodou Gaussův Best-fit
R_{CH_i}	<i>[mm]</i>	Poloměr kružnice vypočtené z datového vzorku metodou Chebyshev - inside
R_{CH_o}	<i>[mm]</i>	Poloměr kružnice vypočtené z datového vzorku metodou Chebyshev - outside
SD	<i>[mm]</i>	Sphere spacing error (Chyba rozteče koulí)
š	<i>[mm]</i>	Šířka rozvinuté plochy (délka oblouku) jednoho skenu v otvoru
x1o	<i>[mm]</i>	Délka oblouku
y2	<i>[mm]</i>	Maximální dosažitelná hloubka skenování
α'	<i>[°]</i>	Průmět úhlu kamer do půdorysné roviny

1 ÚVOD

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

S rostoucími nároky na rychlost měření a se zvyšující se tvarovou náročností výrobků se však v posledních letech stále více prosazují bezkontaktní systémy měření, nazývané také jako 3D skenery. V mnoha oblastech průmyslově vyspělého výrobního podniku se skenovací zařízení v kombinaci s kontrolním softwarem stávají hlavním nástrojem průmyslové inspekce, přestože jsou ve srovnání s příslušnými kontaktními systémy méně přesné [1]. Důvody lze také spatřovat ve vysokých požadavcích moderní výroby souvisejícími s automatizací měření a přechodem na Průmysl 4.0 [2]. V rámci této nové koncepce se měřicí a kontrolní technologie stále více používají jako řídicí nástroj přímo ve výrobě [3]. Lze očekávat, že v následujících letech zde budou CMM dále nahrazovány laserovými a optickými 3D skenery, bude více využíváno měření v těsné blízkosti výrobní linky nebo přímo v ní (např. robotické in-line měření) s cílem zvýšit flexibilitu a efektivitu, zkrátit čas výroby a zvýšit jakost výrobků.

Spolehlivost a přesnost bezkontaktních systémů je ovlivněna celou řadou faktorů. Hlavní roli mají především vlastnosti použitého 3D skeneru, jehož přesnost bývá deklarována tzv. Acceptance testy [4], [5]. Dalším faktorem je prostředí, ve kterém měříme, tedy teplota, vlhkost, osvětlení, prach atp. Velký vliv na přesnost měření má také úprava povrchu měřené součásti a v neposlední řadě i samotný postup při digitalizaci, systematické i náhodné chyby způsobené obsluhou. Existuje mnoho doporučení a postupů, které by měly být dodržovány. Bohužel praxe ukazuje, že pokud není možné zcela vyloučit lidský faktor, je třeba alespoň nastavit kontrolní mechanismy a vytvořit systém, který bude vysoce robustní, tedy u kterého výsledky měření budou co nejméně závislé na operátorovi.

1.1 Cíle a náplň práce

Autor předkládané habilitační práce se věnuje problematice měření s pomocí optických 3D skenerů téměř deset let. Nové poznatky systematicky předává v rámci pedagogického působení studentům během výuky nebo při vedení bakalářských a diplomových prací. Má praktické zkušenosti s přístroji mnoha výrobců, široce spolupracuje s průmyslovou sférou v rámci projektů a smluvního výzkumu. Teoretické poznatky a především praktické zkušenosti jsou promítnuty do obsahu této práce.

Její úvod je věnován současnému stavu poznání, tedy informacím o stavu oboru v oblasti bezkontaktní metrologie, a to především z pohledu výzkumu přesnosti snímání s využitím optických 3D skenerů.

Následuje teoretická část práce, která kromě nezbytného seznámení se základní terminologií přináší informace o praktickém využití 3D skenování. Pozornost je věnována základním principům snímání, stejně tak jako metodám transformace naskenovaných dat do jednotného globálního souřadného systému. Jsou vysvětleny a popsány základní matematické principy aktivní a pasivní triangulace, stereovidění či měření pomocí laserového paprsku, transformace s využitím měřicích ramen, tracker systémů nebo za použití referenčních bodů. Blíže jsou specifikovány skenery použité v práci - systémy ATOS II a ATOS Triple Scan.

Za hlavní a nejdůležitější pasáž teoretické části práce je považována kapitola pojednávající o jednotlivých faktorech, jež mohou mít vliv na rozměrovou přesnost měření. Je zdůrazněno, že přesnost celé inspekce s využitím bezkontaktních systémů je komplexní proces, skládající se z posloupnosti mnoha jednotlivých kroků, od volby systému, přes digitalizaci až po způsob SW vyhodnocení dat. Prvním krokem úspěšného měření je volba vhodného systému, jeho správné seřízení a kalibrace. Následuje proces digitalizace, jehož korektnost a stabilita výstupu je ovlivněna přípravou dílu pro měření, mnoha vnějšími podmínkami a nastavením procesních parametrů digitalizace, stejně tak jako zvolenou strategií a postupem při samotném snímání. Poslední oblastí celého řetězce inspekce je pak softwarové zpracování a vyhodnocení nasnímaných dat. Zde jsou na základě praktických zkušeností doporučeny vhodné postupy a je upozorněno na rizika spojená s neodbornými zásahy do polygonální sítě, ať už se jedná o nevhodnou editaci meshe nebo nesprávně zvolený výběr mraku bodů pro výpočet inspekčního elementu. Autor zde také vysvětluje, jaké jsou možnosti vyrovnání dílu v rámci souřadného systému nebo na nominální CAD model a jaké metody výpočtu lze při rozměrové resp. při GD&T inspekci volit s ohledem na kontrolu funkce výrobku nebo vyhodnocení spolehlivosti procesu výroby.

Praktická část habilitační práce úzce souvisí s těmito teoretickými informacemi. Shrnuje poznatky mnohaletého výzkumu a celkem v pěti kapitolách přináší výsledky praktických experimentů a zkoušek, které dokládají vliv různých faktorů na přesnost měření.

První dílčí část seznamuje s metodikou, kterou lze použít pro posouzení přesnosti digitalizace optických 3D skenerů. Věnuje se praktickému provedení tzv. akceptační zkoušky pro bezkontaktní 3D skenery ATOS - od návrhu a výroby vlastního zkušebního etalonu, přes stanovení jeho nominálních rozměrů až po digitalizaci a vyhodnocení.

Další kapitola je zaměřena na komplexní rozbor přesnosti digitalizace optickými 3D skenery a na podrobné zmapování schopnosti skenerů zachytit drobné prvky. Cílem bylo posoudit, s jakou přesností dokáží skenovací systémy pracovat v běžných podmínkách, tedy v jiném než laboratorním prostředí, při snímání realistických ploch různých tvarů a velikostí, tedy složitějších geometrií než obsahuje etalon určený pro Acceptance test. Pro účely této analýzy byl navržen a vyroben vlastní model pro měření, který obsahoval prvky různých tvarů a velikostí. Nominální rozměry modelu byly stanoveny proměřením na souřadnicovém měřicím stroji a takto zjištěné skutečné rozměry byly porovnány s výsledky získanými optickou digitalizací 3D skenerem ATOS. Na základě rozboru výsledků byly sestaveny diagramy přesnosti měření skeneru dle zkoumaných hledisek, např. v závislosti na tvaru měřeného prvku či jeho nominální velikosti. Nedílnou součástí výzkumu bylo též určení schopnosti 3D skeneru zachytit detailní prvky na měřené součásti a stanovení limitů skenování pro jednotlivé měřicí objemy.

Jak již bylo řečeno, optická 3D digitalizace je v posledních letech využívána stále častěji k rozměrové a tvarové kontrole dílů. Skenovány jsou rozličné výrobky z různých materiálů - kovové,

plastové, kompozitní nebo speciální materiály, využívané 3D tiskárnami. Povrch pak může mít různou barvu, drsnost, je lesklý nebo matný. Praxe naznačuje, že právě povrchové vlastnosti skenovaného dílu mohou významným způsobem ovlivnit schopnost díl oskenovat a kvalitu získaného 3D modelu. Další část seznamuje s výzkumem, jehož cílem a motivací bylo posoudit vliv různých materiálů obrobku na přesnost optické bezkontaktní 3D digitalizace. Pro tyto účely byly vyrobeny téměř tři desítky vzorků z různých materiálů, barev a povrchů. Skenování bylo prováděno pomocí generačně různých optických 3D skenerů - Atos II a Atos III Triple Scan. Data získaná digitalizací byla posuzována na základě procenta naskenovaného povrchu a z pohledu rozměrových charakteristik celkem pěti různých rozměrů. Byly porovnány výsledky zjištěné při skenování vzorků bez a s použitím antireflexního nástřiku. Výzkum prokázal skutečnost, že některé materiály, především používané při aditivní výrobě, jsou sice zdánlivě dobře skenovatelné, ale rozměrové hodnoty jsou zkreslené.

Pro zlepšení optických povrchových vlastností je před 3D skenováním často nutné nanést na povrch měřené součásti slabou vrstvu speciálního antireflexního materiálu. Ke zmatnění povrchu existuje mnoho přípravků, které se liší svým složením a způsobem aplikace. Důležité je znát, jak matnicí nástřiky ovlivní kvalitu a přesnost digitalizace, tedy jaká je struktura povlaku a její tloušťka. Ta se může v závislosti na použitém přípravku značně lišit. Této problematice je věnována další část experimentů. Jejich cílem byl výzkum celkem sedmi matnicích nástřiků využívaných v běžné praxi. Měření probíhalo na válcových a kulových etalonech pomocí optického 3D skeneru ATOS a pomocí elektronového mikroskopu. Analýzou bylo zjištěno, jak jsou ovlivněny rozměrové charakteristiky součásti v závislosti na druhu použitého přípravku a ve vazbě na materiál měřeného objektu. Bylo zjištěno, že tloušťka nástřiku se dle použitého přípravku pohybuje v řádu jednotek až stovek μm . Výzkum také sledoval, jak snadno lze následně přípravek ze součásti očistit.

Kvalita naskenovaných dat může být ale ovlivněna i mnohými dalšími faktory. Obecně se přesnost digitalizace optických 3D skenerů ATOS posuzuje pomocí acceptance testů v souladu s normou VDI / VDE 2634. Při této ověřovací zkoušce by měly být všechny proměnné a okolní podmínky měření téměř ideální. V běžné praxi tomu tak vždy není, proto byla pozornost zaměřena i na výzkum toho, jak vnější vlivy a parametry procesu digitalizace mohou ovlivnit rozměrovou a tvarovou přesnost optického 3D měření. Posuzovanými aspekty byly např. kalibrace, expozice, počet snímků, úhel skenování nebo kvalita použitých referenčních bodů. Měření opět probíhalo na optickém 3D skeneru ATOS od firmy GOM a k analýze byly použity kulové a válcové kalibrační artefakty. Bylo zjištěno, že největší vliv na kvalitu a přesnost naskenovaných dat má především použití nekvalitních referenčních bodů. Obsluha by též měla věnovat dostatečnou pozornost kalibraci a zahřátí skeneru na provozní teplotu před vlastním měřením.

Poznámka: Výzkumy uvedené v praktické části této publikace byly realizovány (a dílčím způsobem publikovány) v průběhu několika let a z důvodu komplexnosti problematiky a obsahové náročnosti jsou přinášeny vždy nejdůležitější poznatky a výstupy z jednotlivých fází experimentů. Z důvodu dynamického vývoje v této oblasti nejsou z dnešního pohledu všechna měření provedena na posledních generacích systémů dostupných na trhu. Nicméně systémy použité v práci jsou dnes v praxi stále často používány, resp. modely, které tyto systémy postupně nahrazují, měří mnohdy sice rychleji nebo mění svůj design, ale z hlediska principu nedochází k zásadním změnám. Práce má především poukázat na správné postupy při skenování a vyhodnocení dat, a to nejen teoreticky, ale především daná tvrzení doložit experimentálně. Na výsledky je třeba pohlížet ne jen z pohledu konkrétních čísel (která budou vždy systém od systému, model od modelu různá), ale zejména z hlediska správné metodiky při měření.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Kontrola přesnosti výroby patří bezesporu mezi jednu z hlavních odvětví v každém výrobním podniku. Bez zpětné vazby a informací o kvalitě výrobků by v zásadě nemohl fungovat žádný výrobní proces. Měření rozměrů a tolerancí tvaru a polohy (tzv. GD&T) probíhalo v minulosti konvenčními metodami, buď ručním způsobem pomocí speciálních jednoúčelových měřidel (posuvné měřítko, mikrometr, kalibr apod.), nebo v průmyslové praxi častěji komplexním automatickým měřením na tzv. souřadnicových měřicích strojích (SMS, nebo z angličtiny CMM). Jejich princip spočívá v měření souřadnic diskrétních bodů na zvoleném povrchu pomocí kontaktní měřicí sondy. V případě kontroly rozměrových charakteristik geometrických primitiv je postup takový, že nejprve dochází ke snímání předepsaného počtu bodů ve vhodných místech daného elementu a následném automatickém výpočtu geometrických charakteristik z těchto změřených bodů. Proces kontroly je tedy de facto ve většině případů redukován na měření a porovnání předepsaných rozměrových kót či tolerancí tvaru a polohy dle výkresu. Přestože dodnes přináší měření touto metodou jedny z nejpřesnějších výsledků (v řádu mikrometrů), není možné ho vždy účelně použít. Jedním z potenciálních úskalí může být kontrola obecných ploch nebo tvarově složitých povrchů, u kterých narážíme na omezující faktor principu, jakým jsou souřadnice bodů těmito přístroji měřeny. Pro přesný a detailní popis geometrie složitější obecné plochy je vyžadováno sejmut na jejím povrchu hustou sítí bodů, což je díky fyzickému kontaktu v každém měřeném bodě časově velice náročné. Novější měřicí stroje a jejich sondy sice již dokáží snímat body i v tzv. skenovacím režimu, kdy sonda se pohybuje v neustálém kontaktu po dle a body jsou tak měřeny s vyšší hustotou. Pro změření 3D plochy ale i tento přístup znamená provést snímání v mnoha řádcích a tedy časovou náročnost takového procesu. U obecných ploch může nastat i problém s korekcí průměru kuličky. To se ukazuje jako limitující především z důvodu rostoucí tvarové složitosti výrobků (nároků na design) a tlaku na růst produktivity. Dalším omezujícím faktorem kontaktního měření je obtížné snímání bodů na poddajných dílech, kdy mechanické působení kontaktní sondy může způsobit deformace dílu a následné zkreslení výsledků kontrolního procesu [6].

Nejen z těchto důvodů jsou dnes v průmyslu konvenční metody měření mnohdy doplňovány a často i zcela nahrazovány novými metodami - speciálními bezkontaktními měřicími systémy, nazývanými jako 3D skenery. Ty lze dle principu, na jakém pracují, dělit na optické, laserové, rentgenové či ultrazvukové. 3D skenery dokáží nasnímat fyzický objekt a jeho reálný tvar převést do podoby počítačového trojdimenzionálního modelu. Kontrolovaný díl tedy neměříme přímo, ale výrobek je nejprve zdigitalizován a vlastní inspekce rozměrové a tvarové přesnosti je realizována až na takto získaném virtuálním modelu. Oproti klasickým dotykovým způsobům poskytuje bezkontaktní digitalizace několik zásadních výhod, jako je např. rychlé měření i tvarově složitých dílů, poskytuje vysokou hustotu dat a zejména, výsledky měření nejsou ovlivněny tuhostí kontrolovaného obrobku. Díky úplnému popisu kontrolované součásti umožňuje provádět komplexní a názorné analýzy a v mnoha případech přináší rychlejší a objektivnější výsledky. Na druhou stranu má tato metoda i své nevýhody, které se týkají např. problémové digitalizace určitých povrchů (průhledné, lesklé, černé) nebo komplikovaného skenování detailních prvků (hluboké otvory, opticky nepřístupná místa, malé elementy, ostré hrany ap.) [6].

Ne zcela jednoznačně je deklarovaná přesnost těchto způsobů měření. V současné době v podstatě neexistují striktně stanovené specifikace nejistoty měření pro optické 3D skenery, jejich přesnost není často jednoznačně kvantifikovatelná a na úrovni národních či mezinárodních norem prakticky neexistují

předpisy, které by bylo možné na tyto systémy aplikovat. Tento nedostatek zmiňuje i mnoho studií a vědeckých článků, např. [7], [8], [9], [10]. Nejbližším dostupným použitelným doporučením je skupina směrnic VDI/VDE 2634 [2]. Využívají se různé přejímací (tzv. acceptance) testy, které z těchto směrnic vychází [6]. Výrobci 3D skenerů vyvinuli vlastní standardy a přesnost svých zařízení ověřují ve speciálních metrologických laboratořích (akreditovaných např. dle normy ISO 17025, jež specifikuje požadavky na kompetenci, nestrannost a činnost laboratoře) na etalonech ideálních tvarů, jako jsou např. soustavy velmi přesných koulí – viz kalibrační etalon pro realizaci tzv. Acceptance testu (Obr. 2.1) pro optické skenery firmy GOM. Bohužel při použití skeneru v běžném provozu zřídka dosáhneme takto zjištěných hodnot přesností, zejména z důvodů rušení a měnících se podmínek okolí.



Obr. 2.1 Kalibrační etalon GOM pro tzv. acceptance test

Lepší situace je u tzv. trekovacích systémů, které se v některých případech používají pro polohování skeneru v globálním souřadném systému (blíže bude tato problematika vysvětlena v kap. 3.2.2.2). Certifikovaná kalibrace trekovacích systémů může být realizována např. dle normy ASME B89.4.22 (Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Co-ordinate Measurement Machines - americký standard, specificky určený pro hodnocení AACMM), VDI/VDE 2617-9 (Acceptance and Reverification for Articulated Arm Co-ordinate Measurement Machines - německá norma rozšiřující používání dobře známých standardů pro ověřování CMM (ISO 10360-2) na tyto typy přístrojů), či ISO 10360-2 (specifikuje akceptační zkoušky pro ověření výkonnosti CMM použitého pro měření rozměrů – norma je primárně určena na zkoušky kartézských CMM s dotykovou sondou, též umožňuje použité metody k ověření nekarteziánských CMM na základě dohody).

2.1 Přehled souvisejících publikací

Související dostupné výzkumné práce se vesměs věnují několika základním tématům. Jednak jde o publikace zaměřující se na popis systémů, vysvětlují základní principy nebo využití 3D skenerů pro speciální aplikace (medicína, stomatologie, archeologie, design). Druhá početná skupina výzkumníků se soustředí na verifikaci samotné přesnosti systémů bezkontaktního skenování, ať už v porovnání s kontaktními způsoby měření, nebo sleduje různé vlivy na přesnost (antireflexní nástríky, procesní parametry apod.). Další výzkumy se pak zaměřují např. na samotný vývoj nových nebo inovovaných aplikací, systémů, počítačové zpracování dat atp.

Tematicky tedy můžeme dostupné publikace klasifikovat dle několika okruhů:

2.1.1 Se zaměřením na základní principy, použití systémů

Do první skupiny lze zařadit nespočet především starších publikací, které se často věnovaly problematice bezkontaktní digitalizace z pohledu kategorizace systémů, přibližovaly základní principy fungování 3D skenování, nebo nalézaly nejrozsáhlejší oblasti a obory pro využití.

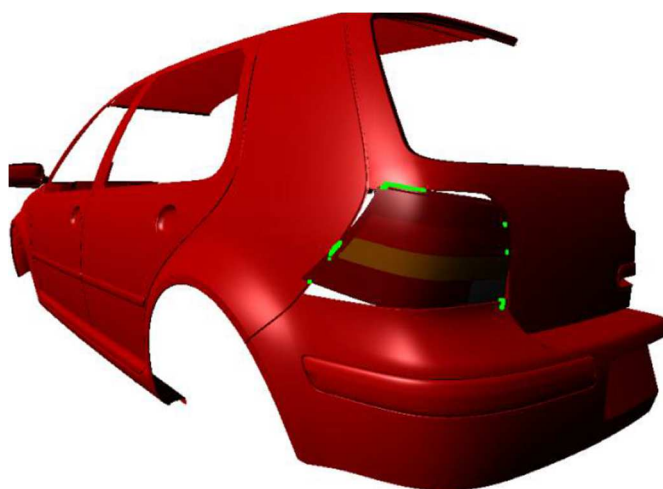
Jednou ze zajímavých knih, která se věnuje robotickému vidění, je publikace kolektivu autorů [11] (2008). Z pohledu této habilitační práce je zajímavá především její druhá kapitola, která se zaměřuje na senzory pro rozpoznávání obrazu. Jsou zde představeny základní principy měření a metody rekonstrukce 3D scény pro aktivní vizuální snímání. Je také popsána myšlenka na rekonfiguraci a rekaliibraci senzoru, která dává přístroji schopnost aktivně měnit jeho snímací parametry podle reálné scény, cíle a účelu.

Rešeršní článek s názvem „*Fringe Projection Techniques: Whither we are?*“ publikoval Gorthi a Rastogi [12] (2010). Je v něm podrobně zmapována problematika proužkové projekce pro generování informace o 3D tvaru objektu. Věnuje se principům, technikám i aplikacím. Šíří záběru této práce dokládá celkem 188 citovaných zdrojů.

Další ucelenou publikací věnují se komplexně problematice rekonstrukce 3D ploch je kniha kolektivu autorů [13] (2013). První kapitola přináší základní informace pro pochopení užitečnosti 3D modelů a způsobu jejich výpočtu z fyzického objektu. Odpovídá např. na otázky jako: Co je to 3D model? Kdy a proč se používá? Jak je vytvářen? Dále jsou představeny techniky, na nichž jsou 3D skenery založeny. Je uvedeno srovnání z hlediska přesnosti, rychlosti a použitelnosti, pro pochopení výhod a nevýhod různých přístupů. Další části knihy se věnují přehledu a popisu metod povrchové a objemové rekonstrukce, jsou představeny nejpoužívanější techniky, spolu s diskuzí o jejich kladech a záporech. Poslední části podrobně pojednávají o vývoji dvou vybraných metod, v doslovném překladu „Síť hierarchické radiální základny“ a „Hierarchická podpora vektorové regrese“.

Obsáhlá je i kniha editovaná Zhang Songem [14] (2013). V jednotlivých kapitolách jsou podrobně vysvětleny základní techniky a principy 3D strojového vidění - jmenovitě např. stereo vidění, 3D dynamické měření tvaru pomocí mřížkové projekční techniky, interferometrie, 3D profilometrie s digitální proužkovou projekcí a technikami fázového posunu, techniky založené na době letu paprsku (ToF), 3D ultrazvukové sensory, optická tomografie a mnoho dalších méně známých metod. Kniha je doplněna řadou ilustrací, které napomáhají snazšímu pochopení jednotlivých principů. Ve stejné edici vyšla i kniha od Kevina Hardinga [15] (2013) zaměřená na optickou rozměrovou metrologii. Je členěna na kapitoly pojednávající o měření velkých, středních, malých a mikroskopických objektů. Opět jsou podrobně popsány techniky pro laserové trekovací systémy, principy triangulace, interferometrie, systémy využívající fázový posun nebo „moiré“ metody.

Velmi obsáhlý přehled možností využití 3D skenování včetně mnoha praktických příkladů a konkrétních ukázek lze nalézt v učebnici od autora Navrátila [16] (2013). V knize jsou popsány oblasti technických oborů, jako např. kontrola kvality výroby, úprava lisovacích nástrojů, využití pro polotovary před obráběním, důvody skenování automobilu, kontrola virtuálních sestav dílů (viz Obr. 2.2); dále oblast designu a kultury - jako archivace designových konceptů, ochrana historických památek, virtuální muzea; ale i mnoho dalších odvětví - včetně grafického a počítačového průmyslu, kriminalistiky, zdravotnictví (dentální aplikace, estetická a plastická chirurgie, ortopedie a protetika) nebo ekonomie. Kniha též přináší základní pohled na jednotlivé metody 3D skenování.



Obr. 2.2 Virtuální sestava fyzických naskenovaných dílů automobilu [16]

Příspěvek autora Breuckmanna [17] (2014) poskytuje přehled historie 3D skenovacích technologií a podrobněji rozebírá stav techniky 3D skenerů, včetně jejich limitů a omezení. Poukazuje na význam ověřovacích a akceptačních testů pro kvalitu dat 3D skenerů s vysokým rozlišením, a to nejen pro průmyslovou metrologii, ale také pro většinu aplikací v uměleckém a kulturním odvětví. V závěru se věnuje očekávanému budoucímu vývoji.

Do kategorie prací, které se primárně orientují na problematiku základních principů a klasifikace systémů můžeme zařadit i mnoho akademických děl, jako např. publikaci T. Chrena [18] (2008). Tento autor se ve své práci zabývá optickými skenery používanými v reverzním inženýrství. Přináší ucelený přehled systémů, jejich rozdělení podle různých hledisek a zaměřuje se na možnosti využití 3D skenerů. Velmi podobná práce uvádějící přehled optických a laserových skenerů pro průmyslovou praxi, metody a využití systémů je práce autora Weidnera [19] (2015). Podrobné zmapování fotogrammetrických technik můžeme nalézt také např. v práci autora Svatého [20] (2012). Autor rozděluje systémy dle různých hledisek, jako např. dle snímkové konfigurace, dle polohy při snímání nebo dle způsobu získávání snímků. Práce vysvětluje principy této metody a mapuje historický vývoj. Nechybí ani charakteristika přístrojů a metod, používaných pro vyhodnocování fotogrammetrických snímků a popis chyb, které mohou ovlivňovat samotné měření.

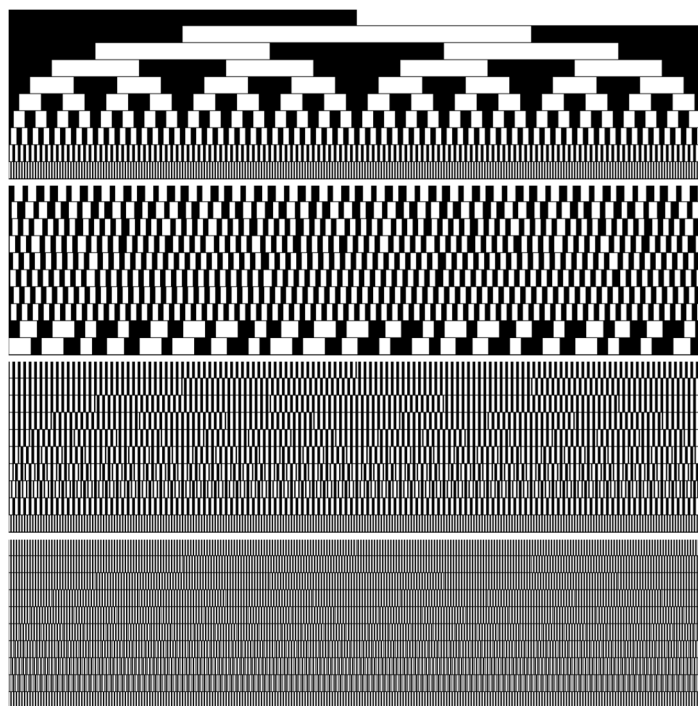
2.1.2 Se zaměřením na projekci světla, kódování

Z hlediska funkce 3D skeneru a principu výpočtu souřadnic bodů v prostoru je důležitá otázka kódování, filtrování a zpracování promítaného strukturovaného světla. Existuje mnoho druhů a kombinací vzorů strukturovaného světla (obecně metoda temporální, prostorová, přímá). Každá metoda má jinou robustnost, spolehlivost, přesnost a vhodnost použití pro různé druhy povrchů (průsvitné, reflexní, tmavé). Přehledu jednotlivých metod se podrobně věnuje např. autor Salvi ve svých publikacích [21] (2004), [22] (2010).

Článek autora Gupty [23] (2011) se zaměřuje na analýzu chyb způsobených nepřímým, tzv. globálním osvětlením, tedy osvětlením, které je způsobeno rozptylem nebo odrazem světla na povrchu součásti. Na základě analýzy navrhuje speciální strukturované světelné vzorce, které jsou odolné vůči jednotlivým globálním světelným efektům pomocí jednoduchých logických operací a nástrojů z

kombinatorické matematiky. Použité techniky nevyžadují explicitní oddělení přímých a globálních složek jasu scény, a proto pracují i v případech, kde separace selže nebo přímá složka je příliš nízká. Metody mohou být snadno začleněny do stávajících skenovacích systémů bez významného zatížení z hlediska doby zachycení nebo hardwaru.

Na nepřímé efekty osvětlení jako je mnohonásobný odraz a povrchový rozptyl, které vážně zhoršují výkon 3D skenování s využitím strukturovaného světla se Gupta se svým týmem zaměřuje i v dalším výzkumu [24] (2012). Analyzuje chyby ve strukturovaném světle, způsobené jak dlouhým (odraz) tak krátkým dosahem (podpovrchový rozptyl) nepřímého osvětlení. Poukazuje, že chyby závisí na frekvenci promítaných vzorů a povaze nepřímého osvětlení. Účinky s dlouhým dosahem způsobují chyby dekódování u nízkofrekvenčních vzorů (široké pruhy), zatímco účinky krátkého dosahu ovlivňují vysokofrekvenční modely (úzké pruhy), (viz Obr. 2.3). Na základě této analýzy byl představen praktický 3D skenovací systém, který díky kombinaci několika vzorů funguje v přítomnosti širokého spektra nepřímého osvětlení.



Obr. 2.3 Příklad různých schémat binárního kódování (standardní Grayův kód - nízkofrekvenční, Maximum Min-SW grayův kód - nízkofrekvenční, logický XOR-04 kód - vysokofrekvenční, logický XOR-02 kód - vysokofrekvenční) [24]

Práci věnující se tématu dekódování snímků publikoval také Ďuriš [25] (2016). Jeho cílem bylo navrhnout program v software Matlab, který by dokázal načtením a zpracováním série snímků vytvořit 3D obraz skenovaného povrchu. Použitá metoda vycházela z principu dekódování vzoru s proužkovou projekcí. V první části práce je uveden ucelený přehled principů měření metodou strukturovaného světla, strategií kódování informací do světelných obrazců, se zaměřením na metody fázového posunu (phase shifting). Práce je ojedinělá v tom, že cílem je analýza a rekonstrukce procesů probíhajících při měření profesionálním systémem ATOS Triple Scan. Každý výrobce se snaží zveřejňovat co nejméně detailů o vnitřní struktuře svého SW pro zpracování dat, proto měl autor při řešení k dispozici pouze omezená data a informace. Nejdůležitější pro rekonstrukci programu jsou samotné snímky z kamer. Ty

jsou všechny plně dostupné jak z měření, tak i z kalibrace systému. Autor uvádí, že skener ATOS III Triple Scan získává při měření povrchu následující obrazy z kamer:

- Povrch neosvětlený projektorem.
- Plně osvětlená scéna před a po promítání obrazců.
- Čtyři obrazy fázově posunutých vodorovných proužků.
- Čtyři fázově posunuté obrazy s vertikálními proužky pro každou ze čtyř vlnových délek.

V práci je dále popsán celý postup tvorby programu a jeho fungování. V závěru jsou výsledky navrženého programu srovnány s výstupy originálního software skeneru ATOS Triple Scan. Tím je verifikována přesnost a korektnost navrženého programu. Bohužel se ukázalo, že bez bližších informací o geometrii a dalších parametrech měřicího systému není možné navrhnout stabilní výpočetní model. Odchyłky navrženého řešení se tak při porovnání s výstupy profesionálního systému pohybovaly až okolo 1 mm.

Výzkumem této problematiky se ve své práci zabývá také Romanovský [26] (2017), resp. Bátorla [27] (2019). Prvně jmenovaný autor v rámci své práce navrhl a realizoval 3D skener pro výukové účely, pracující na principu projekce strukturovaného světla. Díky použité platformě a ovládacímu softwaru vytvořenému v prostředí Matlab je tento systém otevřený a vhodný pro demonstraci principů pro výukové účely. Druhý autor v rámci své práce navrhl a realizoval 3D skener umožňující implementaci nových promítaných vzorů, za účelem minimalizace náhodných chyb při skenování problematických povrchů. Jeho práce se věnuje návrhu HW částí systému pro skenování, výpočtům a výběru vhodných komponent. SW část zahrnuje desítky skriptů naprogramovaných v SW Matlab, které komplexně řeší celý proces skenování - od generování sekvencí různých vzorů, pozicování HW, promítání a snímání obrazu, dekodování a filtrování dat, až po triangulaci. Navržený systém je funkční, otevřený, snadno rozšiřitelný. Zařízení je schopné využívat celkem 6 kodifikačních metod. Autor poukazuje, že navržený systém je díky implementovaným metodám schopný eliminovat náhodné chyby vznikající při skenování problematických povrchů.

Další práce věnující se výzkumu vlivu použitého vzoru na odolnost proti odleskům a rozptylu světla, novým strukturovaným i nestrukturovaným vzorům, polarizaci strukturovaného světla, dynamické projekci nebo aplikaci snímků s vysokým dynamickým rozsahem (HDR) se věnuje mnoho dalších odborných publikací. Např. Zhang [28] (2016) využívá pro potlačení odlesků vysokofrekvenční vzory. Ty pro dosažení vysokého pixelového rozlišení kombinuje s nízkofrekvenčním kódem. Promítáním vysokofrekvenčního vzoru přerušovaných čar a jejich postupným fázovým posuvem řeší problém podpovrchového rozptylu světla Kobayashi [29] (2015). Kombinací dvou snímků posunutých o půl periody dokáže eliminovat paprsky rozptýlené pod povrchem a získává pouze signál odražený od objektu. Huang [30], [31] (2017) se zabývá vlivem okolního osvětlení na kvalitu skenování. K tomuto účelu navrhuje použít kódování ne pomocí intenzity, ale s využitím polarizace světla. Dynamické projekci, která adaptivně upravuje promítané vzory na základě zpětné vazby o světelných podmínkách scény, se věnují např. práce autora Chiba [32] (2017) nebo Sheng [33] (2017). Projekci s vysokým dynamickým rozsahem (tzv. HDR) pro skenování lesklých objektů se ve svém výzkumu věnuje Zhao [34] (2014) nebo Rao [35] (2018).

2.1.3 Se zaměřením na přesnost, kalibraci, vnější faktory

Další početnou skupinou publikací, které lze v dostupné literatuře nalézt, jsou experimentální práce, jejichž společným znakem je praktický výzkum přesnosti snímání. Do této kategorie lze zařadit i práce, které se soustředí na faktory mající vliv na stabilitu a správnost snímání, potažmo následující inspekci.

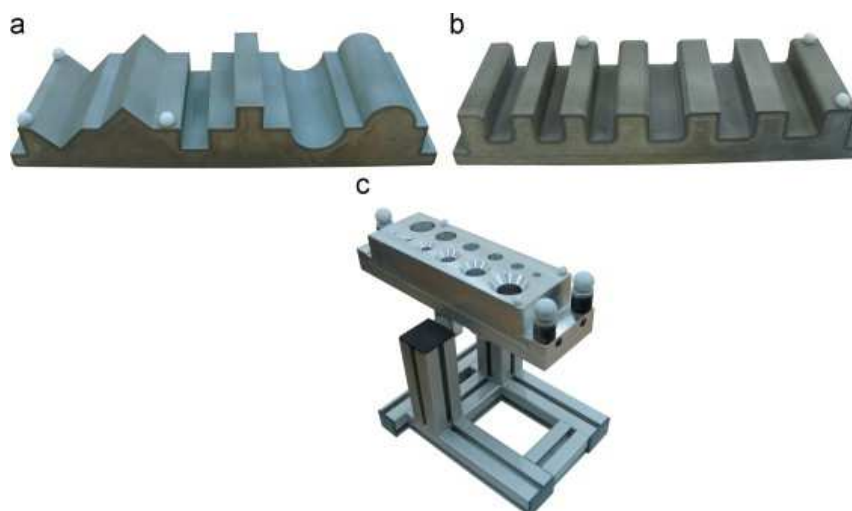
Jeden ze starších výzkumů věnujících se analýze systematických a náhodných chyb při digitalizaci laserovým skenovacím systémem je zpracován Fengem [36] (2001). Autor ve své práci zdůrazňuje, že laserový skener je elektrooptické zařízení pracující na principu optické triangulace, a z tohoto důvodu je přesnost měření ovlivněna geometrií měřené součásti a její polohou ve skenovacím okně. Vliv hloubky skenování a promítaného úhlu nejsou u komerčních skenerů ve standardním kalibračním procesu brány v úvahu a byly v této práci experimentálně identifikovány. Výsledky ukázaly, že náhodná chyba skenovaných dat se blíží jmenovité hodnotě poskytnuté výrobcem. Systematická chyba laserově skenovaných dat má maximální hodnotu asi 160 μm a vykazuje relativně velkou variabilitu s hloubkou skenování a promítaným úhlem. V této práci byl dále vytvořen kvadratický empirický model, který je schopen predikovat systematické chyby s odchylkou menší než 25 μm . Model lze použít pro plánování tras skenování nebo pro zvýšení přesnosti digitalizace pomocí kompenzace. Bylo prokázáno, že přesnost kontroly standardní koule lze takto zlepšit o více než 50%.

Výzkumu přesnosti skenování laserových skenerů se věnoval také Boehler [37] (2003). Celkem testoval a porovnával výstupy 10 skenerů od různých výrobců, přičemž se zaměřil na problematiku vlivu povrchové odrazivosti, sledoval rozlišení a přesnost systémů či efekt vzniku chyb na hranách. Pro jednotlivé testy použil několik různých objektů (koule, sady koulí, terčíky, desky apod.). Výsledkem experimentů je mnoho zajímavých informací, jako např. hodnota šumu pro různé povrchy, směrodatné odchylky měření jak v horizontálním, tak vertikálním směru, vyhodnocení kvality skenování hran, chyby při skenování různých materiálů ve srovnání s bílým povrchem. V závěru publikace jsou shrnuty nejdůležitější výhody a nevýhody jednotlivých testovaných systémů.

Další z testů na téma chyb měření uskutečnil Keller [38],[39] (2003), který se pokoušel pomocí bezkontaktního měření stanovit rovinné rozměry strojních součástí. Důraz kladl na analýzu vzniku jednotlivých chyb tohoto způsobu měření a následnou možnost jejich potlačení na minimum.

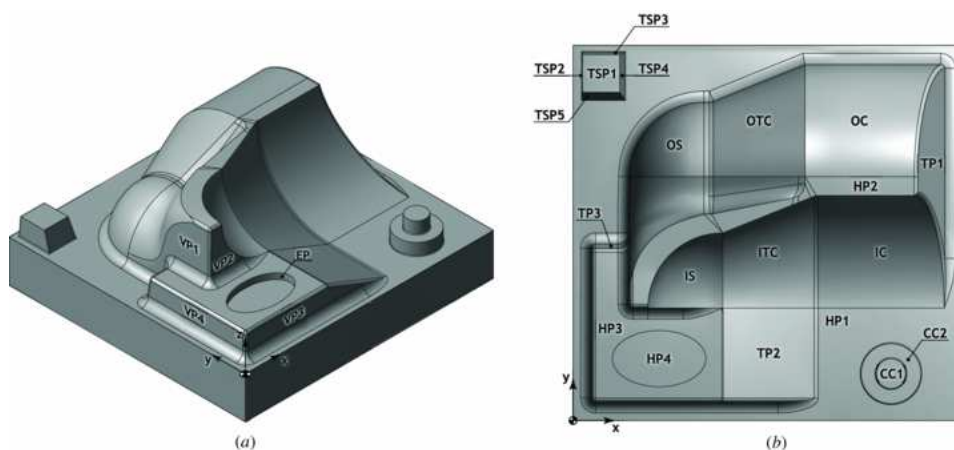
Výzkumu 3D skenovacích systémů pro metrologické aplikace se věnují dva zajímavé články kolektivu autorů pod vedením Martínesa [7] a [40] (2010). Autor vysvětluje, že navzdory mnoha výhodám bezkontaktních skenovacích systémů (snížení výrobních nákladů v důsledku zkrácení doby kontroly, získání velkého množství dat apod.) existují ve srovnání s tradičními inspekčními dotykovými systémy i specifická negativa, jako je nedefinovaná a nestandardizovaná přesnost. Cílem výzkumu proto bylo analyzovat použitelnost skenovacích systémů pro měření a kontrolu tolerancí. Navržená metodika zahrnuje srovnání dvou skenovacích technologií, laserového skenování (skenovací hlava METRIS LC-50) a kontaktního skenování (dotyková sonda TP20 RENISHAW s průměrem kuličky 2 mm a délkou 40 mm), (oba namontované na souřadnicovém měřicím stroji), přičemž měření kontaktní měřicí soudnou je považováno za referenční. Bylo navrženo několik zkušebních modelů, které zahrnují různé standardní geometrické tvary (roviny, koule, válce, otvory (vnější a vnitřní) a kuželové povrchy), (viz Obr. 2.4). Kromě výzkumu přesnosti systémů byl studován také vliv CAD softwarů používaných pro rekonstrukci povrchu (Catia V5R18, Geomagic Studio V9). Pro porovnání rekonstruovaných povrchů byl použit inspekční SW Geomagic Qualify V8. Z pohledu použitého programu pro rekonstrukci základní geometrie byl určen jako výhodnější SW CATIA. Dále z článku vyplývá, že při použití

laserového skeneru lze za předpokladu skenování v kolmém směru vůči skenovanému povrchu dosáhnout relativně dobré přesnosti s maximálními odchylkami okolo 15 – 20 μm .



Obr. 2.4 Zkušební modely použité při zkouškách přesnosti laserového skeneru [40]

Podobnému tématu se věnuje výzkum v [9] (2010). V příspěvku je poukazováno na fakt, že díky zvýšení přesnosti a opakovatelnosti jsou 3D optické skenery stále častěji využívány nejen pro oblast reverzního inženýrství, ale také pro kontrolu kvality, a že jsou vhodnou alternativou k souřadnicovým měřicím strojům (CMM). Je též zmiňována německá směrnice VDI / VDE 2634 jako jediný možný referenční materiál k posouzení, zda 3D optické měřicí systémy odpovídají deklarovaným nebo požadovaným výkonovým specifikacím. Přesto je dle autora obtížné porovnat různé skenery v souladu s touto směrnicí. V článku proto nabízí adekvátní nový standard. Se zaměřením na kontrolu výrobních nástrojů (forem) navrhl s využitím běžných geometrických prvků a ploch volného tvaru inovativní zkušební díl (viz Obr. 2.5). Celková absolutní odchylka mračna bodů získaná skenerem byla v souladu s přesností optického zařízení (0,02 mm) deklarované výrobcem. Tento závěr potvrdily také výsledky srovnávacích testů klasických geometrií.



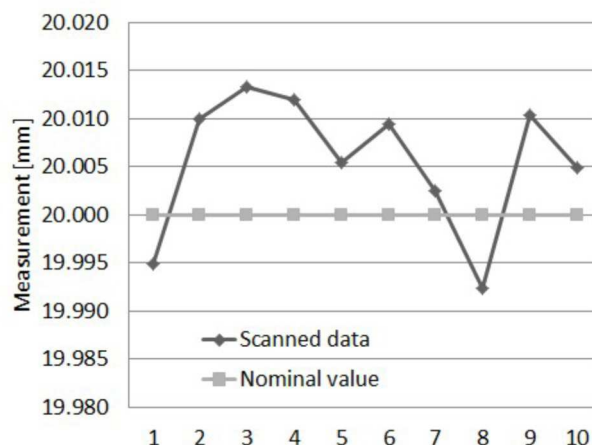
Obr. 2.5 Referenční CAD model (a) a seznam referenčních prvků (b) [9]

Vukašinović a kol. [41] (2010) ve své práci zkoumali vliv úhlu dopadu, barvy objektu a vzdálenosti měření na počítačem řízený laserový skenovací proces. Pro určení fyzikálního pozadí těchto vlivů byla analyzována činnost triangulačního senzoru, odraz povrchu a barevné vlastnosti měřeného objektu. Článek shrnuje několik pokynů, které by měly být dodrženy, aby se dosáhlo lepších výsledků měření především s ohledem na získaný detail a množství šumu. Konkrétně se jedná o tato obecná doporučení a pokyny:

- Povrch by měl mít jednotnou barvu a měl by být velmi reflexní v rozsahu spektra použitého laserového světla.
- Je upřednostňován difuzní odraz, v případě nanášení antireflexního nástríku je nutné zvážit tloušťku nanesené vrstvy.
- Měřicí senzor by měl být co nejbližší objektu - krátké vzdálenosti vedou k tenčímu profilu laserového paprsku a k získání lepších detailů.
- Při měření zakřivených povrchů by trajektorie pohybu měla sledovat geometrii povrchu, aby byla dodržena konstantní vzdálenost mezi senzorem a měřeným povrchem.
- K získání přesného profilu laserového paprsku, resp. nízké hladiny šumu jsou nutné vysoké vzorkovací frekvence.
- Měření by měla být prováděna s minimálním možným výkonem laseru a vhodně zvolenou prahovou hodnotou.

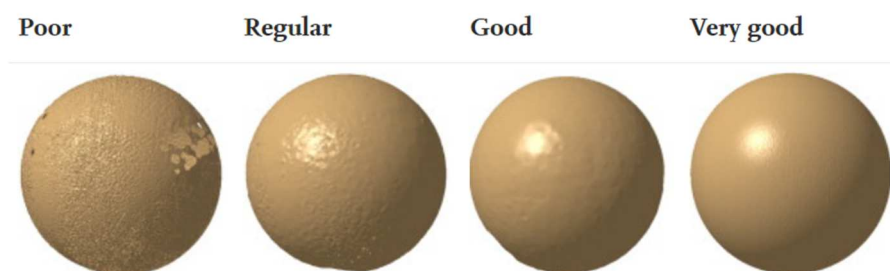
Podrobnému tématu - vlivu povrchové topologie na přesnost snímání laserového triangulačního skeneru se Vukašinović věnoval i ve své další publikaci [42] (2010). V ní se zaměřil na dva z jeho podhledu nejdůležitější parametry v interakci mezi topologií povrchu a procesem skenování, jmenovitě na vzdálenost (mezi skenerem a povrchem) a úhel skenování. Ostatní parametry jako mikrostruktura, barva povrchu a optické nastavení zůstaly během tohoto experimentu neměnné. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při malých vzdálenostech mezi senzorem a měřeným povrchem. Úhel měl na chybu mírně klesající vliv až do úhlu 55° , s jeho dalším zvětšováním ale již odchylka dramaticky narůstala. Pro dosažení nejlepší přesnosti je proto doporučeno použít co možná nejmenší skenovací vzdálenosti a úhly do 55 stupňů. V článku je dále vyvinut model pro predikci chyb na základě zmíněných vlivných faktorů.

Vědecký tým T. Brajlíha [8] (2011) provedl výzkum možnosti použití 3D skenování pro inspekci obrobků. Dosažení rozměrové přesnosti optického skeneru ATOS II bylo testováno na řadě koncových měrek opatřených antireflexním nástríkem na bázi titanového prášku (TiO_2). Z řady deseti měření byla určena směrodatná odchylka $7,1 \mu\text{m}$ (pro koncovou měrku o jmenovité délce $l = 20 \text{ mm}$), resp. $5,9 \mu\text{m}$ (pro $l = 50 \text{ mm}$) a $11,2 \mu\text{m}$ (pro $l = 70 \text{ mm}$). Standartní nejistota měření byla stanovena v mezích $12 \mu\text{m}$ v celém rozsahu měření, rozšířená nejistota na úrovni spolehlivosti 95% na $25 \mu\text{m}$. Další test byl proveden s ocelovou koulí, kdy v rámci 5 měření byly porovnány výsledky ze skenování s měřením na CMM. V tomto případě byly odchylky od nominálních (CMM) dat mnohem nižší, což autor odůvodňuje eliminací následné chyby sestavy skenování během „post-processingu“ skenovaných dat. Rozšířená nejistota měření pro $k = 2$ byla v tomto případě pouze $5 \mu\text{m}$.



Obr. 2.6 Výsledek skenování 20 mm dlouhé koncové měrky [8]

Podrobné srovnání několika skenovacích systémů (jmenovitě laserový skener K-Scan s trackerem, ruční laserový skener HandyScan Exascan, laserový skener Metris na CMM Brown & Sharpe Ventoa, skener s proužkovou projekcí ATOS I a průmyslový tomograf YXLON International MU 2000-CT) a určení jejich přesnosti provedl Barbero [43] (2011). Pro stanovení nejistoty měření provedl opakované měření kalibračních elementů jako je koule, válec a koncová měrka. Dále provedl srovnání kvality sítí (viz Obr. 2.7) vytvořených pěti softwarovými balíčky (Focus-Inspection, Metris, VxScan, Mimics a Atos). Nejmenší šum poskytoval systém ATOS, následovaný laserovým skenováním na CMM. Nejvyšší přesnosti bylo dosaženo taktéž skenerem ATOS, pro nějž byla zjištěna rozšířená nejistota měřicího procesu 25 μm , zatímco výrobce udává 10 μm . Následovaly Metris + CMM s nejistotou 40 μm (výrobce 32 μm), K-Scan 104 μm (výrobce 71 μm), Exascan 230 μm (výrobce 40 μm), a CT 295 μm (výrobce 100 μm).

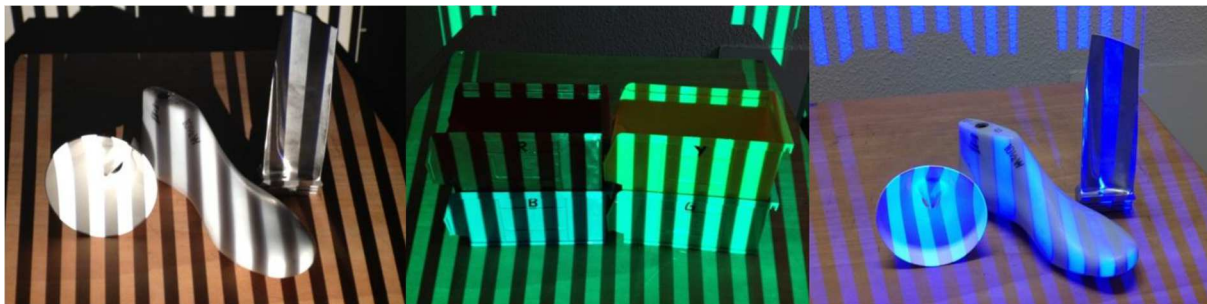


Obr. 2.7 Klasifikace kvality polygonální sítě [43]

Skenování malých dílů pomocí optického 3D skeneru ATOS Triple Scan se věnoval autor Morovič a Pokorný v [44] (2012). V příspěvku je ilustrován obecný koncept Reverzního inženýrství, věnuje se popisu 3D skeneru firmy GOM a postupům získávání modelů touto technologií. Hlavní náplní práce je popis procesu 3D skenování vybraných dílů specifických tvarů a velikostí. Výsledky skenování posloužily k testům a porovnání jednotlivých digitalizačních atributů, poukázaly na možné problémy a jejich řešení.

Odpověď na otázku, proč, kdy a jaká barva světla by měla být použita u skenerů pracujících na principu projekce strukturovaného světla, odpovídá výzkum autora Mongona [45] (2012). Článek

popisuje klady a zápory osvětlení bílým světlem (celé spektrum), které kontrastuje s použitím vybraných komponentních barev. Je vysvětleno, že výběr barev osvětlení (vlnových délek) se může pohybovat od infračerveného (IR) po ultrafialové (UV), včetně viditelného spektra. Různá pásma vlnových délek mohou být výhodná v různých kategoriích aplikací, např. použití IR je prospěšné pro kulturní dědictví a biometrické skenování, modrá pro skenování pokožky. V práci je také vyhodnocován vliv různých barev na skenování lesklých povrchů. Hlavní výhodou monochromatického světla je to, že umožňuje použití filtrů před objektivy fotoaparátu k potlačení okolního světla.



Obr. 2.8 Různé scény a různobarevná projekce [45]

V závěru článku jsou shrnuty tyto poznatky:

- Barevné světlo funguje stejně jako bílé světlo na barevně neutrálních (bílých, šedých, černých) nebo kovově matných površích. Naopak barevné světlo funguje stejně jako bílé světlo na objektech, které odpovídají barvě promítaného světla.
- Při promítání barevného světla není skenovací proces natolik ovlivněn okolními světelnými podmínkami, jako u skeneru s bílým světlem, neboť před objektivy kamer lze použít úzkopásmové filtry.
- Barevné světlo neposkytuje významné zlepšení pro tradičně obtížně skenovatelné povrchy (lesklé, průhledné). Ani skenery s barevnou projekční jednotkou neumožnily snadné snímání těchto materiálů.
- Určitou nevýhodou při použití barevného světla je to, že kvalita skenovaných dat začíná záviset na samotné barvě objektu, což není případ bílého světla. Analýza ukázala, že v dobré kvalitě je obtížné skenovat objekty, které mají doplňkovou barvu k barvě projekce. Pokud jsou tyto komplementární barvy zcela přesné, skenovaná data jsou silně zašuměná, zdeformovaná nebo je problematické objekt vůbec naskenovat.

C. Bernal [46] (2013) se svým týmem analyzovali přesnost měřicího systému Comet L3D pomocí lepicí pásky, kterou použili místo antireflexního nástřiku. Naměřenou bílou neprůhlednou pásku o tloušťce 0.06 mm porovnávali s náměry objektů ošetřených bílým práškem.

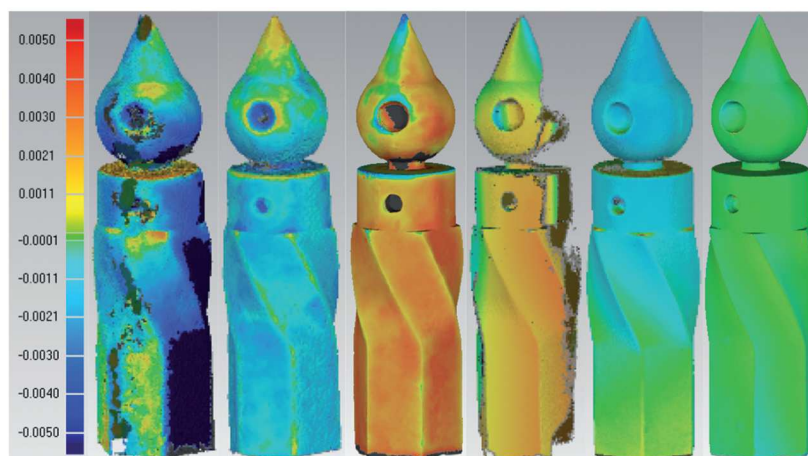
Autor Vagovský [47] (2015) se věnoval výzkumu měřicích schopností optického 3D skeneru ATOS Triple Scan II. Zabýval se měřením malého objektu, jímž byla velmi tvrdá ocelová tyč o $\varnothing$ 12 mm. Cílem bylo zjistit dosažitelnou přesnost skeneru s využitím statistického vyhodnocení. Po mnoha měření dospěl k závěru, že systém není schopen poskytnout přijatelné výsledky při měření malých, vysoce přesných objektů s úzkou hodnotou tolerančního pásma.

Zajímavý výzkum věnující se vlivu povrchu materiálu na chybu skenování je popsán v práci autora Kurz [48] (2015). Bohužel se nejedná o aplikaci ve strojírenství, ale materiály primárně používané ve stomatologii. Nicméně i zde zjištěné poznatky jsou důležité, neboť autoři došli k závěru,

že použití různých materiálů způsobuje výškové rozdíly ve skenování. Dalším zajímavým výsledkem je zjištění, že šum v datech může být snížen tím, že skener se drží co nejblíže ke kolmici na vzorek.

Netradiční problematiku řeší autor Christian Brauer-Burchardt v [49] (2015). V jeho článku je popsán model podvodní kamery, který bere v úvahu refrakční efekty na rozhraních vzduchu, skla a vody. Dále prezentuje novou kalibrační strategii pro tento systém, kdy byla provedena některá zjednodušení týkající se geometrie pro usnadnění kalibrace a zvýšení robustnosti. Popsaná technika kombinuje běžnou kalibraci na vzduchu s několika měřeními pod vodou pro stanovení vzdáleností rozhraní obou kamer.

Velmi inspirativní je článek kolektivu autorů pod vedením Kerstena [50] (2016), který se věnuje stanovení geometrické přesnosti několika ručních skenovacích systémů střední třídy. Zkoušky proběhly v laboratoři fotogrammetrie a laserového skenování HafenCity University Hamburg ve spolupráci s laboratoří fotogrammetrie Bochum University of Applied Sciences. Pro testování byly vybrány přístroje *DOTProduct DPI-7 / DPI-8*, *Artec Spider*, *Mantis Vision F5 SR* a *Creaform HandySCAN 700*, a dále profesionální skenery pracujících na principu projekce strukturovaného světla *AICON smartSCAN* a *GOM ATOS I 2M*, které pro některé testy posloužily jako zdroj referenčních dat. Pro srovnávací zkoušky všech systémů byly zvoleny geometricky stabilní referenční tělesa (etalon křížového tělesa s ocelovými kuličkami, granitová deska), na kterých byly vyhodnocovány parametry jako průměr a tvar koule (*Probing error PS (size)*), *Probing error PF (Shape)*) roztečná vzdálenost koulí (*Sphere-spacing error SD*), resp. rovinnost, v souladu se směrnici VDI/VDE 2634. Dále byly digitalizovány modely různých velikostí a tvarů, které byly formou barevných map ve 3D porovnány s referenčními daty (Obr. 2.9). Testy ukázaly, že hodnocené systémy střední třídy zdaleka nedosahují takové kvality a přesnosti (chyby se mnohdy pohybovaly i v řádu milimetrů) jako výstupy z profesionálních systémů. Výjimku tvořil pouze skener firmy *Creaform HandyScan 700*, který poskytoval výsledky blízké referenčním. Odchytky u tohoto zařízení se ve všech případech pohybovaly v řádu setin milimetru, jak z pohledu rozměrových, tak tvarových charakteristik.



Obr. 2.9 Barevná mapa odchylek (m) jednotlivých systémů v porovnání s referenčními daty skeneru ATOS (zleva DPI-7 dhp:i , DPI-7 LKA, DPI-8, Artec Spider, Mantis F5 a HandySCAN 700) [50]

Přesnosti laserových skenerů se věnuje také studie publikovaná v [51] (2016). Autoři si stanovili celkem tři cíle výzkumu: Porovnání celkové chyby uvedené výrobcí pěti laserových skenerů se střední kvadratickou chybou vypočítanou skenováním koncové měřky; opakovatelnost 3D modelů generovaných laserovými skenery při skenování složitého volného tvaru (jako model byla použita stehenní kost); srovnání chyb jednoho levnějšího laserového skeneru (*NextEngine*) s odchylkami čtyř

laserových skenerů vyšší třídy (*Nikon, LDI, Creaform, NDI*). Výsledkem studie byla zjištění, že střední kvadratická odchylka při skenování koncové měrky byla o 2 až 52 μm nižší v porovnání s celkovou chybou uváděnou výrobcí. Opakovatelnost při skenování hovězí stehenní kosti byla významně horší než opakovatelnost při skenování koncové měrky. Přesnost levného laserového skeneru byla srovnatelná s přesností drahých laserových skenerů, systematická chyba byla ovšem o řád větší. Hlavní přínosem studie bylo zjištění, že celkové chyby uváděné výrobcí jsou horní mezí pro skenování jednoduchých geometrických objektů. Opakovatelnost je v průměru 3x horší při skenování složitého volného tvaru ve srovnání se skenováním koncové měrky a hlavní rozdíl mezi levnějšími a dražšími laserovými skenery je vyšší systematická chyba u low-end skenerů.

Kvalitu skenovaných dat může ovlivňovat mnoho faktorů, tvrdí ve své studii Gerbino a jeho tým v [52] (2016). Dle jeho názoru mohou tyto faktory souviset jak s vnitřními prvky zařízení (rozlišení a přesnost skeneru), tak s vnějšími podmínkami, jako je správné nastavení parametrů skenování, vlastnosti skenovaného povrchu (barva, lesk, drsnost, tvar) nebo vzájemná poloha senzoru vůči měřenému povrchu. Ve svém článku proto na komerčním laserovém 3D triangulačním skeneru analyzoval účinky některých z těchto faktorů. Prostřednictvím přístupu k návrhu experimentů (DoE) a stanovením střední kvadratické chyby jako funkce jednotlivých vlivných parametrů určil, že klíčovými faktory z hlediska přesnosti měřicího procesu jsou především relativní orientace skeneru vůči objektu a jeho poloha v zorném poli měřicího zařízení. Naopak osvětlení (pokud je rozptýlené a není přímo orientováno na součást), stejně jako filtrační faktory nejsou statisticky významné.

Přesnosti skenerů pracujících se strukturovaným světlem se věnuje autor Eiríksson se svým týmem v [53] (2016). V článku je řešena otázka, jak běžné konstrukční parametry ovlivňují přesnost systémů. Pozornost je soustředěna především na řešení otázky vlivu návrhových parametrů kalibrace, postupů kalibrace a strategií kódování (Fourierovy metody - metody fázového posunu (PS), metody založené na binárních hranicích - např. binární a šedé kódování (Gray), posun čáry (Line Shift)). Měřítkem pro vyhodnocování jsou přesně vyrobené kalibrační artefakty v souladu se směrnicí VDI / VDE 2634 (část 2). Experimenty jsou prováděny na skeneru vlastní výroby (obsahující dvě kamery a projektor) a v závěru jsou porovnány s komerčním systémem ATOS III Triple Scan. Práce odpovídá především na tyto otázky:

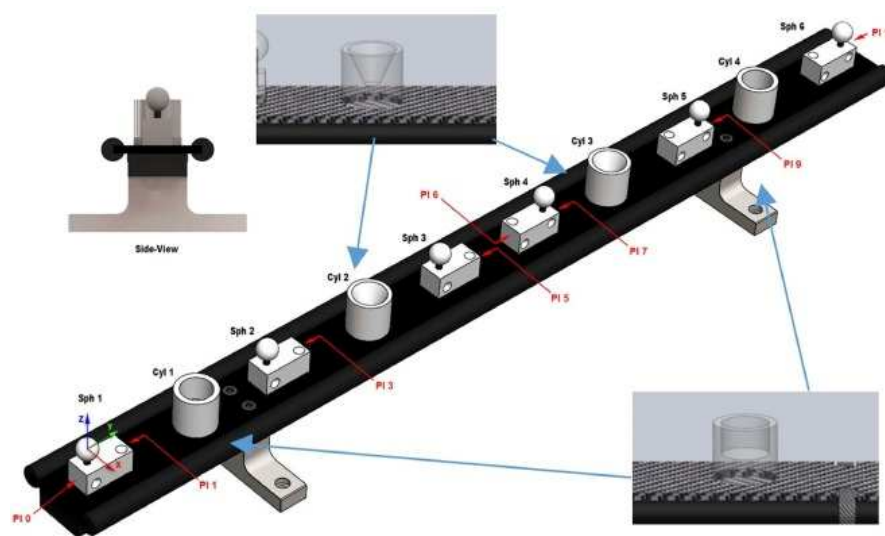
- Jaké kalibrační parametry by měly být zahrnuty do kalibračního postupu?
- Jaký úhlový rozsah snímání je vyžadován při kalibraci?
- Kolik pozorování je pro kalibraci požadováno?
- Která strategie kódování je nejvýkonnější?

Výsledky ukázaly, že úhlový rozsah kalibrační desky vzhledem k základní linii kamery má na výsledky kalibrace zanedbatelný vliv. Z hlediska použité strategie kódování se jako nejpřesnější ukázala metoda „PS“. Dosahovala zhruba 3x přesnějších výsledků v porovnání s metodou „Line Shift“ pro sledovaný parametr rovinnosti a chyby tvaru koule a taktéž zhruba 3x lepších výsledků v porovnání s metodou „Gray“ z pohledu parametru chyby tvaru koule a chyby velikosti koule. Výsledky dále ukázaly, že při správném nastavení všech parametrů stanovených v této studii lze dosáhnout srovnatelných (v některých ohledech dokonce i lepších) výsledků v porovnání s nejmodernějším komerčním systémem.

Jiná publikace věnující se otázce přesnosti 3D skenování je práce autora Mikó [54] (2017) a jeho kolektivu. V publikaci je představen proces reverzního inženýrství a dále jsou posuzovány faktory, které mají vliv na přesnost modelu získaného 3D skenováním. V rámci svého výzkumu autor došel k poznání, že hlavním zdrojem chyb není samotný 3D skener, ale celý proces. Proto za účelem přesného výstupu

je nutné analyzovat mnoho okolností, jako je tvar samotné součásti, materiál a vlastnosti povrchu. Druhou důležitou skupinou faktorů jsou parametry procesu skenování (použití referenčních prvků, vzdálenost a směr skenování, použitá frekvence a parametry různých softwarových nástrojů). Posledním faktorem je člověk. Zvláště při ručním snímání může přesnost pohybu ruky, konstantní rychlost, stabilita nebo změna vzdálenosti od měřené součásti mít vliv na vznik chyb. Výsledek skenování tedy závisí i na zkušenostech uživatele.

Další práce kolektivu autorů pod vedením Martínez-Pellitero S. [10] (2018) hodnotí výkonové a provozní limity rozměrové přesnosti 3D optického skenování založené na technologii projekce s modrým světlem (skener *AICON SmartScan*). Etalon použitý k výzkumu byl vyroben z matného bílého keramického materiálu (viz Obr. 2.10) a referenční rozměry byly změřeny na souřadnicovém měřicím stroji *DEA Global Image* (jehož maximální přípustná chyba (dle ISO 10 360-2) je $MPE_E = 2,2 + 0,003 \cdot L$ [μm]). V rámci výzkumu se autoři věnovali také analýze vlivu softwaru skeneru na výsledky měření. Kromě toho byly provedeny různé testy pro několik měřicích objemů snímače. Výsledky ukázaly, že software *Optocat* provádí počáteční filtrování před generováním sítě STL, což mírně prospívá výsledkům měření. Tento interní post-processing mračna bodů zlepšoval výsledky měření asi o 20 μm vzhledem k externímu následnému zpracování v SW *Geomagic Control*. Dále bylo zjištěno, že měřicí objem 850 mm přinášel v některých ohledech přesnější výsledky, než měřicí objem 400 mm. A to i přesto, že druhý jmenovaný poskytuje vyšší rozlišení dat. Pravděpodobným důvodem je nutnost pořídit více dílčích skenů a vznikající chyba při jejich následné registraci (skládání). Průměrná odchylka průměrů koulí od referenčních dat se pohybovala od -0,1 mm do +0,1 mm, odchylka průměrů válců byly zhruba poloviční. Chyba tvaru koule byla v rozmezí 0,3 - 0,5 mm, u válce 0,1 - 0,35 mm.



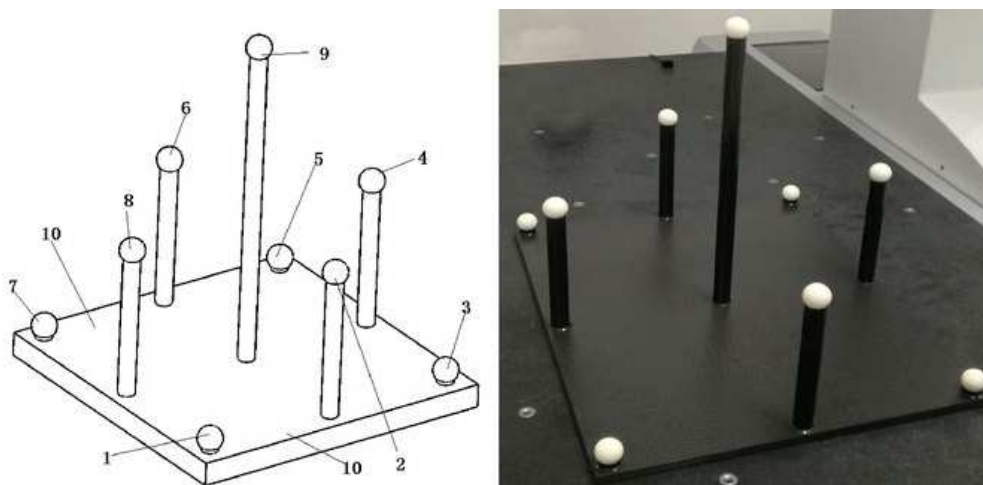
Obr. 2.10 CAD model etalonu [10]

Ověření spolehlivosti laserového skeneru *Gocator 2330* se ve své práci věnoval Franke [55] (2018). Jeho hlavním cílem bylo identifikovat faktory mající vliv na schopnost skeneru nasnímat povrch měřeného objektu. Za důležité aspekty autor označil charakter povrchu měřené součásti (barva, drsnost), poloha skeneru vůči měřené ploše, nastavení parametrů skeneru (expoziční čas) a další vlivy okolí (okolní osvětlení). Jako významná zjištění lze uvést nutnost správného nastavení expozičního času a dodržování vhodné orientace skeneru. Dále se ukázalo, že při optimální volbě expozičního času byl vliv

okolního osvětlení zanedbatelný a že vzorky s drsnějším povrchem jsou citlivější na optimální volbu podmínek při měření.

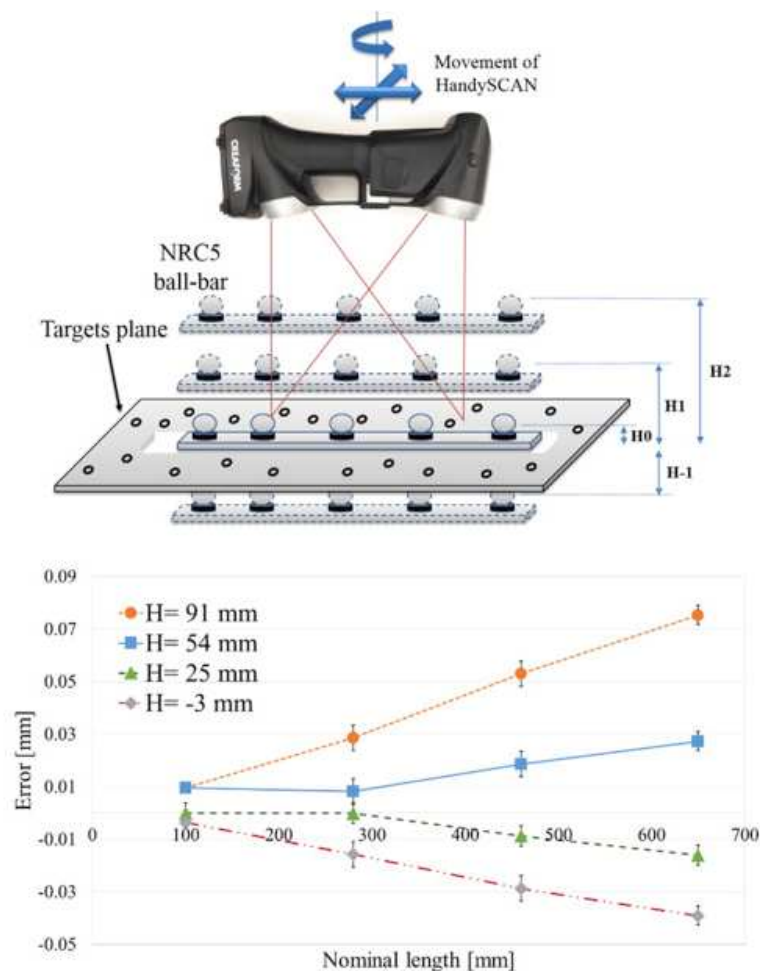
Předmětem článku [56] (2019) je výzkum věnující se stanovení dopadu použité strategie digitalizace na přesnost výsledku měření. Autoři poukazují, že tento problém je zvláště důležitý při měření velkých objektů, kdy není možné zajistit ideální podmínky pro snímání. Byly provedeny experimenty s optickým skenerem, jehož měřicí objem byl několikanásobně menší, než byla velikost speciálně navržené testovací šablony s definovaným rozložením referenčních bodů a geometrických prvků. Byly simulovány různé strategie měření používané v praxi (s podporou fotogrammetrie, spojování snímků přes společné referenční body, spojování snímků dle geometrie). Nejlepších výsledků bylo dosaženo při skenování na body, jejichž pozice byly předem stanoveny fotogrammetrií. Při tomto způsobu skenování byl rozptyl měření zhruba poloviční než u zbylých dvou strategií, což potvrzuje lepší opakovatelnost. I průměrná hodnota naměřené vzdálenosti dvou koulí vykazovala nejmenší odchylku od nominální hodnoty 2000,102 mm, a to: fotogrammetrie 13 μm , referenční body -77 μm , geometrie 36 μm .

Kalibrační zařízení pro optický skener je prezentováno v nedávném článku [57] (2019). Pro kalibraci je využíváno standardních vzdáleností středů kulových prvků (viz Obr. 2.11). Navržený etalon může poskytovat rozměry o různých velikostech a směrech, neboť obsahuje celkem devět koulí v různých polohách. Zařízení lze tak využít pro ověření přesnosti měření optického skeneru v průmyslové praxi, kde dle autora chybí vhodná kalibrační metoda.



Obr. 2.11 Kalibrační artefakt pro ověření přesnosti měření optického skeneru [57]

Na klasifikaci nejvýznamnějších zdrojů chyb a popis jejich vlivu na přesnost měření se ve svém článku zaměřuje Givi a kol. [58] (2019). Cílem jeho výzkumu je minimalizace chyb u přenosného skenovacího systému HandySCAN 300 pomocí vylepšeného procesu měření. Jako již mnoho jiných autorů poukazuje na fakt, že v současné době chybí normativní standardy vhodné pro hodnocení výkonu takového systému. Diskutována je problematika kalibrace systému, orientace skeneru, vliv okolního osvětlení, druh reflektivních značek, vzdálenost desky s referenčními body od měřeného objektu (Obr. 2.12) nebo vliv odrazivosti povrchu použitého pozadí.



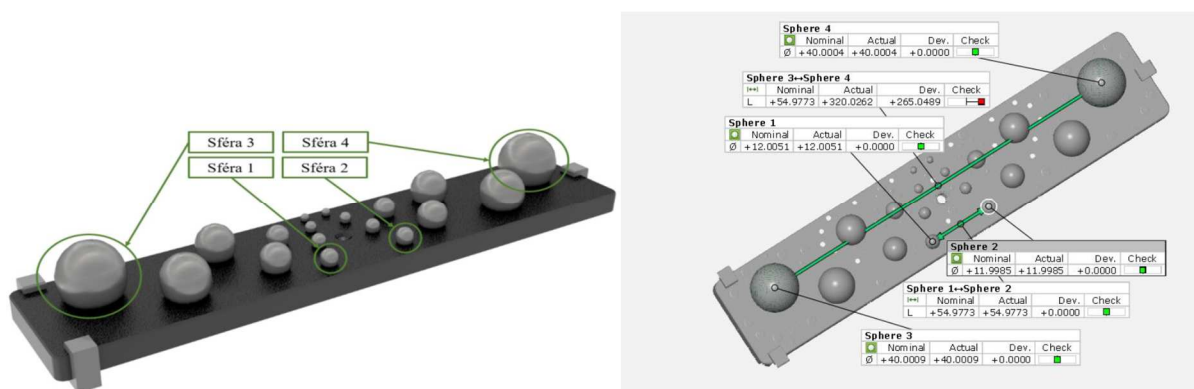
Obr. 2.12 Chyby rozteče koulí v závislosti na vzdálenosti kulového etalonu od desky s referenčními značkami [58]

Z výzkumu vyplynula tato hlavní doporučení a poznatky:

- Dominujícím zdrojem chyb je proces kalibrace. Využití samostatného fotogrammetrického systému (MaxShot 3D) výrazně potlačilo jeden z hlavních problémů - chybu měřítka, která byla úměrná měřené délce.
- Umístění cílových značek ve výšce artefaktu minimalizuje velikost odchylek.
- Nejlepších výsledků bylo dosaženo při vysoké intenzitě okolního osvětlení.
- Pro přesné měření je třeba udržovat skener kolmo k cílové rovině (především při prvotním snímání značek pro stanovení souřadného systému).
- Čím světlejší barva desky nesoucí reflektivní značky, tím méně narůstá chyba s měřenou vzdáleností.
- Zdroje chyb, jako je výška koulí od roviny obsahující fotogrammetrické cíle, odrazivost fotogrammetrických cílů a odrazivost materiálu pozadí, mohou být účinně minimalizovány vhodným výběrem výšky středu koule vzhledem k cílové rovině.

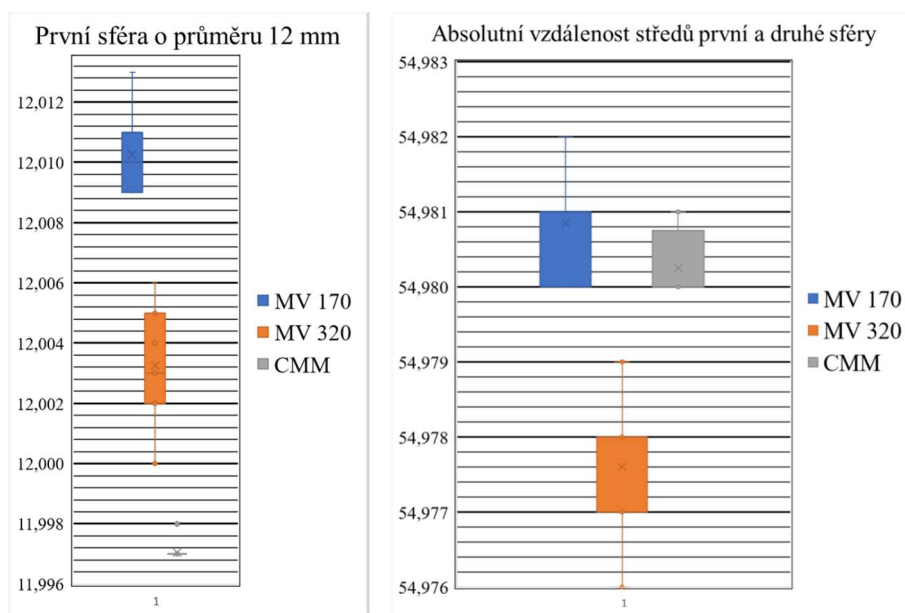
Dále je v příspěvku navržen lineární model pro kompenzaci kalibrační chyby a formulována rovnice pro určení nejistoty měření na základě vyhodnocených zdrojů chyb. Pro ověření odhadu nejistoty bylo provedeno srovnávací měření na CMM. Pro tyč jmenovité délky 500 mm byla pro systém HandySCAN stanovena korigovaná změřená délka 500,02 mm a rozšířená nejistota 0,018 mm. Referenční hodnota určená na CMM byla délka tyče $500,03 \pm 0,002$ mm. Chyba vzdálenosti určená skenerem od reference tedy činila -0,01 mm.

Porovnání kontaktního měření a optického 3D skenování se ve své práci věnuje Návrh [59] (2019). V praktické části porovnává měření na optickém 3D skeneru ATOS Triple Scan 16M (pro MV170 a MV 320) a souřadnicovém měřicím stroji Wenzel LH 65 – X3M Premium. Pro experiment byl zvolen ověřovací etalon využívaný pro tzv. Acceptance testy s označením GOM Probing / Spacing Artefact 400 (PSA/400/Z5015), (viz Obr. 2.13. vlevo). Pro měření byl vybrán 4. nejmenší a největší pár koulí a vzdálenost jejich středů (viz Obr. 2.13. vpravo). Jednotlivá měření byla podrobně statisticky zpracována a vyhodnocena formou krabicových grafů (viz Obr. 2.14).



Obr. 2.13 Artefakt pro měření (vlevo) a vyhodnocení jednotlivých parametrů (vpravo) [59]

Z výsledků dle očekávání vyplynulo, že CMM měření poskytuje stálejší hodnoty s mnohem nižší mírou nejistoty měření. Rozšířená nejistota měření pro Skener ATOS se pro průměry koulí pohybovala v rozmezí 1,7 μm až 2,3 μm pro MV170, a 3,4 μm až 4,2 μm pro MV320. Roztečné vzdálenosti vykazovaly rozšířenou nejistotu 1,5 μm a 3,2 μm pro MV 170, resp. 1,8 μm a 2,1 μm pro MV320. Výběrový průměr rozměru sfér byl zhruba o 13 μm větší pro MV170, resp. o 7 μm větší pro MV320. Tento rozdíl je přičítán vlivu matného prášku.



Obr. 2.14 Průměr sféry č. 1 a vzdálenost mezi sférami č. 1 a 2 (vyhodnocení formou krabicových grafů) [59]

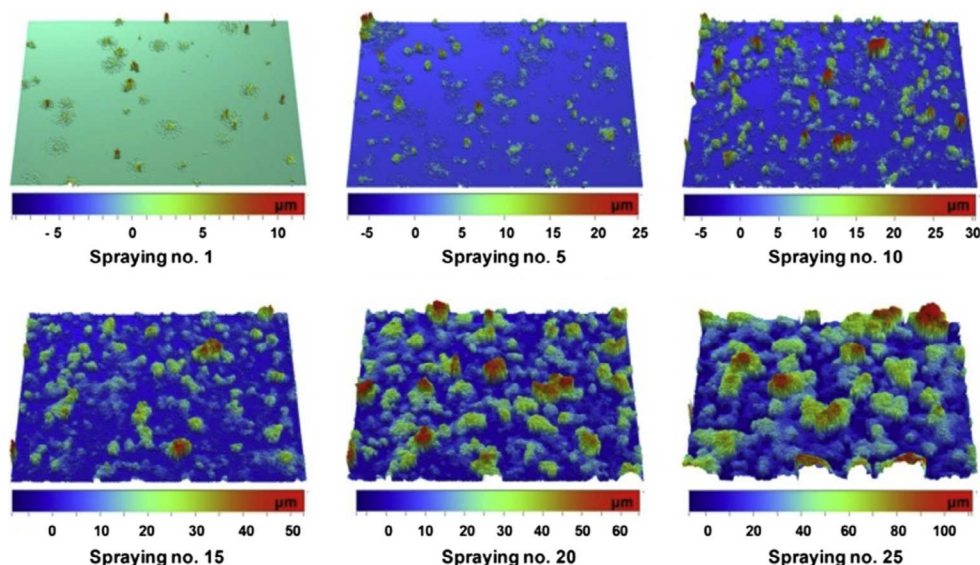
2.1.4 Se zaměřením na antireflexní nástríky

V dostupné literatuře lze nalézt i výzkumy, věnující se cíleně problematice antireflexních nástríků a jejich vlivu na přesnost měření. Např. Dokoupil [61] (2013) provedl experimentální zjištění odchylek měření optického systému ATOS Triple Scan při aplikaci matnicích přípravků. Cílem výzkumu popsaného v této literatuře je stanovení nejistoty měření při opakovaném nástríku křídovým a titanovým práškem a určení tloušťky vrstvy matnicích prášků. Ve své práci zmiňuje, že jedním z hlavních vnějších faktorů ovlivňujících přesné měření za pomoci optického skeneru je příprava měřeného objektu - ošetření zmatňující vrstvou. Tloušťka vrstvy musí být dostatečná, jinak by nedošlo ke kvalitnímu zmatnění povrchu, zároveň nesmí ale ovlivnit výsledky měření. Dochází k závěrům, že na každém z použitých etalonů (kalibrační kroužek, kalibrační koule, koncová měrka) se vrstva projevuje odlišně. Po zpracování veškerých dat a určení nejistot autor zjistil, že křídový prášek dosahuje zhruba dvojnásobné nejistoty měření v porovnání s titanovým nástríkem. U křídového prášku je také mnohem vyšší tloušťka 0.029 ± 0.006 mm, oproti 0.006 ± 0.003 mm pro titanový prášek.

Práce autora Valinasaba [62] (2014) a [63] (2015) připomínají, že optické skenery pracují na základě odraženého světla z povrchu objektu, a proto je měření ovlivněno povrchovými charakteristikami cílového objektu, jako je průhlednost a odrazivost. Pro vyřešení tohoto problému je ve většině případů předmět stříkán aerosolovým sprejem, aby dočasně změnil své vlastnosti, např. od lesklé po matnou nebo od průhledné po neprůhlednou. Je důležité aplikovat povlak o minimální možné tloušťce, aby se nezměnila geometrie objektu. Pro studium této problematiky v rámci své disertační práce vyvinul rozprašovací nanášecí systém založený na atomizaci, který použil pro aplikaci akrylové barvy ředěné s vodou v poměru 6:1. Měřením tlouštěk nástríku na profilometru došel k zjištění, že atomizovanou směsí lze docílit tloušťky jedné vrstvy okolo 50 nm. Dostatečné krycí vrstvy pro 3D skenování bylo dosaženo po nanesení zhruba 8 - 10 vrstev, tedy při celkové tloušťce okolo 400 nm. Slabší nástríky byly pro účely 3D skenování nedostatečné a neměly dostatečnou krycí schopnost. Dalšími zajímavými výstupy výzkumu bylo zjištění, že úprava povrchu součásti atomizovanou suspenzí

poskytuje zhruba 30x lepší výsledek v porovnání s nástřikem provedený aerosolovým sprejem. Při jeho použití byla detekována tloušťka vrstvy okolo 12 μm . Tato silnější vrstva spolu se skutečností, že dochází k hromadění částic v exponovaných místech, jako jsou různé kouty, může do inspekce vnášet jisté nepřesnosti a negativně ovlivňovat rozměry a tvar kontrolované součásti.

Další významný výzkum zaměřený na vliv matnicích nástřiků na přesnost 3D optického měření publikoval Paloušek [64] (2015). Práce měla tři hlavní roviny a to určení odrazivosti světla, určení geometrických odchylek a statistické zpracování dat. Autoři ve svém článku popisují problémy, které se mohou vyskytnout při skenování bez použití zmatňujících nástřiků a zároveň vysvětlují, kdy je vhodné nástřik použít. Jelikož výrobce zmatňujících přípravků udává velmi přesné podmínky pro měření (teplota, osvětlení a zkušený personál) a ty je v praxi mnohdy obtížné dodržet, může být výsledek měření tímto způsobem ovlivněn. Výzkum prováděný jeho týmem vedl ke zjištění, že zatímco křídový povlak může v průměru dosahovat tloušťky až 44 μm (s nejistotou měření typu A 3,9 μm), použitím antireflexního nástřiku na bázi titanové běloby se tloušťka sníží zhruba desetkrát na úroveň kolem 5 μm (s nejistotou měření typu A 0,44 μm). To má velice významný pozitivní vliv na přesnost procesu digitalizace. Ukázka 3D mapy tloušťky matnicího nástřiku v závislosti na počtu provedených nanášecích cyklů (od aplikace jedné vrstvy – vlevo nahoře, až po 25 aplikací – vpravo dole) je uvedena na Obr. 2.15.



Obr. 2.15 3D mapa tloušťky matnicího nástřiku pro různé počty nanášecích cyklů [64]

Problematicke skenování lesklých povrchů se věnuje také Zeman [65] (2016). Cílem jeho práce bylo experimentálně posoudit vliv koncentrace titanového prášku v matnicím roztoku na kvalitu skenování takto upraveného povrchu. K nanášení přípravku bylo použito speciálně navrženého zařízení, které umožňovalo celý proces nástřiku zautomatizovat, a tak vyloučit vliv lidského faktoru a zajistit neměnné podmínky pro všechny nástřiky. Koncentrace prášku a etanolu byla s ohledem na předchozí experimenty volena v rozsahu 1:1 až 1:30. Až na jeden experiment byl nástřik nanášen vždy v jedné vrstvě. Jedním ze zajímavých výstupů výzkumu bylo zjištění, že zatímco překrytí povrchu je na koncentraci roztoku poměrně silně závislé, matnicí účinky z pohledu potlačení odlesků koncentrace roztoku již tak významně neovlivňuje. U křemíkové i nerezové destičky bylo nejlepších výsledků dosahováno při zmatnění suspenzí o hmotnostním poměru 1:3 a 1:5. Při těchto koncentracích bylo

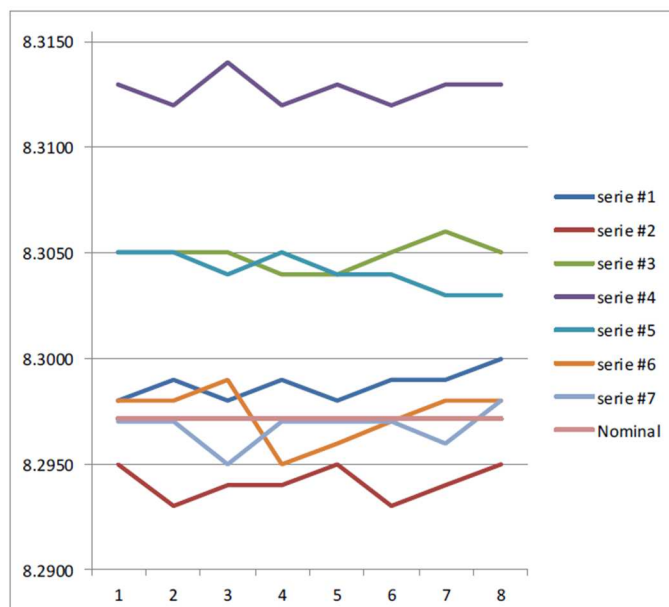
dosahováno nejmenší odchylky rovinnosti měřených destiček. Z hlediska zmatnění postačovaly i nižší koncentrace, ale již docházelo ke zhoršení kvality naskenovaného povrchu. Při menším poměru (1:2 a 1:1) se naopak často ucpávala tryska stříkací pistole. Výzkumem bylo také potvrzeno, že nanesení více vrstev řidšího roztoku je ekvivalentní jedné vrstvě o vyšší koncentraci. Konkrétně jeden z experimentů prokázal, že 4 vrstvy přípravku o koncentraci 1:12 dosahovaly stejných, v některých ohledech i lepších výsledků, než jedna vrstva koncentráту 1:3. Z hlediska rozměrového ovlivnění vzorků nástřikem bylo zjištěno, že rozdíly v rozměrech Johannsonovy měrky a tedy tloušťce nástřiku byly patrné především pro koncentrace 1:1, 1:2 a 1:3. Samotná tloušťka vrstvy se pohybovala v rozmezí 2,5 až 6 μm . Další snižování poměru titanového prášku a etanolu již nepřineslo významné změny ve zjištěné tloušťce nanesené vrstvy. Pouze 4 vrstvy suspenze o koncentraci 1:12 vykazovaly významně nižší tloušťky než jedna vrstva čtyřnásobného koncentráту. Toto zajímavé zjištění však již nebylo blíže odůvodněno.

Další obsáhlou prací, zabývající se matnicími nástřiky pro účely optického 3D skenování je práce D. Hrubého [66] (2018), [67] (2019). Cílem jeho výzkumu bylo najít metodu nanášení směsi TiO_2 a etanolu, která by zajistila tloušťku matnicí vrstvy mimo měřitelný rozsah 3D skeneru. V rámci jeho práce byla zkonstruována pistole umožňující nanášení atomizované směsi a nástřiky provedené touto pistolí byly porovnávány s nástřiky nanesenými běžně používanou airbrushovou pistolí. U nástřiků autor sledoval jejich matnicí schopnost, tloušťku, a také vliv použitých částic TiO_2 . Práce ukazuje způsob nanesení nástřiků, které dostatečně zmatní povrch pro účely 3D digitalizace, a současně mají tloušťku, která by neměla výsledky skenování ovlivnit.

Podobné problematice se ve své práci věnoval také Pereira a kol. [68] (2019). Autor publikuje, že pro skenování zrcadlových nebo průsvitných povrchů je nutné aplikovat nátěrový materiál, což je ale v rozporu s požadavky na přesnost trojrozměrného měření. Jeho studie navrhuje použití zlata, stříbra, platiny a uhlíku pro povrstvení povrchů, které mají být skenovány. Účinky těchto materiálů na přesnost třírozměrného skenování byly vyhodnoceny a porovnány s účinky dvou používaných materiálů (vývojka Metal-Chek D 70 a tělový pudr). Pro ověření výsledných geometrických variací byly vzorky naskenovány před a po aplikaci každého použitého materiálu. Výsledky ukázaly, že vnitřní chyby trojrozměrného skenovacího procesu, jako je registrace mračna bodů, mohou mít významnější účinky než použitá povrchová úprava. Měření provedená z jediného mraku bodů ukázala rozměrové tolerance přibližně 0,01 mm pro zlatý, platinový a uhlíkový povlak. Tyto povlaky poskytují výrazně vyšší přesnost než tradičně používaná vývojka a jsou navrženy pro přesné trojrozměrné snímání lesklých a průsvitných povrchů.

Zevrubný článek, věnující se problematice měření optickými skenery publikoval nedávno Arias Coterillo [69] (2019). Autor poukazuje na známou skutečnost, že pro přesné měření je třeba zabránit odrazům světla dopadajícímu na lesklé kovové součásti použitím antireflexního nástřiku. Cílem jeho výzkumu bylo posoudit možnost řízení výrobních tolerancí dosažených při obráběcím procesu pomocí technik optického skenování. Výzkum byl směřován především na získání informací o účincích nástřiku oxidu hořečnatého (MgO) na přesnost měření úhlu kuželového prvku (část kužele držáku nástroje SK40 DIN2080) pomocí 3D skeneru ATOS II. Nástřik byl aplikován ručně a bylo sledováno, zda je dosažena homogenní vrstva. Při vyhodnocování byly s nominálními daty srovnávány dva parametry – kuželovitost (úhel kuželu) a průměr D_3 ve střední části kužele. Statistickým zpracováním bylo určeno, že úhel α (poloviční úhel kuželovitosti) vykazoval pro jednotlivé série měření průměrnou odchylku od nominálních dat v rozsahu $-0,003^\circ$ až $0,016^\circ$ (viz Obr. 2.16) a směrodatnou odchylku kolem $0,0008^\circ$. Průměr D_3 nabýval střední odchylky v rozmezí od 0,08 mm do 0,11 mm a směrodatnou odchylku kolem 0,002 mm. Z výsledků bylo dále odhadnuto, že pro parametr α je „systematická“ chyba $0,0041^\circ$, zatímco „náhodná“ chyba (představující rozšířenou nejistotu na úrovni 95% spolehlivosti) je $\pm 0,0125^\circ$.

Ekvivalentně pro průměr D_3 byla „systematická“ chyba stanovena na 0,0926 mm, a „náhodná“ chyba pro 95% úroveň spolehlivosti na $\pm 0,0230$ mm. V případě lineárního měření průměru D_3 lze významnou část systematické chyby nebo zkreslení způsobené procesem měření připsat právě tloušťce antireflexní vrstvy. Průměrná hodnota tloušťky práškového nástřiku byla odhadnuta na téměř 50 μm . Vliv matnicí vrstvy v nejistotě měření byl však malý.



Obr. 2.16 Hodnoty úhlu α v porovnání s nominální hodnotou (osm hodnot pro každou se sedmi sérií měření) [69]

Poznámka: Výše uvedený výběr souvisejících publikací si nekladl za cíl přinést vyčerpávající seznam dostupných témat. Snahou bylo představit především publikace mající vztah k této práci, tedy k tématu 3D digitalizace optickými skenery, které pracují na principu projekce rastru světla. Pozornost byla zaměřena na výzkumy věnující se přesnosti a kvalitě skenování, resp. faktorům, které jí ovlivňují. Studie týkající se např. vývoje SW pro zpracování obrazu, návrhu hardware a speciálním aplikacím byly zahrnuty spíše okrajově.

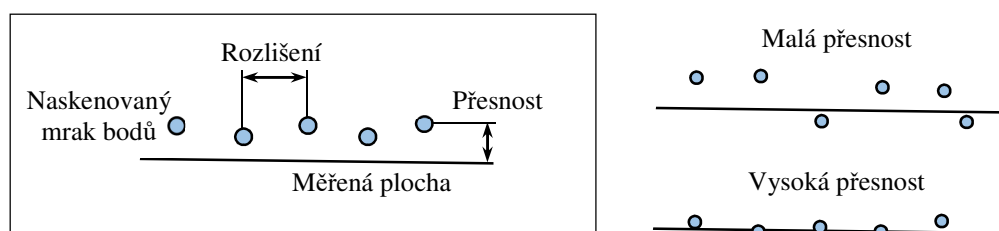
3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Úvod do 3D digitalizace

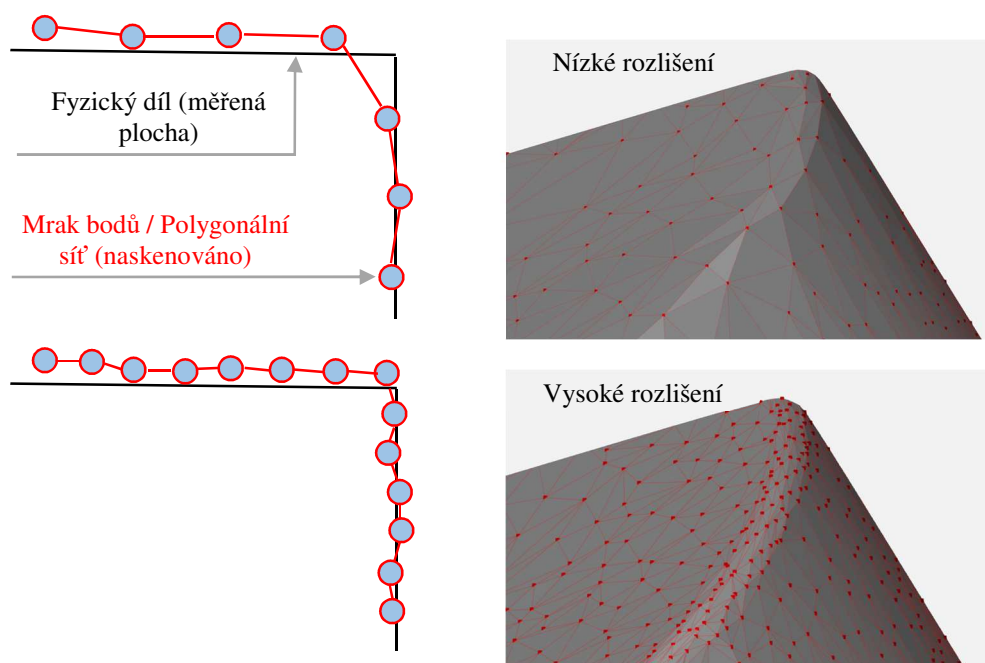
3.1.1 Základní pojmy - terminologie

Rozlišení - přesnost skenování

Tyto dva termíny se někdy chybně zaměňují, přestože jejich význam je rozdílný a nemusí mezi nimi existovat přímá úměra. *Přesnost* udává, zjednodušeně řečeno, odchylku měření, tedy rozdíl mezi změřenou a reálnou hodnotou, zatímco *rozlišení* naskenovaných dat říká, jaká je nejkratší možná vzdálenost mezi změřenými body (viz Obr. 3.1). Čím je rozlišení 3D skeneru (tedy hustota naměřených bodů) větší, tím je schopnost systému zachytit na měřeném objektu i malé detaily lepší (Obr. 3.2, Obr. 3.30) [70].



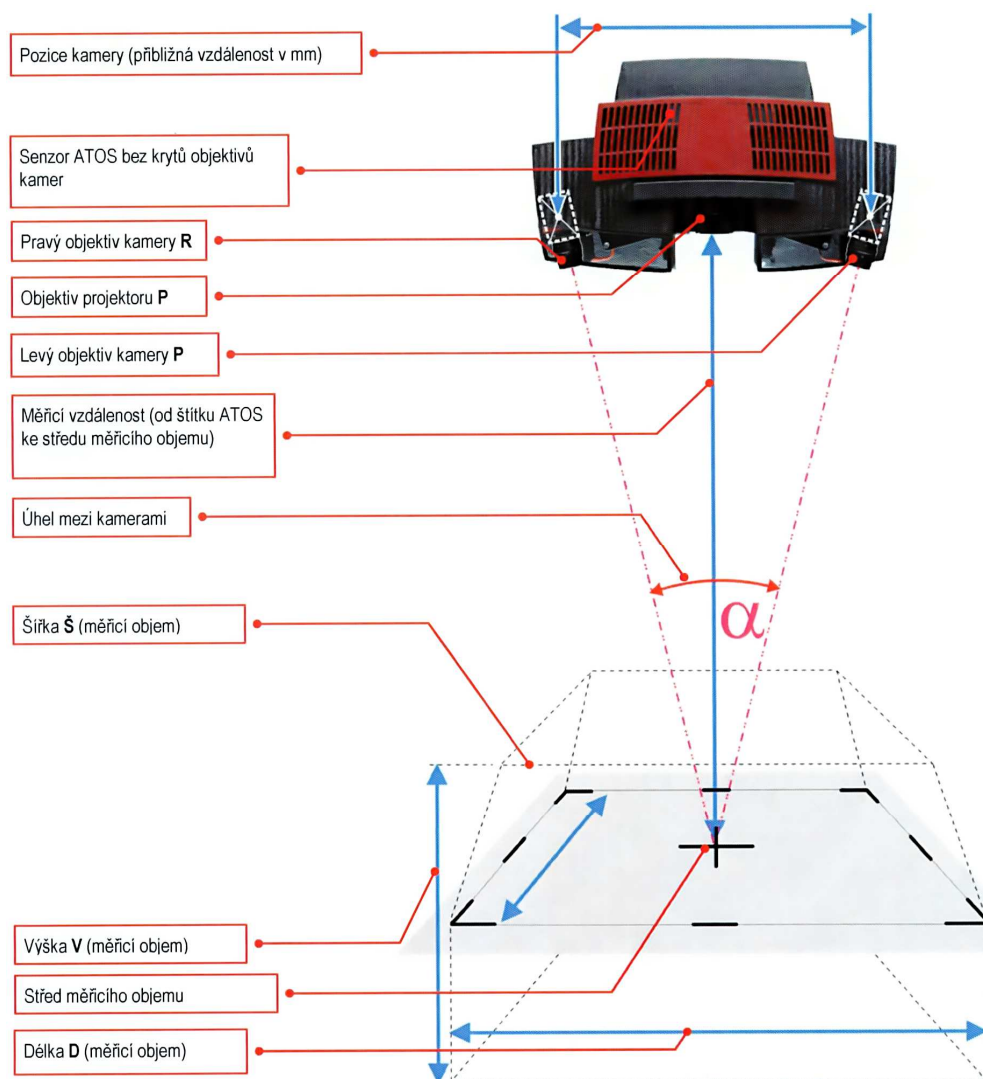
Obr. 3.1 Rozlišení a přesnost naskenovaného mraku bodů



Obr. 3.2 Vliv rozlišení na detailnost naskenovaného povrchu

Měřicí objem – pracovní rozsah

Měřicí objem (označován jako MV) vymezuje aktivní oblast v zorném poli skeneru, ve které je možno realizovat digitalizaci. Pouze obrobek nebo jeho část, ležící v této zóně, je nasnímána. Měřicí objem bývá nejčastěji vymezen velikostí skenovacího pole (délka a šířka MV) a hloubkou ostrosti (výška MV) – Obr. 3.3. Parametry měřicího objemu jsou dány optickou soustavou 3D skeneru. Zvláště u levnějších systémů bývá fixní (případně softwarově nastavitelný), naopak u profesionálních skenerů může být jeho změna realizována hardwarovou výměnou objektivů. Tím lze dosáhnout variability měřicího objemu ve velkém rozsahu (řádově od desítek milimetrů až po metry). Velikost použitého měřicího objemu není určující pouze pro velikost měřeného objektu, ale výrazným způsobem ovlivňuje také hustotu snímaných bodů a částečně i přesnost skenování. Ne u všech skenerů je měřicí objem určován dle výše uvedeného popisu. Např. u skenerů, které používají pro pozicování v prostoru mechanického ramene, častěji mluvíme o *pracovním rozsahu* daného skeneru. Podobně u zařízení, u kterých je poloha skenovací hlavy lokalizována opticky nebo laserově s využitím tzv. tracker systému, bývá definován tzv. *pracovní prostor* daného systému [70].



Obr. 3.3 Vymezení měřicího objemu u optického 3D skeneru ATOS III Triple Scan [71]

Rychlost snímání

Rychlost skenování je v ideálním případě definována počtem sejmutých bodů za jednotku času. Vzhledem k principiálním rozdílům snímání jednotlivých systémů se v podkladech výrobců také často setkáme s termínem *počet měření (snímků) za sekundu*. V tomto případě nemusí velký počet snímků automaticky znamenat vyšší rychlost skenování, resp. větší množství nasnímaných bodů za jednotku času. Je třeba též sledovat, zda snímání probíhá pouze bodově (laserový paprsek), v řádcích (pomocí laserové linky, kříže nebo určitého počtu křížů (dnes jsou běžné 3, 5, 7 ale i 11 křížů)) nebo v celém zorném poli skeneru (často tzv. 3D aktivní triangulace - projekce strukturovaného světelného svazku). S tím souvisí i rychlost vzorkovací frekvence použitého přijímače - kamer. Rychlost a kvalita nasnímaných bodů může být do jisté míry ovlivněna i barvou použitého světla projekce (světlo bílé, červené, modré apod.) [70].

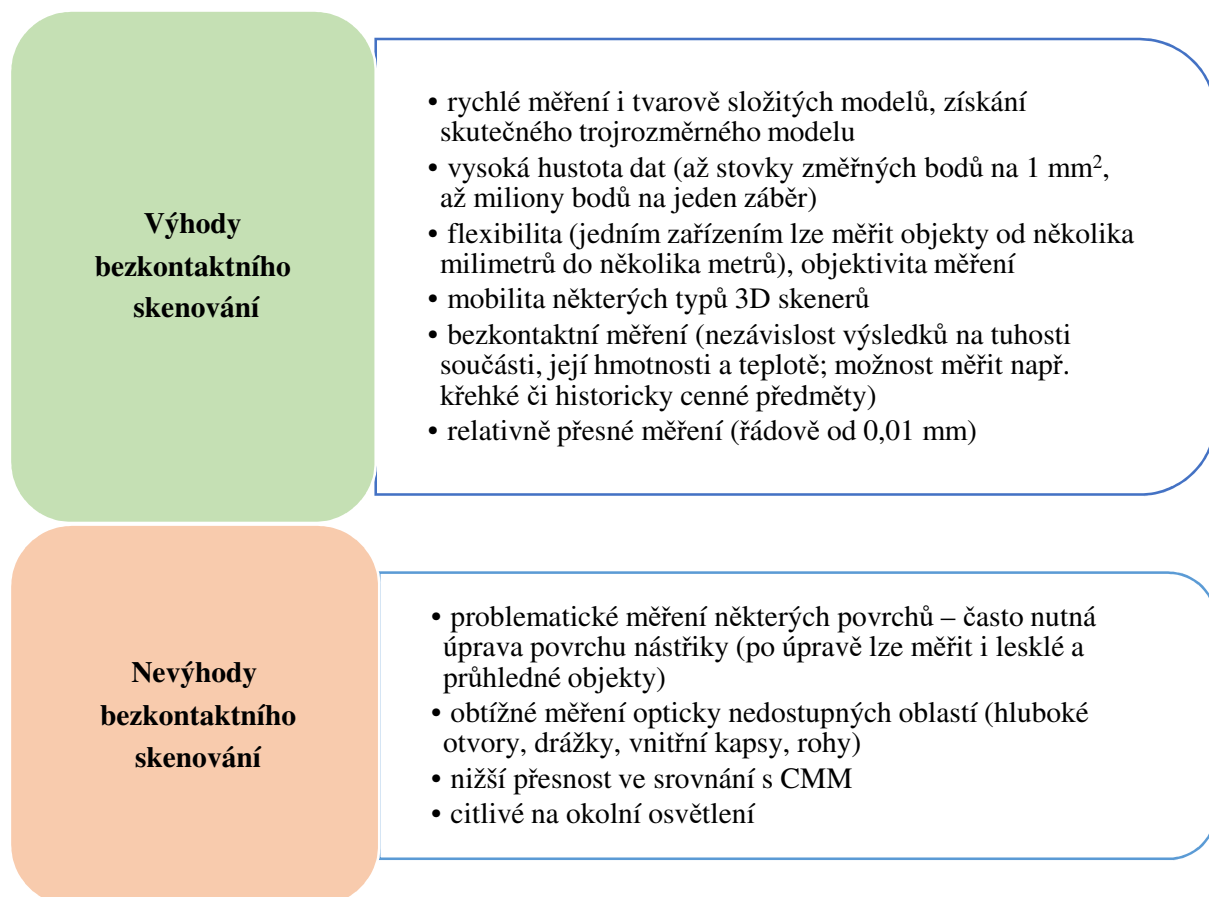
3.1.2 Chyby při skenování

Všechna měření, ať už kontaktní nebo bezkontaktní, jsou zatížena určitým druhem chyb. Způsobuje to mnoho aspektů, jako je např. nedodržení srovnatelných podmínek při jednotlivých měřeních, nepřesnost samotného zařízení apod. Obecně lze chyby při skenování rozdělit do dvou základních skupin – na chyby systematické a náhodné [36].

- **Systematické chyby** se vyskytují u každého měření. Jsou vlastností samotného systému a jeho kalibrace, jako důsledek jeho nedokonalosti nebo chyby. Mohou být také způsobeny nevhodně zvolenou metodou měření nebo vyhodnocení či vlivem prostředí (teplota, osvětlení, křídový nástrík). Tyto chyby se systematicky opakují a za srovnatelných podmínek skenování nabývají vždy stejné hodnoty. Díky tomu je můžeme do jisté míry eliminovat např. úpravami vyhodnocovacích metod. Dělíme je na zjistitelné (lze kompenzovat či eliminovat pomocí některých matematických modelů nebo korekcí měřidla na základě zjištěné odchylky při měření etalonu) a nezjistitelné, které zahrnujeme do nejistoty měření. Dle [27] se může jednat o chyby vzniklé např. v důsledku nesprávně provedené kalibrace skenovacího senzoru, nevhodnou kombinací rozlišení projektoru a kamer, nevhodnou vzdáleností skeneru od objektu nebo přehříváním čipu kamer.
- **Náhodné chyby** pochází z mnoha zdrojů, a proto je obtížné resp. nemožné ji kontrolovat a eliminovat. Stejně jako systematické chyby, i tyto chyby se vyskytují u každého měření. Příčina vzniku je náhodného charakteru, jak z pohledu směru tak velikosti. Důvodem může být nevhodné okolní osvětlení, vliv povrchu součásti (barva, odlesky, rozptyl světla), špatné zaostření, apod. Tyto chyby jsou úměrné rozptylu souboru opakujících se měření. Chyba se proto dá určit pouze z opakovaného měření, za pomoci intervalu, v němž se bude skutečná hodnota s jistou pravděpodobností vyskytovat. Nejznámější je v tomto směru Gaussovo rozdělení hustoty pravděpodobnosti [59].

3.1.3 Výhody a nevýhody

Výhodou 3D skenování je především to, že nezáleží na tuhosti měřené součásti, neboť mezi měřicím zařízením a součástí nedochází k žádnému dotyku. K dalším přednostem patří vysoká rychlost snímání bodů, často stovky tisíc až miliony bodů během několika vteřin. K nevýhodám lze naopak zařadit obtížné snímání špatně přístupných míst (hluboké dutiny, rohy apod.) nebo komplikovanější měření objektů s nevhodným povrchem (lesklé, průhledné, tmavé povrchy). Tuto nevýhodu lze zčásti eliminovat používáním antireflexních nástřiků [70].

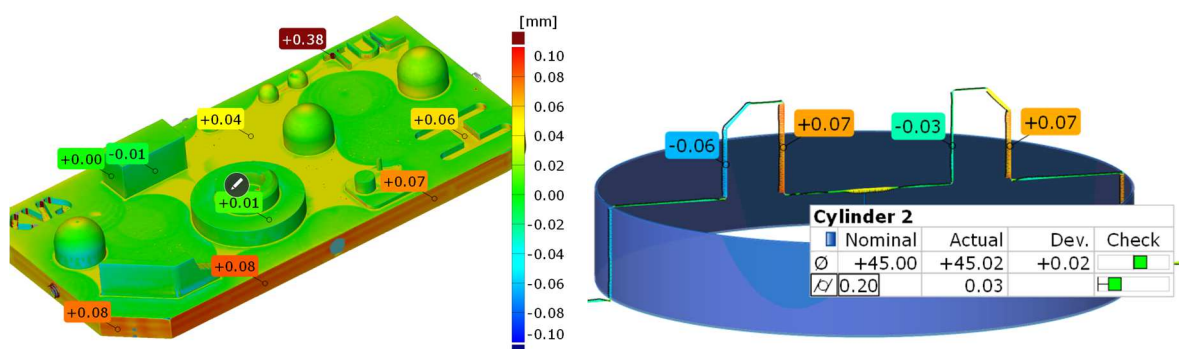


Obr. 3.4 Výhody a nevýhody bezkontaktního skenování

3.1.4 Oblast využití 3D skenování

Jak již bylo řečeno, bezkontaktní 3D skenery se v současnosti využívají k relativně přesné a především rychlé digitalizaci fyzických objektů o velikosti milimetrů až metrů a přenosu jejich tvaru do virtuálního počítačového prostředí. V něm je možné modely dále editovat, vyhodnocovat, modelovat či archivovat. Výstupem procesu skenování jsou v první fázi body na povrchu skenovaného objektu, o vypočítaných souřadnicích X, Y a Z, tzv. *mrak bodů*. Z něho je dále možné vypočítat tzv. *polygonální síť* (neboli mesh, známé také jako formát STL). Přímá práce s těmito modely je však vzhledem k objemu a formátu dat ve většině CAD/CAM softwarech komplikovaná až nemožná. Pro editaci, inspekci nebo následné modelování (reverzní inženýrství) se proto využívají specializované, pro tyto účely specificky vyvinuté programy [70].

3D digitalizace má využití v nejrůznějších průmyslových oborech, jakými je např. metrologie, kvalita, výroba, konstrukce, technologie apod. Skenovat lze v podstatě jakékoli strojní díly a součásti - výlisky, výkovky, obrobky, nástroje nebo formy. Data získaná skenováním mají široké využití především v oblastech komplexní kontroly geometrické přesnosti výrobků (tzv. inspekci), kontrole kvality výroby a funkčnosti celků, při vývoji a inovaci nových produktů, v designu, při modelování metodou reverzního inženýrství, v opravárenství, při verifikaci simulací vstřikování plastů nebo tažení plechu atd. Bezkontaktní optická zařízení nachází uplatnění i mimo průmyslová odvětví a jsou často využívána v medicíně a stomatologii, stejně jako při rekonstrukci reálného povrchu objektu v různých počítačových aplikacích nebo počítačové grafice.

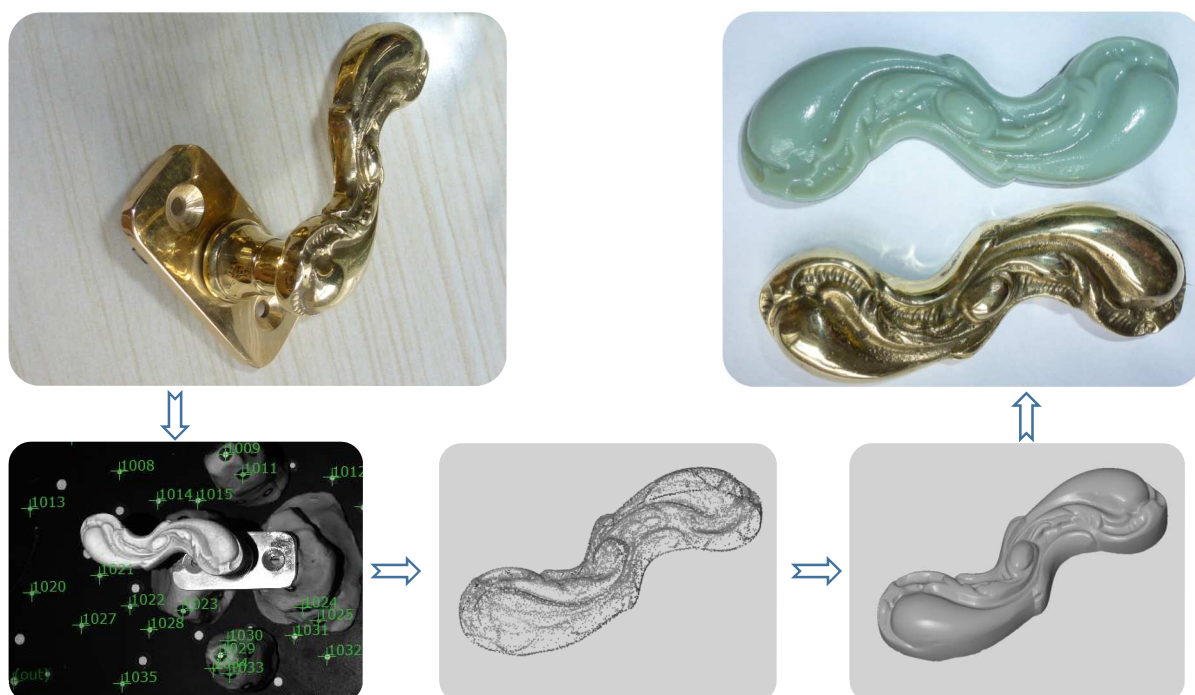


Obr. 3.5 Barevná mapa odchylek, inspekční řez, rozměrová inspekce

V případě kontroly tvaru a rozměrů vyrobené součásti lze poměrně jednoduše provádět grafické porovnání naskenovaných dat s původním CAD modelem formou tzv. barevných map odchylek, inspekčních řezů, obrysových a kontrastních křivek, odchylek bodů atd. (viz Obr. 3.5). Vzhledem k velkému množství změřených bodů na povrchu součásti mohou být tato vyhodnocení v porovnání s kontaktní metodou velmi komplexní a mohou poskytovat podrobnější informace o každém místě povrchu objektu. Základem každé inspekce je správné vyrovnaní naskenovaného modelu v souřadném systému. Nejčastější metody používané pro ustavení je metoda 3 – 2 – 1 (rovina - přímka - bod), Best-Fit (vyrovnaní na celkový tvar obrobku, kdy je aktuální model v kartézském souřadném systému transformován vzhledem k nominálnímu modelu takovým způsobem, aby součet kvadratických odchylek všech změřených bodů na aktuálním díle byl od nominálních dat co nejmenší), Local Best-Fit (jako Best-Fit, ale s tím rozdílem, že shoda je hledána pouze na definované oblasti obrobku), dále dle geometrických prvků nebo především v automobilovém průmyslu velmi často používané ustavení na referenční body (RPS). Kromě grafického porovnání lze na datech samozřejmě provádět klasickou rozměrovou kontrolu formou rozměrových a úhlových kót a výpočet tolerancí tvaru a polohy (GD&T).

Výstupem inspekce je nejčastěji protokol o měření součásti, který obsahuje číselné (nominální a aktuální rozměry, tolerance, odchylky) a grafické výstupy inspekce. Pro počítačovou inspekci (CAI) je třeba použít SW umožňující práci s mrakem bodů či polygonální sítí. Z nejčastěji používaných lze jmenovat GOM Inspect, Polyworks Inspector, Metrolog X4, Geomagic Control X, VX Inspect, Zeiss Calypso atd.

Vzhledem k tomu, že polygonální STL data jsou používaným vstupním formátem pro aditivní technologie, lze naskenovaná data bez větších úprav využít k přímému 3D tisku. Zde však samozřejmě záleží na kvalitě naskenovaného modelu. Ve většině případů je nutné před vlastní výrobou 3D data upravit, tzn. odmazat šum, opravit defekty, uzavřít otvory a neoskenovaná místa, případně jinak model editovat (zrcadlit, úprava měřítka apod.). Při využití specializovaných CAM aplikací lze data ve formátu STL využít i k přímé tvorbě NC programu a následnému obrábění.



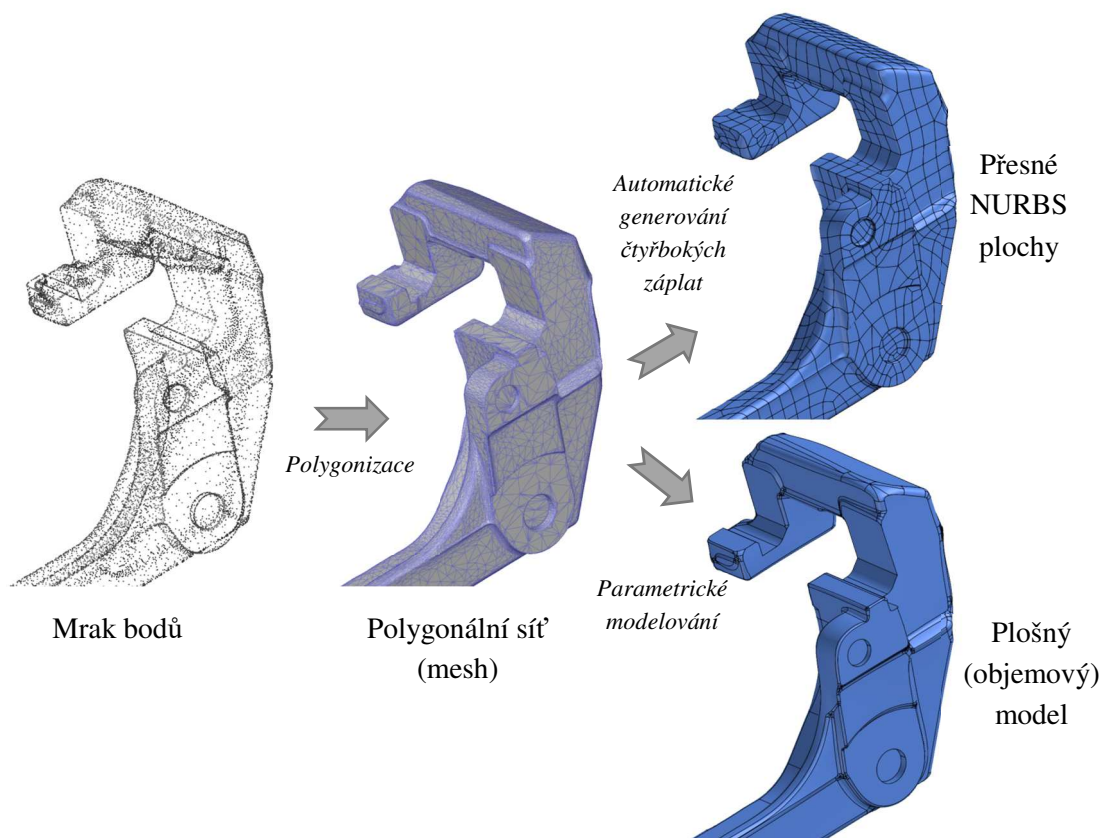
Obr. 3.6 Využití 3D skenování pro 3D tisk

Další charakteristickou oblastí užití výstupů 3D digitalizace je reverzní inženýrství (také RE, Reverse Engineering). Na rozdíl od klasického strojírenského postupu, kdy strojní součást vzniká přímo z 2D výkresu nebo 3D modelu (většinou pomocí CAD/CAM systémů) a končí výrobou reálné součásti, je proces reverzního inženýrství přesně opačný. 3D model součásti vzniká na základě digitalizace reálného modelu (dílu) a následného převodu do 3D CAD dat. Této metody se dnes často využívá z důvodu tvorby chybějící výkresové dokumentace, při aktualizaci CAD modelu, renovaci forem, nástrojů, realizaci fyzikálních zkoušek apod. Tento postup je volen také v případě různých designových modelů - pro převod ručně vyrobených předloh (např. hliněných či sádrových návrhů, koncepčních studií) do 3D grafické podoby k dalšímu zpracování (např. při návrhu designu karoserie automobilu).



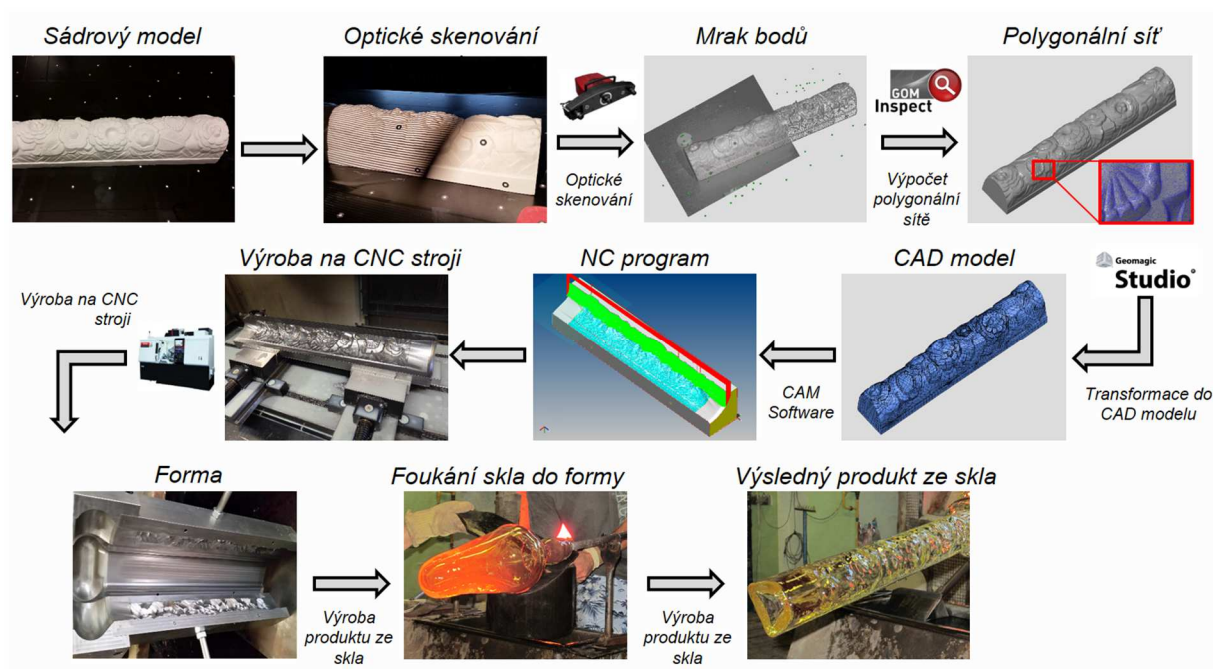
Obr. 3.7 Oblast využití metod reverzního inženýrství

Pro převod naskenovaného modelu (ve formátu mraku bodů nebo polygonální sítě - STL) do plošného nebo objemového CAD modelu (např. IGES, STEP) je nutno použít specializované programy (např. Geomagic Design X, Geom. Studio, PolyWorks Modeler, VXmodel, Tebis). Obecně jsou možné dvě základní cesty transformace. Buď je naskenovaná součást popsána základními geometrickými primitivami (roviny, válce, kužely, koule apod.), resp. výstupem transformace je plně parametrický model vycházející z 3D skenu, viz Obr. 3.8 vpravo dole, nebo se jedná o model tvořený tzv. obecnými plochami, jejichž popis je dán matematicky (program vygeneruje na povrchu polygonální sítě čtyřboké záplaty (tzv. NURBS plochy), které plně reprezentují tvar modelu), viz Obr. 3.8 vpravo nahoře.



Obr. 3.8 Transformace mraku bodů na plošný model (reverzní inženýrství)

Druhý přístup je lépe použitelný např. pro různá umělecká díla, která se nedají vytvořit žádným z dostupných prvků modelování jako vysunutí, šablonování, rotace atd. (příklad na Obr. 3.9, Obr. 3.10). Výhodou tohoto typu zpracování dat je rychlost transformace, nevýhodou horší editace vzniklého CAD modelu a jeho vyšší datová náročnost. Při prvním způsobu se naskenovaná data stejným principem jako v CAD systému přemodelují na parametrický model. Výsledkem tak je geometricky „čistý“ model, který můžeme dle potřeby i zpětně editovat. Celý proces modelování je navíc neustále pod kontrolou přesnosti, díky možnosti zobrazení odchylek vytvořeného těla /skic vůči naskenovaným datům. Velkou výhodou je také možnost tvorby modelu na základě nekompletního skenu. Proces převodu je však časově mnohem náročnější než varianta generování čtyřbokých ploch.

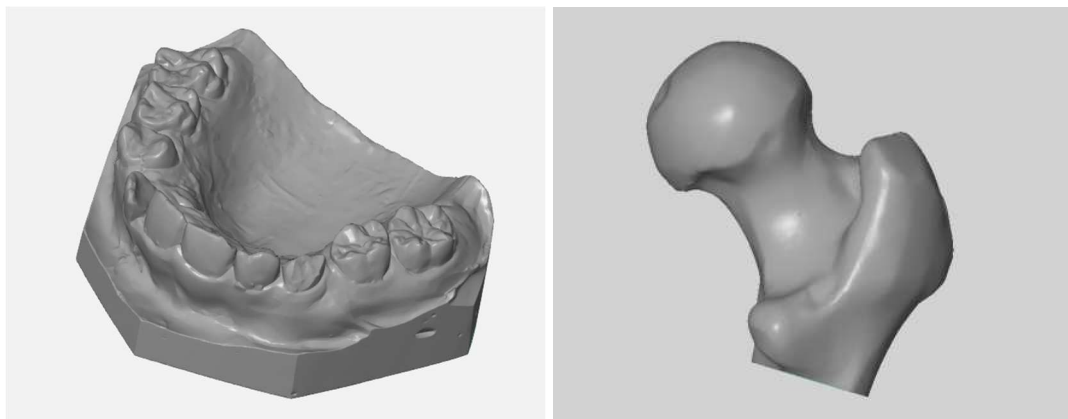


Obr. 3.9 Praktický příklad procesu reverzního inženýrství (výroba formy pro produkty ze skla na základě sádrové předlohy)



Obr. 3.10 Praktický příklad procesu reverzního inženýrství (sádrová předloha, kovová forma)

Kromě technických oborů se v neposlední řadě výstupy z 3D skenování využívají také v lékařství či stomatologii při návrhu implantátů (příklad Obr. 3.11), plánování operací apod. Uplatnění nachází ale i designu, v umění, kultuře, architektuře a archeologii, kde jsou data použita např. pro archivaci a dokumentaci historických artefaktů, soch, ale i budov, archeologických nalezišť apod. (příklad Obr. 3.12).



Obr. 3.11 Využití 3D skenování v lékařství.



Obr. 3.12 Využití 3D skenování v designu.

3.2 Systémy pro 3D skenování

Obecně lze 3D skenery rozdělit dle mnoha hledisek. Souřadnice bodů definující povrch součásti lze získat jak kontaktní, tak bezkontaktní metodou, existují skenery, které dokáží snímat pouze viditelné geometrie, ale i systémy pro skenování vnitřních struktur. Skenery lze dělit na mobilní a stacionární a dále dle různých principů pozicování a snímání. Vzhledem k tomu, že tato práce je věnována nedestruktivním bezkontaktním systémům, které skenují vnější geometrie, bude dále blíže pozornost zaměřena na tuto užší skupinu.

3D skenery

- destruktivní
- **nedestruktivní**
- dotykové
- **bezdotykové**
- stacionární
- mobilní
- **reflektivní (snímající pouze vnější geometrii)**
- transmisivní (průmyslové CT - snímající i vnitřní geometrii)

3.2.1 Principy bezkontaktního snímání

Většina optických zobrazovacích zařízení interpretuje 3D scénu pouze ve 2D podobě. Pro prostorové měření je však ztráta jedné souřadnic nežádoucí. Aby bylo možné dopočítat souřadnice 3D scény, je tedy nutné vedle získaného 2D obrazu z čipů kamer znát další informace o optické soustavě zařízení [72].

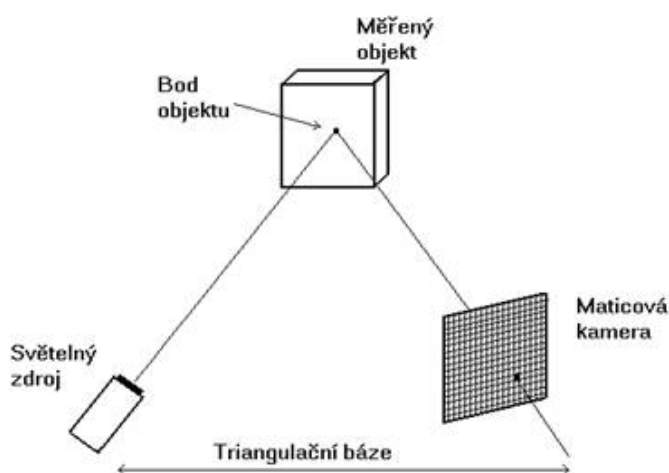
Systémy pro skenování využívají pro určení souřadnic bodů v prostoru několika základních principů. Jedním z často používaných je rastrová projekce světla na snímáný objekt a číslíkové zpracování takto získaného obrazu. Využívána je metoda aktivní nebo pasivní triangulace, jejíž podskupinou je tzv. stereovidění.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

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

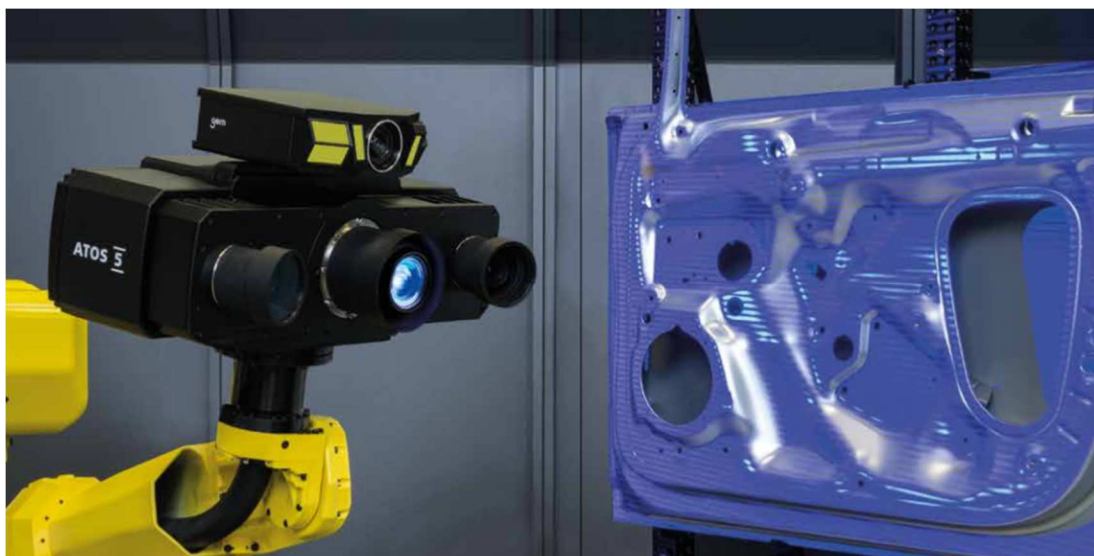
3.2.1.1 Projekce rastru světla

Skenery založené na projekci světla vychází při výpočtu bodů v prostoru z metody aktivní triangulace. Ta je v dnešní době pravděpodobně nejpoužívanější technikou optické digitalizace. Přístroje jsou složeny minimálně ze dvou senzorů - nejčastěji světelného zdroje a kamery [2] (Obr. 3.13). Jako promítaný vzor může být použit bod (1D triangulace), světelný pruh (2D triangulace) nebo strukturovaný světelný svazek - sada pruhů, mřížka apod. (3D triangulace). Obraz promítnutého rastru

je snímán kamerou a následně počítačově zpracován. Některé systémy využívají ne jedné, ale více kamer. To má pozitivní vliv na přesnost měření, dochází k redukci šumu a snížení chybně změřených bodů především na hranách rovnoběžných s promítanými pruhy. Oproti jedno-kamerovým systémům je zde také možná automatická kontrola aktuálního stavu kalibrace. Typickým příkladem systému na tomto principu jsou průmyslové skenery od německé firmy GOM - řada skenerů ATOS (viz Obr. 3.14) (které budou dále použity v této práci), přenosné skenery (HandySCAN 3D BLACK, Go!SCAN SPARK, MetraSCAN 3D) od kanadské firmy Creaform, tříkamerové systémy od firmy Hexagon (WLS400M, resp. BLAZE 600M) a mnoho dalších (Leica T-Scan, Zeiss Comet, AICON StereoScan).



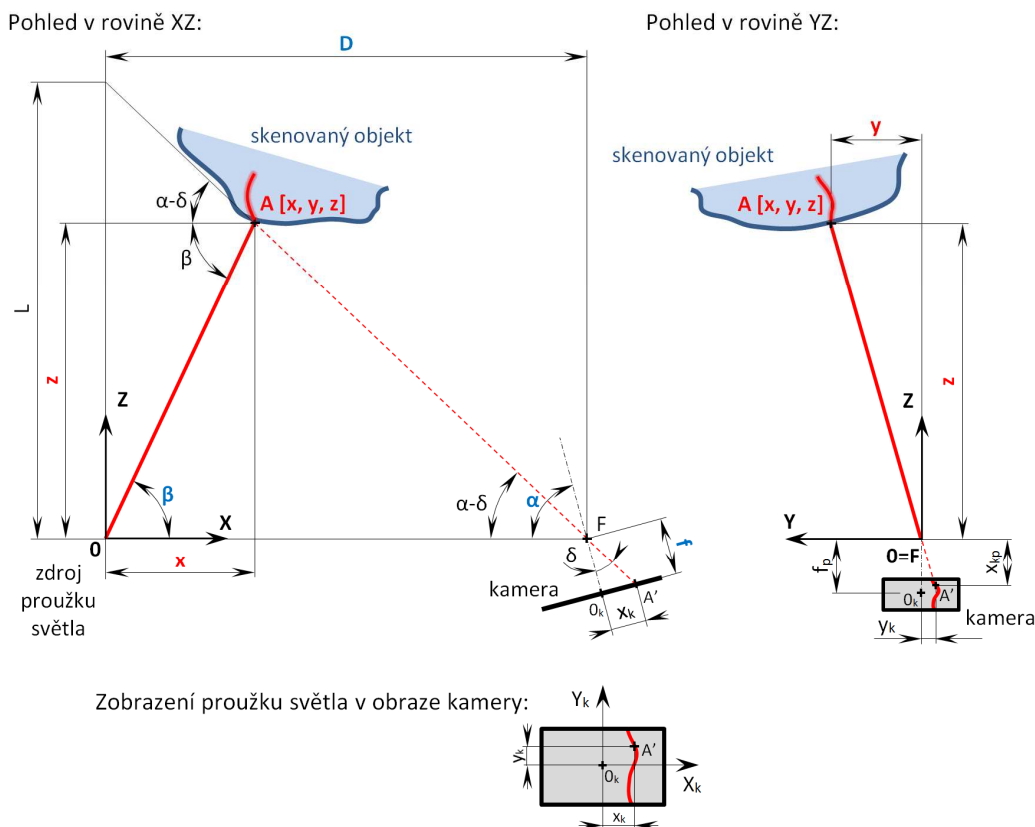
Obr. 3.13 Princip triangulace [72]



Obr. 3.14 Vysokorychlostní skener ATOS 5 pracující na principu projekce modrého světla (firma GOM) [73]

Příklad výpočtu souřadnic měřeného bodu (bodů) pomocí triangulace je uveden na Obr. 3.15. Zdroj světla, snímač a osvětlený bod na měřeném objektu definují tzv. *triangulační trojúhelník*.

Základní princip vychází z faktu, že trojúhelník je definován délkou jedné strany a dvěma přilehlými úhly. Zbývající dvě strany a třetí úhel lze dopočítat. Pro výpočet je tedy nutné znát konstrukční parametry skeneru - vzdálenost mezi ohniskem kamery a projektoru (D) (nazývána také jako *triangulační báze* – viz Obr. 3.13), úhel optické osy kamery (α), úhel osy projektoru – promítaného světla (β) a ohniskovou vzdálenost optické soustavy (f). Tyto parametry jsou dány hardwarem, nebo jsou vypočítány při kalibraci [70]. Zatímco úhel mezi paprskem světla a triangulační bází (β) je pro daný promítaný paprsek neměnný, úhel na straně snímáče ($\alpha - \sigma$) je závislý na pozici vysvíceného bodu na CCD snímáči, resp. na poloze (souřadnicích) hledaného bodu A .



Obr. 3.15 Výpočet souřadnice bodu A pomocí triangulace [70]

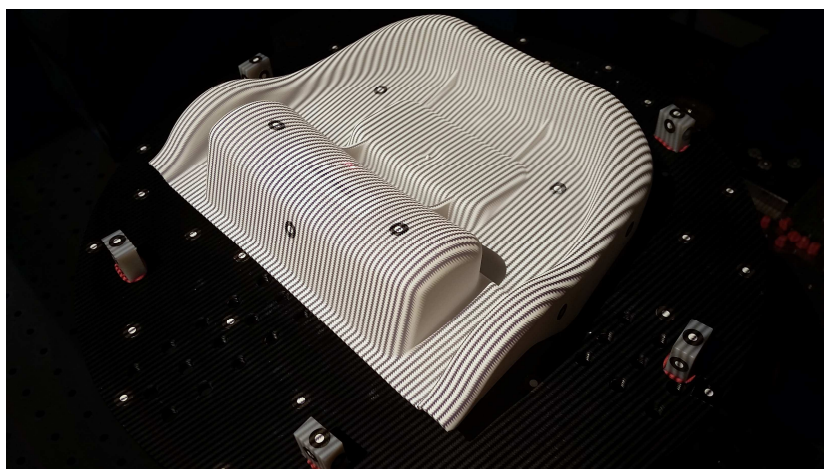
V obraze kamery je nejprve nalezen proužek světla promítaný projektozem na měřenou součást. Tím jsou známy obrazové souřadnice bodů, které leží v oblasti promítaného proužku v souřadném systému kamery X_k, Y_k . Pro obraz vybraného bodu A' o zjištěných souřadnicích $A'[x_k, y_k]$ lze z triangulačních trojúhelníků vypočítat jeho prostorové souřadnice $A[x, y, z]$ dle následujících vztahů [70].

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

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

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

Stejným způsobem lze vypočítat i další body v místě proužku. V případě 3D triangulace (promítání více proužkového rastru) (viz Obr. 3.16) jsou pak výstupem souřadnice mnoha bodů (tzv. mrak bodů) v celém zorném poli (měřicím objemu) skeneru viditelných z dané pozice skeneru.



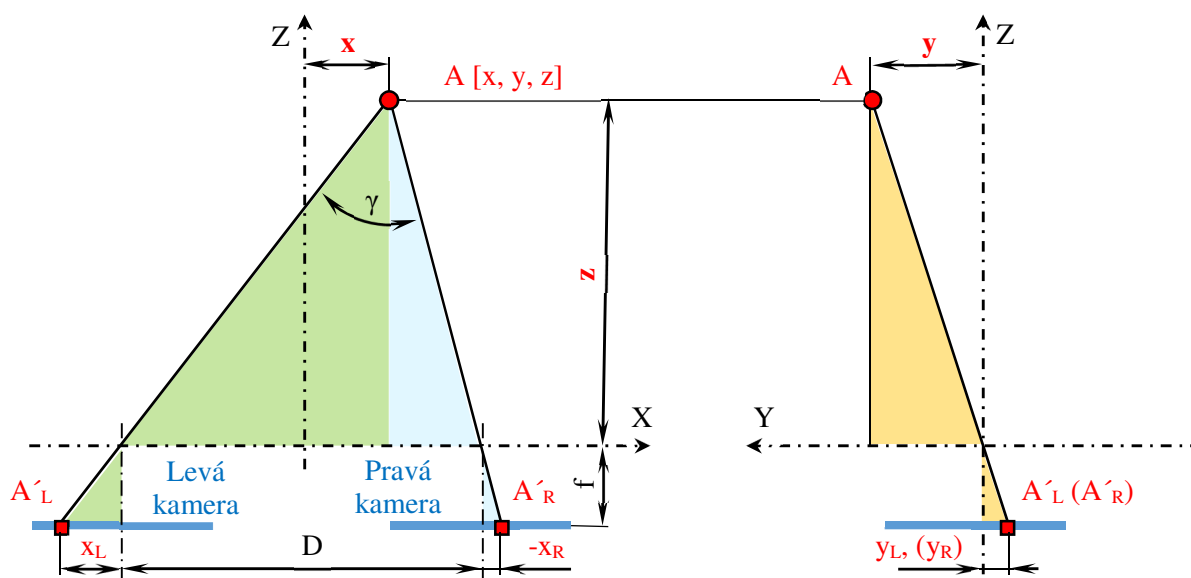
Obr. 3.16 Proužková projekce 3D skeneru na měřené součásti

3.2.1.2 Stereovidění

Metoda stereovidění vychází v podstatě též z principu triangulace. Protože se ale v tomto případě nevyužívá žádného zdroje světla, ale objekt je sledován „pasivně“ pouze (nejčastěji dvěma) kamerami, mluvíme o tzv. *pasivní triangulaci*. Pro výpočet polohy měřeného bodu je i zde nutné znát parametry zařízení - ohniskovou vzdálenost optické soustavy f a vzájemnou vzdálenost mezi optickými osami kamer (tzv. *bázi*) – viz parametr D na Obr. 3.17. Tu systém určí během kalibrace, tedy snímání etalonu známých rozměrů. Na základě podobnosti trojúhelníků (odpovídající si trojúhelníky jsou v obrázku označeny stejnou barvou) lze sestavit tři rovnice o třech neznámých – ze kterých je možno vypočítat souřadnice hledaného bodu $A [x, y, z]$:

Pohled v rovině XZ

Pohled v rovině YZ



Obr. 3.17 Metoda pasivní triangulace – stereovidění

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

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

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

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

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

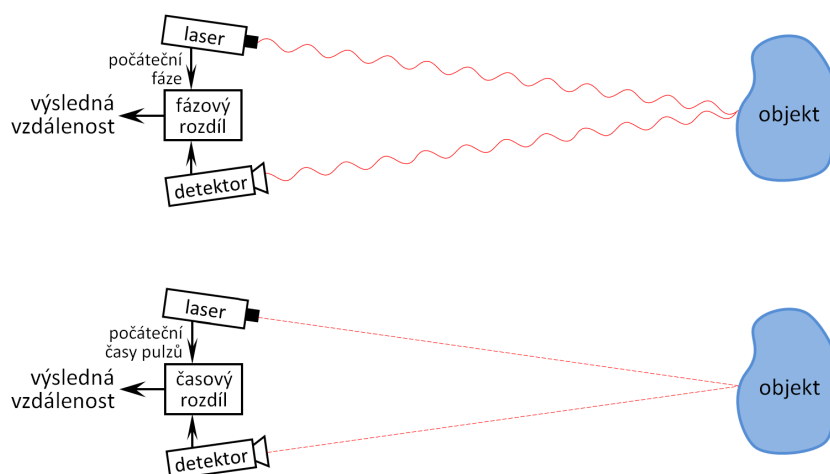
$$y = y_L \cdot \frac{D}{x_L - x_R} = y_L \cdot \frac{D}{p} \quad (8)$$

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

Kde parametr p bývá označován jako *horizontální paralaxa* a představuje rozdíl mezi x_L a x_R . S ním souvisí úhel γ – tzv. *úhlová paralaxa*, jež svírají sdružené paprsky mezi měřeným bodem A a ohnisky obou kamer. Pro dosažení dostatečné citlivosti měření je třeba zajistit, aby tento úhel, potažmo velikost horizontální paralaxy neklesala pod určité minimum. U profesionálních skenerů bývá úhel mezi kamerami zpravidla v řádu desítek úhlových stupňů.

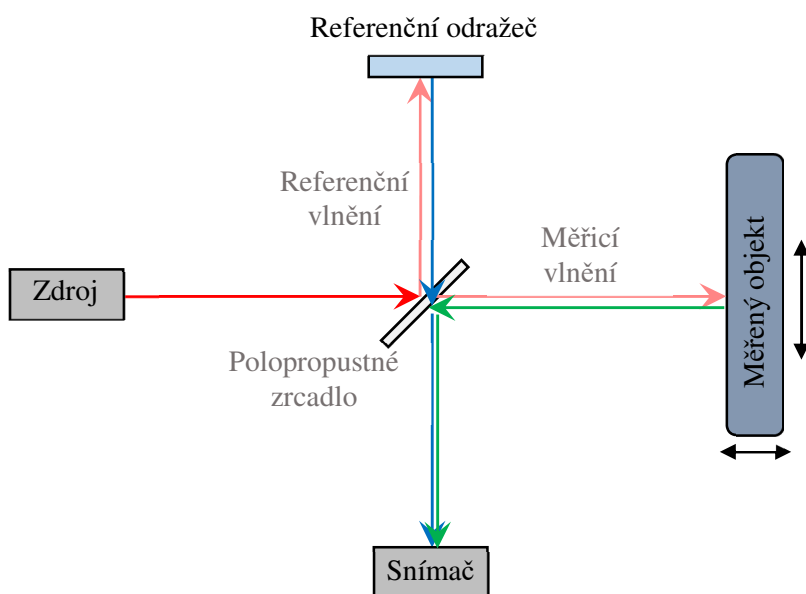
3.2.1.3 Detekce laserového paprsku

Další z používaných principů bezkontaktní digitalizace povrchu objektu je obecně založen na měření doby letu světelného paprsku. Pro ten je třeba používat monochromatického koherentního světla, mezi jehož zdroje patří nejčastěji lasery. Proto pro systémy pracující na tomto principu také časté označení *laserové skenery* [70]. Při použití této metody se paprsek světla vyslaný ze skeneru odrazí od měřeného objektu a vzdálenost (z -ová souřadnice měřeného bodu) je detekována buď z časového zpoždění (metoda „time-of-flight“) navraceného laserového paprsku (modulovaného světla) nebo měřením jeho fázového posunu (metoda „phase shift“), vycházející nejčastěji z metody optické interferometrie – viz Obr. 3.18. V některých případech jsou pro zvýšení přesnosti kombinovány obě metody.



Obr. 3.18 Základní princip laserových skenerů [70]

Můžeme se setkat s několika druhy modulace signálu (např. pulzní, spojitá, pseudonáhodná) a různými principy optické interferometrie (např. pracující s několika vlnovými délkami, holografická, skvrnová, s bílým světlem), (více např. [72], [74]). Základní princip optické interferometrie je přiblížen na Obr. 3.19. Laserový světelný paprsek je na polopropustném zrcadle rozdělen na vlnění referenční a měřicí (signálové). Referenční vlna po odražení od referenčního odražeče interferuje s vlnou odraženou od měřeného předmětu. Jelikož vzdálenost předmětu (měřeného bodu) je na rozdíl od vzdálenosti referenčního odražeče proměnlivá, mění se na základě její polohy i intenzita výsledného vlnění. Jeho vyhodnocením můžeme získat informaci jak o amplitudě vlny, tak i o fázi, resp. fázovém posunu.



Obr. 3.19 Základní princip interferometru (Michelsonův interferometr)

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

3.2.2 Transformace do globálního souřadného systému

Souřadnice bodů získané dle výše uvedených principů jsou vždy vztaženy k lokálnímu souřadnému systému skeneru. Pro digitalizaci celé součásti je však zpravidla nutné díl měřit z více pozic, a tedy měnit polohu skeneru vůči obrobku. V takovém případě již nelze pracovat pouze v souřadném systému skeneru, ale je nutné lokální souřadnice transformovat do jedinečného globálního souřadného systému objektu. Pro snímání polohy skeneru v prostoru a tedy výpočet jeho absolutní polohy vůči měřenému objektu se bez ohledu na výše uvedené principy snímání používá několik metod.

3.2.2.1 Měřicí ramena, SMS

První možností je snímat polohu skenovací hlavy podobným způsobem, jako je měřena poloha dotykové sondy u kontaktních měřicích systémů. Pokud umístíme skenovací hlavu na měřicí rameno, bude její poloha v prostoru dopočítána z úhlového natočení jednotlivých kloubů ramene. V případě použití na portálovém měřicím stroji pak z lineárních odměřovacích pravítek jeho pohybových os. Do výpočtu dále vstupují i rozměry skenovací hlavy, kdy je na základě kalibrace zjištěna a následně do výpočtu zahrnuta její geometrie (výsledné souřadnice změřených bodů jsou dle této geometrie korigovány). Výsledná poloha měřeného bodu v globálním souřadném systému je pak určena na základě opticky nebo laserem (nebo kontaktní sondou) změřené vzdálenosti od měřicí sondy a jednotlivých úhlových natočení ramen resp. pozic os portálového stroje. Výhodou tohoto principu je jednoduchost provedení, nevýhodou pak omezený pracovní prostor nebo zhoršená pohyblivost skenovací hlavy. Tyto systémy jsou často využívány ve strojírenství, kdy lze s vysokou přesností (v řádu tisícín až setin mm) měřit i středně velké objekty. Příklad kombinace měřicího ramene s kontaktní sondou a laserového skeneru je uveden na Obr. 3.20.



Obr. 3.20 7osé rameno Absolute Arm a detail laserového skeneru RS5 (firma Hexagon) [75]

Jak již bylo zmíněno v kap.3.2.1.3, u laserových skenerů založených na principu měření doby letu světelného paprsku dojde ve směru jeho vyslání ke změření jednoho bodu na povrchu objektu. Pro získání mračna bodů celého měřeného objektu je třeba postupně měnit směr vysílaného paprsku. To bývá u těchto systémů řešeno např. „rozmetáním“ laserového paprsku rotujícím zrcátkem v kruhových drahách ve vertikální rovině a současným pomalým potáčením hlavy skeneru kolem jeho svislé osy. Pro určení absolutních souřadnic jednotlivých změřených bodů systém využívá a kombinuje informaci o vzdálenosti bodu a aktuální poloze hlavy skeneru, resp. směru vyslání paprsku. Velkou výhodou tohoto principu je možnost měření i na velké vzdálenosti (až stovek metrů) při zachování poměrně vysoké přesnosti (v řádu mm). Příkladem takového systému může být laserový skener Trimble TX nebo Faro Focus (viz Obr. 3.21). Využití těchto systémů je např. pro měření ve stavebnictví, geodézii, archeologii, pro měření výrobních hal, památek apod.



Obr. 3.21, Trimble TX6 3D Laser (vlevo) [76], laserový skener FARO Focus 350 s dosahem 350 m (vpravo) [77]

3.2.2.2 Tracker systém

Další možností je využití bezkontaktní metody snímání polohy skeneru pomocí tzv. Tracker systému. Jedná se o optický nebo laserový systém, který v reálném čase sleduje polohu skenovací hlavy v prostoru a definuje jeho absolutní pozici. Pro jednoznačnou detekci vzdálenosti a natočení je hlava skeneru pro tyto účely opatřena soustavou speciálních reflexních bodů (zrcátek). Výhodou oproti předchozímu řešení umístění skeneru na ramena nebo SMS je zpravidla výrazně větší prostorový rozsah měření a volná pohyblivost skeneru. Na druhou stranu je vyžadován neustálý vizuální kontakt mezi skenerem a trackerem. Zpravidla bývá i náročnější kalibrace celého systému.

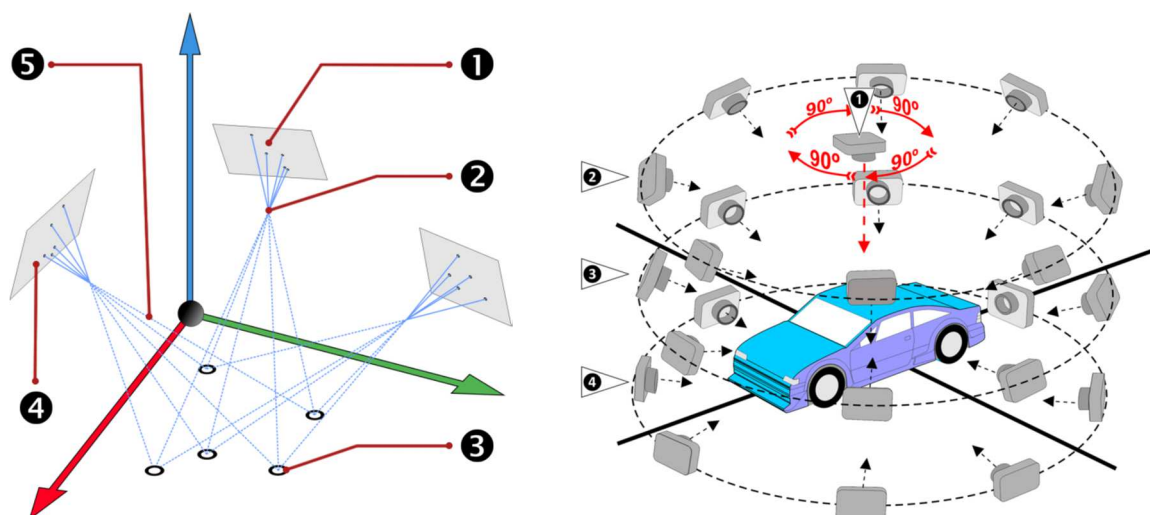


Obr. 3.22 Ruční laserový skener Leica T-Scan 5 a Leica Absolute Tracker AT960 (vlevo, fi Hexagon) [75], 3D scanner MetraSCAN a Trackovací systém C-Track (vpravo, fi Creaform) [78]

3.2.2.3 Referenční body

Jednodušší možností nevyžadující trekovací zařízení je metoda absolutního určování polohy skeneru v prostoru založená na využití tzv. pozičních značek, především u systémů využívajících proužkovou projekci světla. V tomto případě se měřený objekt (nebo jeho okolí) opatří speciálními referenčními body, které jsou ještě před samotným skenováním povrchu součásti (nebo v jeho průběhu) identifikovány skenerem. Ten je pak na základě zjištěné pozice bodů schopen transformovat jednotlivé skeny do společného globálního souřadného systému. Podmínkou je viditelnost min. 3 (resp. 4 u některých systémů) bodů známých z některého z předchozích snímků. Vzhledem k tomu, že identifikace referenčních bodů probíhá nejčastěji na principu podobnému stereovidění, bývají systémy využívající tento princip transformace zpravidla vybaveny min. dvěma kamerami. Výhodou této metody je absence dalšího zařízení (trackeru, měřicího ramena) a tedy plná volnost při pohybu se skenovací hlavou. Na druhou stranu nevýhodou je nutnost opatřovat měřený objekt referenčními značkami a riziko rostoucí chyby transformace vznikající navazováním jednotlivých snímků, zvláště pokud je velikost měřeného objektu několikanásobně větší než měřicí objem skeneru.

Tento problém lze eliminovat využitím tzv. **fotogrammetrie**, což je metoda původně využívána v geodézii pro zjišťování souřadnic bodů (rozměrů) z fotografií. Při fotogrammetrii je objekt, resp. referenční body na něm umístěné, vyfotografován z několika pozic a výškových hladin (viz Obr. 3.23, vpravo). Kromě běžných bodů, tzv. nekódovaných, se ve snímcích musí v dostatečném množství (min. 5 v každém snímku) nacházet i jedinečné, tzv. kódované body a objekty pro určení referenční vzdálenosti (např. referenční tyče). Při dodržení základní metodiky je pak na základě pořízené sady 2D fotografií software schopen s vysokou přesností (zpravidla řádově setiny mm) vypočítat souřadnice referenčních bodů v trojrozměrném prostoru. Tyto informace se následně využijí při samotném skenování, kdy díky znalosti polohy referenčních bodů na celém objektu již není nutné snímky navzájem překrývat, a dochází tak ke zvýšení přednosti i rychlosti digitalizace.



Obr. 3.23 Princip fotogrammetrické metody: Bodové paprsky referenčních bodů ve 3 snímcích (vlevo), metoda fotografování velkých objektů (vpravo) [79]

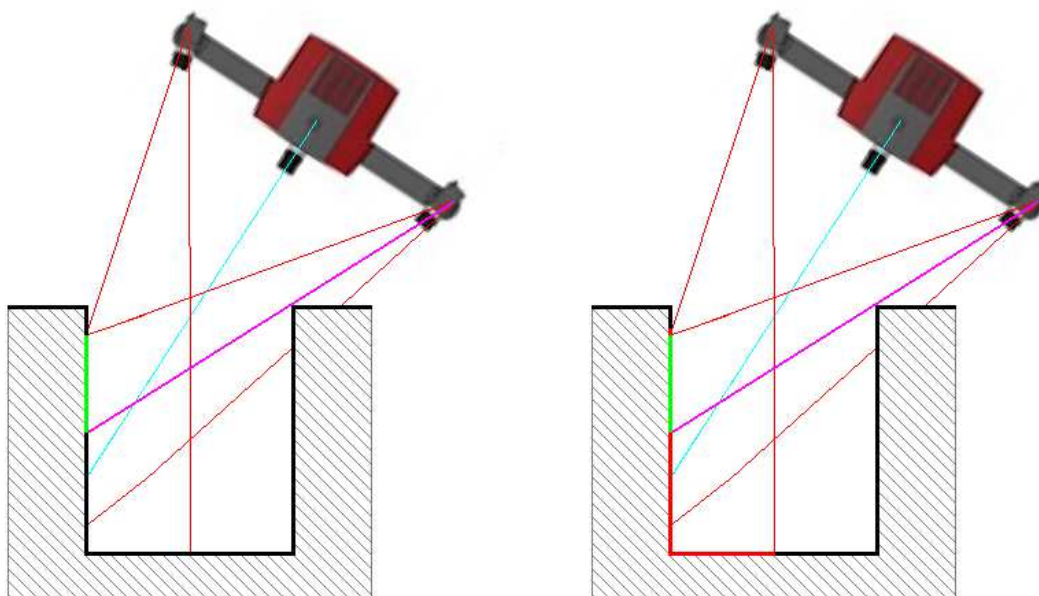
3.2.2.4 Geometrie, textura

Především u levnějších systémů se využívá transformace snímků na základě geometrie (tzv. BestFit), barvy, textury. Tato metoda obecně dosahuje nižší přesnosti při skládání snímků. Někdy bývá tento postup jako alternativní i u systémů, které defaultně využívají pro transformaci poziční značky (hybridní metoda). Tyto systémy lze jednoduše využít např. při skenování lidského těla, při digitalizaci uměleckých děl nebo všude tam, kde nevyžadujeme vysokou přesnost [70].

Existuje mnoho dalších metod, kombinací nebo podskupin optického měření 3D objektů. Cílem této práce však není detailně popsat všechny existující techniky, ale seznámit s nejčastěji používanými, resp. s těmi, na kterých pracují systémy použité v praktické části práce.

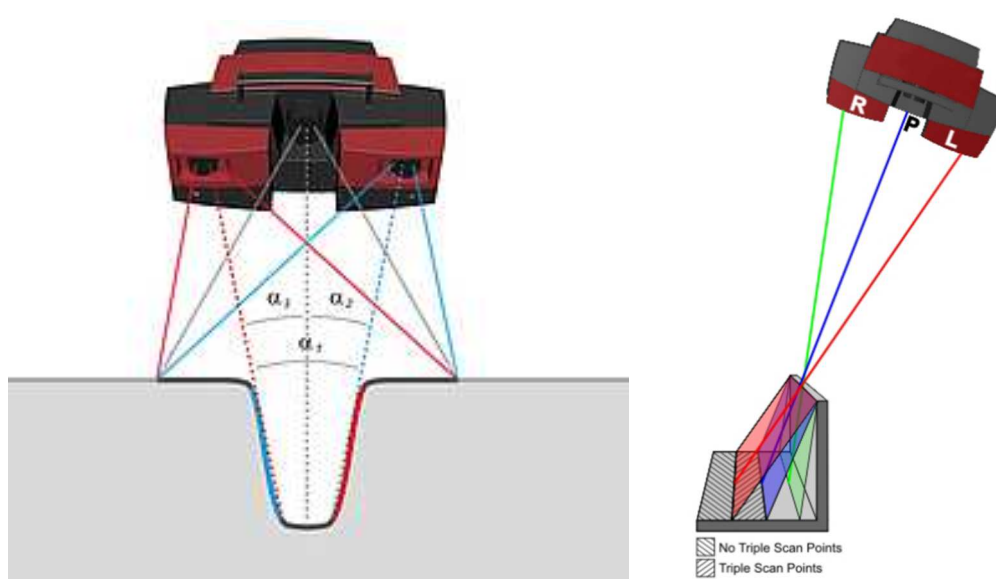
3.2.3 Skenovatelnost vnitřních geometrií

Jak již bylo uvedeno, jednou z velkých nevýhod optické 3D digitalizace je neschopnost zachytit špatně opticky přístupnou vnitřní geometrii, typicky otvory do větší hloubky. Důvodem je nutnost dívat se na skenovanou plochu pod určitým úhlem (ze zkušenosti je to minimálně kolem 10 - 25°) a navíc je z principu měření nutné, aby stejné místo bylo zároveň v zorném poli projektoru, tak jedné (ATOS III), (viz Obr. 3.24 vpravo) nebo ideálně obou kamer (ATOS II, ATOS III – vypnutá funkce Triple Scan), (viz Obr. 3.24 vlevo).



Obr. 3.24 Zachycená plocha uvnitř otvoru (systém využívající dvě kamery (vlevo), metoda Triple Scan (vpravo)) [80]

Senzory ATOS pracují na principu aktivní triangulace a stereovidění. Díky kalibraci SW zná fixní úhel mezi oběma kamerami a jejich vzájemnou vzdálenost. Systém zachytí 3D měřené body v oblastech, které vidí obě kamery společně (Obr. 3.24 vlevo, zelená oblast). Z kalibrace jsou též známy úhly mezi jednotlivými kamerami a projektorem. Díky rastrové projekci tak SW dokáže zaznamenat i body viditelné pouze jednou kamerou (Obr. 3.24 vpravo, červená oblast). Tak lze naskenovat i hůře přístupná místa nebo otvory do větší hloubky. Kombinací principu stereo-kamer a Triple Scan technologie lze tedy vypočítat prostorové body ze tří různých průsečíků paprsků (L + P kamera, projektor + P kamera, projektor + L kamera). Tento princip trojitěho skenování nabízí výhody pro měření reflexních ploch a objektů s vnitřními tvary. Výsledkem jsou kvalitnější naměřená data bez otvorů nebo nepravidelných bodů (Obr. 3.25).



Obr. 3.25 Princip Triple Scan technologie [80], [81]

V [82] byla provedena analýza a odvození vztahu závislosti nasnímané hloubky otvoru na jeho průměru pro systém ATOS II. Vycházelo se z předpokladu, že vnitřní válcovou stěnu otvoru lze naskenovat pouze šikmým pohledem vedeným kruhovým ústím otvoru, které však svým tvarem cloní pohledu kamer a dovolí při jednom záběru zachytit pouze část vnitřní plochy připomínající parabolu. Grafickou analýzou byla nalezena hranice tohoto obrazce a plocha byla následně rozvinuta do roviny. V další fázi byla nalezena závislost, určující do jaké hloubky bude otvor naskenován při daném počtu snímků v rámci celého obvodu (Obr. 3.26). Podíl obvodu otvoru (o) a počtu snímků definuje šířku (δ) rovinného rozvinu naskenované plochy odpovídající jednomu snímku. Ta nám zároveň určuje maximální hloubku, které jsme při daném počtu snímku schopni zachytit. Čím větší množství snímků použijeme, tím větší bude také naskenovaná hloubka otvoru. Limitováni jsme však maximální dosažitelnou hloubkou (y_2). Příklad prezentovaný na obrázku je zpracován pro systém ATOS II s optikou MV 700 mm a skenování pod úhlem 25° vzhledem k ose otvoru.

$$o = \pi \cdot d \quad (10)$$

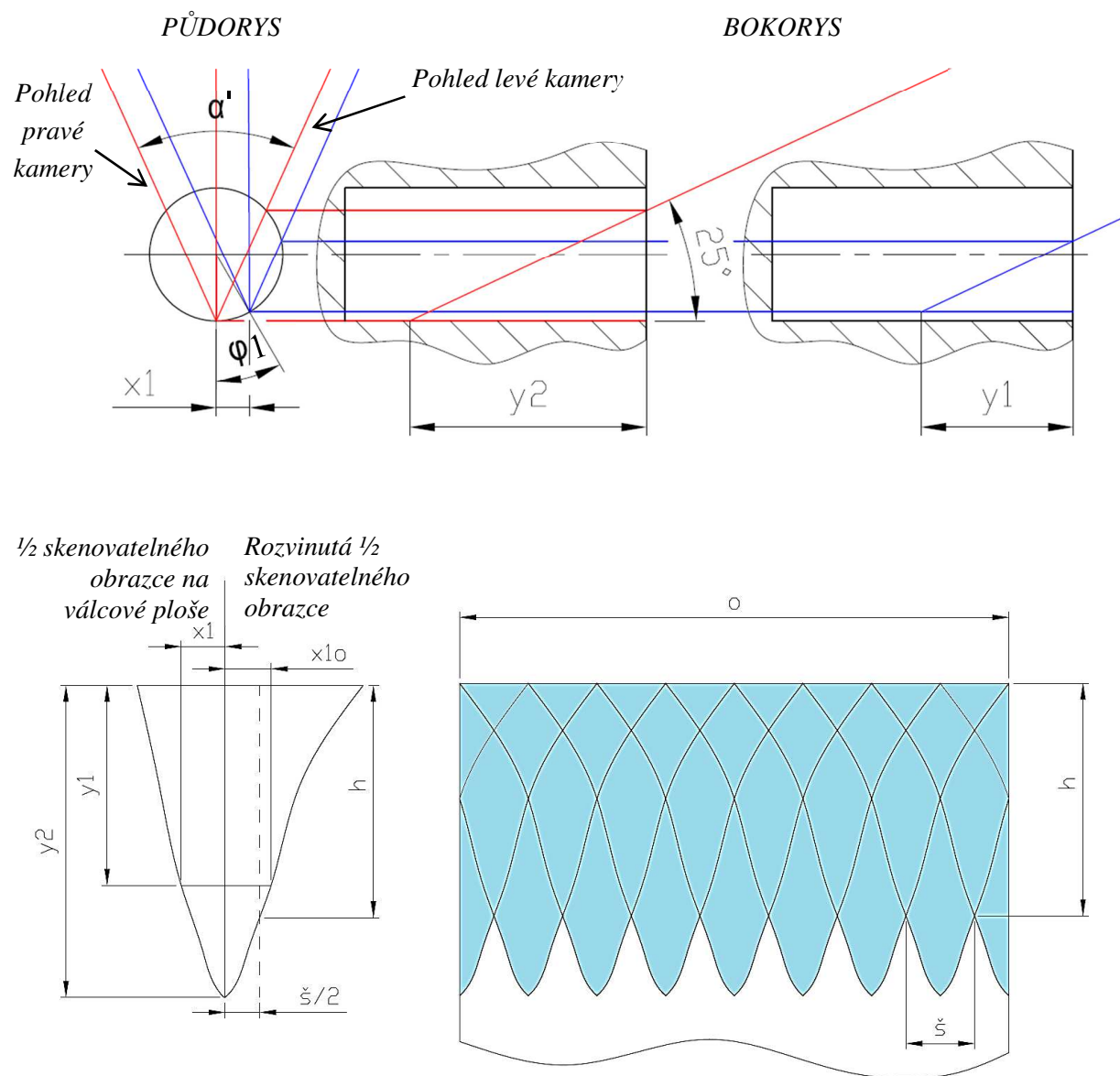
$$x1o = \frac{d}{2} \cdot \varphi \quad (11)$$

- o obvod otvoru
 d průměr otvoru
 $x1o$ délka oblouku
 α' průmět úhlu kamer do půdorysné roviny
 δ, h velikost rovinného rozvinu naskenované polohy odpovídající části jednoho snímku
 $x1, y1, \varphi1$ pomocné parametry jednoho z konstrukčních bodů grafické analýzy (viz. Obr. 3.26)
 $y2$ maximální dosažitelná hloubka skenování

Grafická analýza byla vypracována pro všechny tři měřicí objemy skeneru ATOS II. Zjištěné vztahy jsou uvedeny v Tab. 3.1. Z nich je zřejmé, že logicky čím menší úhel je mezi kamerami, tím jsme schopni zaznamenat otvor do větší hloubky. Vzhledem k tomu, že úhel je u systému ATOS dán hardwarem a pro zajištění dostatečné přesnosti se nejčastěji pohybuje v rozmezí $25 - 30^\circ$, lze zobecnit, že u dvou-kamerového systému lze otvor naskenovat maximálně cca do hloubky rovnající se jejímu průměru. U systému využívajícího metodu Triple Scan, pak bude tato hloubka teoreticky až téměř dvojnásobná. Jistým způsobem však klesá přesnost a kvalita naskenovaných dat.

	MV 50	MV 250	MV 700
Úhel kamer α	24°	31°	22°
h / d (pro 8 snímků)	1,2	1,0	1,3

Tab. 3.1 Závislost naskenované hloubky otvoru na jeho průměru



Obr. 3.26 Grafická analýza skenovatelnosti otvoru (Atos II, MV 700) [82]

3.3 Skenery použité v práci

V experimentální části této habilitační práce bude pozornost zaměřena na optický způsob digitalizace. Pro praktická měření byl jako optický bezkontaktní 3D skener zvolen na pracovišti dostupný měřicí systém německé firmy GOM, konkrétně **ATOS II** (Obr. 3.27) a **ATOS III Triple Scan** (Obr. 3.28). Dá se říci, že použité postupy a zjištěné výsledky budou povětšinou obecně platné i pro skenery jiných výrobců pracujících na stejném principu.

3.3.1 3D skener ATOS

Systém ATOS je optický 3D skenovací systém od německého výrobce GOM, který pracuje na principu triangulace a strukturovaného světla. Celý systém se skládá ze skenovací hlavy (skeneru), která obsahuje tři objektivy – projekční jednotku a dvě kamery, dále z řídicí jednotky, stativu a výkonného počítače nebo notebooku s příslušným softwarem. Jako příslušenství lze pro urychlení skenování využít poloautomatický otočný stůl s naklápěcí jednotkou a svislý portál (lift) pro motorické polohování hlavy skeneru ve svislém směru. Volbou vhodných objektivů kamer a projektoru definujeme ve směru skenování velikost 3D oblasti, ve které je možné součást digitalizovat - tzv. měřicí objem (blíže kap. 3.1.1, viz Obr. 3.3). Ten je rozhodující nejen pro velikost skenovaného dílu, ale významným způsobem ovlivňuje také hustotu nasnímaných dat a samotnou přesnost snímání. V současnosti jsou v laboratoři katedry dostupné 3 měřicí objemy pro každý měřicí systém, jak je uvedeno v Tab. 3.2 a v Tab. 3.3. Nejmenší měřicí (tzv. SO) objem, je vhodný pro digitalizaci velmi malých objektů (řádově milimetry až centimetry) a umožňuje nasnímat objekt ve velmi vysokém rozlišení (rozteč bodů 0,04, resp. 0,03 mm). Umožňuje tak na díle zachytit i velmi jemné detaily v řádu desetin milimetru. Zároveň dosahuje nejvyšší přesnosti, která se pohybuje kolem 0,01 mm. Naproti tomu největší měřicí objem se používá při digitalizaci objektů o velikosti i několika metrů, jako jsou např. velké formy, rozměrné výlisky v automobilovém průmyslu apod. Možnost zachytit velkou oblast na jeden záběr je však vykoupena nižším rozlišením nasnímaných dat.



Obr. 3.27 Optický 3D skener ATOS II s měřicím objemem MV250 (vlevo) a SO (vpravo)

Měřicí objem	Rozlišení	Měřicí vzdálenost
55×44×30 (MV 55, SO)	0.04 [mm]	300 [mm]
250×200×200 (MV 250)	0.18 [mm]	730 [mm]
700×560×560 (MV 700)	0.50 [mm]	1030 [mm]

Tab. 3.2 Seznam měřicích objemů pro systém ATOS II

Měřicí objem	Rozlišení	Měřicí vzdálenost
100×75×70 (MV 100)	0.03 [mm]	490 [mm]
320×240×240 (MV 320)	0.10 [mm]	830 [mm]
700×530×530 (MV 700)	0.21 [mm]	830 [mm]

Tab. 3.3 Seznam měřicích objemů pro systém ATOS III



Obr. 3.28 Optický 3D skener ATOS III Triple Scan

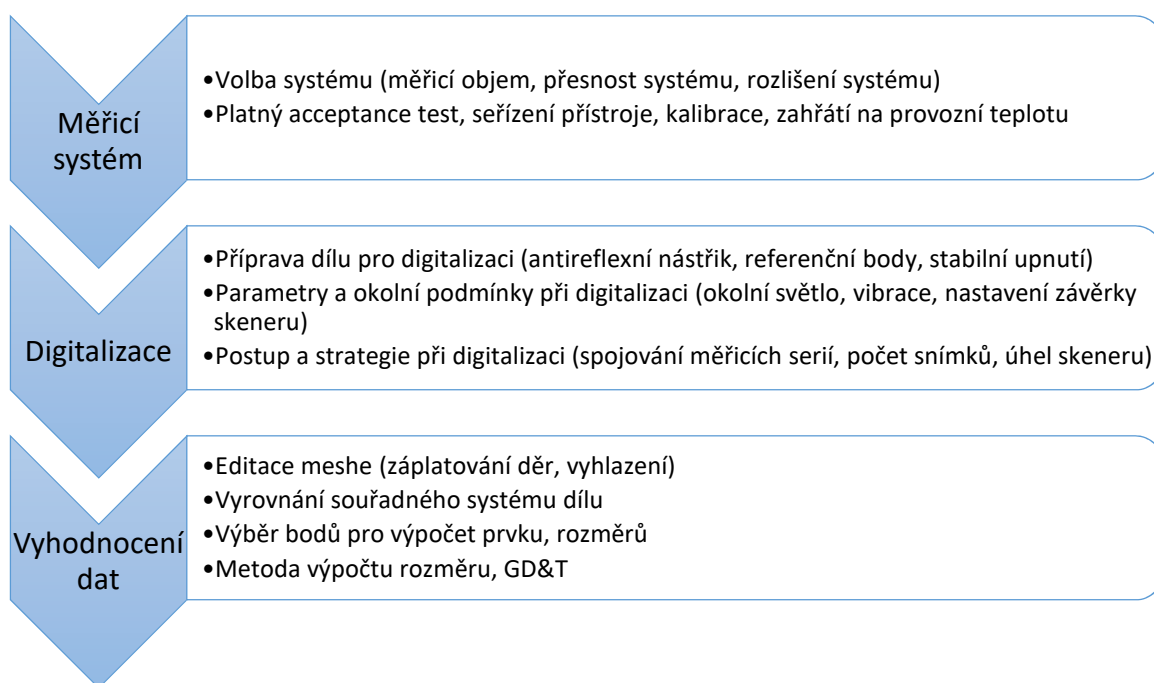
Transformace jednotlivých snímků do společného souřadného systému (do jednoho celku) probíhá víceméně automaticky, a to na základě společných referenčních bodů, které se před měřením musí umístit na měřenou součást, případně do bezprostředního okolí – na upínací přípravek, měřicí stůl apod. V případě nedostatku referenčních značek systém alternativně umožňuje transformovat snímky také pomocí BestFitu na skenovaný tvar.

Systém ATOS II používá projekční jednotku s bílým světlem a rozlišení kamer je 1,4 mil. pixelů. Nová generace ATOS III Triple Scan dosahuje rozlišení 8 mil. pixelů na každé kameře a využívá LED projekci modrého světla (Blue Light Technology). Digitální projektor umožňuje světlo promítat v různě širokých, orientovaných a fázově posunutých pruzích. Hlavní výhodou úzkopásmového modrého světla je dle výrobce lepší možnost filtrace rušivého okolního osvětlení, díky čemuž je systém méně náchylný na rušivé okolní vlivy a v kombinaci s Triple Scan technologií umožňuje kvalitnější skenování špatně přístupných a reflexních míst (blíže vysvětleno v kap. 3.2.3 a v kap. 3.4.2.4). Tzv. „Triple“ technologie doplňuje klasické stereoskenování o dva další módy, kdy oblasti, které nebyly viditelné oběma kamerami zároveň, jsou doplněny o plochy naskenované kombinací projektoru a levé resp. pravé kamery. Kromě této významné funkcionality systém disponuje dalšími zajímavými inovacemi, jako je trekování zvolené komponenty v reálném čase nebo zpětnou projekcí zvolené geometrie na fyzický díl.

3.4 Faktory ovlivňující rozměrovou přesnost

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

Proměnné, které mohou ovlivnit správnost a kvalitu naměřených dat, lze u inspekce pomocí bezkontaktních skenerů rozdělit zhruba do tří základních skupin, jak je znázorněno na Obr. 3.29. Prvním krokem je volba správného systému pro digitalizaci, druhá oblast zahrnuje korektně provedenou digitalizaci a poslední, třetí skupina shrnuje bezchybné vyhodnocení naskenovaných dat.



Obr. 3.29 Parametry ovlivňující přesnost inspekce

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

3.4.1 Měřicí systém

3.4.1.1 Volba systému

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

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

Velikost výrobku bude klíčová pro volbu vhodného měřicího objemu (přístroje s potřebnými pracovním rozsahem). Některé systémy mají pevný pracovní rozsah, nebo rozsah nastavitelný pouze softwarově. Řada skenerů využívající především triangulační metody dovoluje nastavení polohy kamery vůči projektoru, díky čemuž umožňují skenovat různě velké součásti bez výměny optiky. Profesionální systémy, k nimž patří i systém ATOS, pak řeší změnu měřicího objemu hardwarově, a to výměnou objektivů kamer a projektoru. To sice klade vyšší nároky na obsluhu, ale díky tomu lze dosáhnout vysoké přesnosti měření se širokou škálou rozměrové variability. Příklad měřicích objemů, které výrobce nabízí pro systém ATOS Triple Scan je uveden v Tab. 3.4 (zeleně zvýrazněné MV dostupné na KSA).

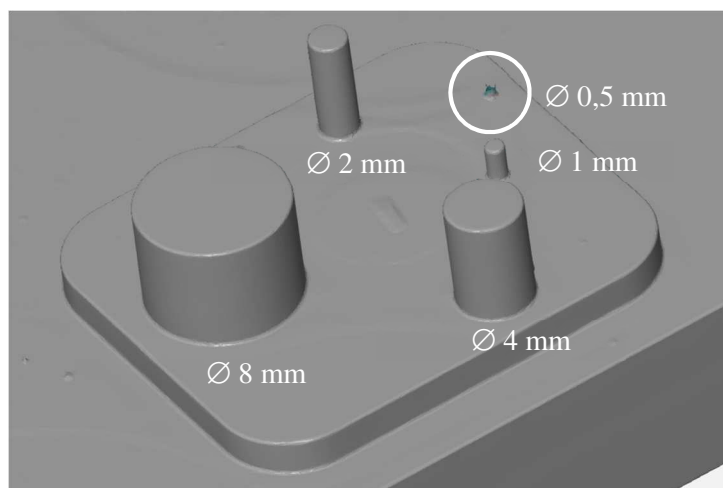
Senzor	Pozice kamery	Název	Měřicí objem (MV) D x Š x V [mm]	Vzdálenost mezi naměřenými body [mm]	Doporučené referenční body [mm]	Měřicí vzdálenost [mm]	Úhel mezi kamerami
ATOS III rev. 02	400	MV 1500	1500 x 1130 x 1130	0,450	Ø 8	1930	12°
		MV 1000	1000 x 750 x 750	0,310	Ø 5	1280	18°
		MV 700	700 x 530 x 530	0,210	Ø 3	830	27°
		MV 560	560 x 420 x 420	0,180	Ø 3	830	27°
		MV 320	320 x 240 x 240	0,100	Ø 1,5	830	27°
		MV 170	170 x 130 x 130	0,050	Ø 0,8	830	27°
	SO	MV 320	320 x 240 x 240	0,095	Ø 1,5	490	28°
		MV 170	170 x 130 x 130	0,054	Ø 0,8	490	28°
		MV 100	100 x 75 x 70	0,031	Ø 0,8	490	28°
		MV 60	60 x 45 x 35	0,017	Ø 0,8	490	28°
		MV 38	38 x 29 x 15	0,012	Ø 0,8	490	28°

Tab. 3.4 Měřicí objemy dostupné pro ATOS III Triple Scan [71]

Jak je evidentní z uvedené tabulky, systém ATOS III Triple Scan můžeme při správné volbě měřicího objemu použít jak pro skenování velkých dílů (max. MV je 1500 mm), tak pro skenování velmi malých dílů (min. MV je 38 mm), kdy je zároveň dosahováno velmi husté sítě naměřených bodů (pro MV 38 je teoretická vzdálenost naměřených bodů necelých 12 μm). Dle předpokládané skladby měřených dílů ve firmě je tedy vhodné pořídit přístroj s odpovídajícími měřicími objemy. Na pracovišti katedry Výrobních systémů a automatizace (KSA) jsou pro systém ATOS III Triple Scan k dispozici tři měřicí objemy (MV 700, MV 320 a MV 100). Je tedy zřejmé, že bude-li úkolem zdigitalizovat díl o max. rozměrech např. 300 x 300 mm, bude ideální zvolit z dostupných konfigurací měřicí objem MV 320. Obecně pokud zvolíme měřicí objem výrazně větší, než jsou rozměry obrobku, bude zbytečně klesat rozlišení nasbíraných dat a samozřejmě také rozměrová přesnost. Naopak při volbě výrazně menšího měřicího objemu bude nutné pro zdigitalizování celého dílu skládat mnoho snímků dohromady, což také může vést k růstu nepřesnosti digitalizace (způsobené chybou transformace jednotlivých snímků, viz např. [56], [58]), ale především bude samotný proces výrazně časově a technicky náročnější. Tato volba se používá např. při skenování velmi velkých výrobků (v řádu metrů až desítek metrů) nebo v případě, že je nutné měřenou součást oskenovat s vyšším rozlišením, než nám poskytuje měřicí objem vhodný pro danou velikost součásti. V tomto případě je však doporučováno kombinovat samotný proces skenování s fotogrammetrií (systém TRITOP), díky které získáme souřadnice referenčních bodů v prostoru pro celou scénu a následně již provádíme skenování na tyto známé pozice referenčních bodů. Tak dojde ke zvýšení přesnosti při skládání jednotlivých skenů v rámci globálního souřadného systému.

Minimální tolerance, které je požadováno dle výkresu vyhodnotit, musí být větší, než je definovaná přesnost (maximální chyba) zvoleného metrologického systému (více viz kap. 3.1.1, kap. 4.1). Máme-li měřit rozměry s přesností na desetiny mm, lze 3D skener, jehož chyba měření je definována v setinách mm, použít. Pokud by však na výkresu byly tolerované rozměry v řádu setin, nebo dokonce tisícín mm, je samozřejmě již nutné volit přesnější systém měření (typicky CMM), než je bezkontaktní digitalizace. V opačném případě nelze zjištěný výsledek považovat za relevantní, neboť budou mít velmi velkou nejistotu měření.

Minimální rozměry (detaily), které jsme schopni bezkontaktní digitalizací změřit, souvisí s rozlišením skenovacího systému (více viz kap. 3.1.1, kap. 4.2.5). Tento parametr je v případě optických 3D skenerů ovlivněn především rozlišením CCD čipu kamer a velikostí použitého měřicího objemu. Např. systém ATOS III Triple Scan s rozlišením CCD čipu 8 Mpx dosahuje pro MV 100 mm teoretického rozlišení 0,03 mm (viz Tab. 3.4). Naproti tomu pro MV 1000 již minimální vzdálenost mezi naměřenými body na povrchu součásti (hustota mraku bodů) klesá na 0,31 mm. Tento parametr je směrodatným údajem pro odhad toho, jaký minimální detail (prvek, plochu) jsme na díle schopni zaznamenat a tedy i změřit a vyhodnotit. Vzhledem k tomu, že pro zaznamenání prvku je třeba ideálně až několika desítek bodů, lze i s přihlédnutím ke zkušenostem říci, že min. velikost prvku by měla být alespoň desetinásobkem použitého rozlišení. To dokládá i experiment provedený v kap. 4.2.5, kde je této problematice věnována bližší pozornost. Příklad je též uveden na Obr. 3.30. Z něho je patrné, že při digitalizaci skupiny válců o různém průměru s využitím systému ATOS III Triple Scan s MV 320 (kde dle tabulky Tab. 3.4 je teoretická vzdálenost mezi body 0,1 mm) není válec o průměru 0,5 mm naskenován vůbec (zakroužkováná oblast – je zde patrný pouze „pahýl“), naopak válec o velikosti od 1 mm výše již jsou naskenovány relativně bez problémů. U vnitřních geometrií je pak neschopnost skenovat malé geometrie ještě markantnější.



Obr. 3.30 Příklad skenovatelnosti různě velkých prvků (ATOS III Triple Scan, MV 320, teoretická vzdálenost mezi body 0,1 mm)

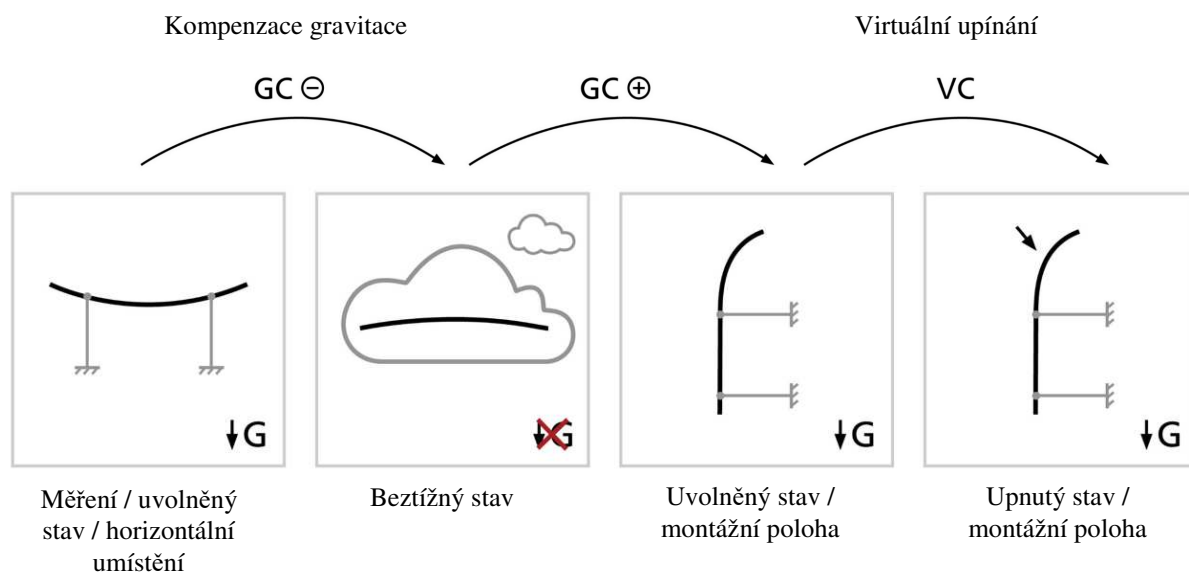
Geometrie obrobku je též důležitá pro posouzení vhodnosti použití optické digitalizace. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, obecně není 3D skenování příliš vhodné pro měření opticky nepřístupných geometrií, typicky např. hlubokých otvorů, vnitřních prohlubní, rohů, drážek apod. Bude-li tedy požadavkem takové geometrie na naskenovaném díle vyhodnocovat, je třeba zvážit vhodnost tohoto systému měření. Pokud se jedná o ojedinělá těžko přístupná místa, lze optickou digitalizaci kombinovat s dotykovou sondou (tzv. Touch probe) a dané místo doměřit kontaktním způsobem (viz Obr. 3.31.). V případě složitých vnitřních struktur je pak vhodné zvolit např. počítačovou tomografii (CT skener).



Obr. 3.31 Kombinace dotykového měření pomocí „Touch probe“ a optické digitalizace [80]

Barva a povrch výrobku mohou také hrát klíčovou roli při volbě vhodného měřicího systému. Zatímco při kontaktním měření je tento atribut zcela nerelevantní, při bezkontaktním měření naopak velmi podstatný. Laserové skenery obecně nemají takový problém s lesklými povrchy jako skenery založené na optickém principu. Skenery používající rastrovou projekci jsou v tomto ohledu na nevhodné optické vlastnosti měřeného povrchu mnohem náchylnější a v některých případech může být problematická i nevhodná kombinace barvy světla projekční jednotky skeneru a barvy měřeného objektu (viz např. [45]). Nejobtížnější jsou pro skenování průhledné, lesklé či černé povrchy. V některých případech však i povrchy zdánlivě vhodné pro optickou digitalizaci (matné, světlé), vykazují vysoké odchylky zjištěných dat. Toto bylo zkoumáno a dokázáno experimentálně a blíže je o této problematice pojednáno v kap. 4.3. Požadujeme-li tedy skenovat výrobek, který má nevhodné optické vlastnosti, je často jedinou cestou využití zmatňujících nástřiků např. na bázi křídý či titanové běloby. Nastane-li tato situace, je třeba dále posoudit dvě otázky. Prvně je třeba rozhodnout, jaký prostředek na zmatnění použijeme (prostředky mají různé vlastnosti a dosahují různé tloušťky nástřiku – možné ovlivnění rozměrů). Blíže je tomuto věnována kap. 4.4, kde byly experimentálně zkoumány vlastnosti různých přípravků pro zmatnění povrchu. Za druhé je třeba mít na zřeteli, zda přípravek nemůže znehodnotit měřený díl. Z neporézních materiálů lze ve většině případů přípravek poměrně lehce umýt, pokud ale bude třeba přípravek aplikovat na porézní materiál, textil, historický exponát apod., je nutné si ověřit, zda aplikací díl neznehodnotíme a můžeme přípravek použít.

Tuhost výrobku je pro posouzení metodiky měření také podstatná. Je-li měřený díl velmi poddajný (guma, měkké plasty, velké plechové výlisky apod.), není často možné ho měřit kontaktním způsobem. Při dotyku sondy s povrchem by se výrobek deformoval a docházelo by ke zkreslení naměřených hodnot. V tomto případě je tedy měření bezkontaktním způsobem ve velké výhodě. Pokud je možné díl oskenovat v jedné poloze, stačí ho dle požadavku volně položit na měřicí stůl, případně dle potřeby fixovat do přípravku a provést digitalizaci. Při ní již na díl nepůsobí žádné síly, a je tedy zaznamenán jeho skutečný tvar. Pokud je ale nutné pro kompletní digitalizaci díl zaznamenat v několika pozicích (typicky během měření díl otočit, pro nasnímání druhé strany) i zde je třeba přizpůsobit strategii měření konkrétním podmínkám. Zásadní je, aby při změně pozice dílu pro měření (při jeho otočení) nedošlo k jeho deformaci. Poddajný díl je proto vhodné fixovat do přípravku nebo volit takové polohy pro měření, ve kterých je ohybová tuhost dílu nejvyšší a nehrozí např. průhyb jeho vlastní vahou. V tomto ohledu je vždy samozřejmě třeba zohlednit požadovaný způsob kontroly. U poddajných dílů, zvláště těch, které jsou součástí další sestavy, je ve většině případů předepsána kontrola v měřicím přípravku, který ho fixuje např. v RPS bodech v požadované poloze. Protože ale výroba speciálních měřicích přípravků vyžaduje mnoho času a nemalé finanční prostředky, začínají se v poslední době na trhu objevovat softwarové nástroje, které umožňují i velké poddajné díly měřit ve volném stavu a použít tzv. virtuální upínání (virtual clamping). Tato SW funkcionalita s využitím metody konečných prvků (MKP) simuluje deformace způsobené fyzickým upnutím dílu. V důsledku je tedy výrobek skenován ve volném stavu a SW dokáže pomocí MKP odečíst deformace způsobené gravitací a následně díl deformovat na základě virtuálně definovaných upínacích míst (viz Obr. 3.32). Tato funkce je nově nabízena i v SW GOM Inspect Professional v 2020.



Obr. 3.32 Princip kompenzace gravitace a virtuálního upínání v SW GOM Inspect [83]

Jak je z výše uvedeného patrné, při volbě měřicího systému musíme zvážit mnoho otázek. Už samotná volba měřicího přístroje významně ovlivňuje kvalitu a přesnost budoucích výsledků měření.

3.4.1.2 Seřízení a kalibrace přístroje

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

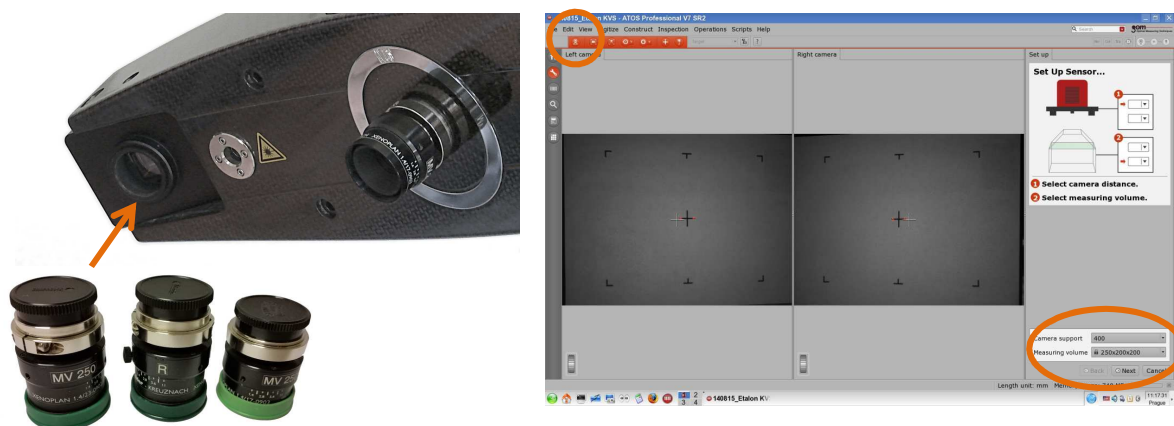
- Platný acceptance test (zkouška / kalibrace v certifikované laboratoři, u výrobce apod.)
- Seřízení přístroje
- Uživatelská kalibrace přístroje
- Zahřátí na provozní teplotu

To, že přístroj měří v deklarované přesnosti, je při jeho koupi doloženo kalibračním listem nebo tzv. **Acceptance testem**. Působením okolních vlivů však přístroj může časem ztrácet svou přesnost, a proto je doporučováno v pravidelných intervalech nechat přístroj znovu zkalibrovat nebo zkontrolovat akreditovanou kalibrační laboratoří (AKL). Akreditační laboratoře mají zavedený jednotný systém jakosti dle ČSN EN ISO/IEC 17025 (Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří), který je posouzen Českým institutem pro akreditaci (ČIA) [84]. Blíže je pojednáno o tzv. Acceptance testu, který se používá pro ověřování přesnosti měření optických systémů, v kap. 4.1.

Úkony, které je třeba učinit pro **seřízení přístroje**, jsou závislé na konkrétním zařízení. U optického 3D skeneru ATOS jde především o nastavení správných úhlů mezi kamerami, zaostření kamer a projektoru, nastavení clony objektivů, případně seřízení laserových ukazovátek. Úplné nastavení senzoru je vyžadováno pouze tehdy, pokud příslušná sada objektivů nebyla v minulosti nikdy používána

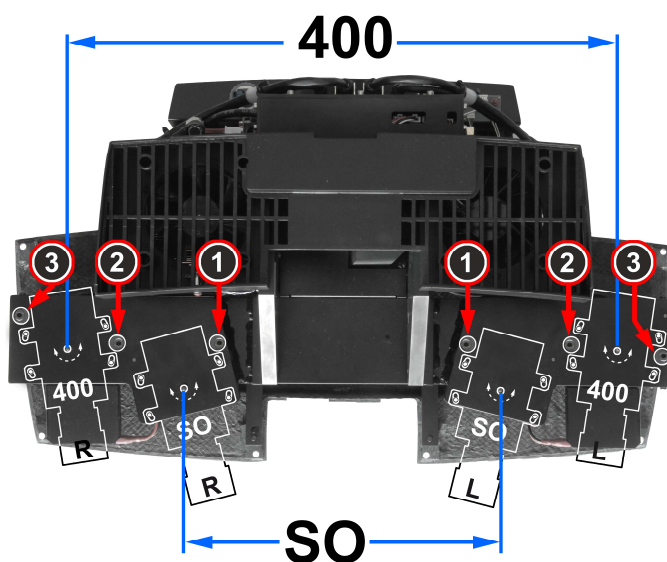
nebo došlo k dekalibraci [71]. Celý skenovací proces, včetně kalibrace a příslušného nastavení je ovládán přímo z obslužného softwaru ATOS Professional a probíhá zhruba v těchto krocích:

- 1) Osazení skenovací hlavy objektivu pro požadovaný měřicí objem (jeden objektiv pro projektor, dva objektivy pro kamery). Kamery se musí umístit na správnou roztečnou vzdálenost dle doporučení výrobce (rozteč tzv. SO pozice kamer je často nižší), (viz Obr. 3.34). U hlavy ATOS II je pro tyto účely předem vyžadována montáž speciální redukce.



Obr. 3.33 Výměna objektivů a volba měřicího objemu

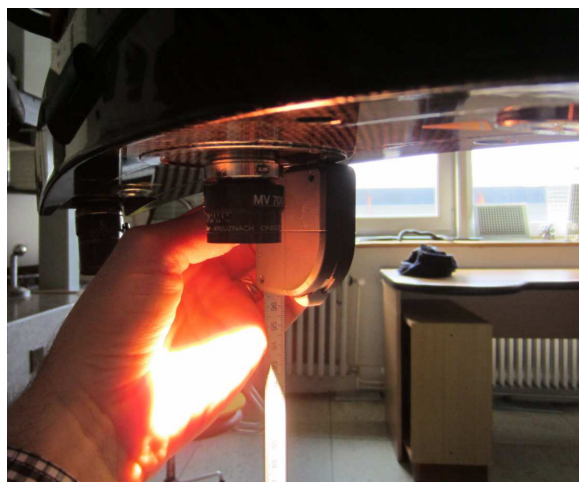
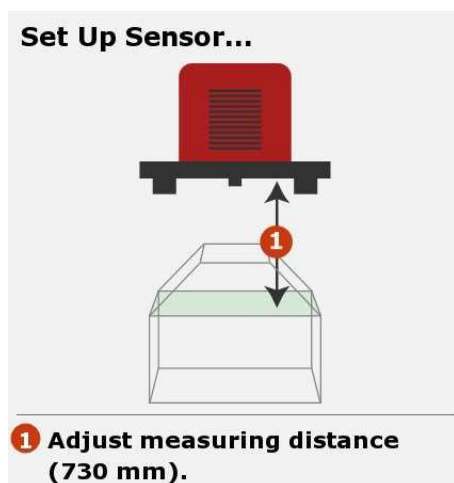
Je-li úhel kamer předdefinován mechanickými dorazy v hlavě senzoru (ATOS III) (označeno čísly 1, 2 a 3 na Obr. 3.34), dle manuálu zvolit správný dotaz pro nastavení přesného úhlu. Posledním krokem je výběr instalovaného měřicího objemu (použité optiky) v řídicím softwaru.



Obr. 3.34 Pozice kamer a excentrické zarážky pro nastavení úhlu kamer (Senzor ATOS Triple Scan) [85]

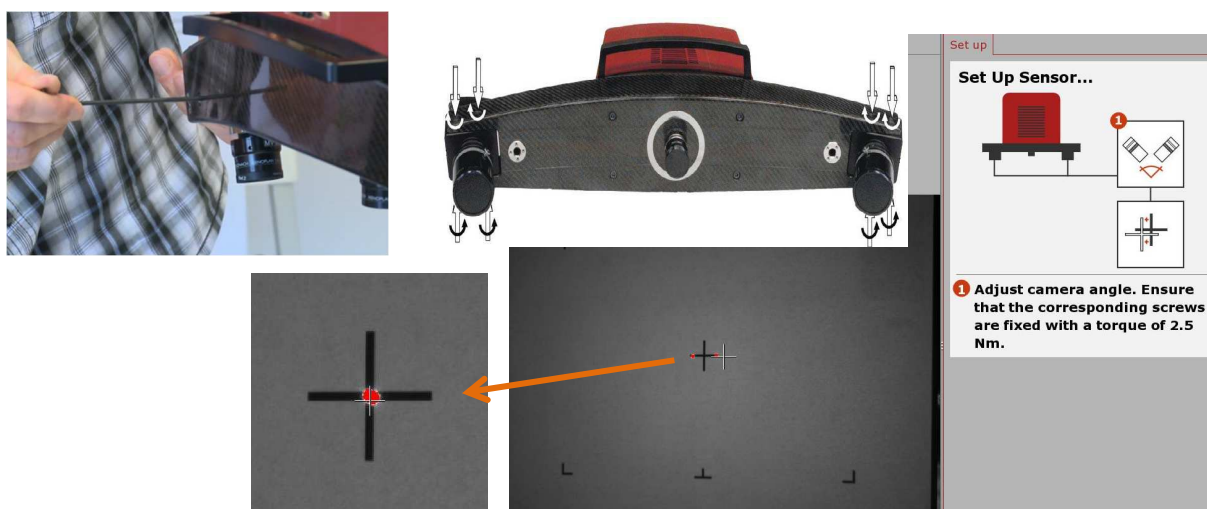
- 2) Pokud skenovací hlava excentrické dorazy pro nastavení úhlů kamer neobsahuje (ATOS II), je vyžadováno úhly seřadit ručně. K tomuto účelu se nejprve hlava skeneru umístí do výrobcem

doporučované měřicí vzdálenosti. Ta je závislá na použitém měřicím objemu a pro námi dostupné sady objektivů pro ATOS II (MV 55, MV 250, MV 700) činí 300, 730 a 1030 mm.



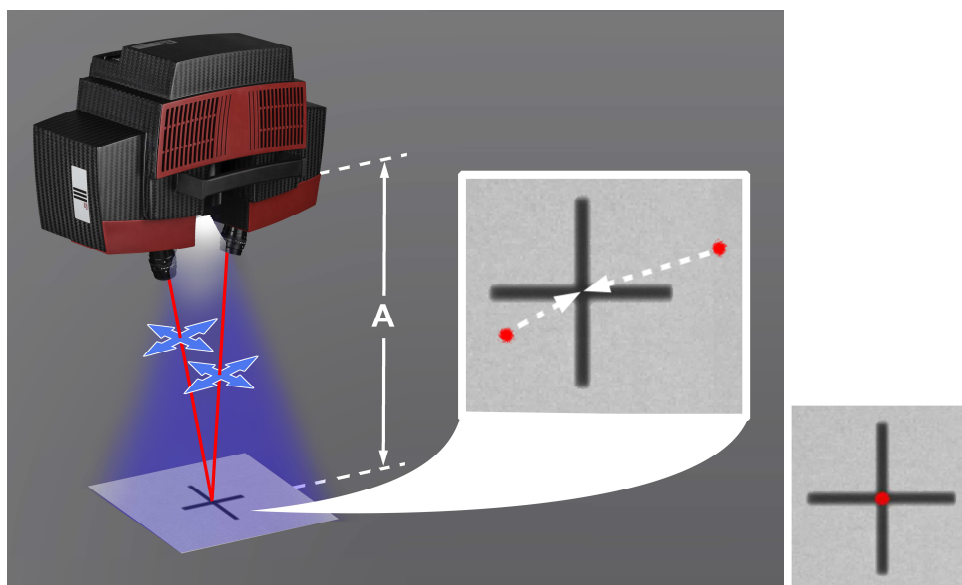
Obr. 3.35 Nastavení měřicí vzdálenosti senzoru

- 3) V případě hlavy ATOS II nastavení jejich úhlů tak, aby se v rovině podložky promítnutý středový kříž projektoru (černý) protnul se softwarovým středem kamery (bílý kříž). Důvodem tohoto procesu je přizpůsobení úhlů kamerových jednotek zvolené měřicí vzdálenosti.



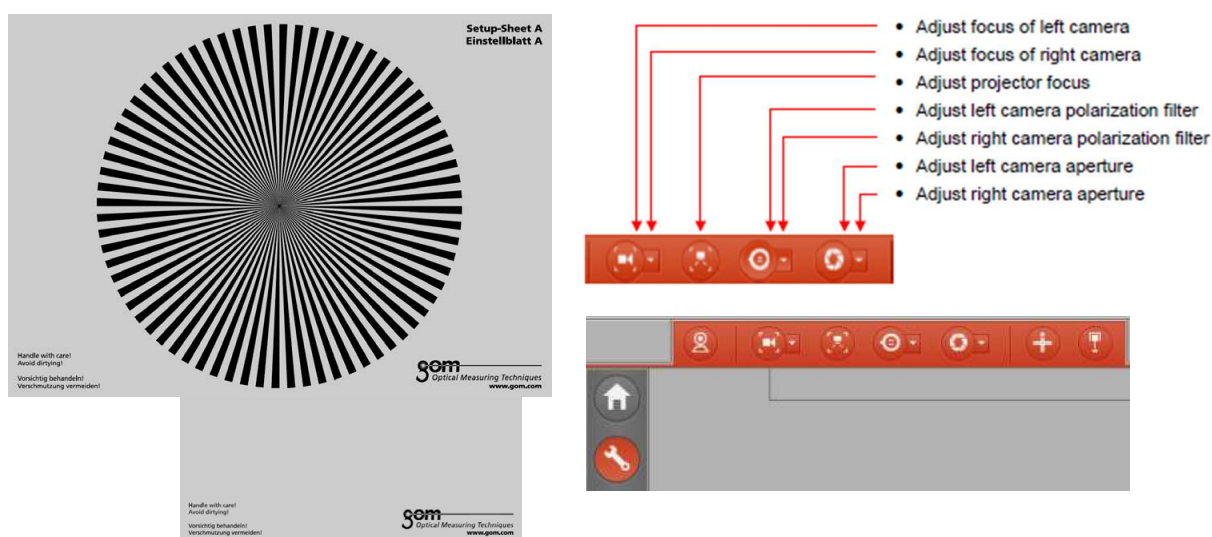
Obr. 3.36 Seřízení úhlů kamer u skeneru ATOS II

- 4) Seřízení dvou podpurných laserových ukazovátek v horizontálním a vertikálním směru tak, aby se jejich paprsky protuly přesně v místě měřicí podložky, tedy ve zvolené měřicí vzdálenosti.



Obr. 3.37 Nastavení pomocných laserových ukazovátek [85]

- 5) Dle nutnosti je možno provádět další pokročilá nastavení senzoru, jako zaostření objektivu projektoru a kamer, seřízení jejich clony, případě polarizačních filtrů. Toto nastavení není vyžadováno provádět při každé výměně objektivů a zpravidla se realizuje pouze při prvním osazení nové optiky, v případě mechanického rozladění nebo v okamžiku, kdy je díky nepřesným výsledkům digitalizace podezření na jejich špatné seřízení. U nového přístroje bývají tyto nastavení zpravidla provedena již od výrobce a není žádoucí do nich zasahovat. Stejně jako ostatní funkce i toto pokročilé nastavení je přístupné z panelu nástrojů obslužného software (Obr. 3.38 vpravo), kde zvolení požadované funkce spustí „průvodce“ pro seřízení daného parametru. Pro seřízení jednotlivých parametrů jsou využívány výrobcem dodané speciální „Setup - Sheet“ archy (viz Obr. 3.38 vlevo).

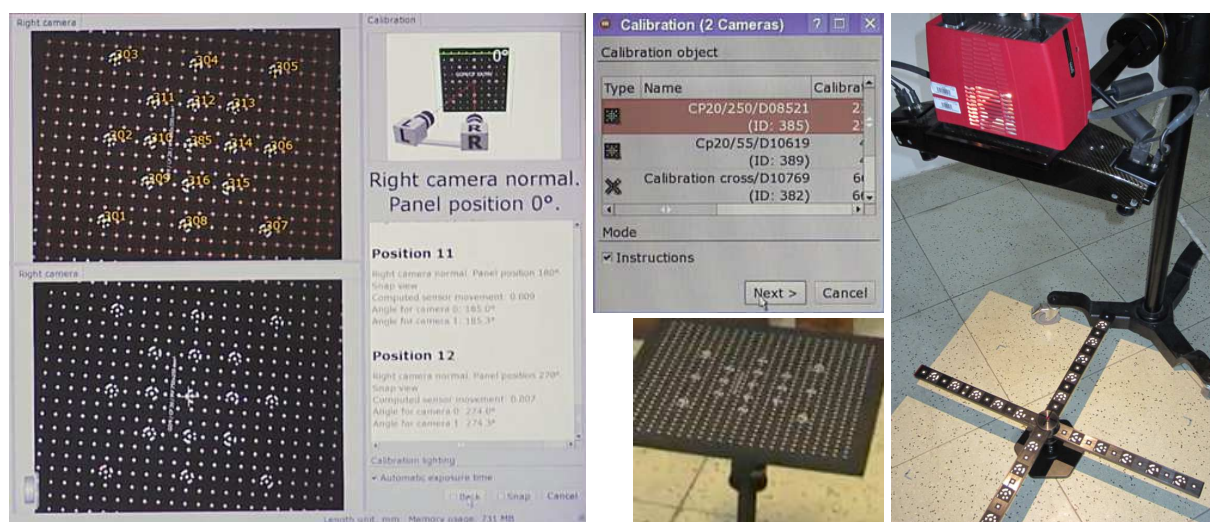


Obr. 3.38 Pokročilá nastavení objektivů (zaostření, nastavení clony) [85]

Zásadním krokem celého procesu přípravy k měření je uživatelská **kalibrace přístroje**. Kalibrace je proces měření, při kterém probíhá nastavení měřicího systému pomocí kalibračních objektů tak, aby byla zajištěna rozměrová stálost měřicího systému. Při tomto procesu software stanovuje geometrické parametry (např. pozici a orientaci jednotlivých kamer) na základě zaznamenaných obrazů kamery. Dále jsou stanoveny zobrazovací charakteristiky objektivů kamer a kamerových čipů. Na základě tohoto nastavení vypočítává software z bodů kalibračního objektu v 2D obrazu kamery jejich 3D souřadnice. Vypočítané 3D souřadnice jsou pak přepočítány zpět na 2D obrazy kamer. Z hlediska pozice těchto referenčních bodů je výsledkem odchylka referenčního bodu (chyba průsečíku) [71]. V případě senzorů ATOS se používají dva různé kalibrační objekty – deska nebo kříž. Kříž se používá pro velké měřicí objemy, desky pro objemy menší. Obecně má každý měřicí objem svůj kalibrační objekt.

Dle výrobce je kalibrace vyžadována před prvním spuštěním měření s nově nainstalovanou sadou objektivů. Systém dále vyžaduje opakovanou kalibraci v případě, že se změnilo nastavení objektivů kamer nebo vzájemná pozice kamer. Kalibraci je také nutné opakovat, pokud systém hlásí možné rozkalibrování [71]. Z vlastní zkušenosti a s přihlédnutím k provedenému experimentálnímu testování (viz kap. 4.5.3.2) je pro zajištění vysoké přesnosti měření vhodné systém kalibrovat také v případě, že byl transportován (byl vystaven vibracím), došlo k výraznější změně teploty okolí, a obecně v pravidelných časových intervalech. A to i v případě, že neměníme HW nastavení kamer, nebo systém sám nehlásí nutnost rekalibrace.

Celý proces kalibrace je řízen softwarem, je postupováno dle průvodce kalibrace. Na počátku kalibračního procesu je třeba v software zadat teplotu, při které bude kalibrace prováděna, aby byla správně spočítána teplotní kompenzace. Dále je nutné podle použitého senzoru nastavit měřicí vzdálenost ke kalibračnímu objektu. Samotná kalibrace pak spočívá v pořízení cca 20 snímků kalibračního artefaktu v definovaných vzdálenostech a úhlech vzhledem k senzoru.



Obr. 3.39 Uživatelská kalibrace senzoru

Po dokončení posledního kalibračního snímku je uživatel seznámen s výsledky kalibračního procesu. Pro senzory ATOS Triple Scan (pro kalibrační desky) se vykazují samostatně výsledky pro projektor a kamery. Aby byly výsledky vyhovující, musí být odchylka kalibrace kamer pod 0,1 pixelu, a odchylka projektoru pod 0,3 pixelu [71]. Pro systém ATOS II (případně ATOS Triple Scan a kalibrační kříž) je kalibrace vyhodnocena jako dobrá, pokud se kalibrační odchylka (počítaná z průměrné chyby

průsečíku pro všechny referenční body) pohybuje mezi 0,01 a 0,04 pixely a odchylka nastavené kalibrační vzdálenosti kalibračního objektu je menší než 0,005% kalibrační vzdálenosti. Vysoká chyba tohoto parametru by naznačovala poškozený nebo nesprávný kalibrační objekt.

Aby se pracovalo za provozních podmínek, je před samotným měřením, stejně tak jako před každou kalibrací, výrobcem doporučováno, nechat senzor cca 15 – 30 minut **zahřát na provozní teplotu**. Systém sice automatiky monitoruje teplotu senzoru a uživatel je upozorňován příslušnými statusy, zda je již dostatečně zahřátý, nicméně měření není při nedostatečném zahřátí nijak blokováno. Z důvodu úspory času se pak v praxi stává, že obsluha započne měření dříve, než je skener plně temperován. Jedním z dílčích cílů výzkumu (viz kap. 4.5.3.6) proto bylo ověřit, zda má (případně jak výrazný) nedostatečné ohřátí senzoru na provozní teplotu skutečně vliv na přesnost digitalizace.

3.4.2 Digitalizace

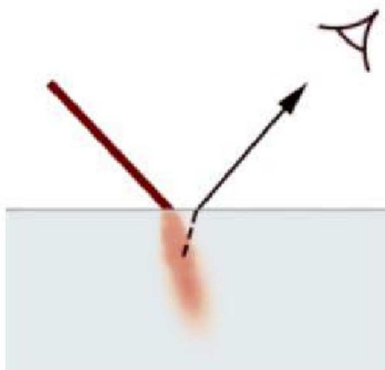
Pokud jsme zvolili vhodný systém pro digitalizaci, je správně seřízen a kalibrován, můžeme přistoupit k samotnému procesu skenování. Jeho cílem je převést reálný výrobek do digitální podoby k dalšímu zpracování. I v tomto kroku je třeba dodržovat doporučené postupy, aby proces digitalizace proběhl korektně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

3.4.2.1 Příprava dílu pro měření

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

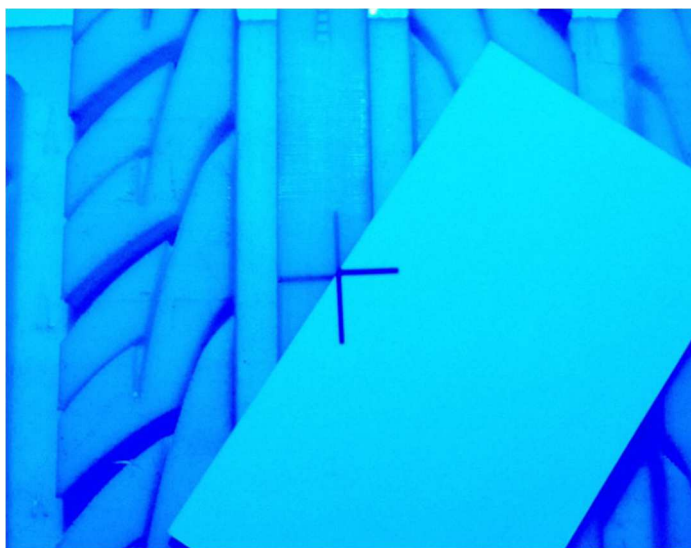
- antireflexní nástřik
- referenční body
- upnutí dílu

Matnicí prášky mají zásadní vliv na kvalitu a přesnost bezkontaktního měření. Z hlediska **antireflexního nástřiku** je důležité si položit otázku, zda nástřik ANO, NE, pokud ano - jaký použijeme přípravek a jakým způsobem ho budeme aplikovat (technika nanesení). Digitalizace povrchu měřeného objektu probíhá tak, že skener promítá na měřený díl rastrový vzor, který pak snímají kamery. Pokud je kontrast rastru příliš nízký, program nebude schopný vypočítat 3D body. Protože se kontrast odvíjí od typu povrchu, je z tohoto pohledu ideální matný a světlý povrch. Naopak problematické pro digitalizaci jsou průhledné (průsvitné) povrchy, u kterých dochází k rozptylu světla, černé povrchy, které světlo pohlcují, nebo lesklé povrchy, u kterých dochází k nechtěnému odrazu. V první řadě je tedy nutné rozhodnout, zda je pro daný díl nutné (bez něho by nebylo možné díl vůbec zdigitalizovat) použít úpravu povrchu matnicím přípravkem. Tak můžeme učinit na základě povrchových vlastností dílu a vlastních zkušeností. Zřejmá nutnost pro aplikaci přípravku je u průhledných a poloprůhledných materiálů a ve většině případů i u silně lesklých materiálů, zejména při použití optických skenerů. Černé výrobky je také lépe nakřídovat. Snáze tak naskenujeme hůře přístupná místa, naskenovaný model bude kvalitnější a skenování se díky zkrácení doby expozice zrychlí. Pozor je třeba si dát především na materiály, které lze i bez nástřiku skenovat relativně dobře, ale z důvodu materiálového složení a částečné průhlednosti vykazuje zdigitalizovaný model zkreslené rozměry, které jsou zpravidla menší. U poloprůhledných povrchů světlo vniká do materiálu a systém pak může spočítat 3D body uvnitř materiálu (viz Obr. 3.40).



Obr. 3.40 Podpovrchový rozptyl v průsvitném objektu [62]

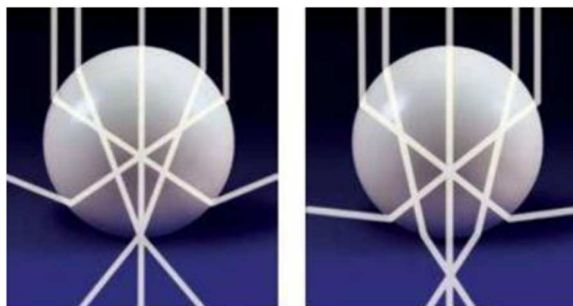
Na základě zkušeností a provedeného výzkumu může tento případ hrozit zejména u některých plastových materiálů s příměsí skla, materiálů používaných v 3D tiskárnách (především fotopolymery) nebo voskových modelů (více viz kap. 4.3). U takových materiálů ač na první pohled neprůhledných dochází k odrazu paprsku několik setin až desetin pod fyzickým povrchem. Pokud je povrch sporný a není možné rozhodnout tzv. na první pohled (nebo chybí přechodí zkušenost s daným materiálem), je doporučováno projektorem promítnout kříž nebo jiný vzor na povrch měřeného objektu a pokud se tento kříž jeví neostrý nebo rozmazaný, je to známkou toho, že povrch je částečně průhledný [16]. Pokud si i přesto nejsme jisti, je možné porovnat ostrost kříže na povrchu součásti s ostroty na bílém papíře (viz Obr. 3.41) Případně je možné několika málo snímky otestovat kvalitu a úplnost skenů povrchu bez nástřiku.



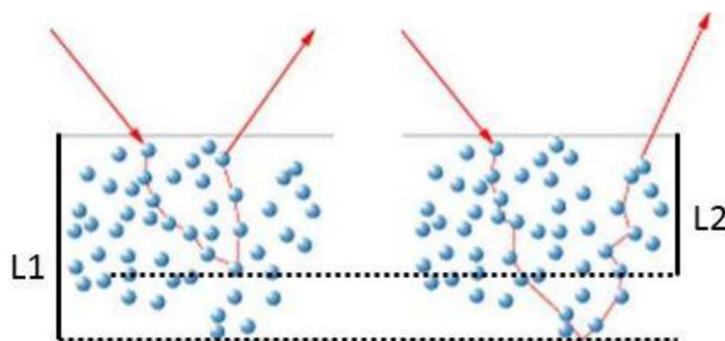
Obr. 3.41 Zkouška průhlednosti povrchu skenovaného materiálu pomocí promítnutého kříže [16]

Pokud je zřejmé, že se bez antireflexního nástřiku neobejdeme, je třeba zvolit vhodný přípravek. Na trhu je dnes dostupná rozličná řada produktů přímo určených pro úpravu povrchu před optickým skenováním. Liší se způsobem aplikace, jemností zrna - a tím dosažitelné min. tloušťky nástřiku, chemickým složením a samozřejmě také cenou. Pro přímou aplikaci lze zakoupit přípravky ve formě spreje, dále ve formě kapaliny pro nanášení stříkací pistolí, či ve formě prášku, který je před aplikací nutné rozpustit např. v etanolu. Existují též produkty, které se po určité době z výrobku sami odpaří. Ty je vhodné použít tam, kde by klasické přípravky výrobek znehodnotily. Většina produktů je dostupných ve formě spreje a je na bázi křídly (hlavní složkou je uhličitán vápenatý). U nich je standardně

dosahováno tloušťky nástriku v řádu několika setin mm. Pro velmi jemné skenování se nejčastěji používá oxid titaničitý (titanová běloba), který je ve formě prášku a po rozpuštění v etanolu se nanáší např. airbrushovou pistolí. Oxid titaničitý má oproti jiným materiálům díky vysokému indexu lomu světla (kolem $n = 2,7$) vynikající krycí schopnost (Obr. 3.42), vysokou opacitu (schopnost pohlcovat záření) a i velmi tenká vrstva dokáže dostatečně rozptýlit (ohýbat) paprsky na povrchu měřeného objektu (Obr. 3.43). To je důvod, proč je právě tato suspenze nejčastěji využívána pro nástriky při 3D skenování, výrazně dokáže změnit optické vlastnosti povrchu měřené součásti, ale zároveň má minimální vliv na její rozměr [66]. V případě použití TiO_2 lze v ideálním případě dosáhnout tloušťky nástriku pouze v jednotkách mikrometrů.



Obr. 3.42 Pigment s vysokým (vlevo) a nízkým (vpravo) indexem lomu [62]



Obr. 3.43 Závislost potřebné tloušťky nástriku na indexu lomu použitého pigmentu (materiál vlevo má vyšší index lomu než materiál vpravo) [62]

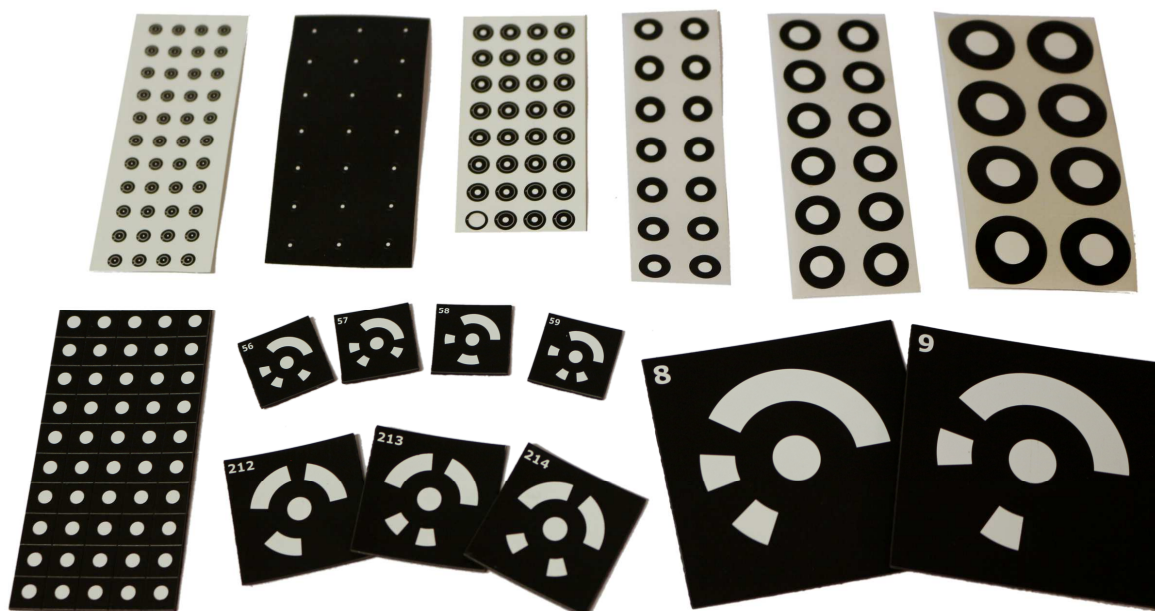
V neposlední řadě je třeba věnovat pozornost přípravě matnicího nástriku (pokud připravujeme např. roztok z titanového prášku, je důležitá koncentrace tohoto roztoku), technice nanášení a množství naneseného prášku (počet vrstev). Jiná tloušťka a kvalita nástriku bude nanášena zkušeným uživatelem a jiná člověkem, který přípravek nanáší poprvé. Tloušťka nanesené vrstvy by měla být co nejtenčí, ale zároveň dostatečná a v maximální možné míře rovnoměrná.

Blíže se problematice rozdělení přípravků pro zmatnění povrchu, dosahovaných tlouštěk a obecně přesnosti skenování za použití antireflexních nástriků věnuje experimentální část práce, kap. 4.4.

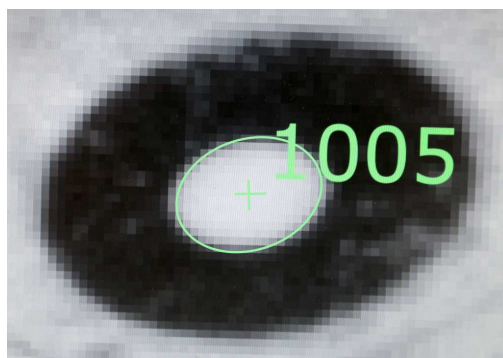
Příprava součásti na optickou digitalizaci dále spočívá v nalepení **referenčních bodů** (u systémů, které to vyžadují). Ty jsou vyžadovány zejména v případě, kdy je úkolem digitalizovat součást větších rozměrů, složitějšího tvaru a u skenování na více měřicích sérií (typicky oboustranné skenování). Pro celkovou digitalizaci je u takových úloh provedeno mnoho jednotlivých měření (skenů) a ty jsou spojeny s pomocí společných referenčních bodů do jednoho celku. U měření na jeden záběr naopak referenční značky nepotřebujeme. Takové úlohy jsou však u systému ATOS spíše výjimečné. Od 7. verze

umožňuje software ATOS Professional spojování snímků také v režimu Best-Fit, tedy zcela bez referenčních bodů, pouze na tvar obrobku. Aby i v tomto případě proběhla transformace jednotlivých skenů správně a s dostatečnou přesností, musí být skenované oblasti dostatečně tvarově členité ve všech třech osách a nesmí být symetrické. Celý proces transformace bez referenčních značek je však výrazně pomalejší, zároveň nejsou v tomto režimu aktivní nejruznější kontrolní funkce softwaru, jako je např. nežádoucí pohyb skenovací hlavy během snímání, změna světelných podmínek apod.

Referenční značky se liší svojí velikostí, tvarem, kvalitou a dalšími parametry (viz Obr. 3.44). U systému ATOS se nejčastěji používají značky kruhového tvaru (bílý kruh uprostřed černého pole, případně negativně). Jejich průměr je doporučen výrobcem a odvíjí se od rozlišení CCD čipu a měřicího objemu. Pro správnou detekci je doporučováno, aby středový kruh bodu dosahoval rozlišení min. 10 px (viz Obr. 3.45). Software proloží elipsu pixelovým přechodem obrazu mezi černým pozadím a bílým bodem, na základě toho pak dojde k propočítání středové bílé kruhové oblasti, resp. výpočtu souřadnic X, Y, Z středu bodu v prostoru. Body mohou být samolepící, magnetické, se zvýšenou odolností proti vysokým teplotám (keramické) apod. Dále rozlišujeme body nekódované a kódované.



Obr. 3.44 Různé druhy referenčních bodů pro systém ATOS (horní řada zleva: nekódované body Ø 0,4; 0,8; 1,5; 3; 5; 8 mm, dolní řada zleva: magnetické nekódované body Ø 3mm, magnetické kódované body Ø 3; 5, 10 mm)



Obr. 3.45 Referenční bod v software

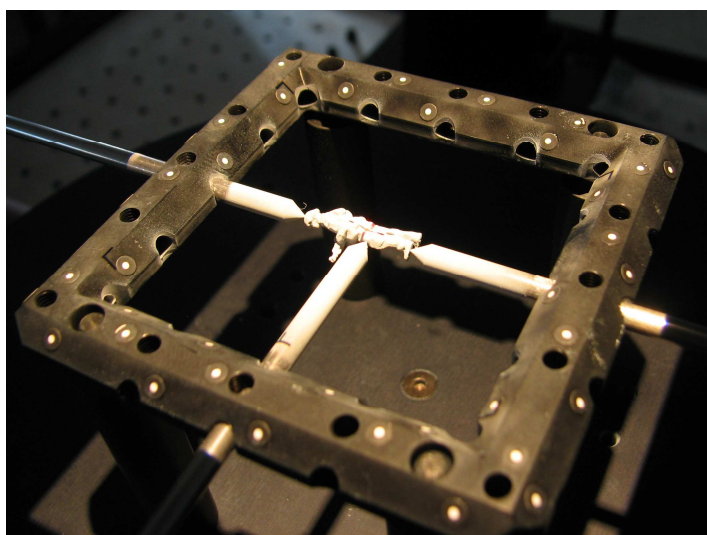
Pro zajištění vysoké přesnosti měření je doporučováno používat originální referenční body dodávané výrobcem. Body si též můžeme sami vytisknout např. na samolepící papír. Jak ukazuje vlastní výzkum, v tomto případě je však třeba věnovat zvláštní pozornost kvalitě tisku a použitému papíru (folii). Body vytištěné na nekvalitní papír mohou vnést do přesnosti transformace jednotlivých skenů (a v důsledku tedy přesnosti digitalizace celého modelu) poměrně zásadní chyby (blíže viz kap. 4.5.3.8).

Jak již bylo uvedeno, součást určenou k digitalizaci není systémem ATOS obvykle možné nasnímat na jeden záběr. To platí i u malých objektů, které ač se vejdou do měřicího objemu kamer, nejsou z jednoho pohledu viditelné celé. Pro kompletní digitalizaci takového objektu jím tedy musíme otáčet v zorném poli skeneru nebo pohybovat skenerem kolem součásti tak, abychom změnou jejich vzájemné pozice mohli pořídit dostatečné množství snímků ze všech požadovaných stran a úhlů. I při digitalizaci malých objektů je tedy nutné myslet na spojování více snímků do jednoho celku a obvykle se tedy nevyhneme lepení referenčních bodů. Ty umístíme buď přímo na měřený objekt anebo v jeho okolí (na měřicí stůl, rámeček, přípravek apod.). Na základě souřadnic těchto bodů software vypočítává pozici senzoru v prostoru, resp. referenční značky jsou použity pro automatickou transformaci dílčích skenů do jednoho celku – do společného souřadného systému. Pro možnost transformace je nezbytné, aby kamery skeneru na jednotlivých záběrech detekovaly dostatečný počet těchto bodů. Pro orientaci skeneru v prostoru jsou to min. 3 body, resp. pro správnou transformaci každého nového snímku do společného souřadného systému min. 3 známé body z předchozích skenů.

Umístování referenčních bodů na skenovaný objekt podléhá specifickým zásadám, které je pro úspěšnou digitalizaci vhodné dodržovat. Jedná se zejména o tato pravidla [6], [86]:

- Umisťovat body na ploché nebo pouze mírně zakřivené plochy (vliv na přesnost detekce souřadnic středu referenčního bodu při různém úhlu pohledu skeneru).
- Nelepit značky poblíž hran - do oblasti vzdálené méně než je průměr referenčního bodu (vliv na kvalitu vyplnění otvoru po bodu).
- Značky musí být vhodně distribuovány v prostoru celého měřicího objemu (napříč jeho délkou, šířkou i výškou), (vliv na přesnost a stabilitu transformace).
- Používat minimálně tolik bodů, aby na každém snímku byly identifikovány min. 3 již známé referenční body (vliv na schopnost transformace do společného souřadného systému).
- Nepoužívat výrazně nadměrné množství referenčních bodů, než je pro daný měřicí objem nezbytné (vliv na rychlost výpočtu transformace).
- Neumisťovat referenční body do jedné linie nebo do pravidelných opakujících se vzorů (vliv na korektnost, přesnost a stabilitu transformace).
- Při požadavku digitalizace objektu na více měřicích sériích (zpravidla oboustranné snímání bez přípravku) nalepit minimálně 3 značky po obvodu modelu tak, aby byly viditelné při snímání modelu v rámci každé dílčí měřicí série (při pohledu shora i zdola), (jedná se o tzv. společné referenční body – „Common reference points“).
- Při digitalizaci plochých objektů neumisťovat značky na protilehlých rovinách přímo proti sobě (nebezpečí nesprávné transformace vlivem záměny ref. bodů).

Při optické digitalizaci nejsou na pevné **upnutí dílu** kladeny tak vysoké nároky, jako při kontaktním měření (na díl nepůsobíme silou). V případě, že skenujeme bezkontaktním systémem, který používá pro transformaci jednotlivých snímků v prostoru referenční body, máme několik možností. Body umísťujeme pouze na měřený objekt, mimo měřený objekt (na přípravek, měřicí rámeček apod.) nebo volíme kombinaci. Pokud jsme umístili body pouze na měřený objekt, je souřadný systém vztažen přímo k dílu, a tedy mezi jednotlivými skeny můžeme pohybovat nejen skenerem, ale i měřenou součástí (samozřejmě za předpokladu, že je dostatečně tuhá a nehrozí její deformace). Velké objekty, které nemají vlastní stabilitu (např. velké plechové výlisky), je vhodné (někdy nutné) upevnit do měřicího přípravku. Body pak lze umístit na přípravek a při výměně dílu tak ušetříme čas pro lepení nových bodů. Pro velmi malé objekty, na které by bylo body problematické umístit, se často používají speciální měřicí rámečky s předem proměřenými body, do kterých díl upínáme pomocí upevňovacích hrotů (Obr. 3.46). Především pro jednodušší objekty mnohdy postačí díl volně položit (případně fixovat např. pomocí speciální plastelíny) na rotační skenovací stůl, a body nalepit na desku stolu. Důležitá je však jedna zásada. Vždy, když jsou body umístěny mimo měřený objekt (rámeček, přípravek, stůl) je třeba zajistit, aby díl nezměnil polohu vůči tomuto objektu. Souřadný systém je totiž v takovém případě svázán s entitou, na níž jsou body umístěny a i minimální pohyb měřeného výrobku vůči této entitě by znamenal posun pořízených snímků v rámci globálního souřadného systému. To by způsobilo nedokonalé navazování skenů a vnesení chyby do skenovacího procesu.



Obr. 3.46 Měřicí rámeček pro skenování malých objektů

Pro přípravu dílu na skenování musíme tedy provést zejména tyto kroky:

- Umístit referenční body (dle metodiky popsané výše).
- Je-li to žádoucí (zpravidla u průhledných, lesklých a černých objektů) upravit povrchové vlastnosti výrobku nanesením antireflexního nástriku a body případně očistit (viz Obr. 3.47).
- Fixovat výrobek na otočný měřicí stůl, do přípravku, rámečku apod.



Obr. 3.47 Příprava výrobku na optické skenování (umístění ref. bodů / aplikace matnicího nástriku / očištění bodů)

3.4.2.2 Parametry a okolní podmínky při digitalizaci

Samotný proces digitalizace je ovlivněn mnoha parametry a okolními vlivy. Stejně jako u kontaktního měření je třeba zajistit, aby i digitalizace probíhala při definované teplotě (ideálně 20°C), aby rozměry objektu nebyly ovlivněny tepelnou roztažností materiálu. Vzhledem k optickému principu měření je dále nutné zabezpečit, aby pracovní místo nebylo osvětleno ostrými nebo blikajícími zdroji světla (např. slunce, zářivky ap.). Nevhodné světelné podmínky mohou způsobit snížení kontrastu promítaného vzoru či další problémy při měření. Nezbytné je také prostředí bez větších vibrací. Co se týká samotných parametrů nastavitelných uživatelem, jde především o nastavení expozice (času závěrky kamer), samostatně pro snímání referenčních bodů a plochy měřeného objektu. Čas závěrky kamer nastavujeme manuálně nebo automaticky přímo v řídicím SW dle světelných podmínek okolí a odstínu měřeného objektu. Vhodným nastavením zajistíme správné exponování snímku a ideální kontrast promítaného vzoru. Blíže se problematice vlivu expozice na přesnost měření věnuje kap. 4.5.3.3. Na Obr. 4.67 je vidět rozdíl mezi podexponovaným a přeexponovaným snímkem.

3.4.2.3 Postup a strategie při digitalizaci

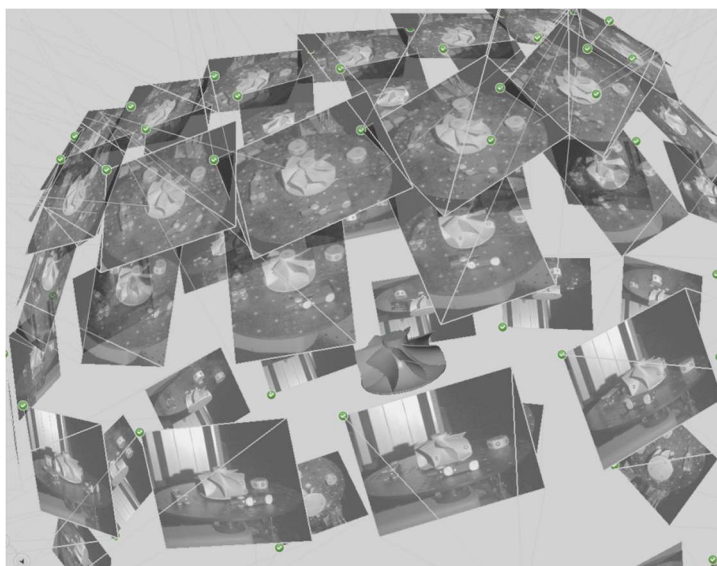
Zejména u tvarově členitých a rozměrných objektů nebo objektů, které nemají dostatečnou tuhost, je zvolená strategie digitalizace klíčová. Svojí roli zde hraje skutečnost, zda budeme skenovat na neznámé referenční body nebo na pozice bodů získané předem pomocí fotogrammetrie, jak díl fixujeme, kolik měřicích sérií pro celkovou digitalizaci dílu zvolíme, kolik snímků pořídíme, pod jakým úhlem, z jaké vzdálenosti nebo jak budeme jednotlivé snímky na sebe navazovat. V SW můžeme také volit mezi vyšší kvalitou naskenovaných bodů „High Quality“ nebo jejich vyšším počtem „More Points“.

Jak již bylo řečeno, během skenování je na měřenou součást projektořem skeneru promítán proužkový vzor, který je snímán CCD čipy obou kamer. Data jsou přenášena do řídicího počítače, kde jsou příslušným softwarem filtrována a zpracována. Výsledkem výpočtu jsou souřadnice velkého množství bodů na povrchu součásti (stovky tisíc až miliony bodů) pro jeden daný snímek. Pro celkové zachycení složitějších či větších dílů je nezbytné pořídit více překrývajících se záběrů objektu z různých poloh a úhlů tak, aby po složení těchto dílčích dat do jednoho celku byla zachycena geometrie celého objektu. Za tímto účelem můžeme pohybovat buď skenerem kolem objektu (zpravidla používáme u velkých a hmotných objektů), nebo otáčet a polohovat objekt v zorném poli skeneru (resp. kombinovat obojí). Při skenování modelů, které se vejdou na rotační měřicí stůl, je tedy velmi praktické měnit vzájemnou polohu obrobku vůči skeneru jednoduchým pootáčením stolu s obrobkem a pořídit tak při

jedné pozici hlavy skeneru jednotky až desítky skenů v úhlovém rozsahu 360°. Tento postup můžeme opakovat při různých úhlových polohách skeneru (např. pod úhlem 45°, 0°- svisle, 90°- vodorovně), případně celý proces opakovat po otočení součásti na stole. Bez ohledu na to, zda bylo mezi jednotlivými snímky pohybováno s obrobkem nebo skenerem, systém dokáže díky detekovaným referenčním značkám určit svojí polohu a postavení v 3D prostoru a na základě této informace transformovat dílčí skeny do jedinečného společného souřadného systému objektu. Je však nutné dbát na to, aby každé měření obsahovalo min. tři referenční body z předchozího měření. Jestliže skener umožňuje projekci proužků jen ve svislém směru (ATOS II), je v některých situacích doporučováno (zejména při digitalizaci svislých hran nebo tenkých žeber, prohlubní apod.) otočit skener o 90° ve vertikální rovině tak, aby promítané proužky probíhaly kolmo k měřené hraně. Dojde tak ke kvalitnějšímu nasnímání uvedených problematických partií. Celý proces digitalizace je v reálném čase přenášěn do řídicího počítače, kde ho může uživatel sledovat. Systém neustále automaticky monitoruje situaci před měřením, při měření i po měření. Je kontrolována kalibrace systému, vzájemný pohyb skeneru vůči měřenému objektu a vliv měnící se intenzity světla a teploty. To zajišťuje vysokou stabilitu a přesnost měřicího procesu za každých provozních podmínek [6].

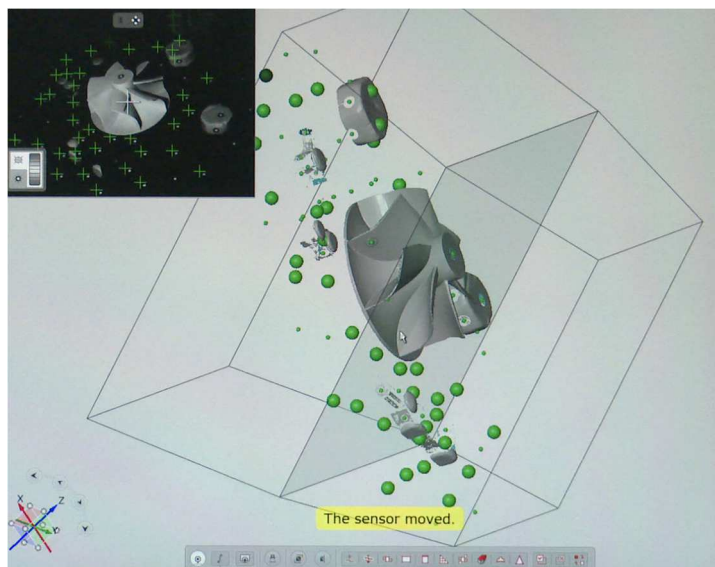
Samotný postup digitalizace se tedy skládá zhruba z těchto dílčích bodů:

- Nastavení senzoru do optimální pozice (vzdálenost, úhel) pro skenování.
- Nastavení vhodného expozičního času kamer.
- Nasnímání dostatečného počtu snímků měřeného objektu pro dané ustavení (z jedné strany).
- V případě potřeby změna polohy objektu (např. jeho otočení).
- Založení nové měřicí série (pokud budeme používat spojení měřicích sérií pomocí společných referenčních bodů).
- Naskenování dostatečného počtu snímků součásti v dané poloze (z druhé strany součásti), (viz Obr. 3.48)



Obr. 3.48 Rozložení dílčích skenů při oboustranném skenování modelu

Při pořizování jednotlivých skenů musí být měřený díl pokud možno uprostřed měřicího objemu (Obr. 3.49). Pro odhad správné měřicí vzdálenosti nám u systému ATOS slouží laserová ukazovátka. Pokud je díl větší než MV, je vhodné začínat uprostřed a jednotlivé snímky navázat na jednu a druhou stranu. Pokud velikost objektu přesahuje svojí velikostí 2 - 3x rozměry měřicího objemu, je z důvodu zachování vysoké přesnosti doporučováno zachytit pozice referenčních bodů předem pomocí fotogrammetrického systému (TRITOP). Zamezíme tak růstu chyb při transformaci snímků.



Obr. 3.49 Vizualizace měřicího objemu

3.4.2.4 Procesní parametry digitalizace

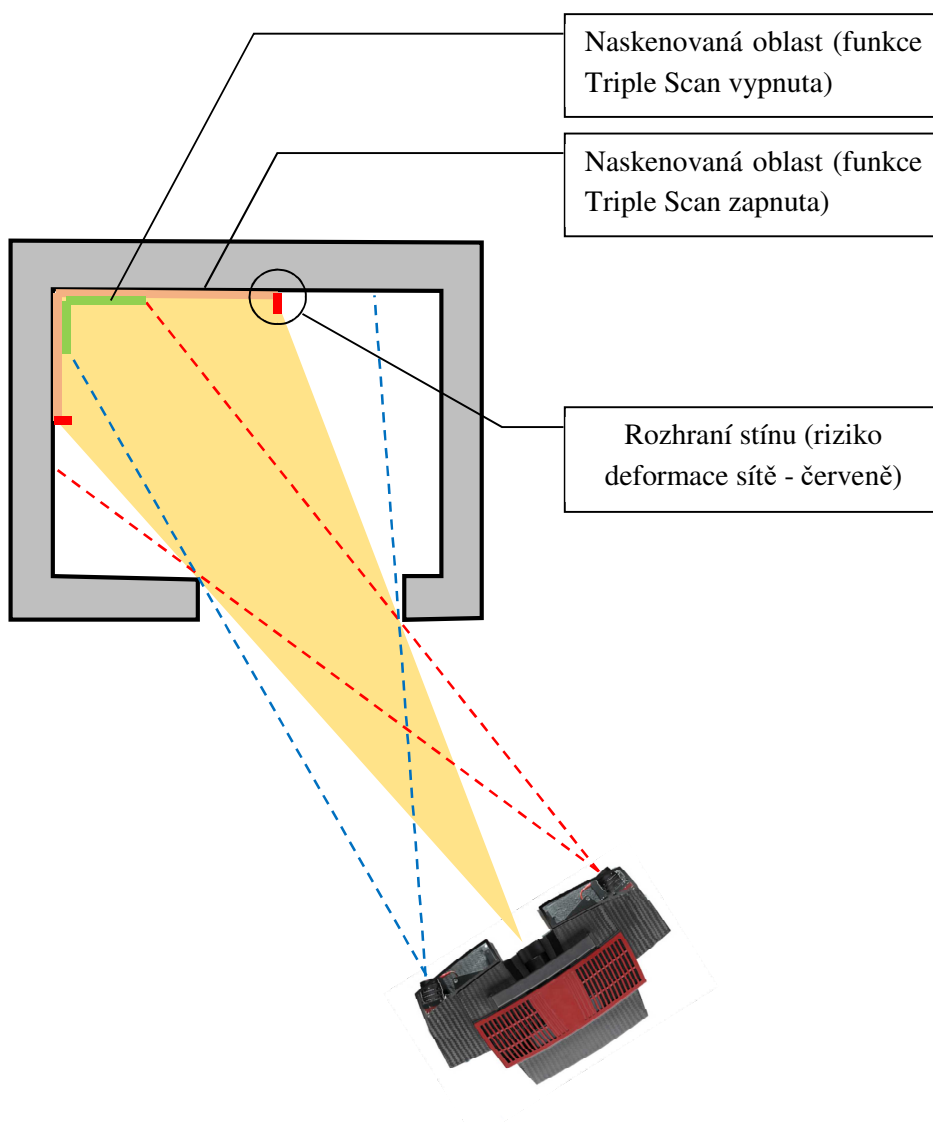
Kromě nastavení úrovně kvality bodů (*High Quality / More Points*) lze při skenování nastavit několik dalších procesních parametrů, které mají podstatný vliv na naskenovaný mrak bodů a výslednou kvalitu polygonální sítě [81].

- *Min. fringe contrast*: Tento parametr určuje minimální kontrast proužků pro výpočet 3D bodů. Čím vyšší hodnota je zvolena, tím méně bodů SW vytvoří. Pro problematické (lesklé) povrchy je třeba volit menší kontrast, než pro běžné povrchy.
- *Points at strong brightness differences*: Při silných rozdílech jasu na povrchu objektu může dojít k silnějšímu šumu měření (např. na textilních površích, lité povrchy). Tuto volbu je doporučováno aktivovat pouze v případě, že bude prováděno měření v zmíněných kritických oblastech.

Klíčové může být nastavení parametrů týkající se Triple Scan technologie (skener ATOS III). V některých případech je použití skenování pouze jednou kamerou zásadní pro zachycení špatně přístupných míst či problematických povrchů. Jindy může naopak tato funkce vnášet do projektu nežádoucí chyby a negativně ovlivňovat kvalitu meshu.

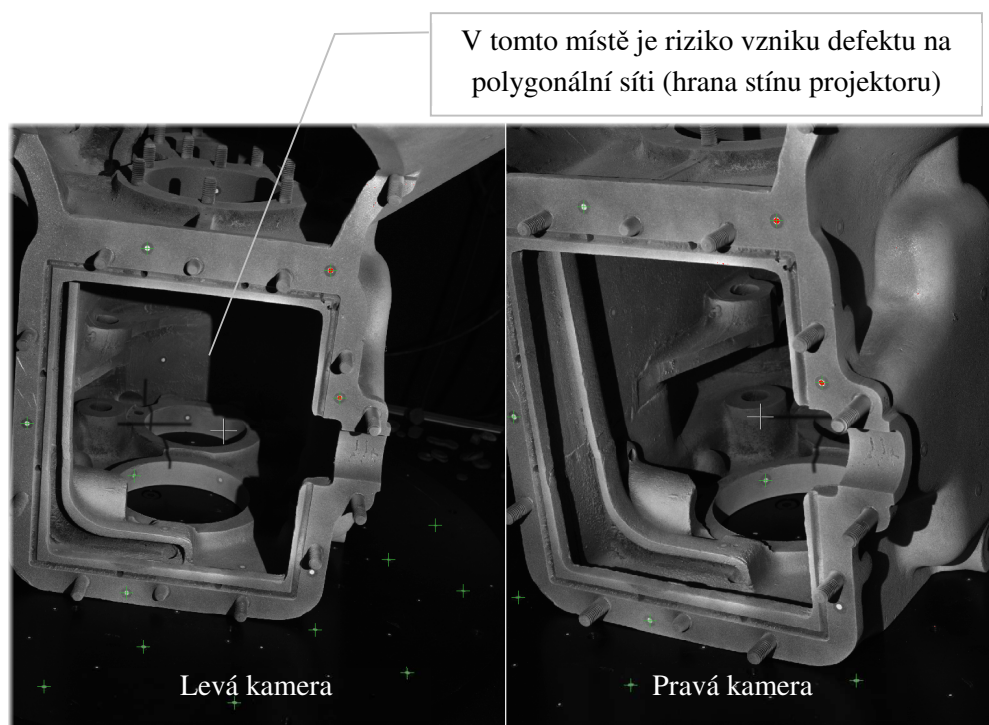
- *Points in shadow areas*: Stíny mohou ovlivňovat proužkovou projekci. Na rozhraní plochy osvětlené projektořem a plochy, která je ve stínu (zastíněné samotnou částí měřeného dílu, přípravkem apod.) mohou vznikat v polygonové síti chybové trojúhelníky (zpravidla vyčnívající ze sítě směrem k projektoři), (viz Obr. 3.50). Tuto funkci je proto v potřebných

případech možné vypnout. Pak nebudou softwarem brány v úvahu body v stínových oblastech. Zároveň budou však deaktivovány i další funkce Triple Scan technologie a nebudou tedy zohledněny oblasti objektu viditelné pouze jednou kamerou (viz Obr. 3.50).

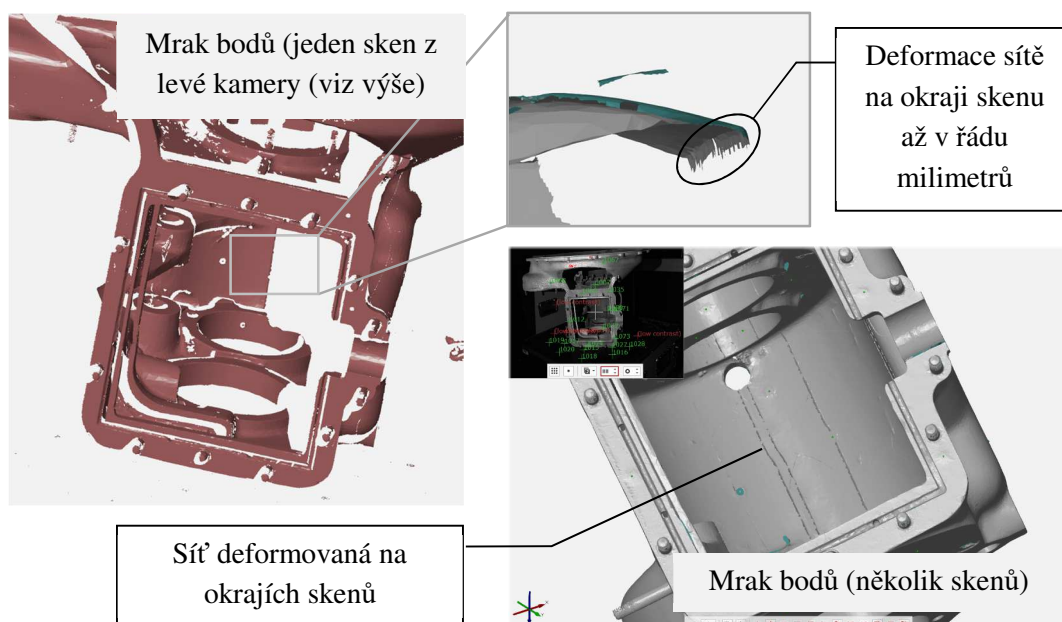


Obr. 3.50 Skenovatelná oblast při zapnuté a vypnuté funkci Triple Scan / ovlivnění kvality sítě stíny

Reálný případ výše popsané problematiky je ukázán na příkladu skenování vnitřních tvarů skříňě převodovky (viz Obr. 3.51 a Obr. 3.52).



Obr. 3.51 Živý pohled levé a pravé kamery na měřenou součást nasvícenou projektorom

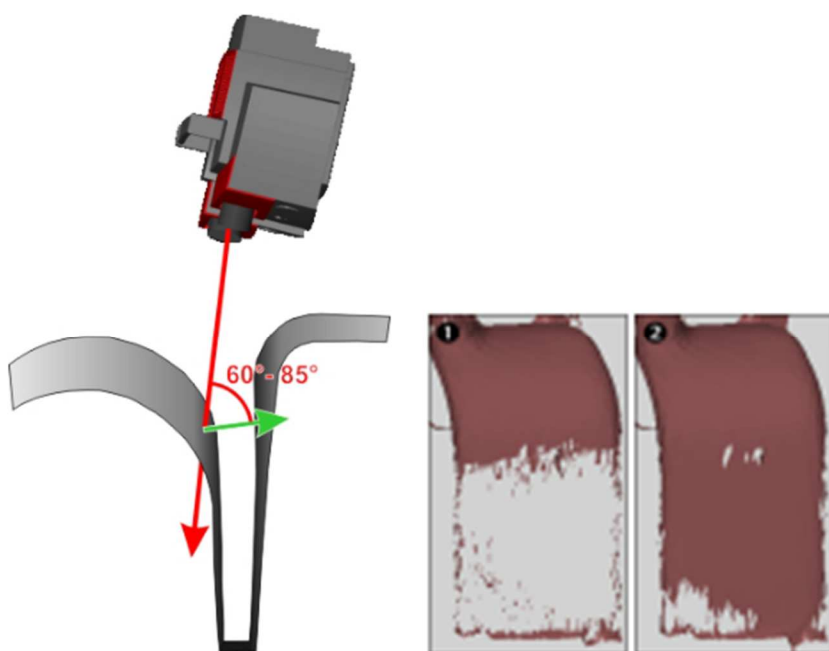


Obr. 3.52 Deformace polygonální sítě na okraji skenu (v místě stínu projektoru)

- *Triple Scan points*: Jak již bylo řečeno, systém ATOS III má tři různé režimy senzorů – stereo kamery, pravá kamera s projektorom a levá kamera s projektorom. Oblasti, které vidí obě kamery, poskytují dobré údaje o povrchu. Kombinace projektoru a pouze jedné kamery umožňuje snímat i hůře přístupné oblasti. Defaultně je funkce „Triple Scan Points“ aktivní. V případě výraznějších problémů (viz příklad výše), lze tuto možnost ručně deaktivovat.

Z vlastní zkušenosti lze říci, že záleží také na celkovém množství jednotlivých skenů. Pokud má systém k dispozici dostatečný počet překrývajících se snímků, při výsledné polygonizaci jsou díky optimalizačnímu algoritmu a vyšší prioritě snímků z obou kamer ve většině případů chybové části sítě odfiltrovány a na výsledném modelu se neprojeví. Naopak především v oblastech, kde je informací nedostatek, může síť v místech hran snímků vykazovat výraznou deformaci.

- *Max. viewing angle sensor/surface*: Tato vlastnost je defaultně nastavena na 80° a definuje maximální úhel mezi směrem pozorování senzoru a normálou povrchu měřeného objektu, kdy systém ještě vytváří měřená data. Vyšší úhel znamená vyšší možnost zachycení špatně přístupných míst (např. hlubokých drážek), ale horší detaily povrchu (Obr. 3.53).



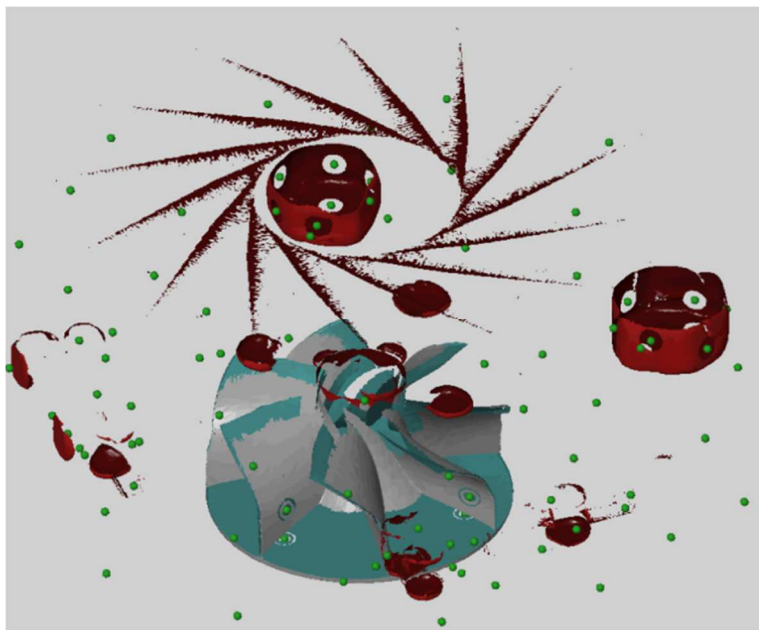
Obr. 3.53 Nastavení úhlu pro zachycení povrchu (vlevo), boční stěna hluboké kapsy měřená při defaultním úhlu 80° (1) a zvětšeném úhlu 85°(2) (vpravo) [81]

Dále je možné nastavit další parametry, jako např. zda jsou body Triple Scan technologií snímány i v místech se silnými rozdíly jasu nebo jaká je maximální povolená odchylka bodů pro výpočet. V expertních parametrech lze také omezit hloubku měřeného objemu, a pokud je povolena možnost skenování s Triple Scan technologií, lze definovat režim výpočtu pro kontrolu kvality Triple Scan bodů. Aktivní je pak parametr *Intersection deviation*, kterým je kontrolován rozpor mezi měřicími body. Software vypočítá chybu průniku mezi body, které vidí obě kamery a body z jedné kamery. Výchozí hodnota prahu pro odchylku průniku je 0,3 pixelu. Stejně tak pomocí parametru *Error noise ratio* lze kontrolovat rozpor mezi měřicími body s přihlédnutím k šumu měření. Software vypočítá procentuální odchylku naměřených hodnot vzhledem k šumu měření pro obě varianty (2 kamery, kamera + projektor). Body jsou akceptovány, pokud je odchylka menší než nastavená hodnota (defaultně 40%).

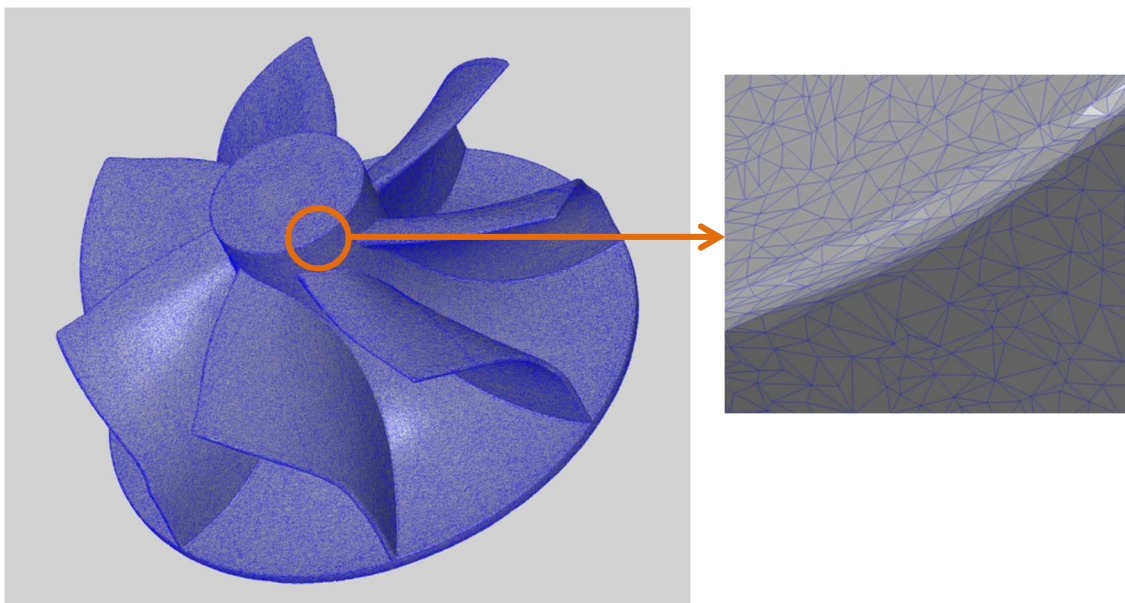
Problematicke, jak konkrétně jednotlivé zmiňované faktory ovlivňují přesnost digitalizace, se podrobněji věnuje experimentální část, kap. 4.5.

3.4.3 Zpracování a vyhodnocení dat

Po digitalizaci následuje ve většině případů softwarová úprava naskenovaných dat. V první řadě je doporučováno odstranit nežádoucí části skenu (přípravek, pomocná geometrie, šum apod.), (viz Obr. 3.54), u oboustranného skenování navzájem vyrovnat individuální měřicí série (transformovat do společného souřadného systému s využitím společných referenčních bodů) (viz předchozí kapitola), nechat přepočítat celý projekt (dojde k opětovnému zpřesňujícímu vyrovnání všech dílčích snímků vůči sobě) a nakonec spustit polygonizaci takto připraveného mraku bodů. Během ní SW dále upraví zachycené měřicí body a převede je do jediné optimalizované sítě nepřesahujících trojúhelníků. V závislosti na zakřivení povrchu měřeného objektu má polygonální síť různou hustotu (viz Obr. 3.55). Během polygonizace software s ohledem na šum specifický pro daný senzor provádí mimo jiné následující kroky: odstranění chyb sítě, vyplnění referenčních bodů (pokud uživatel povolí tuto možnost), vyhlazování, ředění. Postprocessing sítě polygonů lze změnit v pěti nebo šesti krocích [81]. Vzniklý model (nazýván např. jako polygonální síť, mesh, STL model) je primárním výstupem procesu 3D skenování. Výstupními formáty pro uložení jsou např. G3D, PLY, POL nebo pravděpodobně nejznámější a nejpoužívanějším formát STL. Model lze dále uživatelsky editovat ve speciálních programech – síť softwarově zjemňovat nebo naopak redukovat, vyhlazovat, záplatovat nežádoucí otvory apod. Nejčasnější využití nalézá při inspekci, výrobě aditivními technologiemi či přímým CNC obráběním, nebo pro účely reverzního inženýrství.



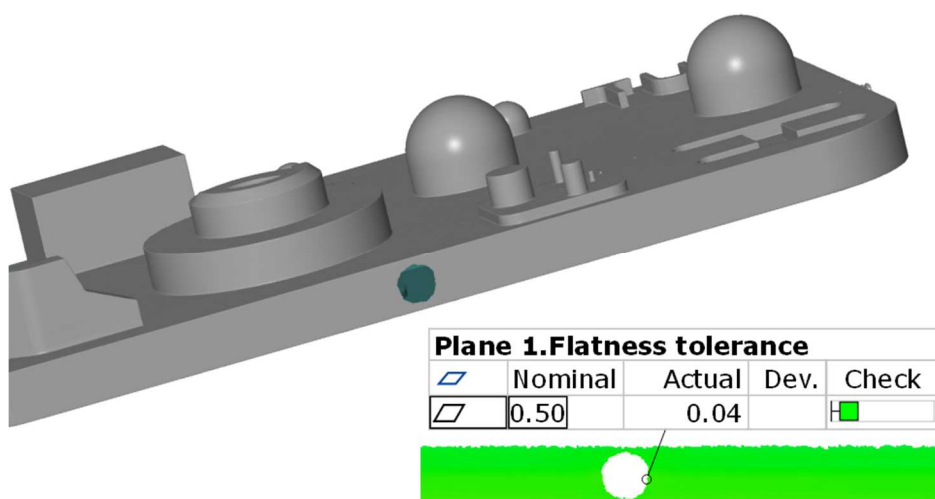
Obr. 3.54 Výběr oblastí (červeně) pro odstranění



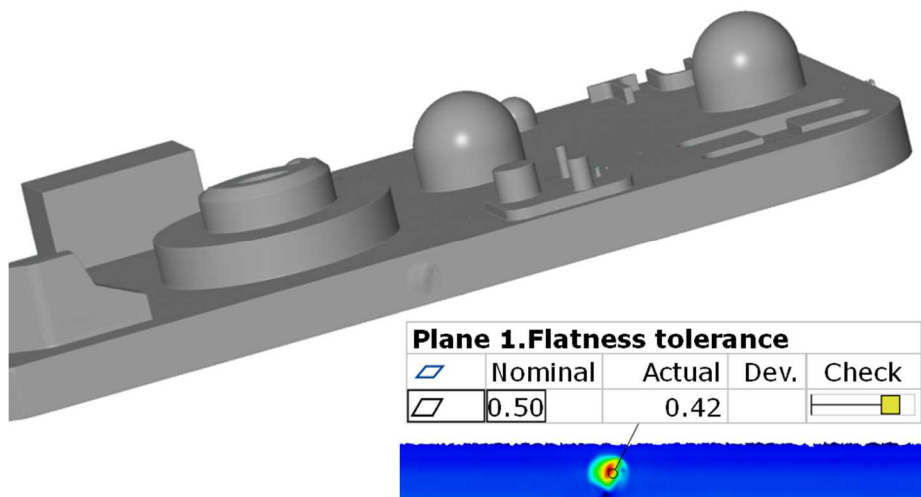
Obr. 3.55 Detail polygonální sítě

3.4.3.1 Editace meshe

Pokud budou data dále sloužit pro tvorbu 3D modelu (reverzní inženýrství) či pro přímý 3D tisk, je zpravidla třeba výraznější úprava trojúhelníkové sítě, zacelení děr, vyhlazení apod. Bude-li však model sloužit k inspekci rozměrů a tvaru, je naopak k jakýmkoliv úpravám třeba přistupovat obezřetně a s velkou opatrností, abychom neuváženým zásahem neovlivnili výsledek kontroly (viz příklady na následujících obrázcích).



Obr. 3.56 Vyhodnocení rovinnosti na neupraveném modelu



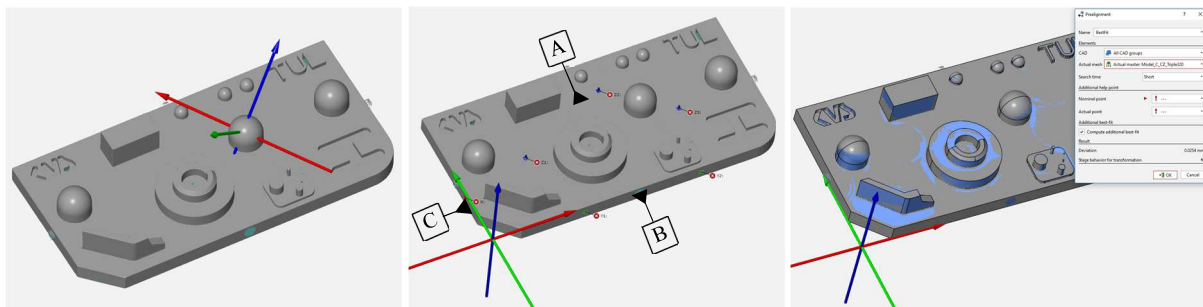
Obr. 3.57 Vyhodnocení rovinnosti na modelu po uzavření otvoru

Na prvním příkladu (Obr. 3.56) je zobrazen model, na kterém je na boční rovině patrný otvor v polygonální síti (po referenčním bodě). Pokud nebudeme mesh editovat a vyhodnotíme rovinnost této roviny, dostaneme výsledek 0,04 mm. Pokud však před vlastním vyhodnocením neodborně otvor v SW uzavřeme (viz druhý příklad - Obr. 3.57), může díky deformaci sítě v tomto místě dojít k výraznému ovlivnění výsledku. V tomto případě chyba rovinnosti stoupla zhruba na desetinásobek (0,42 mm), což však neodpovídá realitě. Tento příklad měl pouze ilustrovat a upozornit, jak i drobné neuvážené úpravy sítě mohou degradovat celý proces měření, zvláště pokud je cílem vyhodnocovat GD&T, nebo rozměry na maximum či minimum materiálu.

3.4.3.2 Vyrovnání souřadného systému dílu

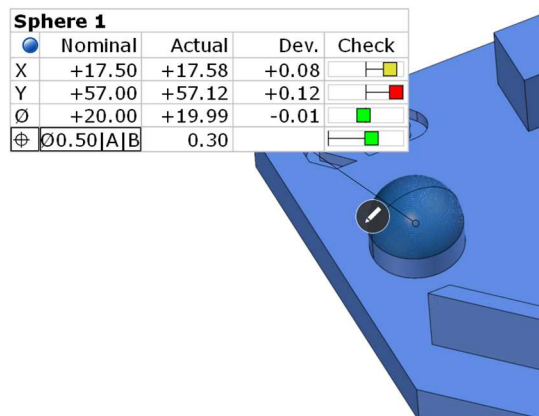
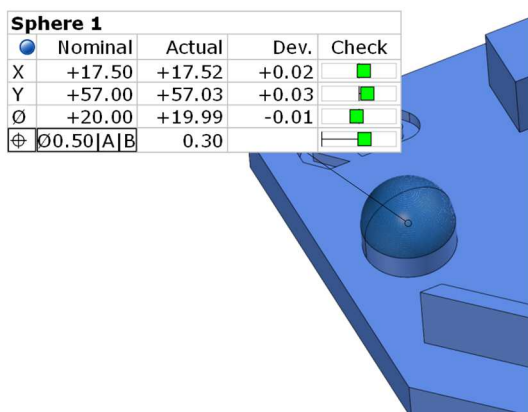
Při kontaktním měření je uživatelské vyrovnání dílu v souřadném systému prováděno zpravidla již před vlastním měřením přímo na stroji. Naopak při optické digitalizaci je objekt naskenován v souřadném systému skeneru, trackeru apod. a jeho zarovnání do požadovaného souřadného systému je prováděno až ve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

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

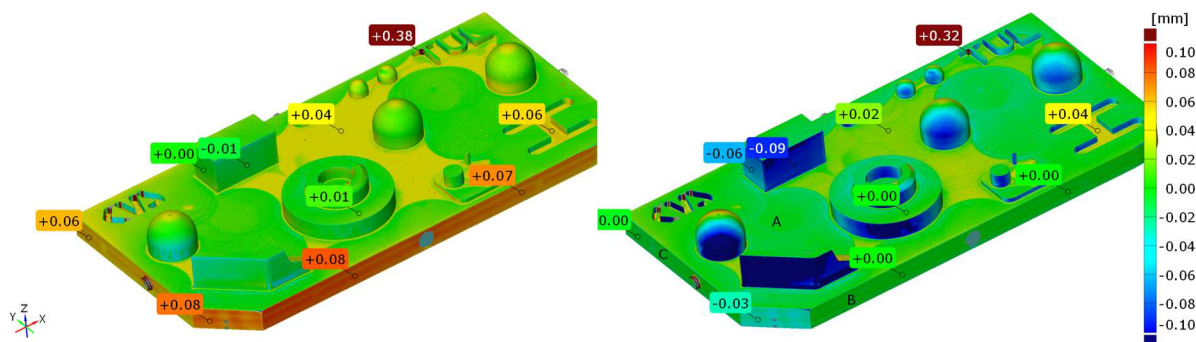


Obr. 3.58 Různé metody vyrovnání aktuálního modelu v souřadném systému (zleva: nevyrovnáno, metoda 3-2-1, metoda BestFit)

Způsob vyrovnání je důležitý především pokud provádíme měření polohy prvků v rámci souřadného systému (Obr. 3.59) a stejně zásadní je při výpočtu barevných map odchylek mezi aktuálním a referenčním modelem. Barevná mapa (případně inspekční řez) vyjadřuje velikost normálových odchylek aktuálního modelu (měřeného) vůči modelu nominálnímu při daném vyrovnání (Obr. 3.60), a tedy přímo s ním souvisí. Jiné vyrovnání přinese odlišné výsledky. Proto nedílnou součástí např. barevné mapy odchylek musí být v měřicí zprávě i informace o použitém vyrovnání. V praxi si toto bohužel i zkušené technici často neuvědomují.



Obr. 3.59 Vyhodnocení kulového prvku při vyrovnání BestFit (vlevo) a při vyrovnání na základny A,B,C (vpravo)

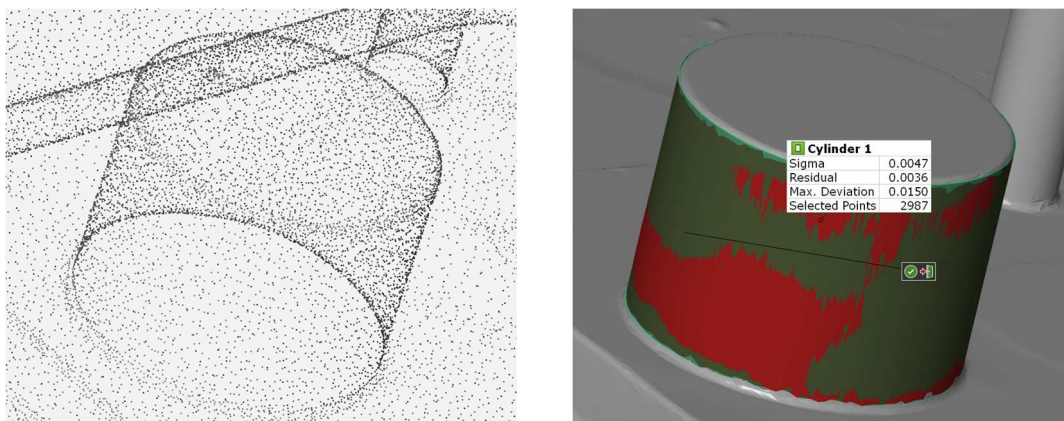


Obr. 3.60 Barevná mapa při vyrovnání BestFit (vlevo) a při vyrovnání na základny A,B,C (vpravo)

Podíváme-li se na Obr. 3.59 je evidentní, že zatímco rozměr prvku (zde průměr koule) na způsobu vyrovnaní nezávisí a je jak pro ustavení BestFit i na základny A, B, C stále 19.99 mm, poloha prvku v ose X a Y je různá v závislosti na poloze modelu v souřadném systému. Ještě markantněji je patrný vliv ustavení z barevné mapy odchylek (Obr. 3.60). Protože díl byl vyroben na délku a šířku cca o 0,15 mm větší, je při ustavení BestFit odchylka na všech bočních rovinách rovnoměrně rozdělena a čítá kolem 0,08 mm. Při vyrovnaní k jedné straně (na roviny B a C) je v místě těchto rovin odchylka blízká nule, zatímco na druhé protilehlé rovině se bude pohybovat právě kolem 0,15 mm.

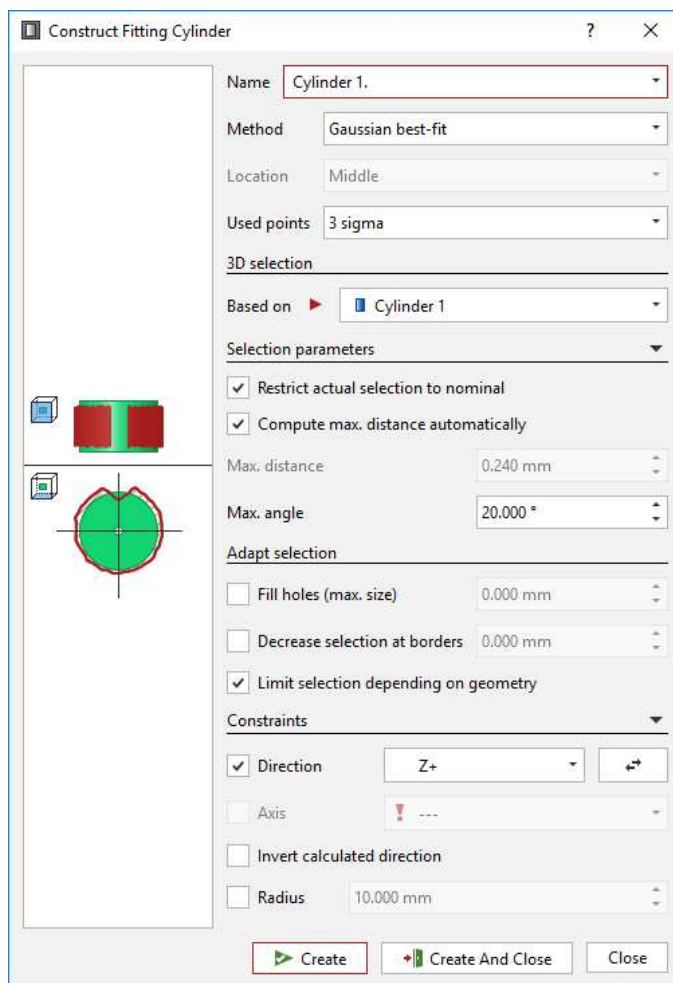
3.4.3.3 Výběr bodů pro výpočet prvku

Po provedeném vyrovnaní je třeba dle potřeby vytvořit (zkonstruovat) základní primitiva (bod, přímka, rovina, válec, koule atd.) na modelu. Zde je třeba si důsledně uvědomit, že výpočet probíhá na základě vybrané množiny poměrně velkého množství bodů polygonální sítě. A právě způsob výběru bodů, jeho selekce, filtrování apod. bude mít dále zásadní vliv na vypočítané charakteristiky (rozměr, GD&T) prvku. Zatímco u kontaktního měření je průměr válce a poloha osy spočítána na základě např. pouze osmi bodů, zde výpočet proběhne na základě i tisíců bodů (viz Obr. 3.61. – pro výpočet válce o $\varnothing$ 8 mm bylo vybráno 2 987 bodů).



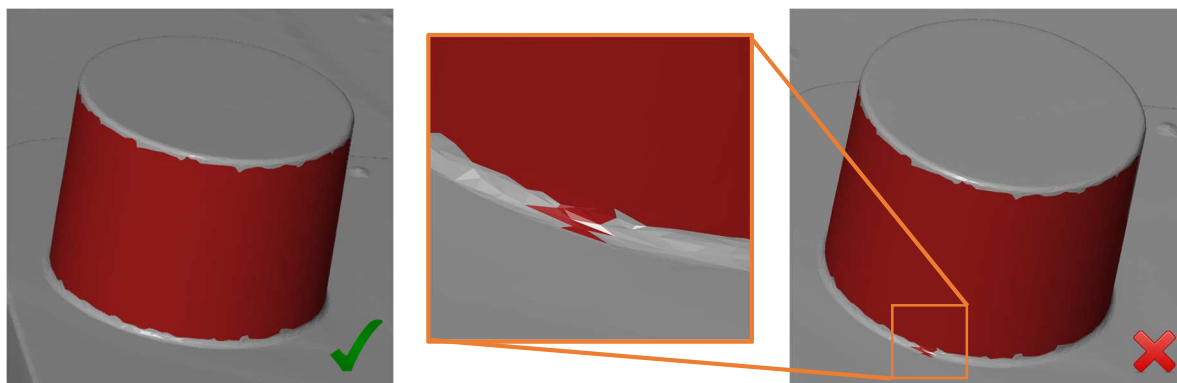
Obr. 3.61 Výběr bodů (červeně) pro výpočet elementu „Cylinder 1“

Z vybraných bodů je dle zvolené metody proložení (blíže viz kap. 3.4.3.4) spočítán daný prvek. Výběr lze provést zcela manuálně nebo můžeme využít různých automatických funkcí programu. Ty se liší dle zvoleného SW a umožňují zvolit mnoho různých nastavení, filtrování, odmazání výběru podél hranic apod. (Obr. 3.62). Sám operátor tedy na základě voleb a provedeného výběru přímo ovlivňuje výsledky měření. Pro volbu optimálních hodnot neexistují obecná doporučení. Vždy závisí na konkrétním výrobku, kvalitě skenu, požadovaném výstupu. Primárně je možné vycházet z doporučení výrobce, defaultních hodnot nastavení SW, ale především z norem (zvláště při vyhodnocování GD&T). Z vlastní zkušenosti je možné také říci, že mnohdy stačí zdravý úsudek a pečlivost při tvorbě reportu. Především při automatickém výpočtu totiž nelze spoléhat pouze na SW a je důležité neustále kontrolovat, zda výběr bodů vstupující do výpočtu elementu je v pořádku.

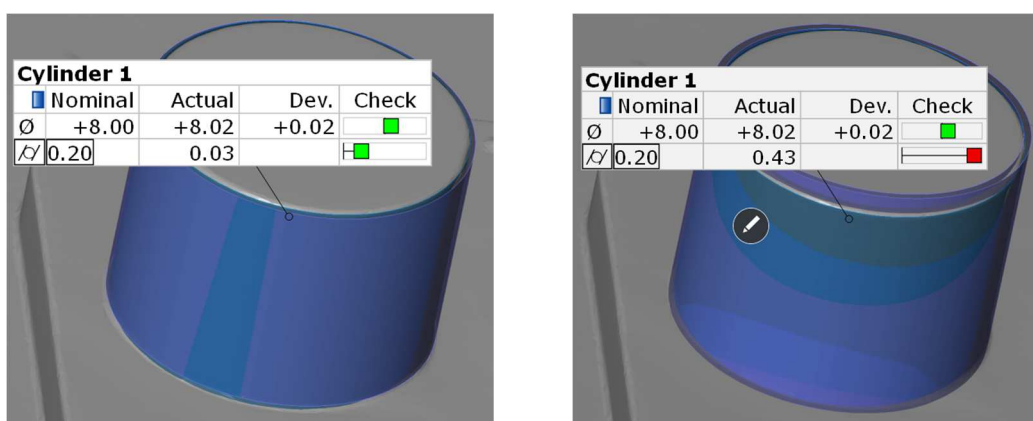


Obr. 3.62 Nastavení parametrů automatického výběru bodů pro výpočet prvku funkcí „Fitting Element“ v SW GOM Inspect („Selection parameters“, „Adapt selection“)

V potaz je třeba brát i druh následně používané výpočetní funkce nad výběrem, protože jak bude podrobeněji vysvětleno v následující kapitole, pokud např. počítáme rozměr prvku pomocí nejlepší shody (tzv. Gaussův BestFit), několik chybně vybraných bodů výsledek v podstatě neovlivní. Zatímco pokud stejný chybný výběr použijeme pro výpočet funkčního rozměru (typicky min. opsaný element, max. vepsaný element) nebo pro výpočet GD&T, může mít i jeden nesprávně vybraný bod z tisíce fatální vliv na výsledek (viz Obr. 3.63 a Obr. 3.64).



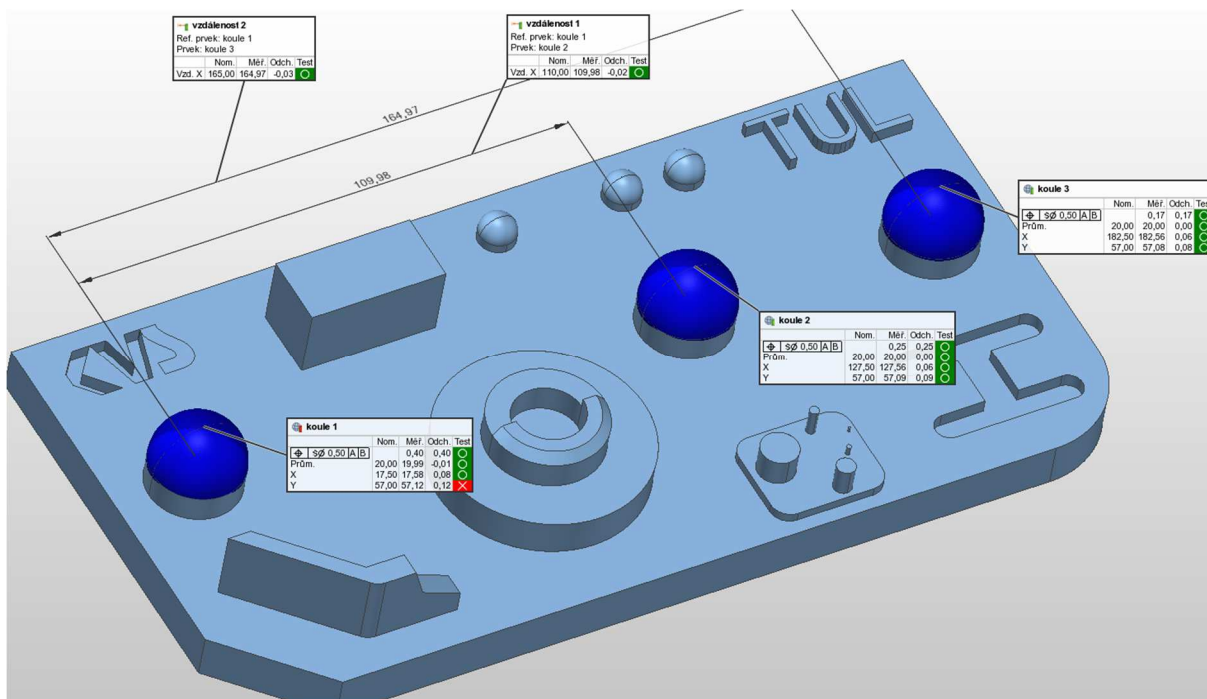
Obr. 3.63 Výběr bodů na válcové ploše: správný (vlevo), špatný (vpravo)



Obr. 3.64 Výpočet průměru válce a válcovitosti: na základě správného (vlevo), špatného (vpravo) výběru

Z výše uvedeného příkladu je zřejmé, že pokud byly vybrány pro výpočet válcového elementu správně body pouze na válcové ploše, je vypočítaný průměr metodou Gaussova BestFitu 8,02 mm a válcovitost 0,03 mm. Stačí však několik chybně vybraných bodů např. v přechodovém rádiusu mezi přilehlou rovinou (detail na Obr. 3.63 vpravo) a chyba válcovitosti byla mylně vypočítána 14x větší, na 0,43 mm (Obr. 3.64 vpravo). Takový výsledek ale samozřejmě neodpovídá realitě a vznikl pouze nepozorností operátora. Rozměr prvku vypočítaný Gaussovým BestFitem nebyl v tomto případě vůbec ovlivněn.

Podobně se mohou výsledky lišit i při použití stejných zdrojových dat (stejně polygonální síť) v různém inspekčním SW. Každý program může používat trochu jiné algoritmy výpočtu, má jiné defaultní nastavení a pro relevantní výsledky je i zde nutno provést nastavení dle požadovaných norem pro vyhodnocení, případně dle zvyklostí. Porovnání inspekce kulových prvků na ukázkovém modelu v SW PolyWorks Inspector a GOM Inspect Professional je uvedeno na následujících dvou stranách.



CSA KATEDRA VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ A AUTOMATIZACE

PolyWorks by innovativnet

Tabulka prvku

Jednotky: Milimetry
Souřadnicové systémy: Obecný
Zarovnání dat: Ustavení ABC

Název	Kontrola	Nom.	Měř.	Tol.	Odch.	Test	Mimo tol.
● koule 1	⊕ SØ 0,50 [A] B		0,40	0,50	0,40	Vyhovuje	
	Průměr	20,00	19,99	±0,10	-0,01	Vyhovuje	
	X	17,50	17,58	±0,10	0,08	Vyhovuje	
	Y	57,00	57,12	±0,10	0,12	Nevyhovuje	0,02
● koule 2	⊕ SØ 0,50 [A] B		0,25	0,50	0,25	Vyhovuje	
	Průměr	20,00	20,00	±0,10	0,00	Vyhovuje	
	X	127,50	127,56	±0,10	0,06	Vyhovuje	
	Y	57,00	57,09	±0,10	0,09	Vyhovuje	
● koule 3	⊕ SØ 0,50 [A] B		0,17	0,50	0,17	Vyhovuje	
	Průměr	20,00	20,00	±0,10	0,00	Vyhovuje	
	X	182,50	182,56	±0,10	0,06	Vyhovuje	
	Y	57,00	57,08	±0,10	0,08	Vyhovuje	
→ vzdálenost 1	Vzdálenost X	110,00	109,98	±1,00	-0,02	Vyhovuje	
→ vzdálenost 2	Vzdálenost X	165,00	164,97	±1,00	-0,03	Vyhovuje	

Organization: Technická univerzita v Liberci

Operator: Mendřický R.

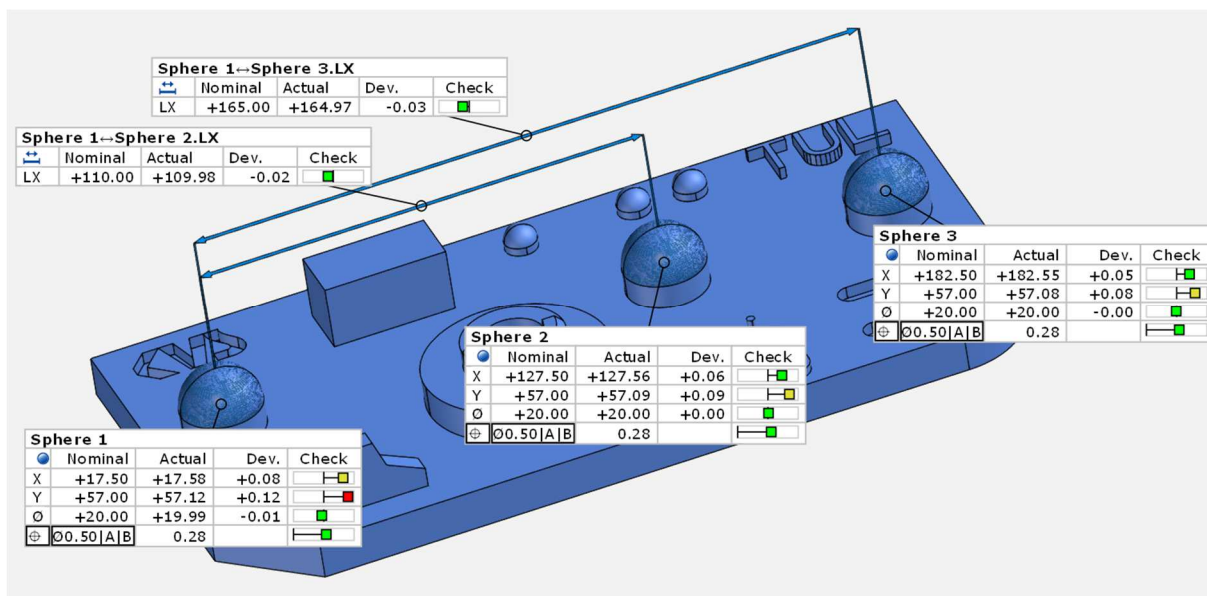
E-mail:

Part name: Etalon

Part number: Díl C

Piece: Díl 1 - ATOS

Obr. 3.65 Vyhodnocení kulových prvků v SW PolyWorks Inspector



Koule

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Sphere 1		X	+17.50	+17.58	-0.10	+0.10	+0.08		
Sphere 1		Y	+57.00	+57.12	-0.10	+0.10	+0.12		+0.02
Sphere 1		Ø	+20.00	+19.99	-0.10	+0.10	-0.01		
Sphere 1	A B	Ø0	+0.00	+0.28	+0.00	+0.50	+0.28		
Sphere 2		X	+127.50	+127.56	-0.10	+0.10	+0.06		
Sphere 2		Y	+57.00	+57.09	-0.10	+0.10	+0.09		
Sphere 2		Ø	+20.00	+20.00	-0.10	+0.10	+0.00		
Sphere 2	A B	Ø0	+0.00	+0.28	+0.00	+0.50	+0.28		
Sphere 3		X	+182.50	+182.55	-0.10	+0.10	+0.05		
Sphere 3		Y	+57.00	+57.08	-0.10	+0.10	+0.08		
Sphere 3		Ø	+20.00	+20.00	-0.10	+0.10	-0.00		
Sphere 3	A B	Ø0	+0.00	+0.28	+0.00	+0.50	+0.28		
Sphere 1↔Sphere 2		LX	+110.00	+109.98	-0.10	+0.10	-0.02		
Sphere 1↔Sphere 3		LX	+165.00	+164.97	-0.10	+0.10	-0.03		

Alignment By ABC

Length unit: mm

Etalon C

6/6

Model_C_CZ_Tuple320

Generated with GOM Inspect Professional

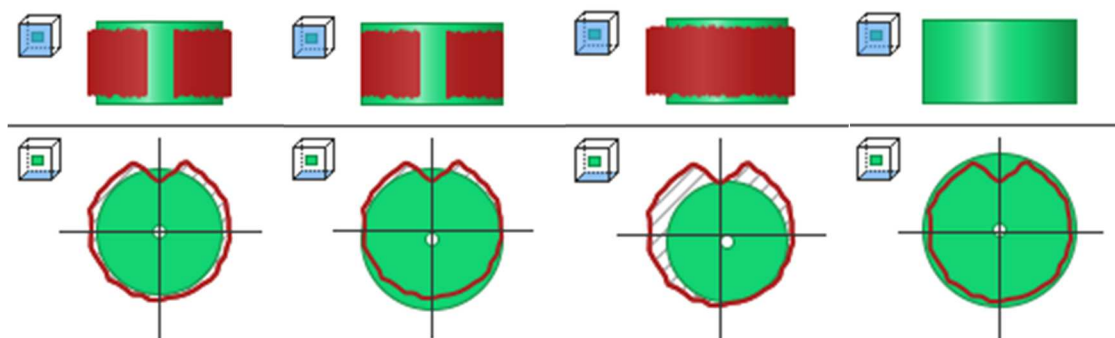
Obr. 3.66 Vyhodnocení kulových prvků v SW GOM Inspect Professional

Přestože snahou autora bylo nastavit v obou SW naprosto shodné parametry (metodu výpočtu prvku, procento filtrace, max. úhel mezi nominálním a aktuálními daty, omezení výběru geometrií apod.), především u GD&T charakteristik se mnohdy výstupy poměrně lišily (chyba polohy prvku koule 1 a 3 k základnám A,B o více než 0,1 mm). To potvrzují i vypočítané rovinnosti základů A / B / C (nejsou uvedeny v grafice). Výstupy ze SW PolyWorks byly 0,07 / 0,07 / 0,08 mm, zatímco ze SW GOM 0,14 / 0,03 / 0,02 mm. Naopak absolutní rozměrové údaje se v obou programech shodovaly téměř ideálně - např. průměry všech tří koulí byly v obou SW na setinu shodné, stejně tak jejich roztečné vzdálenosti. I z tohoto je patrná mnohem vyšší náchylnost tolerancí tvaru a polohy na způsob práce s daty ze skenování. V této souvislosti je ještě vhodné připomenout, že v SW lze volit způsob výpočtu vztažných základů a samotných GD&T tolerancí. Výsledky se budou lišit, pokud budeme volit mód ideální geometrie, nebo proběhne výpočet dle standardů ISO 5459 či ASME Y14.5.

3.4.3.4 Metoda výpočtu rozměru, GD&T

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, výpočet samotného prvku probíhá na základě výběru bodů polygonové sítě. Za předpokladu, že byl výběr správně definován, zbývá tedy zvolit vhodný matematický model pro výpočet. Ten bude záviset na účelu daného měření. Rozdílnou metodu zvolíme, pokud je cílem měření kontrola funkčních specifikací pro montáž (lícování) nebo pokud měření provádíme za účelem řízení výrobního procesu. V prvním případě je cílem měřit správné neboli funkční rozměry, aby bylo možné posoudit lícování, montáž, odchylky. Ve druhém případě je úkolem měření především sledovat výrobní parametry a procesy nebo výpočet koeficientů způsobilosti procesu C_p , C_{pk} ap. Zde je důležité stabilní, na odlehklých hodnotách nezávislé měření, které bude mít vysokou opakovatelnost. Chceme rychle získat takové výsledky, které nás budou informovat o relativních vzájemných odchylkách mezi jednotlivými díly při sériové výrobě [87].

V kvalitním inspekčním SW je na výběr z několika metod pro výpočet geometrie prvku. Pro řízení procesu bude nejčastěji volena funkce tzv. Gaussova BestFitu, kdy rozměry a poloha (natočení) prvku je vypočítána tak, aby součet kvadrátů odchylek všech bodů výběru od geometrického prvku byl minimální. Naopak při kontrole funkce je vhodné použít metodu výpočtu nejmenšího opsaného, resp. největšího vepsaného elementu. K dispozici je ale např. i Best-fit dle Chebysheva (viz Obr. 3.67).



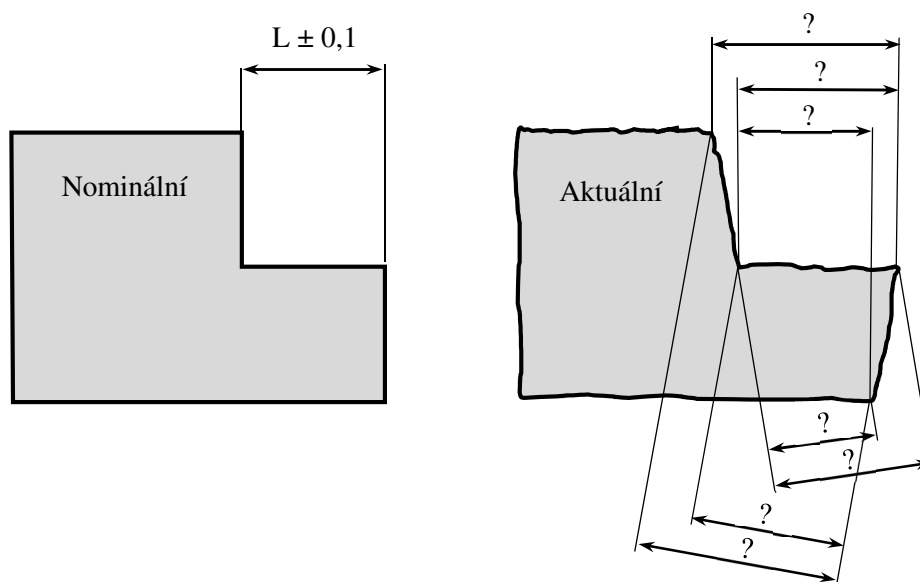
Obr. 3.67 Konstrukce válcového prvku dle různých metod (zleva: Gaussův Best-fit, Chebyshev Best-fit – střední, největší vepsaný element, nejmenší opsaný element)

Navíc je možné volit různé filtrace (např. neuvažovat všechny vybrané body, ale pouze statistický výběr nejméně odlehlých bodů (v rámci 1 – 5 sigma) (parametr „Used Points“ na Obr. 3.62), a nastavovat okrajové podmínky (např. definovat směr osy prvku dle jiného elementu apod.), (viz Obr. 3.62, sekce „Constraints“).

V okamžiku, kdy máme vypočítané geometrické elementy, jsme téměř v cíli rozměrové a tvarové inspekce. Nyní je třeba v SW definovat jednotlivé kontroly, tedy rozměrové, úhlové nebo GD&T. Nejjednodušší situace nastává, pokud potřebujeme získat rozměr nebo polohu některého vytvořeného prvku (průměr válce, koule, poloha osy apod.). Pokud jsou účelem měření lineární a úhlové kóty mezi jednotlivými elementy (vzdálenost dvou rovin, úhel mezi dvěma rovinami apod.), je nutné tyto prvky nejprve vytvořit a pak pomocí příslušných funkcí vypočítat potřebné rozměry mezi nimi (viz blíže kap. 3.4.3.5). Pozor při generování GD&T. Budeme-li kontrolovat tolerance tvaru a polohy prvků, SW vypočítá toleranci polohy na základě příslušné normy (ISO, ASME) a v podstatě ignoruje výpočetní metodu (Gaussian, Chebyshev), na základě které byl element vytvořen. Současně bere při výpočtu v úvahu všechny body výběru bez ohledu na případnou filtraci.

3.4.3.5 Metody při měření vzdálenosti

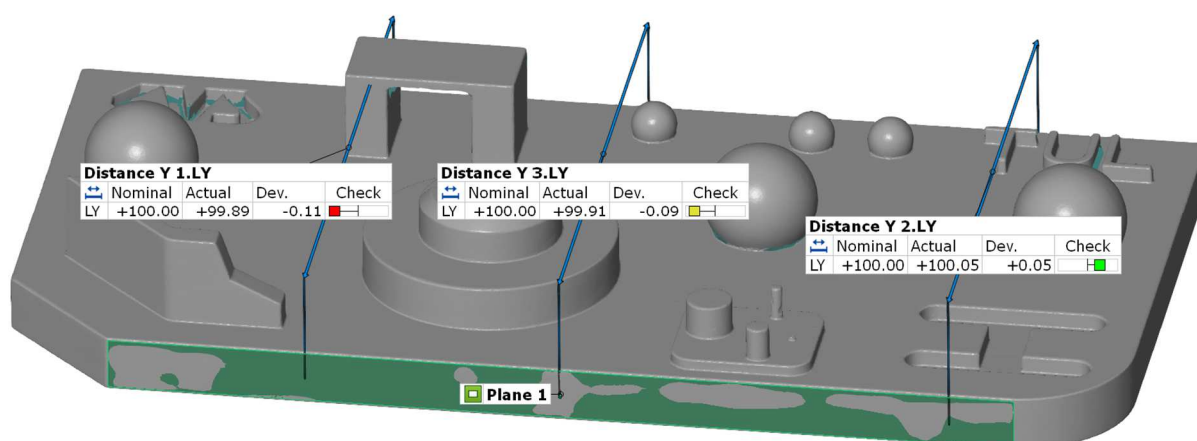
Zvláště při měření délkových a úhlových rozměrů je třeba věnovat také pozornost volbě správného postupu a výběru vhodného měřicího nástroje – funkce. Ne vždy existuje jednoznačná a jednoduchá odpověď, jak určit vzdálenost mezi dvěma elementy, pro příklad lze uvést měření vzdálenosti dvou rovin. Jak ilustruje Obr. 3.68, pro jasně definované zadání na nominálním modelu (vlevo) existuje několik možných řešení na reálném díle (vpravo) a nelze jednoznačně říci, které řešení je správné. V tomto případě by bylo třeba lineární kótu řešit ve vzájemném vztahu s GD&T a primárně určit, zda chyba rovnoběžnosti kontrolovaných rovin nepřekračuje uvedenou toleranci. Jinými slovy vzdálenost mezi dvěma rovinami lze také chápat jako kontrolu polohy GD&T (určit polohu roviny ve vztahu k jiné rovině). Taková kontrola používá celou rovinu, nejen některé konkrétní body.



Obr. 3.68 Měření vzdálenosti dvou rovin (nominální model nebo výkres – vlevo, skutečnost na reálném díle – vpravo) [88]

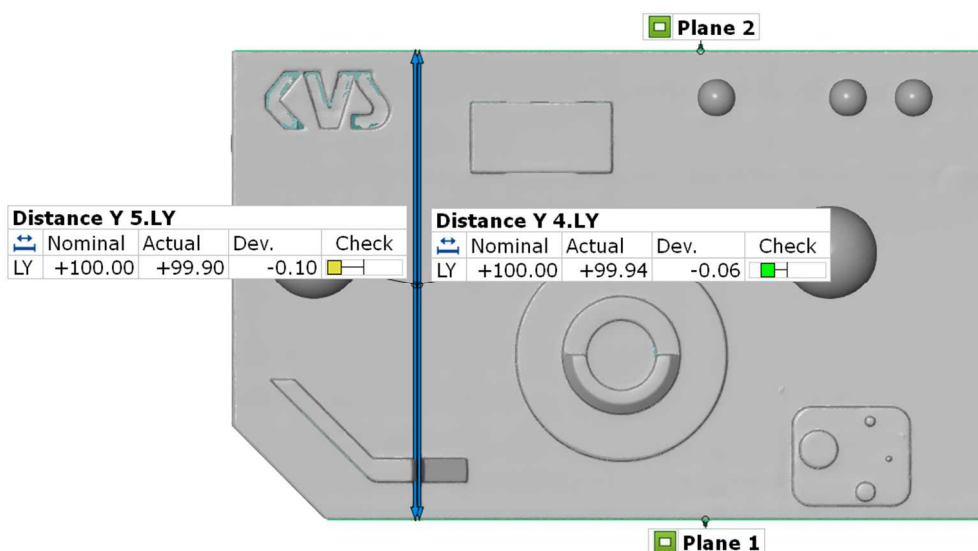
Teprve v případě, že roviny jsou z hlediska polohy a tvaru v pořádku (v dané toleranci), má smysl měření jejich vzájemné vzdálenosti. I zde ale existuje v inspekčních SW mnoho možností, jak k danému zadání přistoupit. Např. v SW GOM Inspect lze lineární kótu („Distance“), tedy v tomto případě vzdálenost mezi dvěma rovinami, měřit s využitím mnoha různých funkcí. Na výběr je funkce pro měření vzdálenosti dvou bodů („2-Point Distance“) - (zde lze dále vybrat body přímo na modelu nebo lépe body na proložených rovinách), funkce pro měření vzdálenosti bodu projektovaného kolmo k vybrané geometrii („Projected Point Distance“) nebo ve vybraném směru ke geometrii („Point-Direction Distance“), dále speciální funkce „Caliper“, která imituje princip měření posuvným měřítkem. Rozměry můžeme kontrolovat i s použitím pokročilých funkcí, jako např. „nezávislý princip“ („Independency Principle“) nebo „obálkový princip“ („Envelope Principe“). Vzhledem k tomu, že obě tyto metody umožňují kontrolovat prvek jako celek, výstupem měření zpravidla není jedno číslo, ale hraniční hodnoty. Princip nezávislosti je založen na metodě výpočtu (LP): dvoubodová velikost a pomocí této metody výpočtu lze určit největší a nejmenší hodnoty prvku nebo vzdálenosti. Při obálkové metodě (E) jde o maximální vepsanou a minimální opsanou velikost prvku či vzdálenosti.

Ukažme si několik výše uvedených metod na příkladu měření lineární vzdálenosti dvou rovnoběžných rovin s nominální vzdáleností 100 mm.



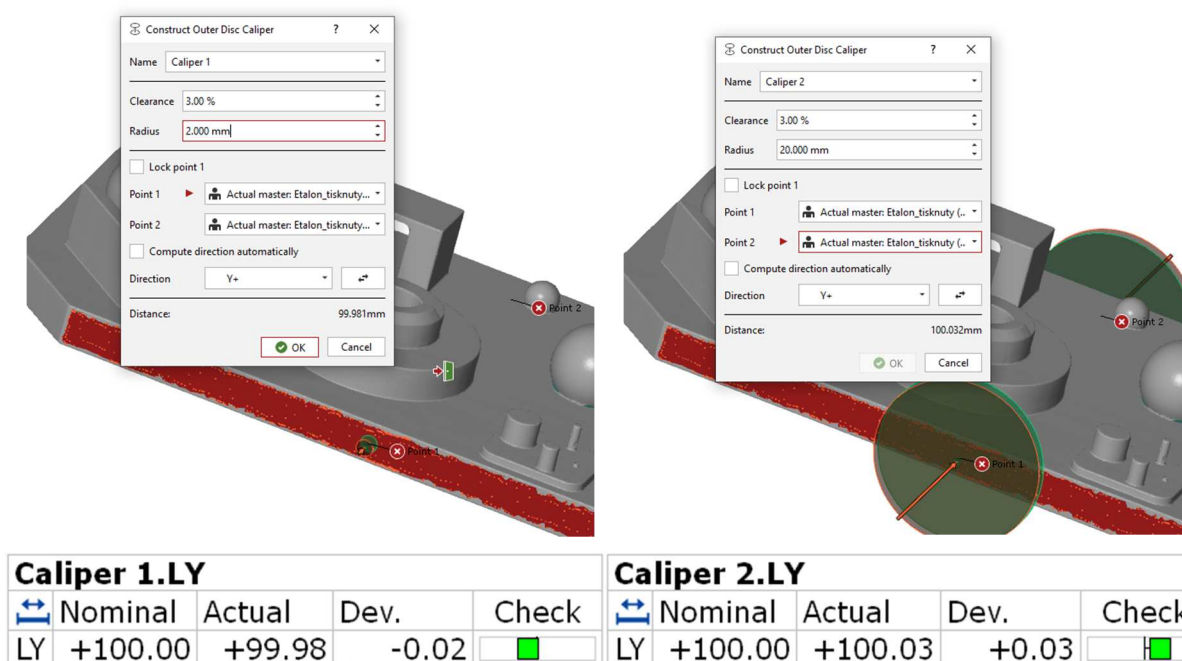
Obr. 3.69 Měření vzdálenosti dvou rovin metodou „2-Point distance“

Z prvního příkladu (Obr. 3.69) je patrné, že pokud použijeme k měření distance rovin metodu měření vzdálenosti dvou bodů, je výsledek velmi ovlivněn výběrem bodů pro měření. Zvláště pokud volíme body přímo na modelu (mrak bodů, mesh) - (viz kóty Y1 a Y2) jsou rizika chyby resp. nejistota výsledku velká. To dokládá i uvedený příklad, kde rozdíl mezi kótami Y1 a Y2 je v tomto konkrétním případě 0,16 mm. Rozměr Y3 je zkonstruován stejnou funkcí, ale jako vzdálenost středu dvou rovin Plane 1 a Plane 2, které byly předem vytvořeny funkcí Gaussův BestFit. V tomto případě již lze očekávat větší relevantnost výsledku. Rozměr všech tří kót je kontrolován vždy ve směru souřadné osy Y.



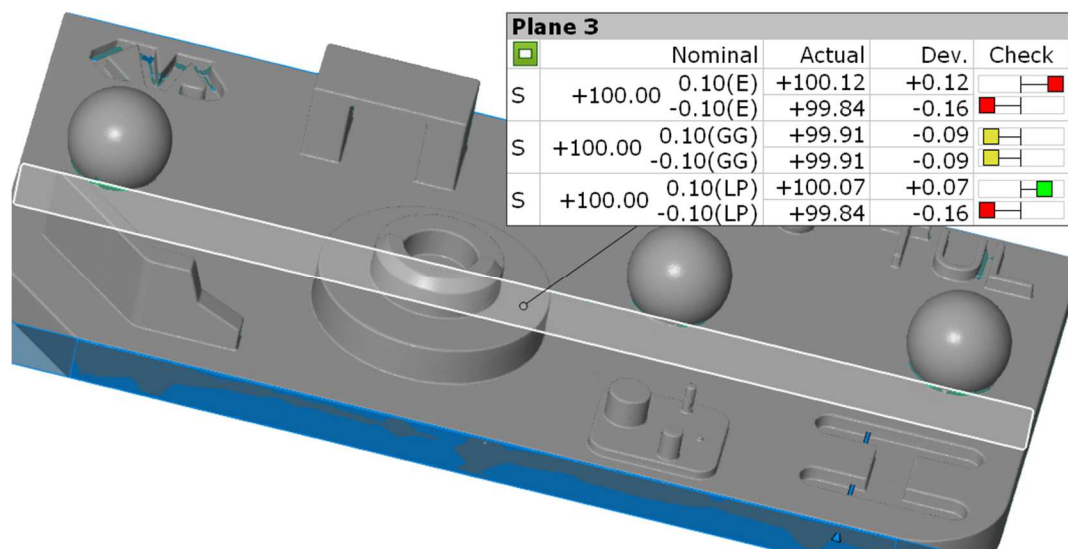
Obr. 3.70 Měření vzdálenosti dvou rovin metodou „Construct Projected Point Distance“

Obr. 3.70 ilustruje měření lineární vzdálenosti metodou, kdy bod je projektován ve směru normály ke zvolenému prvku, zde k rovině. Jako v prvním příkladu je výsledek opět silně ovlivněn výběrem bodu a dále volbou elementu, do kterého projektujeme. Na výše uvedeném obrázku rozměr Y4 představuje projekci bodu vybraného na přední ploše meshe do Plane 2 (zadní rovina vykonstruovaná funkcí Gaussův BestFit), zatímco kóta Y5 projekci bodu vybraného za zadní ploše meshe do Plane 1 (přední rovina vykonstruovaná funkcí Gaussův BestFit). Přestože je měření provedeno v identickém místě, výsledky se liší. Případná chybná orientace prvku, do kterého projektujeme (v tomto případě tedy odchylka normály roviny od směru Y) ovlivní směr měření a v důsledku zjištěný rozměr. Jiný výsledek tedy můžeme získat, pokud obecně provedeme měření z roviny A do roviny B a naopak.



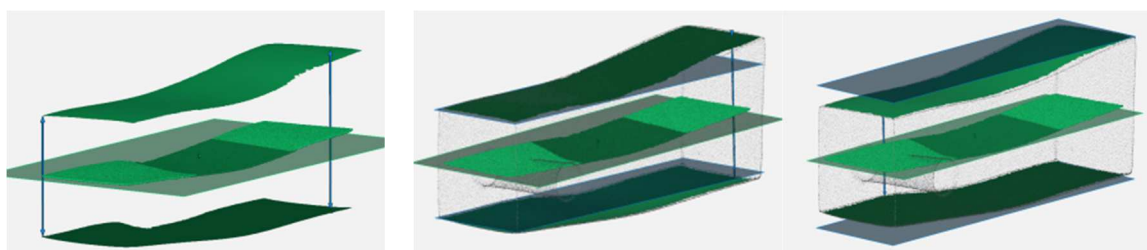
Obr. 3.71 Měření vzdálenosti dvou rovin metodou „Construct Outer Disc Caliper“

Při použití funkce „Caliper“ (Obr. 3.71) měříme vzdálenost podobně jako posuvným měřítkem. Dva paralelní dotykové disky se z vnější strany dotýkají měřeného povrchu, přičemž středová osa disku prochází jedním z kliknutých bodů. Vzhledem k tomu, že tímto způsobem měříme nejzazší vnější vzdálenost v oblasti disku, zjistíme tímto způsobem zpravidla větší rozměry než měřením středové vzdálenosti rovin. Rozměr bude také obvykle narůstat se zvětšující se velikostí disku, který lze v rámci dialogu funkce volit. Na příkladu výše byl pro průměr disku 2 mm zjištěn rozměr 99,98 mm (Obr. 3.71, vlevo) a pro průměr 20 mm pak 100,03 mm (Obr. 3.71, vpravo), a to při měření ve zcela identickém místě.



Obr. 3.72 Měření vzdálenosti dvou rovin metodou „Independency Principle (LP)“, „Envelope Principle (E)“ a „Linear Size – Gaussian best-fit (GG)“

Na výše uvedeném obrázku jsou uvedeny příklady dalších pokročilých metod měření, které lze pro měření vzdálenosti použít. Princip nezávislosti (LP) je založen na metodě výpočtu dvoubodové vzdálenosti. Pomocí této metody výpočtu určíme minimální a maximální vzdálenost rovin po celé ploše symetrické roviny. Oproti tomu princip obálové metody (E) určuje největší vnitřní vzdálenost a nejmenší vnější vzdálenost rovin pomocí obálek, které jsou rovnoběžné se symetrickou rovinou (viz Obr. 3.73).



Obr. 3.73 Princip měření vzdálenosti dvou rovin metodou (LP) – minimální a maximální vzdálenost (vlevo); a metodou (E) – maximální vnitřní vzdálenost mezi dvěma rovinami (uprostřed), – minimální vnější vzdálenost mezi dvěma rovinami (vpravo) [81]

Z uvedených příkladů je zřejmé, že obálkovou metodou získáme nejzazší limity jak z pohledu maxima tak minima. Celkový rozptyl na tomto demonstrativním případu činil 0,28 mm. Dále je zřejmé, že metodou výpočtu „Linear Size – Gaussian best-fit“, jsme získali identické výsledky, jako při měření vzdálenosti dvou bodů – středů proložených rovin metodou Gaussův BestFit (viz rozměr Y3 na Obr. 3.69) a to 99,91 mm. Nejedná se sice o zcela identický proces, ale vzhledem k povaze metod budou výsledky ve většině případů velmi podobné.

Výše uvedené příklady zdaleka nevyčerpaly všechny možnosti, jak provádět inspekci lineární vzdálenosti. Cílem bylo upozornit na možná úskalí a často nejednoznačnost při na první pohled tak jednoduché úloze jako je změření rozměrové kóty. Nelze ani doporučit žádný zaručený a ve všech směrech výhodný postup. Vždy záleží na konkrétní úloze, požadavku výkresové dokumentace či zadavatele, popřípadě lze vycházet ze znalosti funkčnosti součástky a vlastních zkušeností. Zatímco pro jeden případ může být jednoznačně výhodné použití jedné vybrané funkce, v jiném případě nemusí být daná možnost vůbec aplikovatelná. Zároveň je třeba upozornit, že uvedené příklady byly demonstrovány pouze na modelu naskenované součásti. Při inspekci, zvláště v případě, že má být měření automaticky opakovatelné, je vhodné postup aplikovat společně s nominálním CAD modelem (pokud je k dispozici) a využít jeho „ideální“ geometrie pro definování pravidel měření (měřících principů), což nám může často pomoci např. v určení směru měření, volbě měřicího bodu apod.

Jak bylo uvedeno v této kapitole 3.4, faktorů, nastavení a proměnných, které mají v celém řetězci (příprava skenovacího systému, postup při digitalizaci, strategie při vyhodnocení) vliv na přesnost výsledku je velmi mnoho. Některé faktory ovlivňuje vědomě či nevědomě obsluha a záleží na ní, zda dodržuje předepsané standardy a postupy. Jiné jsou dány náhodnými vlivy, u některých faktorů je jejich vliv na kvalitu výsledku nejasný. Cílem praktické části práce je tedy dále seznámit s výsledky výzkumu a experimentálního měření v této oblasti, poukázat na další problematické a rizikové faktory a přinést konkrétní výsledky.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část práce je zaměřena na výzkum vybraných faktorů a vlastností ovlivňujících přesnost 3D skenování a následného vyhodnocení dat. Cílem bylo experimentálně ověřit, jak mohou jednotlivá nastavení, vnější vlivy či zásahy uživatele ovlivnit kvalitu a přesnost skenovacího procesu. Většina faktorů je teoreticky blíže vysvětlena v kap. 3.4.

První část je věnována tzv. acceptance testu. Ten se v oboru optické metrologie používá ke kontrole, zda je ověřovaný přístroj ve shodě – tedy splňuje stanovené požadavky výrobce. Jsou vysvětleny jednotlivé vyhodnocované parametry a samotná metodika testu. Smyslem a cílem této části práce bylo navrhnout a vyrobit vlastní etalon, který by v první fázi prokázal, zda je možné pro vybraný 3D skener realizovat testy přesnosti digitalizace v podmínkách běžného prostředí a jakým způsobem se tyto výsledky blíží výstupům akreditované laboratoře. Důležitější však bylo vytvoření etalonu, který by po ověření posloužil pro následující fáze výzkumu vlivu dalších parametrů na přesnost 3D digitalizace.

Druhá kapitola praktické části se komplexněji věnuje problematice přesnosti digitalizace. Cílem bylo ověřit, jak se shodují, resp. jaké jsou odchylky mezi výsledky měření na souřadnicovém měřicím stroji (kontaktní metodou měření) a výstupy inspekce s využitím 3D optické digitalizace (bezkontaktní metodou měření). Analýza byla prováděna na složitějším modelu (nikoli pouze na soustavě koulí, jako u acceptance testu), který umožnil více se přiblížit měření reálných součástí. Testovací díl (etalon) byl navržen tak, aby obsahovat prvky jak různých tvarů (válcové a kuželové elementy, otvory, drážky, koule, tvarové plochy), tak i různých velikostí. Kromě rozměrové kontroly bylo dalším cílem stanovit, jaký je vzájemný vztah mezi rozlišením přístroje, resp. teoretickou hustotou naskenovaných bodů a velikostí nejmenšího naskenovaného elementu. Díky tomu bylo možné určit limity skenovatelnosti prvků různého tvaru s ohledem na použitý měřicí objekt skeneru.

Další pasáž se zaměřuje na zodpovězení otázky, zda a jakým způsobem jsou výsledky a přesnost skenování ovlivněny druhem a barvou použitého materiálu výrobku. Pro účely tohoto výzkumu byly vyrobeny desítky vzorků z různých materiálů, a to jak konvenční metodou – třískovým obráběním, tak aditivní technologií – 3D tiskem. Rozměry modelů byly nejprve určeny kontaktní metodou (použit byl o řád přesnější měřicí přístroj, výsledky měření touto metodou nejsou barvou výrobku ovlivněny) a následně tyto referenční hodnoty srovnány s výstupy 3D skenování. Při digitalizaci byly použity dvě generace přístrojů ATOS, starší systém používající projekční jednotku s bílým světlem a novější ATOS s modrým LED světlem projektoru. To navíc umožnilo posouzení vlivu barvy světla projektoru na schopnost systémů skenovat problematické povrchy (lesklé, tmavé apod.). Všechny vzorky byly skenovány jak v surovém stavu (bez jakékoli povrchové úpravy), tak upravené slabou vrstvou křídového nástřiku, který se používá pro sjednocení povrchu a eliminaci odlesků u opticky nevhodných povrchů.

Jaká je reálná tloušťka různých antireflexních přípravků pro úpravu povrchu dílů pro skenování, je zkoumáno v předposlední kapitole. Testováno bylo celkem 7 produktů, křídové přípravky různých výrobců speciálně vyvinuté pro zmatnění povrchu dílů před skenováním, stejně tak jako např. speciální samoodpařovací přípravky, nebo vývojky. Do testů byl zařazen i roztok na bázi titanové běloby, který by měl dle dostupných výzkumů dosahovat nejlepších parametrů a z hlediska rozměrů by měl nejméně ovlivňovat rozměr výrobku. Nedílnou součástí tohoto experimentu jsou i snímky struktury jednotlivých přípravků ve vysokém zvětšení, z optického a elektronového mikroskopu.

Poslední kapitola praktické části práce je věnována dalším parametrům, které mohou výsledky a přesnost měření ovlivňovat. Stejně jako v předchozí kapitole, i zde je jako jeden z modelů pro měření použit ověřený etalon z první fáze výzkumu. Využití jednotného etalonu napříč několika experimenty zvyšovalo spolehlivost a relevantnost jednotlivých testů. Konkrétně byla v této části výzkumu řešena témata jako kalibrace skeneru, čas expozice, počet dílčích skenů, úhel mezi skenerem a měřenou plochou, doba temperace přístroje, expozice (clona objektivů jednotlivých kamer) anebo kvalita a velikost referenčních bodů. Bylo zjištěno, že některé aspekty nemají žádný nebo pouze zanedbatelný vliv na přesnost, zatímco jiným je třeba věnovat zvýšenou pozornost.

4.1 Acceptance test

3D optické skenery se v současnosti často používají i jako univerzální měřicí a kontrolní zařízení. Uživatel proto musí mít jistotu, že používá optický skener, který skenuje v definovaném rozsahu přesnosti. Tento požadavek je, z dlouhodobého hlediska, možné zajistit pouze prostřednictvím srovnatelných kritérií a prověřováním zařízení (skeneru) v pravidelných intervalech. Výrobce doporučuje provádět acceptance test cca 1x za rok, pro určitá průmyslová odvětví (např. letecký průmysl) i častěji.

Ve výrobních firmách je samozřejmě nutné i s ohledem na normy jakosti a certifikace tyto intervaly dodržovat. Realizace srovnávacího testu v laboratoři výrobce či akreditované laboratoři je však velmi nákladná, zároveň celý měřicí systém po odeslání výrobcem ke kontrole není několik dní až týdnů k dispozici. Velké firmy proto v některých případech řeší ověřování a kalibraci přístrojů interně, kde je k těmto účelům zřízeno specializované pracoviště. Ve výzkumných laboratořích se však kontroly často podceňují a neprovádí se v doporučených intervalech, někdy dokonce vůbec. I zde však má přesnost a spolehlivost systému zásadní význam. V první fázi byla proto pozornost zaměřena na výzkum možnosti stanovit přesnost měření optických 3D skenerů v laboratorních podmínkách. Cílem bylo ověřit, zda lze navrhnout a vyrobit kalibrační etalon, který by umožnil spolehlivě provádět zkoušku přesnosti měření srovnatelnou s acceptance testem. To by usnadnilo realizovat vlastní kontrolu spolehlivosti systému v častějších intervalech a za výrazně nižších nákladů. Zároveň by ověřený etalon posloužil pro další testy a experimenty.

Tento výzkum byl publikován také v odborném periodiku [89].

4.1.1 Popis acceptance testu

Jak již bylo naznačeno, acceptance test se provádí pro ověřování přesnosti měření optických systémů. Na základě charakteristických parametrů ověřuje, zda měřicí systém splňuje limity parametrů kvality. Naměřené odchylky nesmí překročit limitní hodnoty, které jsou dány výrobcem a jsou specifické pro typ skeneru, měřicí objem a parametry měření. Test pro zařízení ATOS se řídí specifiky výrobce (GOM) a je v souladu s normou VDI/VDE 2634 – část 3 [90], která se zaměřuje právě na 3D optické systémy. Norma popisuje praktickou stránku testu, definuje kalibrační etalon, definuje charakteristické hodnoty, podmínky měření a způsob vyhodnocení. Výrobce stanovuje další specifiky, která je při provádění testu nutné dodržet [5], [4], [91]:

- Senzor a všechny jeho komponenty jsou nastaveny výrobcem. Je třeba zkontrolovat, zda všechna nastavení odpovídají specifikacím. Pokud tomu tak není je třeba senzor nastavit dle hardwarové uživatelské příručky.
- Při kalibraci senzoru je třeba dodržet dobu zahřívání a mezní limity kalibrace.
- Měření se provádí s nastavením kvality „high“ a nastavením rozlišení „full“.
- Dobu expozice je třeba zvolit tak, aby byly měřicí snímky správně exponovány. Především je třeba se vyvarovat nadměrné expozice.
- Pro tvorbu meshe a polygonizaci jednotlivých snímků užijeme nastavení „Standard“
- Pro výpočet sfér používá software pouze data měření ležící nad definovanou rovinou, která je rovnoběžná se základní deskou kalibračního artefaktu a protíná koule v 10° jižní šířky (tedy je použit mírně nadpoloviční objem koule).

- Sféry jsou vypočteny metodou nejmenších čtverců (funkce Gaussův BestFit) za použití cca 99,7% všech bodů (použitím filtrace 3 Sigma). Tím je zajištěno, že zhruba 0,3% nejvzdálenějších bodů je z výběru vyloučeno.
- Chyba vnější vzdálenosti (parametr *Length measurement error*) se stanoví metodou C (dle VDI / VDE 2634, Part 3).
- Teplota okolí a přípravku musí být totožná. Prostředí, ve kterém se provádí měření, musí být bez mechanických vibrací. Okolní světlo nesmí být během měření příliš intenzivní.

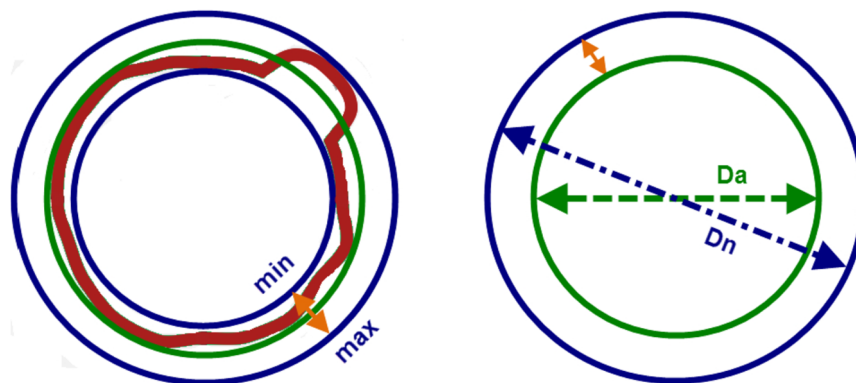
Inspektor provádí předepsaný postup vždy stejným způsobem. Pro zkoušku se používá sférický artefakt (Probing / Spacing Artifact - PSA) vyráběný firmou GOM, který se skládá z několika shodných, homogenních párů koulí s různými průměry a roztečnými vzdálenostmi (viz Obr. 2.1). Metrika koulí (jejich průměr a vzájemná vzdálenost) je velmi přesně určena v externí laboratoři. Při každé přejímací zkoušce je měřen jeden pár koulí, jehož výběr závisí na testovaném senzoru a použitém měřicím objemu. Pokud má skener více měřicích objemů, testuje se každý samostatně. V souladu s akceptačním testem jsou pro každý MV posuzovány celkem tři série měření. Poloha a vyrovnaní párů koulí vzhledem k senzoru je během snímání přesně definována. Software provádí transformaci a jemné vyrovnaní jednotlivých měření pro každou řadu měření. Z měření je vygenerována polygonální síť, a z té jsou následně vypočítány jednotlivé parametry testu (viz kap. 4.1.2). Ty jsou na konec posouzeny porovnáním s maximální přípustnou chybou *MPExx* (*maximum permissible error*). Tato mezní hodnota je definována výrobcem měřicího zařízení, v tomto případě firmou GOM, a pro vyhovující test nesmí být překročena.

4.1.2 Parametry acceptance testu

Jak bylo uvedeno výše, pravidla pro provádění testu a jeho vyhodnocení vychází přímo z normy VDI / VDE 2634, Part 3. Zde však nejsou některé postupy a parametry zcela přesně definovány a výrobce má možnost pro realizaci akceptačního testu některé proměnné blíže specifikovat.

Vyhodnocovanými parametry při Acceptance testu jsou:

- Probing error form (PF)
- Probing error size (PS)
- Sphere spacing error (SD)
- Length measurement error (E)



Obr. 4.1 Schematické znázornění výpočtu „Probing error“ [5]

První dva parametry se používají pro měření tvaru a průměru sfér. Parametry umožňují vyhodnotit schopnost měřicího systému a zohlednit jak chybu vlastního měřicího zařízení, tak chybu vzniklou skládáním jednotlivých snímků dohromady.

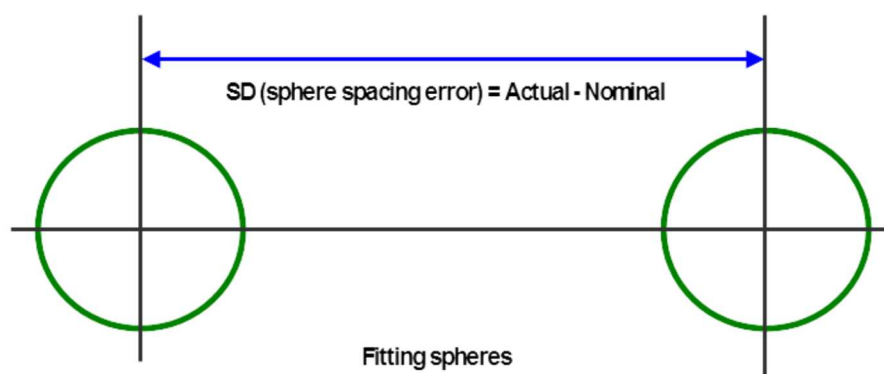
Probing error form (PF) (Obr. 4.1 - vlevo) udává odchylku tvaru („kulovitost“). Zjišťuje se největší vepsaná a nejmenší opsaná koule (ze všech bodů skenu) o společném středu. Parametr *Probing error form (range)* udává rozdíl mezi poloměry těchto kružnic (více viz kap. 4.1.3). Pro vyhodnocení se ale častěji používá parametr *Probing error form (sigma)*, který odpovídá směrodatné odchylce. Ta je spočítána z radiální vzdálenosti všech měřených bodů koule vzhledem k ideální „fitnuté“ kouli s volně odhadnutelným průměrem.

$$PF(\sigma) = \sigma \quad (12)$$

$$PF(\text{range}) = |\max - \min| \quad (13)$$

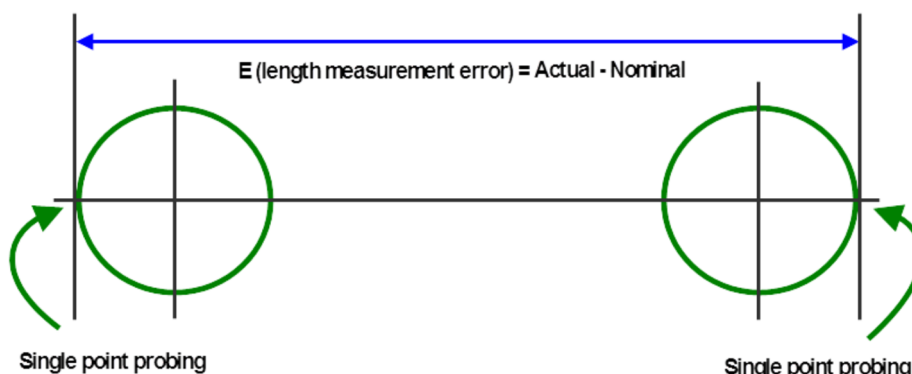
Probing error size (PS) (Obr. 4.1 - vpravo) udává odchylku rozměru „fitnuté“ koule. Zjišťuje se velikost koule pomocí metody *Fitting Sphere*. Chyba průměru je definována jako rozdíl mezi naměřeným průměrem D_a a referenční hodnotou průměru D_n .

$$PS(\text{size}) = D_a - D_n \quad (14)$$



Obr. 4.2 Schematické znázornění výpočtu „sphere spacing error“ [5]

Sphere spacing error (SD) (Obr. 4.2) udává odchylku vzdálenosti středů dvou koulí. Zjišťuje, zda skener měří ve správném měřítku na definované délce.



Obr. 4.3 Schematické znázornění výpočtu „length measurement error“ [5]

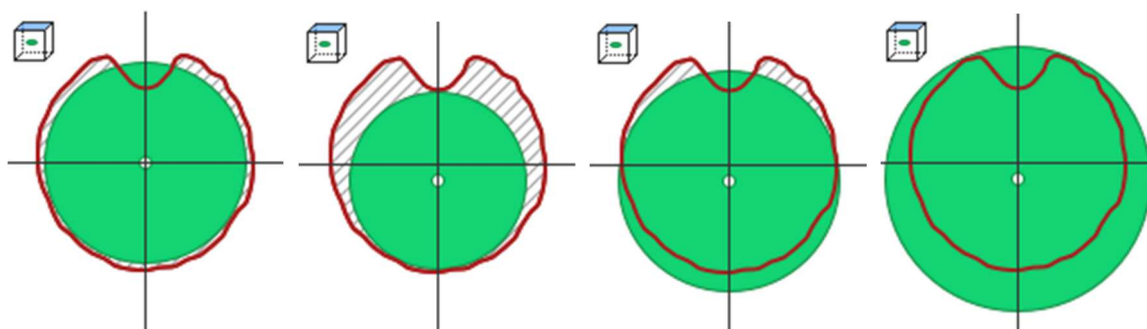
Length measurement error (E) (Obr. 4.3) udává odchylku měření délky. Určuje, zda skener měří ve správném měřítku včetně vlivu šumu skenu.

4.1.3 Výpočet odchylky tvaru koule

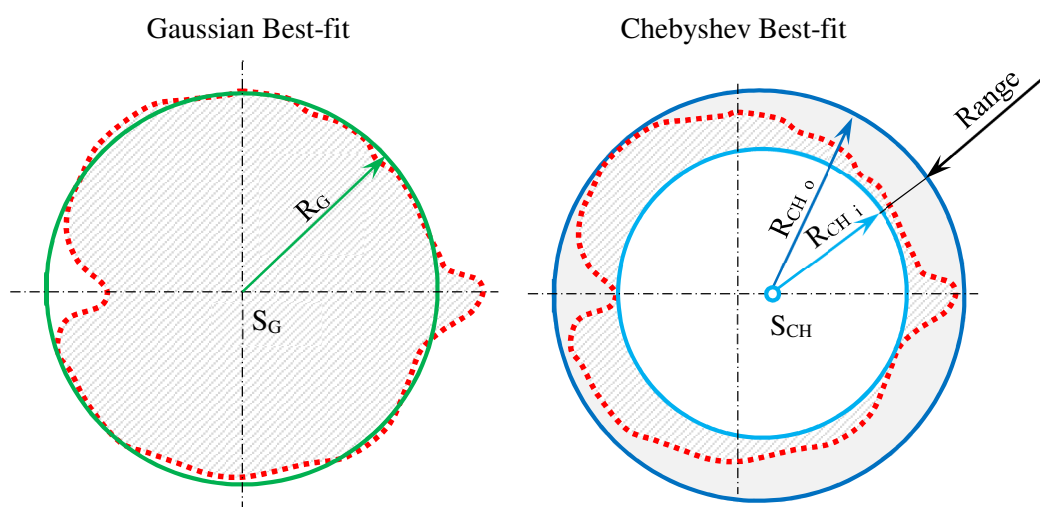
V rámci acceptance testu a dalších experimentů bude třeba mimo jiné vyhodnocovat odchylku tvaru kulového prvku. Vzhledem k tomu, že termín „kulovitost“ není normou definován a inspekční software tedy ani tuto funkci nenabízí, bylo třeba nalézt cestu, jak chybu tvaru sféry vyhodnotit.

Za tímto účelem vyjdeme z definice pro odchylku tvaru prvků. Norma [92], [93] říká, že odchylka tvaru je míra vychýlení reálného profilu kontrolovaného dílu od nominálního tvaru. Jako příklad uvedme odchylku tvaru kružnice – kruhovitost. Ta je definována jako radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic, které daný tolerovaný prvek ohraničují z vnější a vnitřní strany. Přičemž společná poloha středu těchto kružnic musí být volena tak, aby radiální vzdálenost mezi kružnicemi byla nejmenší možná [93]. Jinými slovy toleranční zóna je omezena dvěma kružnicemi se společným středem a je dána právě rozdílem jejich poloměrů (viz Obr. 4.5 vpravo, parametr Range).

V SW GOM Inspect Professional, který byl využit pro inspekci, lze pro výpočet elementů z vybraného souboru bodů naskenovaných dat využít několika výpočetních metod (jak bylo také blíže popsáno v kap. 3.4.3.4). Pro ověření dané definice a volbu správného postupu pro výpočet chyby tvaru koule byl proveden ověřovací výpočet pro element kružnice, resp. kruhovitost, kterou je na rozdíl od „kulovitosti“ možné v SW přímo vyhodnotit. Na testovacích datech byl z výběru bodů vypočítán element kružnice metodou Gaussova a Chebysheva Best-fitu. V prvním případě je prvek vypočítán takovým způsobem, aby součet kvadratických odchylek všech vybraných bodů od „fitnutého“ prvku byl minimální. V případě Chebysheva SW počítá maximální vzdálenost vybraných bodů od „fitnutého“ prvku a prvek konstruuje tak, aby maximální vzdálenost byla nejmenší. Jinak řečeno, střed kružnic pro Chebyshevovu metodu je nalezen takovým způsobem, aby dvě soustředné kružnice se společným středem S_{CH} (opsaná a vepsaná) měly nejmenší radiální vzdálenost (viz Obr. 4.5 vpravo). V případě Chebyshevovy metody pak ještě máme možnost volit umístění proloženého prvku - a to uvnitř všech vybraných bodů, uprostřed a vně (viz Obr. 4.4).

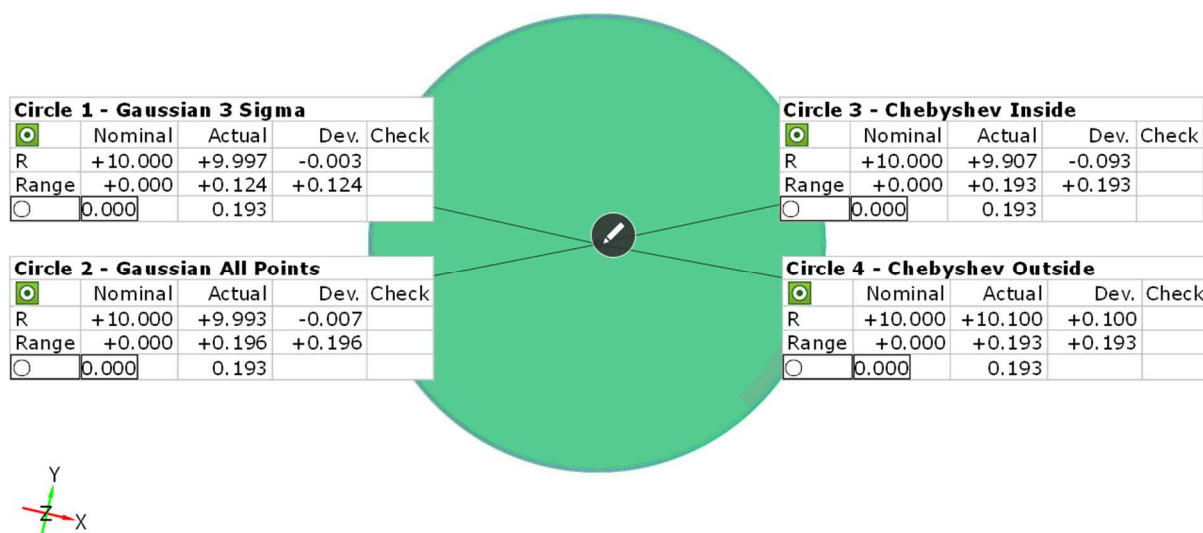


Obr. 4.4 Konstrukce kružnice dle různých metod v SW GOM Inspect (zleva: Gaussův Best-fit, Chebyshev Best-fit – inside, Chebyshev Best-fit – middle, Chebyshev Best-fit – outside)



Obr. 4.5 Gaussův a Chebyshev Best-fit

Dle ilustrace uvedené na výše uvedeném obrázku je tedy zřejmé, že kruhovitost vypočtená v SW by měla nabývat stejné hodnoty jako rozdíl mezi poloměrem kružnice vytvořené funkcí Chebyshev outside (R_{CH_o}) a Chebyshev inside (R_{CH_i}), v obrázku označené jako Range.



Obr. 4.6 Tvorba prvku kružnice dle různých metod v SW GOM Inspect

To potvrzuje praktický příklad realizovaný v SW GOM Inspect Professional uvedený na Obr. 4.6. Zde je z mraku bodů reprezentující naskenovanou kružnici (vytvořena řezem meshe válce) vypočítán prvek kružnice čtyřmi možnými způsoby:

- Circle 1 – metoda Gaussův Best-fit s filtrací bodů 3 Sigma (99,7 % bodů výběru)
- Circle 2 – metoda Gaussův Best-fit s použitím všech vybraných bodů
- Circle 3 – metoda Chebyshev Best-fit s volbou lokace uvnitř (inside)
- Circle 4 – metoda Chebyshev Best-fit s volbou lokace vně (outside)

Pro všechny prvky byl následně vypočítán poloměr R , parametr $Range$ (udávající součet absolutních hodnot nejmenší a největší odchylky datového souboru) a kruhovitost. Z výsledků je patrné, že kruhovitost, tak jak ji vypočítal SW (tedy dle jeho vnitřních algoritmů), vychází 0,193 mm bez ohledu na to, jakou metodou byl daný prvek vytvořen. Dle specifikace SW jsou při výpočtu GD&T brány v úvahu všechny body výběru neohledně na původně zvolenou výpočetní metodu prvku a s ní spojenou případnou filtraci. Stejná hodnota 0,193 mm byla získána také pro parametr $Range$, ale pouze pro výpočetní metodu Chebyshev (tedy kružnici 3 a 4). Zároveň je parametr $Range$ u Chebyshevovy metody dle předpokladu roven rozdílu poloměrů pro vnější kružnici $R_4 = 10,1$ mm a vnitřní kružnici $R_3 = 9,907$, tedy 0,193 mm. Potvrdila se tedy hypotéza, že rozdíl mezi poloměrem nejmenší opsané a největší vepsané kružnice, jež mají společný střed a byly vypočteny metodou Chebyshev, se rovná hodnotě odchylky tvaru daného prvku - v tomto případě kruhovitosti. Pro výpočet odchylky tvaru koule (jak bude někdy dále v rozporu s normou zkráceně uváděno „kulovitosti“) byl tedy zvolen právě tento postup.

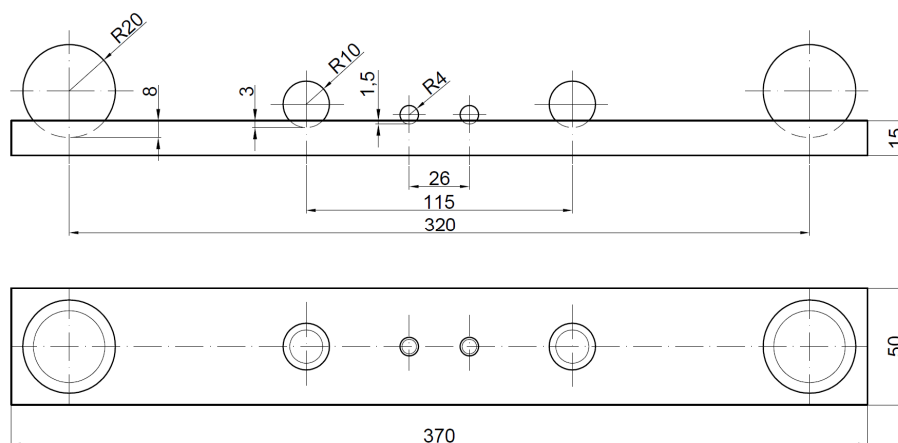
$$\text{Odchylka tvaru koule} = R_{CH_o} - R_{CH_i} = Range_{CH} \quad (15)$$

4.1.4 Kalibrační etalon

Pro realizaci testu a vyhodnocení požadovaných parametrů bylo třeba navrhnout a vyrobit kalibrační artefakt. Ten by měl být navržen tak, aby použité prvky měly co největší tvarovou a rozměrovou přesnost a aby byl využitelný pro vyhodnocení všech dostupných měřicích objemů. S odkazem na tuto skutečnost byl navržen sférický etalon se třemi páry koulí pro tři uvažované měřicí objemy MV 55, 250 a 700 mm pro systém ATOS II. Rozměry koulí a jejich roztečné vzdálenosti jsou v souladu s požadavky Acceptance testu, resp. se směrnicí VDI/VDE 2634 a jsou uvedeny v Tab. 4.1, a na Obr. 4.7.

Měřicí objem	Průměr koulí	Rozteč koulí
55x44x30 (MV55)	8 [mm]	26 [mm]
250x200x200 (MV 250)	20 [mm]	115 [mm]
700x560x560 (MV 700)	40 [mm]	320 [mm]

Tab. 4.1 Zvolené rozměry měřených elementů na etalonu



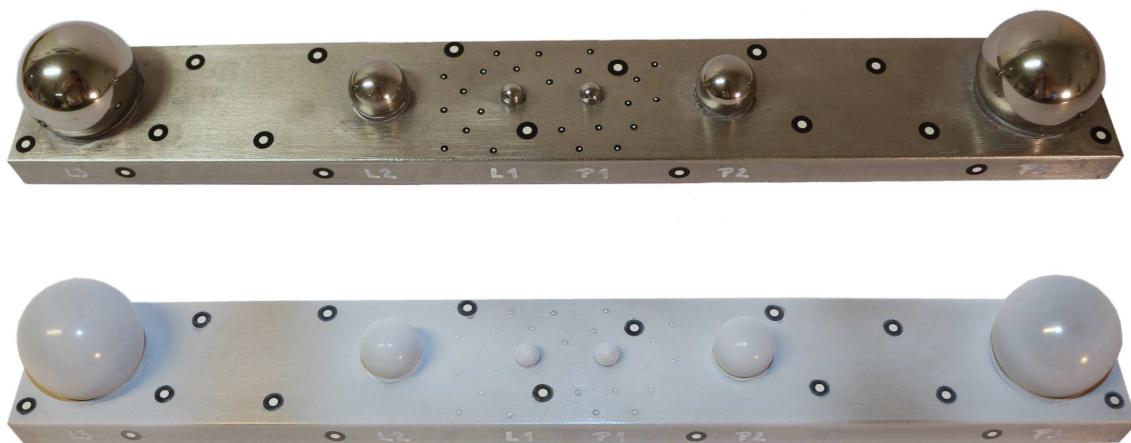
Obr. 4.7 Návrh etalonu pro acceptance test

Pro výrobu základové desky byla zvolena nerezová ocel - chrom-niklová austenitická ocel AISI 304. Kuličky byly nakoupeny u pražské společnosti Redhill Balls. Použité kuličky jsou z důvodu požadované velmi malé drsnosti leštěné, jsou přesnosti G100 a materiálu AISI 304. Tab. 3 uvádí přesnosti kuliček deklarované výrobcem.

Stupeň jakosti	Odchylka průměru koule	Odchylka od kulového tvaru	Povrchová drsnost
G100	2.5 [μm]	2.5 [μm]	0.100 [μm]

Tab. 4.2 Stupeň přesnosti G100 podle ISO 3290 [94]

Kuličky byly vlepeny dvousložkovým epoxydovým lepidlem (Bison Epoxy Metal) do předem obrobených lůžek v základové desce. Vyrobený kalibrační etalon, již opatřený referenčními značkami, je vyobrazen na Obr. 4.8.



Obr. 4.8 Fyzický model kalibračního etalonu (bez matněního nástřiku / s matněním nástřikem)

4.1.4.1 Stanovení nominálních rozměrů

Skutečné, pro naše účely tedy referenční (nominální) rozměry prvků, byly opakovaně proměřeny na tříosém souřadnicovém měřicím stroji DEA GLOBAL Status 7.10.5 od výrobce Hexagon Metrology. Přesnost měření CMM byla o řád vyšší, než je předpokládaná přesnost měření 3D skenerů. Kalibrační list stroje uvádí maximální dovolenou chybu měření $MPE_E = (2,5 + L/300) \mu m$. Byla provedena teplotní korekce rozměrů na 20°C a výsledky měření byly statisticky zpracovány (byly určeny průměrné hodnoty z deseti měření, standardní nejistota měření typu A, B a C). Výsledné hodnoty proměnných spolu s rozšířenou nejistotou U uvádí Tab. 4.3.

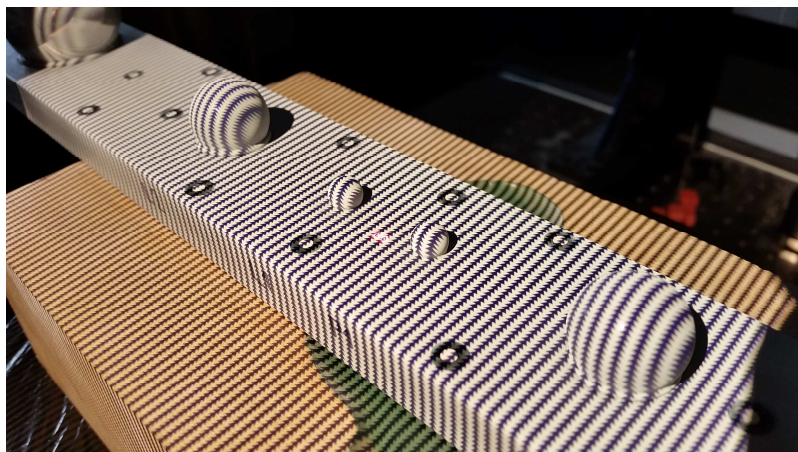
Měřená veličina	Výsledek měření
Koule L Ø8 mm	8.000 ± 0.005 [mm]
Koule R Ø8 mm	7.999 ± 0.005 [mm]
Koule L Ø20 mm	20.000 ± 0.005 [mm]
Koule R Ø20 mm	20.000 ± 0.005 [mm]
Koule L Ø40 mm	40.002 ± 0.005 [mm]
Koule R Ø40 mm	40.001 ± 0.007 [mm]
Rozteč koulí 26 mm	26.017 ± 0.005 [mm]
Rozteč koulí 115 mm	115.005 ± 0.006 [mm]
Rozteč koulí 320 mm	319.933 ± 0.007 [mm]
Vnější vzdálenost 34 mm	34.016 ± 0.005 [mm]
Vnější vzdálenost 135 mm	135.005 ± 0.006 [mm]
Vnější vzdálenost 360 mm	359.935 ± 0.007 [mm]

Tab. 4.3 Výsledky měření etalonu na CMM

4.1.5 Digitalizace etalonu

Při realizaci acceptance testu je na základě zmiňované normy doporučen přesný postup pro skenování kalibračního etalonu. Pro každý měřicí objem se provádí digitalizace celkem ve třech měřicích sériích, přičemž pro každou sérii je předepsána jiná poloha skenovací hlavy vůči objektu. Každá série se skládá z celkem deseti dílčích snímků pořízených z předepsaných pozic. Etalon musí být

při měření umístěn stabilně, opatřen referenčními body příslušného průměru a prostředí musí být bez vibrací. Protože koule jsou velice lesklé, provádí se antireflexní nástřik práškem oxidu titaničitého. Kvůli zajištění vysoké přesnosti probíhala všechna měření za konstantních podmínek, konkrétně při teplotě $20 \pm 1^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 10 \%$. Aktuální teplota při měření byla vždy zaznamenána a všechny vypočítané délkové rozměry byly korigovány na 20°C .

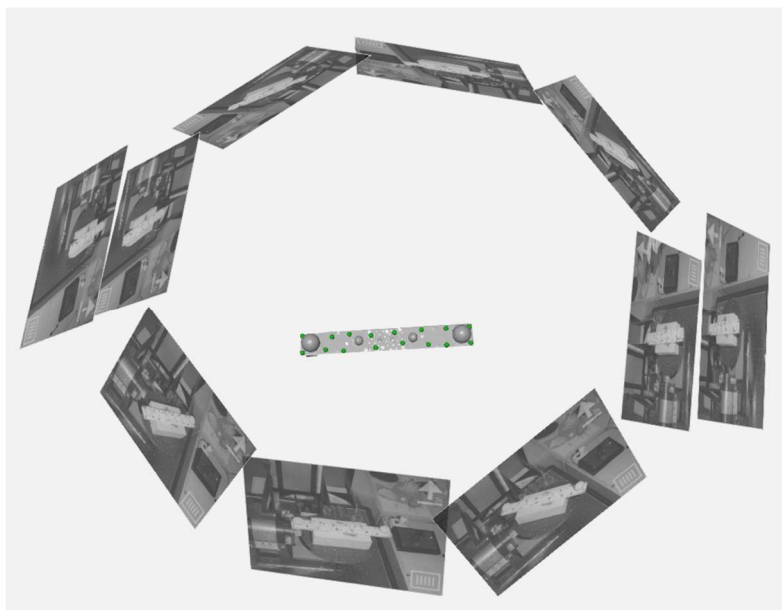


Obr. 4.9 Digitalizace etalonu (projekce proužků světla)

Postup pro měření je následující [5] (1. měřicí série):

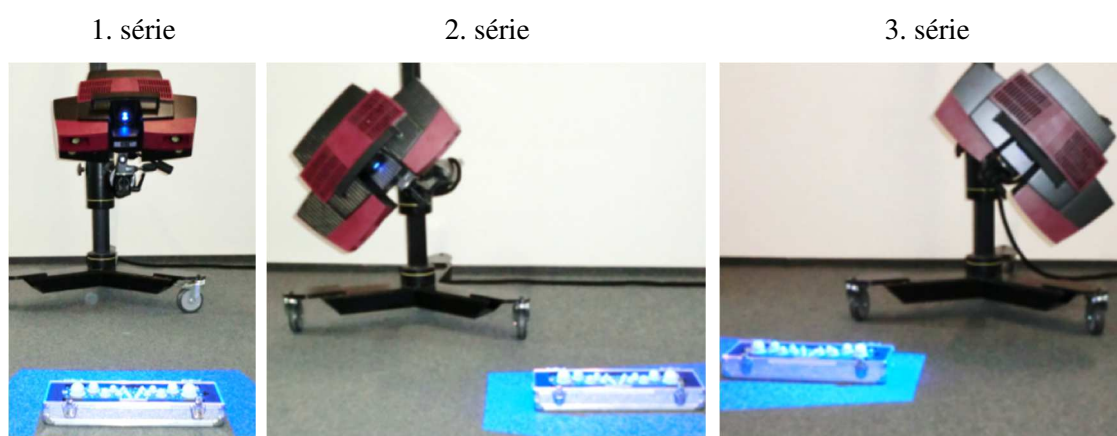
- Umístit etalon horizontálně na rovnou a stabilní plochu (např. desku rotačního stolu) a zajistit jeho stabilitu.
- Naklopit snímač na úhel 45° vzhledem k etalonu (naklonit je možné jak skener, tak etalon).
- Nastavit vzdálenost skenovací hlavy tak, aby se střed měřicího objemu nacházel uprostřed spojnice středů měřených koulí.
- Vytvořit 8 snímků, přičemž pro každé měření otočit etalon o 45° kolem středového bodu.
- Vytvořit jeden snímek (devátý) v pozici, kdy se střed měřicího objemu nachází v průsečíku spojnice koulí a vnějšího povrchu levé koule (etalon bude pootočen o 90° proti výchozí pozici).
- Vytvořit jeden snímek (desátý) v pozici, kdy se střed měřicího objemu nachází v průsečíku spojnice koulí a vnějšího povrchu pravé koule (etalon bude pootočen o 180° proti předchozí pozici).

Pozice snímků pro 1. měřicí sérii jsou patrné z Obr. 4.10.



Obr. 4.10 Jednotlivě vytvořené snímky při skenování etalonu (MV 700, 1. měřicí série)

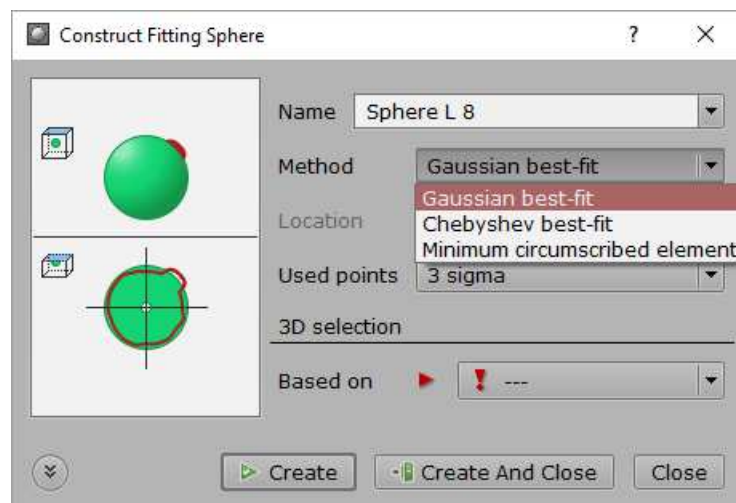
Při 2., resp. 3. měřicí sérii se postupuje analogicky, pouze skener je nakloněn z kolmé polohy o 45° ve směru, resp. proti směru hodinových ručiček (viz Obr. 4.11).



Obr. 4.11 Vzájemná poloha skeneru vůči artefaktu při jednotlivých sériích (1. snímek dané série) [4]

4.1.6 Vyhodnocení dat

V dalším kroku proběhlo zpracování naskenovaných dat v software GOM Inspect Professional, čímž byly získány informace o požadovaných veličinách. Pro určení průměru koulí byla použita funkce „Fiting Sphere“, která umožňuje z velkého množství naskenovaných bodů (tzv. mraku bodů) vypočítat odpovídající geometrický prvek. Jako metoda výpočtu byl zvolen v souladu s normou „Gaussův Best-fit“, přičemž pro výpočet prvku bylo použito 3σ (tedy 99,73 %) bodů z výběru (viz Obr. 4.12).



Obr. 4.12 Konstrukce „fitnuté“ koule

Výpočet rozteče koulí pak probíhal vytvořením inspekčního prvku „2-point Distance“, přičemž je měřena vzdálenost středu levé a pravé koule daného páru.

4.1.6.1 Výsledky acceptance testu

Záměrem tohoto výzkumu bylo především pokusit se realizovat test přesnosti měření 3D optického skeneru v podmínkách výzkumné laboratoře na vlastním etalonu a takovým způsobem, aby jeho realizace vycházela z příslušných doporučení a norem a byla srovnatelná s acceptance testem prováděným v metrologických laboratořích. Dalším důvodem bylo také získat ověřený etalon, který bude možné využít v dalších fázích experimentů. Za tímto účelem byla provedena digitalizace vyrobeného etalonu dle postupu (viz kapitola 4.1.5) pro všechny 3 měřicí série a následně byly vyhodnoceny charakteristické veličiny. Cílem bylo tedy určit všechny 4 určující parametry (viz kapitola 4.1.2) pro každý ze tří měřicích objemů. Pomocí optické digitalizace bylo tímto způsobem získáno v kombinaci celkem 54 veličin. Ty byly následně porovnány s referenčními rozměry získanými z CMM a byla určena jejich odchylka (chyba).

Ukázka vyhodnocení pro parametr „Probing error size“ (levá koule) je uvedena v tabulce Tab. 4.4, pro parametr „Sphere spacing error“ v tabulce Tab. 4.4. Obojí pro MV 250.

Měřicí série	Počet snímků	Počet vybraných bodů	Aktuální průměr (D_a) [mm]	Nominální průměr (D_n) [mm]	Probing error size (PS) [mm]
1	10	2774	19.991	20.000	-0.009
2	10	2763	19.982	20.000	-0.018
3	10	2615	19.990	20.000	-0.010

Tab. 4.4 Vyhodnocení parametru „Probing error size“ (MV250, levá koule)

Měřicí serie	Počet snímků	Aktuální rozteč [mm]	Nominální rozteč [mm]	Sphere spacing error (SD) [mm]
1	10	115.011	115.005	0.006
2	10	115.004	115.005	-0.001
3	10	115.017	115.005	0.012

Tab. 4.5 Vyhodnocení parametru "Sphere spacing error" (MV250)

Pro výsledné posouzení acceptance testu je dle normy směrodatná vždy maximální (absolutní) hodnota každého parametru ze všech tří měřicích sérií. S ohledem na tuto skutečnost je v níže uvedené tabulce (Tab. 4.6) uveden výsledný souhrn veškerých posuzovaných parametrů acceptance testu pro použité tři měřicí objemy. Pro porovnání je v tabulce také uvedena velikosti chyb zjištěných při posledním testu v oficiální metrologické laboratoři.

Parametr		Výsledek experimentu	Metrologická laboratoř
MV 55	Probing error form (sigma)[mm]	0.002	0.001
	Probing error size [mm]	0.023	0.003
	Sphere spacing error [mm]	-0.005	-0.002
	Length measurement error [mm]	0.018	0.003
MV 250	Probing error form (sigma)[mm]	0.003	0.004
	Probing error size [mm]	-0.018	-0.020
	Sphere spacing error [mm]	0.012	-0.017
	Length measurement error [mm]	-0.018	-0.035
MV 700	Probing error form (sigma)[mm]	0.009	0.024
	Probing error size [mm]	-0.087	-0.103
	Sphere spacing error [mm]	0.012	-0.044
	Length measurement error [mm]	-0.080	-0.187

Tab. 4.6 Porovnání zjištěných maximálních chyb s hodnotami výrobce

Jak je ze srovnání patrné, u MV250 byly námi zjištěné chyby srovnatelné s testem provedeným v laboratořích GOM, u MV700 bylo dosaženo dokonce lepších výsledků, naopak u MV55 výsledků o něco horších. Důležité však je, že ve všech případech jsou chyby v řádu max. setin mm. To prokazuje, že systém měří korektně a že všechny prvky systému (deska pro uživatelskou kalibraci, kamery, projektor), podmínky měření i způsob vyhodnocení jsou v pořádku. Zároveň se dá říci, že metodika a postupy ověřené tímto experimentem jsou platné a obecně použitelné pro obdobné systémy.

Při oficiálním acceptance testu jsou hodnoty zjištěných odchylek dále porovnávány s limitními hodnotami určenými výrobcem. Pokud jsou všechny parametry pod stanovenou mezí, je vystaven certifikát o akceptační zkoušce s výsledkem vyhověl. V případě našeho testu jsme ve všech případech známé limitní hodnoty dodrželi. Příklad známých limitních hodnot pro MV 250 je uveden v Tab. 4.7.

Parametr	Výsledek experimentu	Limit
Probing error form (sigma)[mm]	0.003	0.007
Sphere spacing error [mm]	0.012	0.020

Tab. 4.7 Porovnání zjištěných maximálních hodnot s limity výrobce

Celkově lze na výsledky pohlížet pozitivně. Všechny prověřované měřicí objemy splnily známé limity a celková chyba se pohybovala maximálně v řádu setin milimetrů. Výsledky testu tak potvrdily, že systém ATOS je schopen s vysokou přesností skenovat jak objekty malých rozměrů, tak větších vzdáleností v rámci měřicího objemu. Různá pozice skeneru vůči měřenému objektu v jednotlivých měřicích sériích navíc prokázala, že výsledky nejsou závislé na prostorovém uspořádaném systému skener – měřený objekt a objekt bude změřen stejně přesně, ať se nachází v jakémkoli místě měřicího objemu.

4.1.7 Diskuze

V rámci tohoto experimentu byla představena metodika pro posuzování způsobilosti práce a přesnosti měření optických bezkontaktních systémů. Jde o poměrně komplikovaný proces, u kterého je třeba dodržovat celou řadu postupů. Průběh samotné digitalizace a vyhodnocení, kterými je možné posoudit přesnost práce skenovacího systému, je definován tzv. Acceptance testem. Ten je dnes firmou GOM používán pro posuzování přesnosti jejich bezkontaktních měřicích systémů. Respektováním předepsaných pravidel lze s jeho pomocí alespoň v některých ohledech číselně vyjádřit přesnost měření optického skeneru ATOS. Test vychází ze skupiny německých směrnic VDI/VDE 2634, části 3, která je v současné době jediným obecným doporučením, jak ověřovat přesnost optických skenerů [91].

V rámci našeho výzkumu a ověření této metodiky byl navržen a vyroben vlastní kalibrační etalon, který umožnil stanovení přesnosti měření optického 3D skeneru ATOS II 400. Prioritním cílem výzkumu byla realizace tzv. akceptační zkoušky bezkontaktního 3D skeneru ATOS. Všechny parametry dané uvedenou normou se u všech dostupných měřicích objemů podařilo vyhodnotit a na základě toho byla stanovena přesnost měření přístroje v laboratorních podmínkách. Všechny sledované parametry byly pod limity danými výrobcem. Dalo by se tedy říci, že uvedený systém v rámci tohoto testu vyhověl a měří v deklarované přesnosti. Měření též prokázalo, že i v místních podmínkách se lze přiblížit k výsledkům akreditované laboratoře. Přestože metodika byla ukázaná a ověřena na konkrétním systému ATOS II, uvedené postupy jsou analogicky použitelné na jakémkoli jiném typu skeneru pracujícím na stejném nebo obdobném principu.

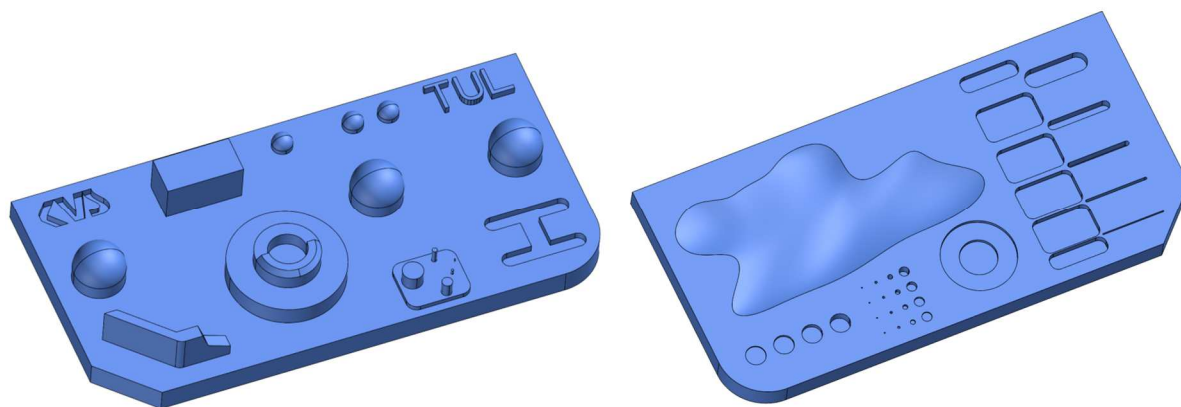
Vlastní měření nemůže samozřejmě nahradit zkoušku v certifikované metrologické laboratoři, nicméně umožní provádět test způsobilosti skeneru dle potřeby i v častějších intervalech. Lze tak ušetřit i nemalé finanční prostředky, neboť oficiální cena acceptance testu je velice vysoká. Nejdůležitější skutečností a výstupem výzkumu je však možnost využít ověřený etalon v rámci mnoha dalších testů a experimentů, s cílem posoudit měřicí schopnost skeneru za různých podmínek. Budeme tak moci sledovat vliv externích podmínek a procesních parametrů digitalizace na přesnost měření pomocí bezkontaktních optických 3D skenerů. Etalon též poslouží při výzkumu vlivu zmatňujících nástřiků na přesnost a kvalitu digitalizace. Tyto testy budou obsahem následujících kapitol experimentální části.

4.2 Analýza přesnosti digitalizace

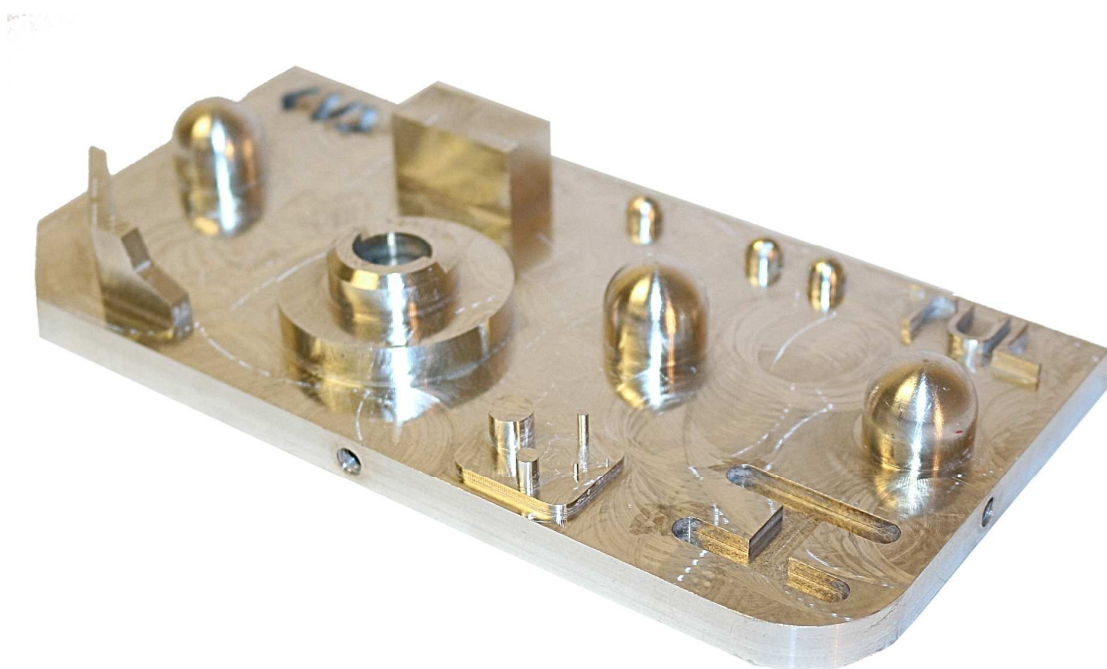
K uskutečnění analýzy bylo nezbytné použít objekt definovaného tvaru a rozměru. Byl tedy navržen model – měřicí etalon, jehož součástí byly různé tvarové prvky o vhodných rozměrech. Etalon byl vyroben na CNC obráběcím centru ze slitiny hliníku. Skutečné, pro naše účely tedy „referenční rozměry“ prvků, byly opakovaně proměřeny na tříosém souřadnicovém měřicím stroji s více než o řád vyšší přesností měření, než byla očekávaná přesnost skenerů. Následovalo kompletní několikanásobné naskenování etalonu skenerem ATOS II s třemi různými měřicími objemy. Před tím bylo ještě nutné na model nalepit referenční body a z důvodu lesklého povrchu nanést antireflexní nástřik titanovým, resp. křídovým práškem. Kvůli zajištění vysoké přesnosti probíhala všechna měření za konstantních podmínek, konkrétně teploty $20 \pm 1^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 10 \%$. V dalším kroku proběhlo zpracování naskenovaných dat v software GOM Inspect Professional, čímž byly získány informace o velikosti rozměrů digitalizovaného etalonu. Porovnáním hodnot rozměrů získaných ze softwaru s naměřenými hodnotami z CMM byla určena jejich odchylka.

4.2.1 Etalon pro měření

Při návrhu podoby etalonu se vycházelo z často vyskytujících se základních tvarů na strojních součástech. Těmi jsou například válce, válcové otvory, drážky a žebra. Navržený etalon má dvě části. První část - vrchní plocha etalonu obsahuje prvky, které ve většině případů vystupují ze základny (Obr. 4.13. vlevo). Všechny prvky vyskytující se na spodní ploše jsou naopak zapuštěny do tělesa základny (Obr. 4.13. vpravo). Zároveň bylo třeba volit takové rozmístění všech prvků, aby při skenování pod úhlem cca 45° si vzájemně „nestínily“, a bylo tak možné je bezproblémově naskenovat.

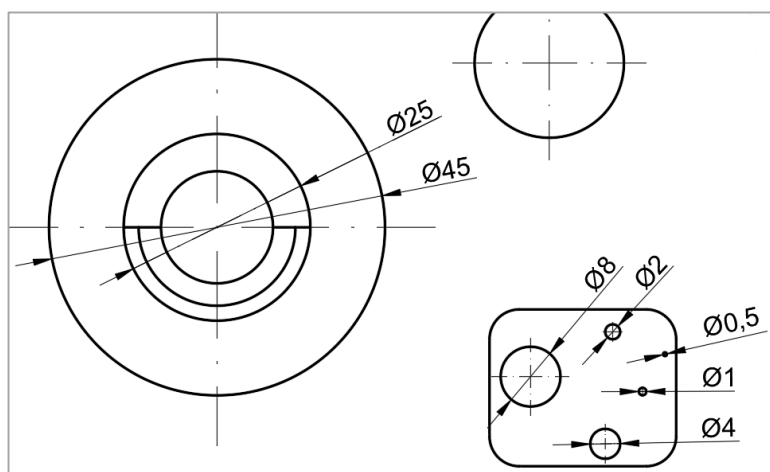


Obr. 4.13 Navržený etalon v CAD (vlevo: horní strana, vpravo: dolní strana)



Obr. 4.14 Etalon vyrobený na CNC obráběcím centru - horní strana

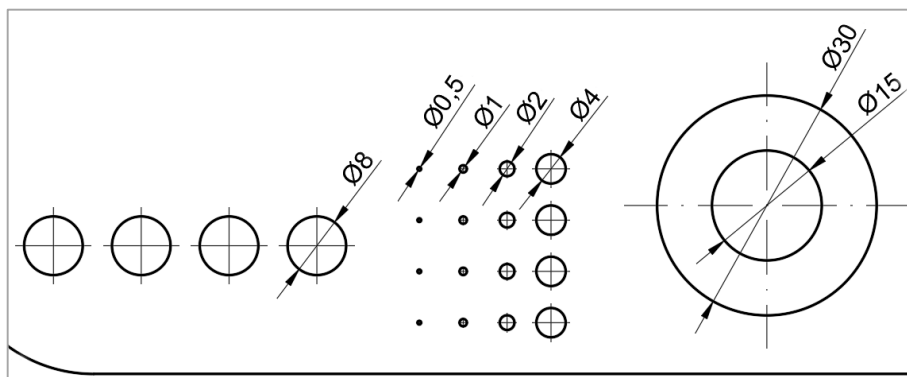
V první fázi výzkumu byla pozornost soustředěna na rozbor vnějších entit – jako jsou válce různých průměrů, žebra, délkové rozměry apod. Válcové prvky (Obr. 4.15) jsou rozděleny do dvou skupin. První z nich je tvořena dvojicí větších souosých válců, druhá je dána pěti válci o malém průměru. Zejména tato skupina velmi malých prvků byla vytvořena za účelem nalezení limitů použitého skenovacího systému. Rozměrová analýza byla provedena pro válce s průměrem větším než 1 mm. Část tohoto výzkumu byla také publikována v [95].



Obr. 4.15 Rozměry válců

Obecně však bývá větší problém s digitalizací vnitřních útvarů, jako jsou dutiny, drážky či jinak špatně přístupná místa. Proto byla v dalším kroku pozornost zaměřena na analýzu přesnosti skenování otvorů, a na zjištění limitů jejich digitalizace při použití různých měřicích objemů. Výsledky tohoto výzkumu byly také publikovány v [96].

Soustava válcových děr použitá k analýze leží na spodní části etalonu a obsahuje několik odstupňovaných průměrů (Obr. 4.16). První z nich, ležící na obrázku zcela vpravo, představuje dva válcové otvory se společnou osou a větším rozměrem. Zbývající otvory jsou rozděleny do čtyř sad, přičemž v každé sadě se nacházejí čtyři otvory stejného průměru a rozdílné hloubky (0,5; 1; 2; 4 mm). Bylo tak možné kromě jiného sledovat závislost naskenované hloubky otvoru na jejím průměru.



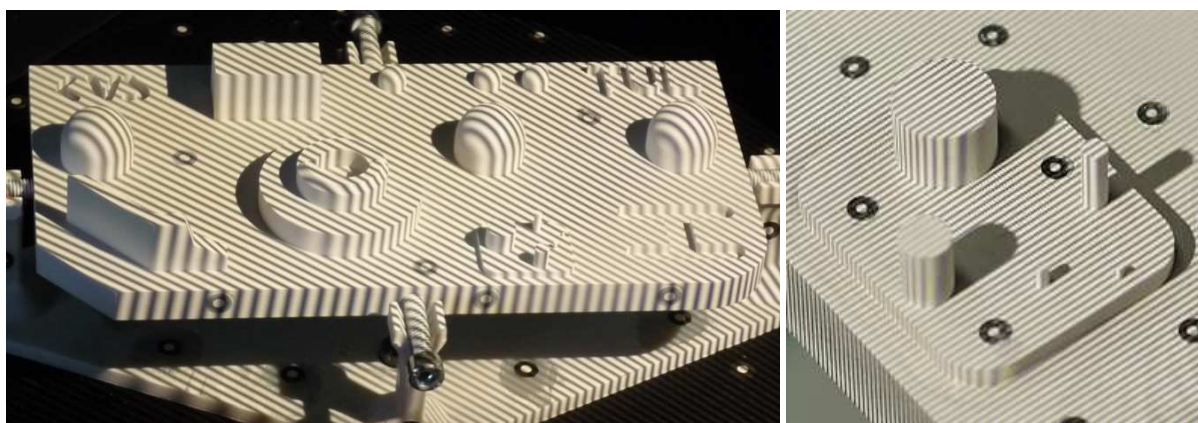
Obr. 4.16 Rozměry otvorů

4.2.2 Měření na souřadnicovém měřicím stroji

Vyrobený etalon a jeho reálné rozměry samozřejmě neodpovídají nominálním hodnotám CAD modelu. V první fázi tedy bylo nutné stanovit referenční rozměry sledovaných prvků. Podobně jako v předchozím experimentu bylo pro tento účel zvoleno měření na souřadnicovém měřicím stroji SMS DEA GLOBAL 07.10.05 (výrobce Hexagon Metrology). Pro měření etalonu byla zvolena měřicí hlava Renishaw PH10M se spínací dotekovou sondou a rubínovým kulovým dotekem. Měření bylo provedeno opakovaně, aby byla vyloučena náhodná chyba měření, resp. pro určení nejistoty zjištěných rozměrů. Dle specifikace výrobce je přesnost tohoto stroje $MPE_E = 2.5 + L / 300 \mu m$, $MPE_P = 2.5 \mu m$. Tyto hodnoty potvrzuje i kalibrační list stroje.

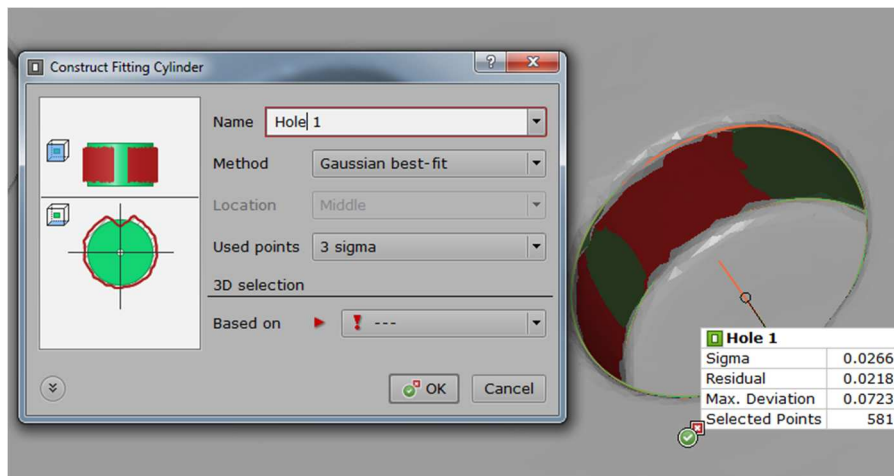
4.2.3 Digitalizace modelu a inspekce rozměrů

Pro snímání objektu optickým skenerem ATOS II bylo postupně použito všech tří sad objektivů. Každý poskytuje jiné rozlišení a umožňuje snímat jinak velký měřicí objem.



Obr. 4.17 Průběh skenování etalonu (MV 250 vlevo, MV SO vpravo)

Reálné modely získané digitalizací byly následně vyhodnoceny v inspekčním SW GOM Inspect Professional. Pro tvorbu vnějších i vnitřních elementů (válce, otvory) a zjištění jejich rozměrů byla použita funkce „Gaussian Best-fit“ pro 3σ všech bodů výběru (viz Obr. 4.18). Podobným způsobem byly analyzovány i další rozměrové a tvarové charakteristiky. Skenování a vyhodnocení etalonu bylo pro každý měřicí objem provedeno celkem pětkrát. Pro každý rozměr byl vypočítán aritmetický průměr a nejistota měření. Předmětem analýzy přesnosti snímání byl rozdíl mezi takto zjištěnou střední hodnotou prvku a referenční hodnotou získanou z měření na CMM.

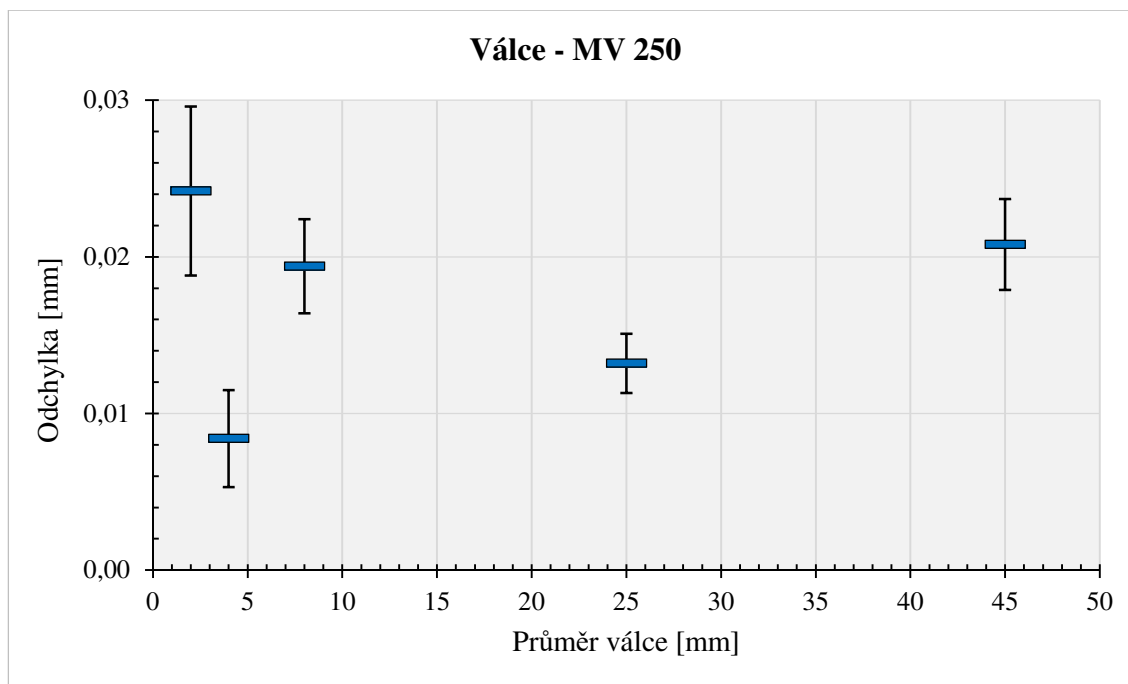


Obr. 4.18 Konstrukce vnitřního válce metodou „Fitting element“

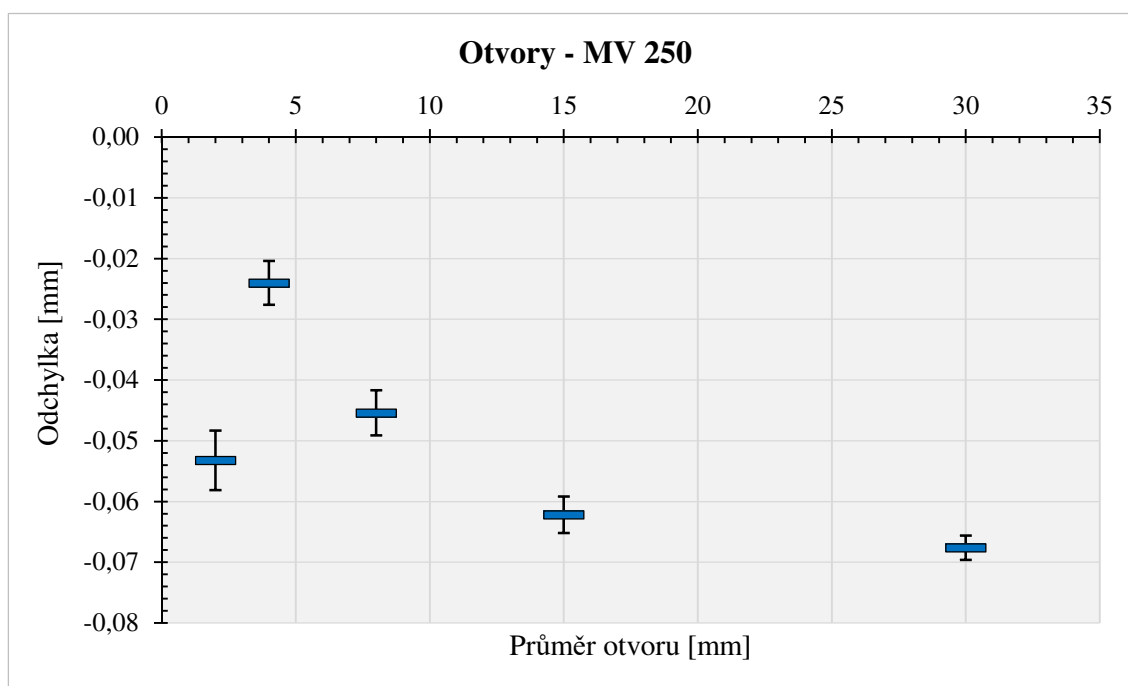
4.2.4 Výsledky měření

Pro názornější interpretaci výsledků inspekce byly výstupy rozděleny do jednotlivých skupin dle sledovaných prvků (vnitřní otvory, válce, koule, délkové míry). Níže uvedené grafické závislosti vyjadřují odchylky mezi rozměrem zjištěným digitalizací a rozměrem referenčním (měřeným na CMM) a současně je zde uvedena vypočítaná standardní nejistota měření typu A. Z té je možné vyčíst jaká je nejistota měření a tedy opakovatelnost měření při 3D skenování. Vzhledem k tomu, že v rámci každé skupiny bylo měřeno více nominálních rozměrů, grafy výsledků zároveň vyjadřují vývoj odchylky v závislosti na měnícím se nominálním rozměru prvku (X osa grafu).

Příklad grafického výstupu odchylek průměru válcových prvků pro měřicí objem 250 ukazuje Obr. 4.19 a pro inspekci otvorů Obr. 4.20.

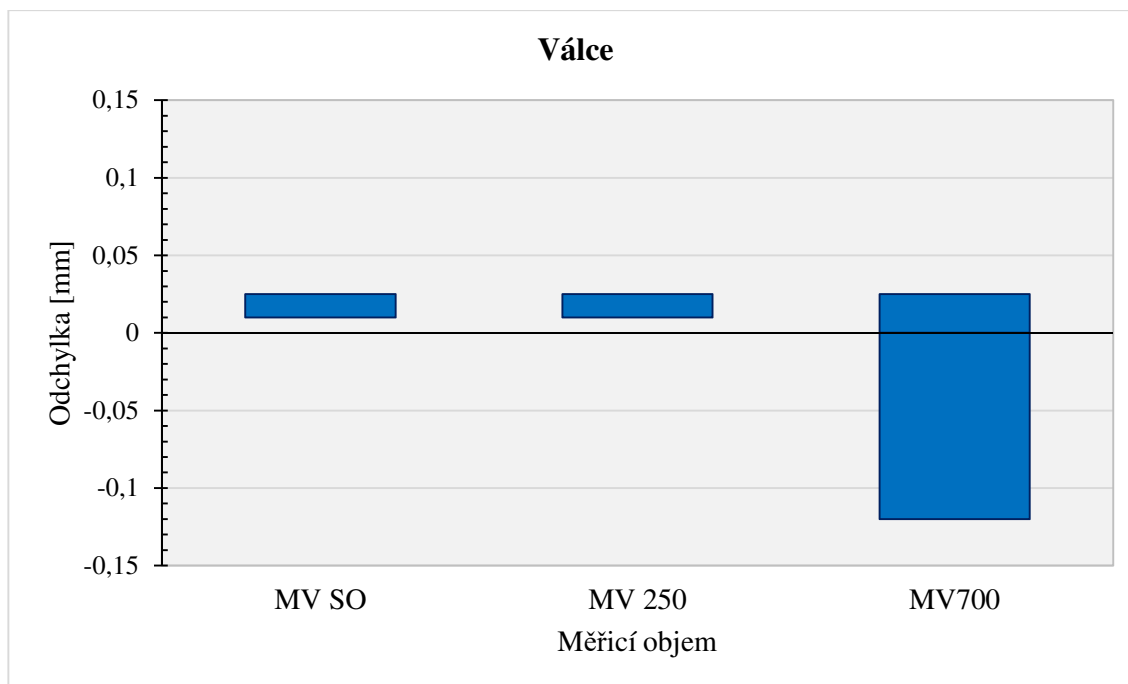


Obr. 4.19 Odchylky průměrů válců v závislosti na jeho velikosti (skener ATOS II – MV 250)



Obr. 4.20 Odchylky průměrů otvorů v závislosti na jeho velikosti (skener ATOS II – MV 250)

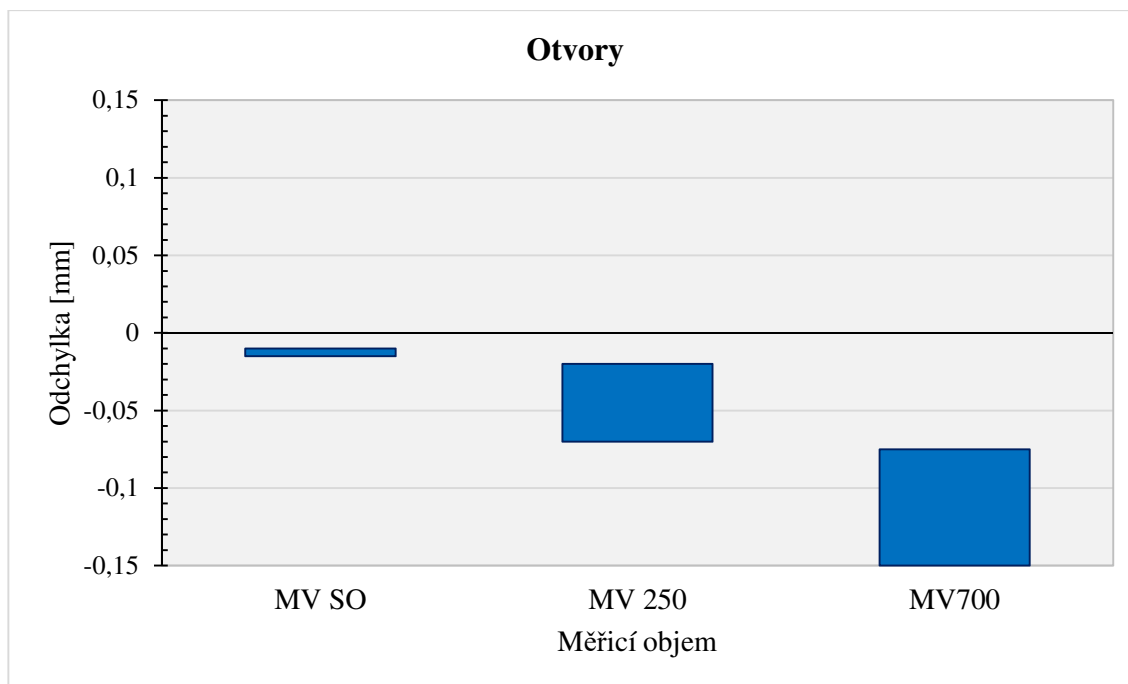
Průměry válců byly změřeny nejpřesněji skenerem ATOS s objektivy systému SO a 250, kdy se chyba pohybovala pod hranicí 0,02 mm. Objektiv 700 naměřil převážně rozměry menší, než jsou ve skutečnosti, přičemž největší chyba vznikla u válců malého průměru, a to až 0,1 mm. Od průměru válců 8 mm i tento objektiv vykazoval chybu max. do 0,02 mm. Souhrnné výsledky (rozsah zjištěných odchylek) přes všechny sledované rozměry ilustruje graf na Obr. 4.21.



Obr. 4.21 Souhrnné výsledky odchylek průměru válců (rozpětí maximální a minimální odchylky pro daný měřicí objem)

Skenování vnitřních geometrií bývá u optických systémů obecně problematictější, což se potvrdilo i v tomto případě. Celou skupinu pěti otvorů o různých průměrech se v kvalitě dostatečné pro měření podařilo naskenovat pouze měřicím objemem MV SO a 250. Pokud byl skener osazen objektivem MV 700, byly kvalitně naskenovány pouze otvory o průměru 4 a 8 mm. Průměry menších rozměrů byly pod rozlišovací schopnost tohoto měřicího objemu, u větších otvorů průměru 15 a 30 mm byla pro spolehlivé změření prvku problematická jejich malá hloubka. Nízká výška stěny byla pro malé rozlišení této optiky nedostatečná, docházelo k velkému zaoblení na hranách a degradaci (deformaci) válcové plochy. To ve výsledku znesnadnilo spolehlivé proložení prvku a určení průměru otvoru.

Trend vývoje chyb se s rostoucím nominálním průměrem otvoru pro objektiv MV 250 nechová tak, jak by se dalo očekávat. Z grafu (Obr. 4.20) je patrné, že s výjimkou nejmenšího rozměru odchylka se zvětšujícím průměrem otvoru roste. Pozitivní je naopak skutečnost, že opakovatelnost měření je velmi dobrá. Průměry otvorů skenované měřicím objemem 250 dosahují největší odchylky - 0,07 mm, a to právě pro prvky největších rozměrů. Zde může jistou roli hrát fakt, že tyto dva otvory byly poměrně mělké, což mohlo určitým způsobem výsledek ovlivnit. U ostatních dvou měřicích objemů již nebylo technicky možné naskenovat celou skupinu všech průměrových variant. Maximální odchylka zjištěná u objektivu SO se pohybovala do - 0,02 mm, nicméně vyhodnocovány byly pouze otvory o jmenovitém $\varnothing$ 2 a 4 mm. Velikosti odchylek u objektivu s označením 700 byly znatelně horší, nicméně pro menší průměry je chyba třeba brát s jistou opatrností, jelikož např. u otvoru $\varnothing$ 4 mm se nepodařilo zdigitalizovat válcovou plochu po celém svém obvodu. Maximální odchylka otvoru $\varnothing$ 8 mm měla pro objektiv MV 700 velikost - 0,08 mm. Souhrnné rozpětí odchylek průměru otvorů pro všechny měřicí objemy ilustruje graf na následujícím obrázku (Obr. 4.22).



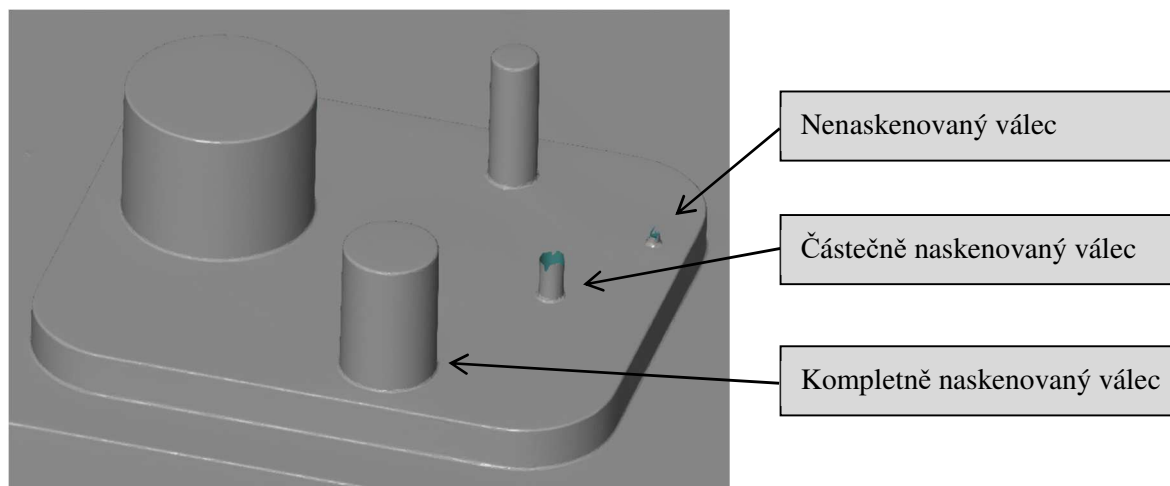
Obr. 4.22 Souhrnné výsledky odchylek průměru otvorů (rozpětí maximální a minimální odchylky pro daný měřicí objem)

Při porovnání chyb rozměrů otvorů s odchylkami měření vnějších válcových ploch je zřejmé, že zatímco s vnějšími tvary si celkem bez problémů poradily všechny měřicí objemy skeneru ATOS II, otvory menších průměrů dobře zvládl pouze systém ATOS osazený optikou SO a 250.

Dále stojí za povšimnutí, že zatímco vnější válcové tvary vykazovaly odchylky převážně v kladných hodnotách, chyby otvorů byly naopak záporné, tedy byly naměřeny menší hodnoty rozměrů oproti skutečnosti. Z toho lze usuzovat, že na velikost odchylek má jistě částečný vliv i vrstva zmatňujícího nástřiku. Pokud bychom vycházeli z údajů uvedených v kap. 4.4 a odečetli průměrnou tloušťku zmatňujícího nástřiku (u měřicího objemu SO byl použit titanový prášek, u ostatních křídový sprej), dalo by se říci, že přesnost systému ATOS SO se pro vnější i vnitřní tvary pohybuje do jedné setiny mm a pro měřicí objem 250 cca do 0,03 mm. Menších přesností je pak dosahováno s měřícím objemem pro velké objekty, ten dosahoval přesnosti do 0,1 mm.

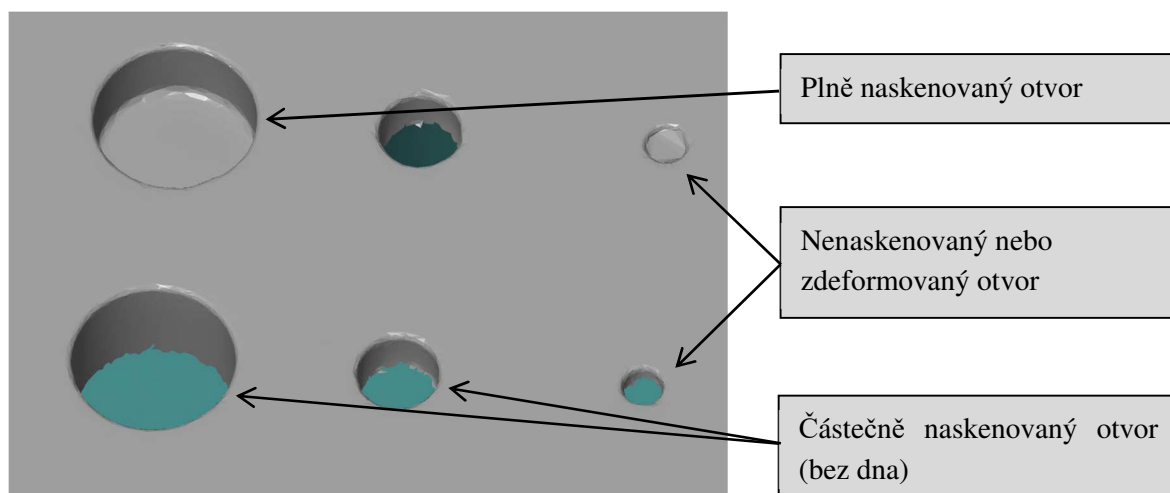
4.2.5 Limity skenování detailních prvků

Součástí této experimentální části bylo též nalezení limitů schopnosti skenovacích systémů zachytit detailní prvky o velmi malých rozměrech. Při určení mezí skenování byly sledovány celkem čtyři skupiny různých elementů, jako je soustava válců, otvorů, žeber a drážek. U skupiny válců byly sledovány průměry 0,5; 1; 2; 4 a 8 mm (Obr. 4.23).



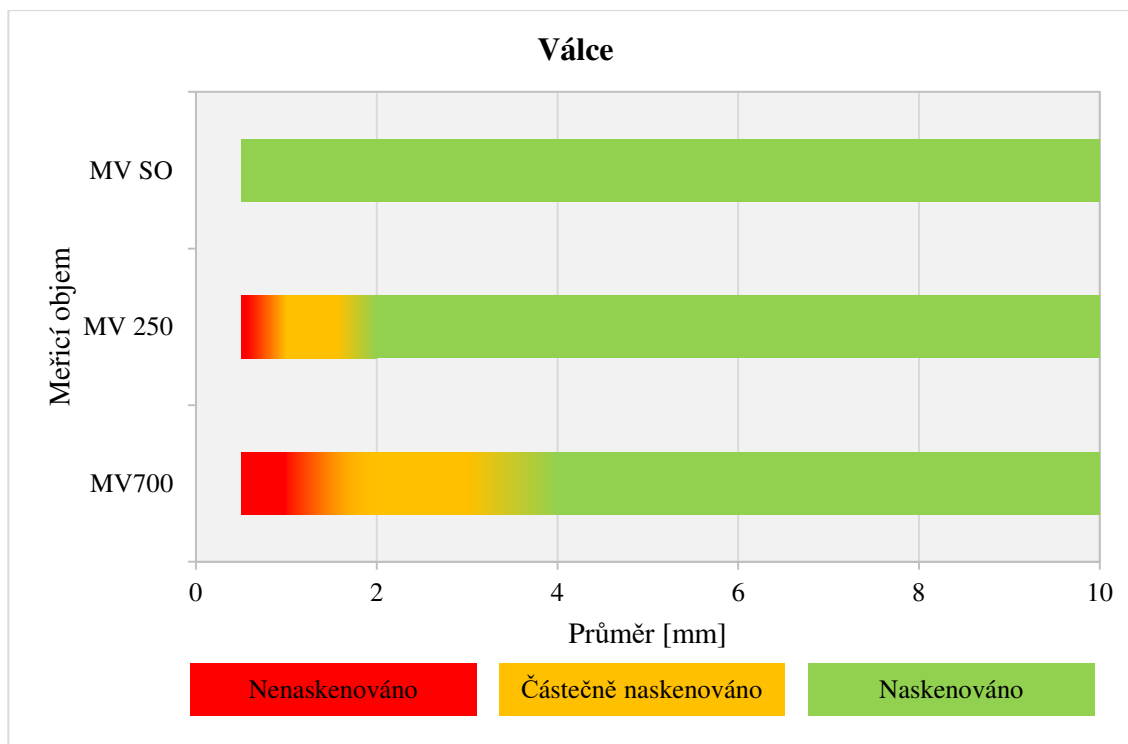
Obr. 4.23 Hlediska hodnocení skenovatelnosti vnějších válců

Schopnost zachycení malých otvorů byla sledována na čtveřici děr odlišných průměrů 1; 2; 4 a 8 mm se čtyřmi různými hloubkami. Hlediska posouzení schopnosti jejich zachycení byla definována třemi stavy – kompletně naskenováno (stav, kdy otvory disponovaly větší částí neporušené válcové plochy po celém obvodu a polygonální síť nevykazovala žádné výrazné deformace či defekty), částečně naskenováno (zahrnuje případy, kdy polygonální síť reprezentují válcovou plochu byla dostatečná k proložení prvku a výpočtu průměru, avšak mesh byl již vlivem nedostatečného počtu nasnímaných bodů neúplný nebo částečně zdeformovaný) a nezachyceno (vystihovalo stav, kdy otvor nebyl vůbec zachycen nebo kvalita sítě byla natolik nevyhovující, že neumožňovala proložení příslušného prvku získanými body) - (viz Obr. 4.24).



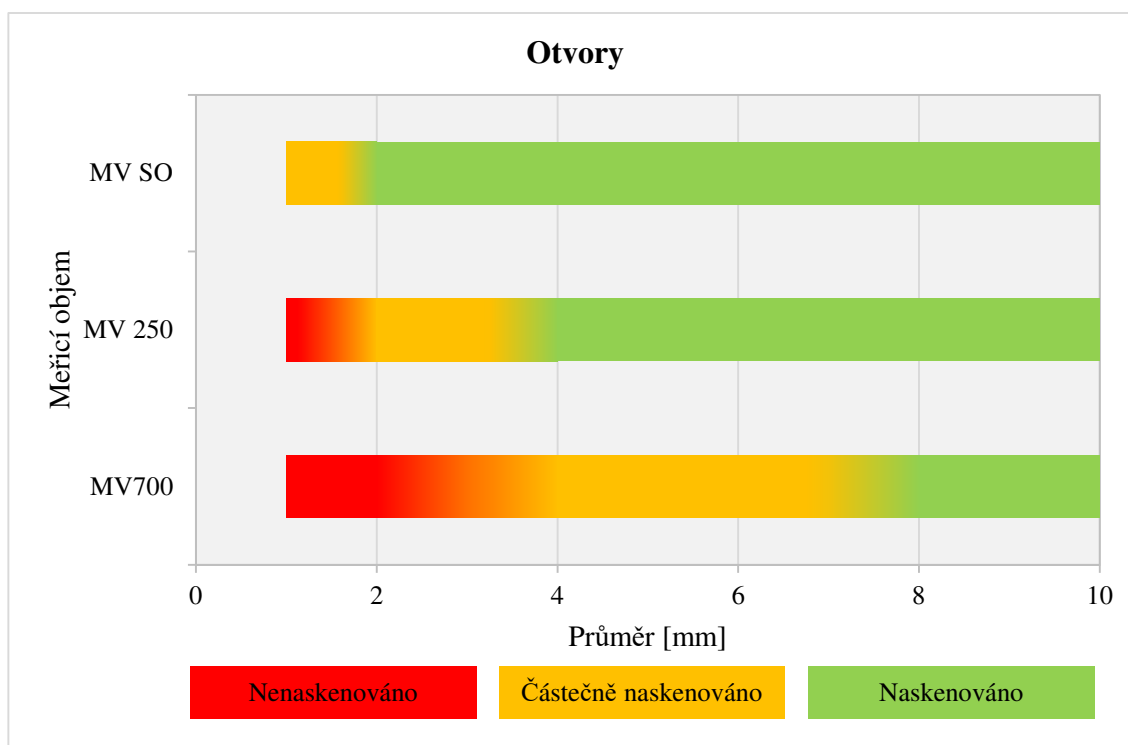
Obr. 4.24 Hlediska hodnocení skenovatelnosti otvorů

Celá skupina válcových elementů se podařila nasnímat pouze za použití měřicího objemu SO. Objektív pro MV 250 kompletně naskenoval válce o $\varnothing$ 2 až 8 mm, válec o $\varnothing$ 1 mm pouze částečně. Stejných výsledků, pouze posunutých o jeden rozměrový stupeň k větším hodnotám, dosahoval skener při nasazeném objektivu MV 700. Limity shrnuje graf na Obr. 4.25.



Obr. 4.25 Schopnost systémů zaznamenat malé válcové prvky

Podobně, celá sada otvorů se podařila naskenovat pouze za použití objektivu SO, přičemž s nejmenším průměrem 1 mm měl i tento objektiv problémy. Naopak objektiv s označením 700 bez problémů dokázal zdigitalizovat až otvory o velikosti 8 mm. Limity shrnuje graf na následujícím obrázku (Obr. 4.26).



Obr. 4.26 Schopnost systémů zaznamenat malé otvory

4.2.6 Diskuze

V této kapitole byla představena část výsledků experimentu zaměřeného na analýzu přesnosti měření s využitím bezkontaktního 3D skeneru ATOS II. Bylo posuzováno několik dostupných měřicích objemů, a to jak z pohledu přesnosti skenování, tak i z pohledu určení závislostí mezi rozlišením použité optiky a velikostí prvku, který je možné kvalitně naskenovat. Na základě zkušeností proběhla digitalizace pro tyto účely vyrobeného artefaktu, čímž byly získány komplexní digitální modely. Ty byly podrobeny detailní inspekci. Pro vyhodnocení míry přesnosti digitalizace systému byly stanoveny odchylky mezi rozměry získanými inspekci naskenovaných modelů a mezi referenčními rozměry určenými měřeními na CMM. Na základě rozboru výsledků byly sestaveny diagramy přesnosti měření skeneru dle zkoumaných hledisek, např. v závislosti na tvaru měřeného prvku či jeho nominální velikosti.

Výstupy provedených experimentů mohou posloužit jako návod při skenování v běžné praxi, neboť v reálných podmínkách demonstrují kvalitu a limity měření pomocí bezkontaktních optických systémů, a tak jejich možné využití pro kontrolu rozměrové a tvarové přesnosti výrobků v průmyslu. Účelem bylo demonstrovat a poskytnout informace, jak velkých odchylek je reálně dosahováno při měření skutečných základních prvků různých tvarů a velikostí. Výstupy je vhodné použít také jako vodítko při volbě vhodného měřicího objemu za účelem digitalizace detailních prvků. Bylo dokázáno, že pro kvalitní a přesnou digitalizaci prvku o určitém rozměru je nutné použít systém, jehož rozlišení bude zhruba 10x jemnější než je rozměr sledovaného prvku, u vnitřních tvarů ještě více. Např. pro inspekci detailu o rozměru 2 mm je nutno zvolit systém ideálně s rozlišením (vzdáleností mezi naměřenými body) kolem 0,2 mm.

4.3 Vliv materiálu

Vlastní zkušenosti i zkušenosti dalších vědců (viz kap. 2.1) naznačují, že povrchové vlastnosti dílu mohou významným způsobem ovlivnit kvalitu bezkontaktní 3D digitalizace a někdy i samotnou schopnost díl oskenovat. Především při použití optického principu snímání zde hrají důležitou roli optické a materiálové vlastnosti měřeného povrchu. Tato kapitola shrnuje výsledky výzkumu v této oblasti a ukazuje, zda a jakým způsobem je přesnost získaných dat ovlivněna materiálem a barvou měřené součásti. Část výsledků byla publikována ve světově uznávaném vědeckém časopise [97].

4.3.1 Výroba vzorků

Pro účely této fáze výzkumu bylo vyrobeno celkem 28 vzorků, z nichž 22 bylo vytištěno pomocí 3D tiskáren a zbylých 6 vyrobeno třískovým obráběním na pěti-osém obráběcím centru KAFO KFO-620-5AX. Ve vyšším zastoupení byly vybrány především materiály, u kterých bylo na základě zkušeností podezření, že jsou z hlediska přesnosti skenování problematické (fotopolymery z 3D tiskáren). Obrobené vzorky byly vyrobeny z materiálu AMPCO 22, ocel 11 523, mosaz, hliník, teflon a polyamid PA6. Pro aditivní technologii výroby vzorků bylo využito celkem čtyř technologií 3D tisku – PolyJet, FDM, SLA a SLS. Většina tištěných vzorků byla vytvořena v lesklé a matné povrchové úpravě, pokud to daná technologie umožňovala (Obr. 4.27, Tab. 4.8).

Technologie PolyJet

Tato technologie spočívá v nanášení jednotlivých vrstev fotopolymerních materiálů, které jsou následně vytvrzovány pomocí UV lampy. Tloušťka vrstvy se běžně pohybuje v řádu desítek mikrometrů. K výrobě celkem 14 vzorků byly použity tiskárny Objet Connex 500 a J750. Většina vzorků byla vyrobena z často používaného materiálu s označením Vero, lišili se pouze barvou. Ta se pohybovala od černé, přes bílou, modrou, červenofialovou, barvu slonové kosti až po téměř bezbarvý a transparentní vzorek. Kromě tohoto materiálu byl použit také materiál PureWhite (č. 1 a 2) a digitální materiál ABS-like (č. 15 a 16).

Technologie FDM

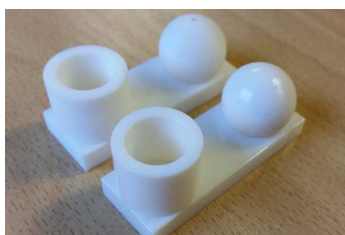
FDM neboli Fused Deposition Modeling je technologie, při které je v tiskové hlavě natavován termoplast, který je následně v podobě tenkého vlákna vytlačován na podložku. Stavba probíhá ze dvou materiálů zároveň, podpůrného a stavebního, přičemž podpůrný materiál je po dokončení tisku odstraněn. Touto technologií byly vyrobeny tři různé vzorky, z materiálů ABS black (č. 3), PC-ABS (č. 4) a ABS white (č. 14). Jako tiskárna byla použita tiskárna Dimension a Fortus.

Technologie SLA

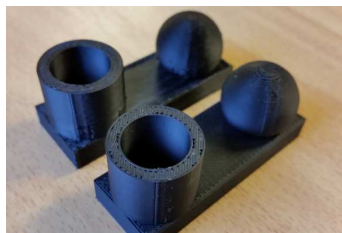
SLA neboli Stereolithography apparatus je technologie pracující na principu vytvrzování vrstvy tekutého polymeru pomocí UV laserového paprsku. Touto technologií byl vyroben čirý vzorek č. 5.

Technologie SLS

SLS neboli Selective Laser Sintering je technologie, při níž dochází ke spékání materiálu pomocí laseru. Materiál ve formě jemného prášku je nanášen na pracovní desku vyhřívaného stolu a vytvrzován po jednotlivých vrstvách. Metodou SLS vznikly dvě dvojice vzorků, šedé vzorky z materiálu Sintratec PA 12 Powder (č. 19, 20) a vzorky bílé z materiálu PA 2200 (č. 21, 22).



1, 2



3, 4



5



6, 7



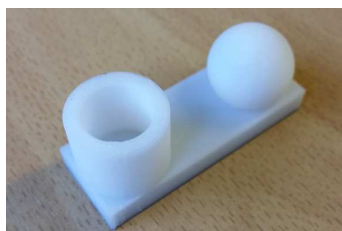
8, 9



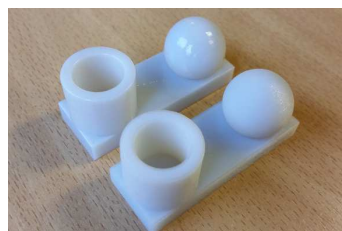
10, 11



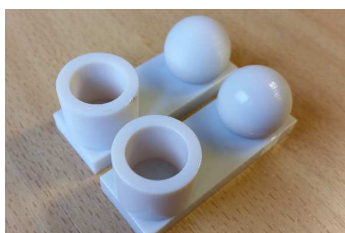
12, 13



14



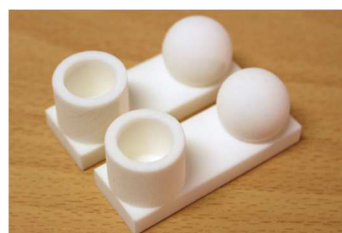
15, 16



17, 18



19, 20



21, 22



23



24



25



26



27



28

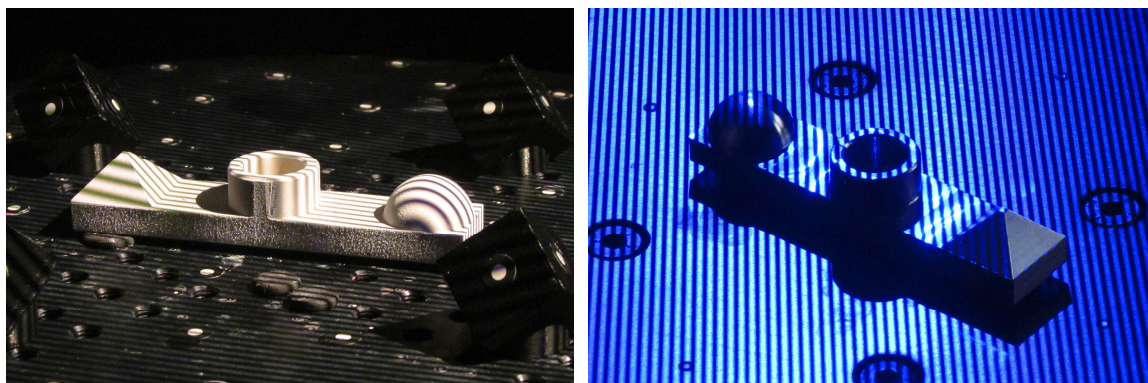
Obr. 4.27 Vyrobené vzorky

Přehled všech vzorků, včetně informací o použité technologii výroby a materiálu je uveden v Tab. 4.8

Technologie	Označení	Stroj	Materiál	Mód
PolyJet	1	J750	PureWhite	Lesklý
PolyJet	2	J750	PureWhite	Matný
FDM	3	Dimension	ABS black	Lesklý
FDM	4	Fortus	PC-ABS	Lesklý
SLA	5	Formlabs Form 2	Durable	-
PolyJet	6	Objet 500	VeroBlack	Matný
PolyJet	7	Objet500	VeroBlack	Lesklý
PolyJet	8	J750	VeroClear	Lesklý
PolyJet	9	J750	VeroClear	Matný
PolyJet	10	J750	VeroCyan	Lesklý
PolyJet	11	J750	VeroCyan	Matný
PolyJet	12	J750	VeroMagenta	Lesklý
PolyJet	13	J750	VeroMagenta	Matný
FDM	14	Dimension	ABSwhite	Lesklý
PolyJet	15	Objet 500	ABS_like	Matný
PolyJet	16	Objet500	ABS_like	Lesklý
PolyJet	17	J750	VeroGrey	Lesklý
PolyJet	18	J750	VeroGrey	Matný
SLS	19	Sintratec Kit	Sitratec PA12	Matný
SLS	20	Sintratec Kit	SitratecPA12	Matný
SLS	21	EOSINT P 395	PA 2200	Pos. X
SLS	22	EOSINT P 395	PA 2200	Pos. Y
Obráběcí stroj	23	KAFO KFO	AMPCO 22	Lesklý
Obráběcí stroj	24	KAFO KFO	Steel 11 523	Lesklý
Obráběcí stroj	25	KAFO KFO	Brass	Lesklý
Obráběcí stroj	26	KAFO KFO	Aluminium	Lesklý
Obráběcí stroj	27	KAFO KFO	Teflon	-
Obráběcí stroj	28	KAFO KFO	PolyamidePA6	-

Tab. 4.8 Přehled zkoumaných vzorků

Vyrobené vzorky byly nejprve naskenovány bez aplikace antireflexního nástřiku pomocí dvou různých skenerů. Jednalo se o skener Atos II 400 a Atos III Triple Scan. Pro skenování čistých vzorků byly použity tyto dva skenovací systémy, neboť používají odlišné světlo projekční jednotky. Zatímco skener ATOS II používá bílé světlo, ATOS III má projekční jednotku s modrým LED osvětlením, která by si dle výrobce měla lépe poradit s lesklými předměty.

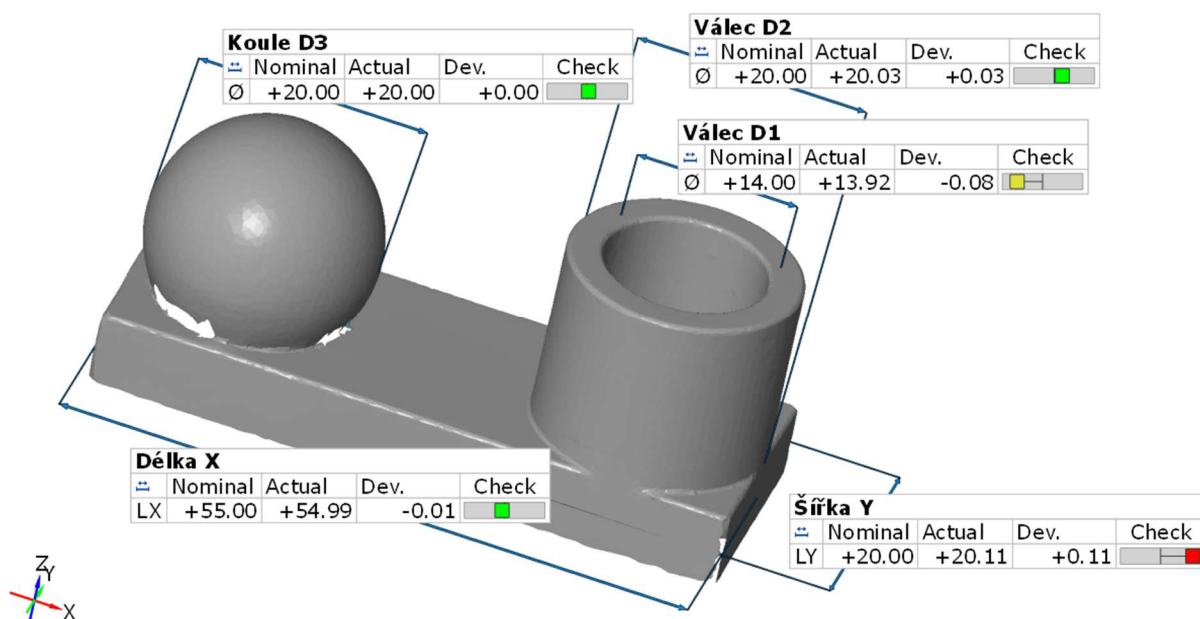


Obr. 4.28 Proces skenování (vlevo ATOS II – bílé světlo, vpravo ATOS III – modré světlo)

Následovalo skenování vzorků, na které byla nanesea slabá vrstva antireflexního nástřiku Helling. Postup měření byl pro všechny vzorky identický. Dle povrchových vlastností a barvy dílu byl nastaven optimální expoziční čas, vzorky byly umístěny na automatický otočný stůl a bylo naskenováno celkem 12 snímků po 30°, skener byl natočen pod úhlem 45° vzhled k horizontální rovině stolu. Tyto dílčí skeny byly softwarem transformovány do společného souřadného systému a byla vygenerována optimalizovaná polygonální síť – tzv. Mesh (STL soubor). Ten byl následně zpracován v SW GOM Inspect Professional, ve kterém byly měřeny požadované rozměrové charakteristiky - vnější a vnitřní průměr válcového prvku, průměr koule a rozměry X a Y základny vzorku (Obr. 4.29).

Jako metoda výpočtu entit byl zvolen „Gaussův Best-fit“, přičemž pro výpočet prvku bylo použito 3σ (tedy 99,73 %) bodů z výběru (viz Obr. 4.12).

Rozměry vypočítané tímto postupem byly porovnány s daty naměřenými na souřadnicovém měřicím stroji. Jednalo se o stejný CMM, použitý v předchozím experimentu, tedy stroj značky DEA, model Global 07.10.05 od výrobce Hexagon Metrology. Vzhledem k tomu, že deklarovaná max. přípustná chyba měření CMM je pouze v řádu mikrometrů, byly rozměry získané na tomto stroji považovány za referenční – nominální.



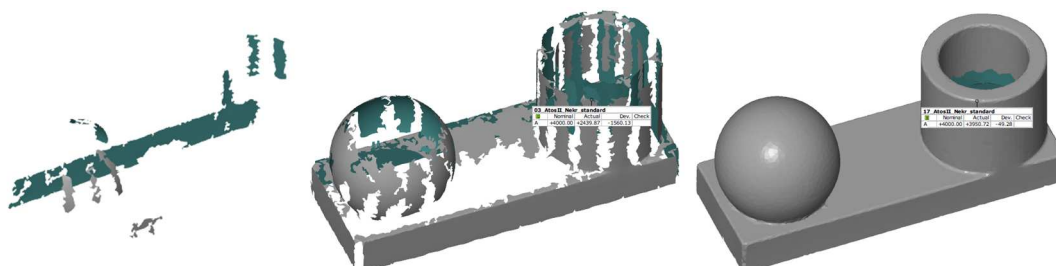
Obr. 4.29 Měřené charakteristiky

4.3.2 Výsledky měření

Vyhodnocení vzorků bylo realizováno dle dvou hlavních kritérií, dle procentuálního podílu naskenovaného povrchu a dle přesnosti skenování vybraných rozměrů. Posouzením kombinace těchto výstupů bylo možné stanovit, které materiály lze kvalitně a především rozměrově správně skenovat i bez aplikace antireflexivních nástřiků. Dle této klasifikace bylo určeno několik svým chováním odlišných skupin materiálů.

Prvním kritériem tedy bylo posoudit samotnou skenovatelnost jednotlivých povrchů bez použití matnicího nástřiku. Dle tohoto hlediska byly materiály rozděleny celkem do tří skupin (viz Obr. 4.30):

- Materiály neskenovatelné (naskenovaný povrch dosahoval max. 50 % celkového povrchu součásti).
- Materiály částečně skenovatelné (naskenovaný povrch vykazoval 50 – 80 % celkového povrchu součásti).
- Materiály skenovatelné (míra naskenované plochy činila více jak 80% celkového viditelného povrchu součásti)



Obr. 4.30 Procento naskenovaného povrchu (do 50%, 50-80%, více než 80%)

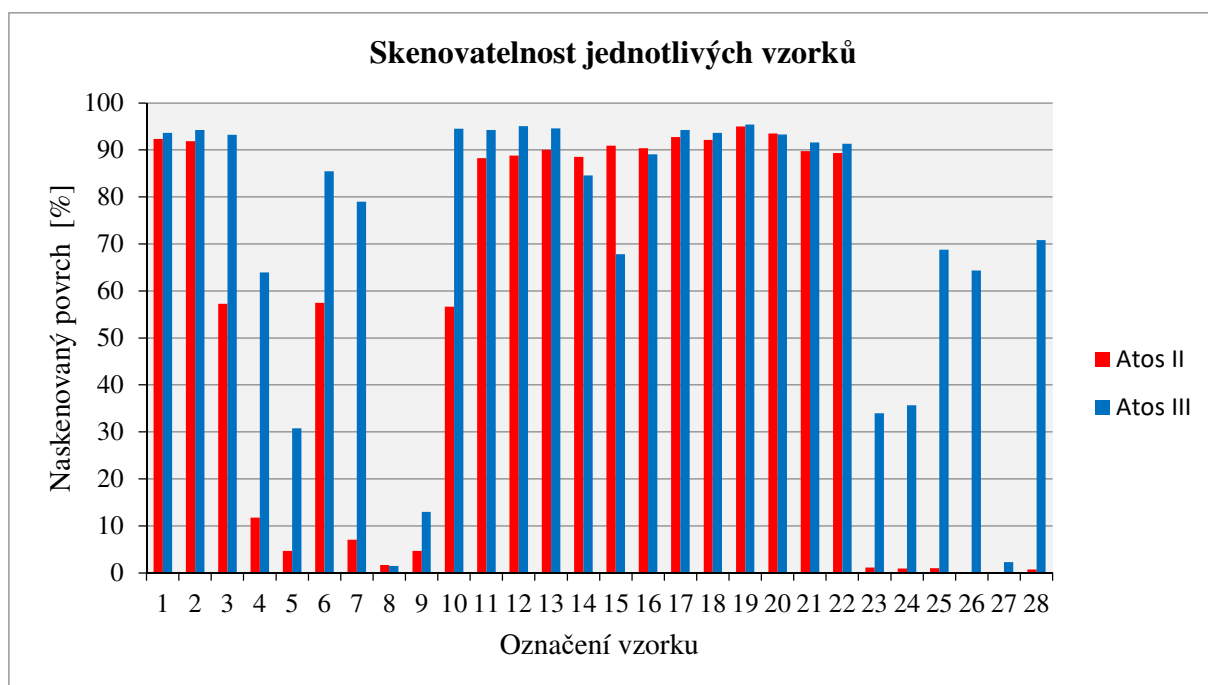
4.3.2.1 Materiály neskenovatelné (do 50%)

Do této skupiny byly zahrnuty všechny modely, u kterých nebylo možné z naskenovaných dat vygenerovat polygonální síť, nebo míra skenu byla do 50% celkového povrchu.

Dle tohoto kritéria bylo do této skupiny pro systém ATOS II zahrnuto celkem 11 vzorků. Z toho 5 vytištěných, kde se průměrné procento oskenovaného povrchu pohybovalo pouze okolo 12%. Ještě hůře dopadly kusy vyráběné třískovým způsobem. Teflonový a hliníkový vzorek se nepodařilo naskenovat vůbec a u ostatních vzorků došlo k naskenování jen nepatrných segmentů, přibližně do 1% celkového povrchu.

Generačně novější systém, ATOS III Triple Scan nezvládl zdigitalizovat vůbec nebo v nedostatečné míře celkem 6 modelů, z toho po třech vzorcích vyrobených aditivní technologií (č. 5, 8 a 9) a tři vzorky obráběné (č. 23, 24 a 27). Míra nasnímaného povrchu u některých vzorků dosáhla 36% celkového povrchu.

Procento zachyceného povrchu pro oba systémy a všechny vzorky je patrné z grafu na Obr. 4.31.



Obr. 4.31 Procento zachyceného povrchu na skenovaném vzorku

4.3.2.2 Materiály částečně skenovatelné (50 – 80%)

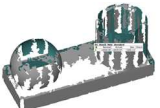
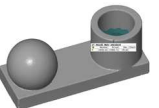
Druhá skupina zahrnovala vzorky, u nichž bylo již možné vygenerovat mesh, ale procento naskenovaného povrchu dosahoval maximálně 80% celkového povrchu. Skener ATOS II přispěl do této skupiny celkem třemi tištěnými vzorky (č. 3, 6 a 10), přičemž všechny tyto modely měly podobnou míru naskenovaného povrchu okolo 57%.

Druhému systému – skeneru ATOS III se částečně podařilo naskenovat celkem 6 modelů, po třech kusech tištěných a třech obráběných. Procento naskenované plochy se v tomto případě pohybovalo v rozmezí cca 60 – 80%. Nejlépe byl z této skupiny naskenován vzorek č. 7, z materiálu VeroBlack v lesklé variantě, který se již blížil hranici 80%.

4.3.2.3 Materiály skenovatelné (nad 80 %)

Tato poslední skupina obsahovala vzorky, které byly naskenovány bez problémů a u nichž se procento naskenovaného povrchu pohybovalo nad 80 % celkové viditelné plochy.

Systému ATOS II se takto podařilo nasnímat celkem 14 z testovaných 28 vzorků, skener ATOS III úspěšně zdigitalizoval o dva vzorky více. Míra naskenovaného povrchu se pohybovala mezi 88 a 95% pro systém ATOS II a mezi 85 a 95% pro systém ATOS III. 100% nebylo dosaženo na žádném sledovaném vzorku, neboť nebylo z hlediska principiálního omezení skenováno dno válcového otvoru.

	Neskenovatelné (do 50%)	Částečně skenovatelné (50 – 80 %)	Dobře skenovatelné (více než 80 %)
			
ATOS II	11	3	14
ATOS III	6	6	16

Tab. 4.9 Počet vzorků v jednotlivých skupinách

Srovnáním obou skenovacích systémů z hlediska schopnosti oskenovat povrch bez nutnosti úpravy křídovým práškem lze konstatovat, že z hlediska počtu naskenovaných vzorků je na tom lépe novější systém Atos III, který naskenoval více než 50% povrchu u 22 vzorků, kdežto Atos II jen u 17 z 28 vzorků. Rozdíl tvořily především lesklé obráběné vzorky, u kterých si starší systém ATOS II neporadil ani s jedním.

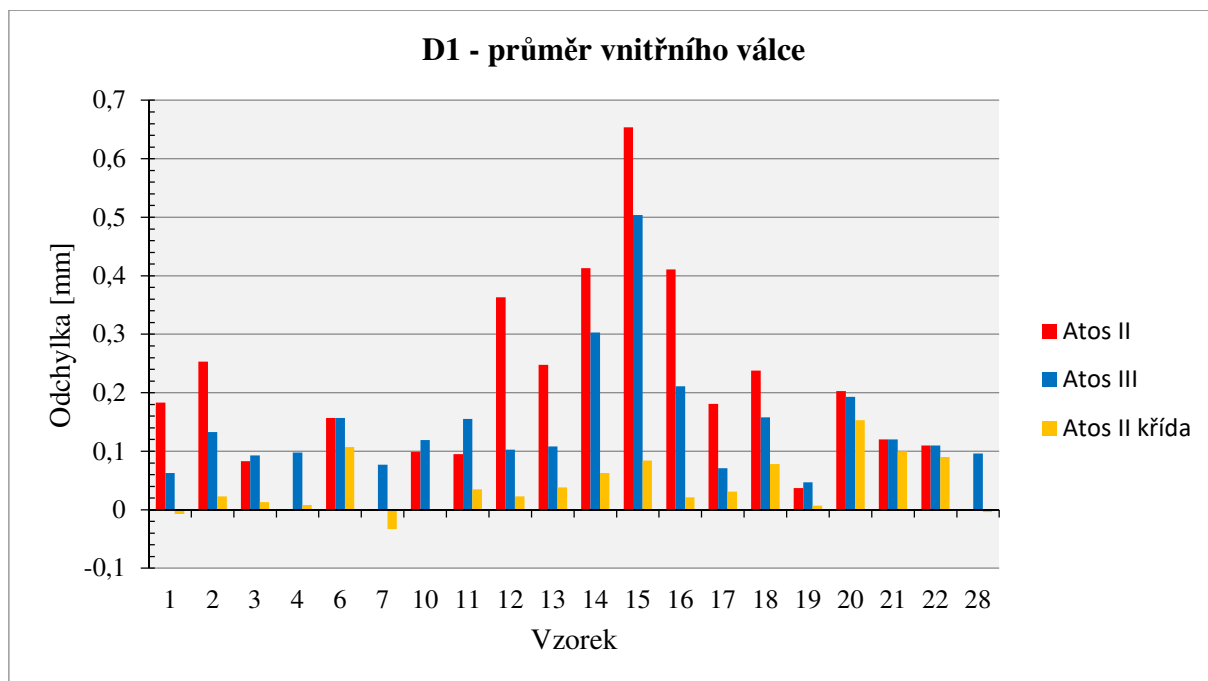
Druhým kritériem hodnocení byla přesnost rozměrů naskenovaných prvků pro povrchově neupravené vzorky. Zde byly stanoveny dvě skupiny:

- Materiály skenovatelné v požadované přesnosti
- Materiály skenovatelné s nedostatečnou přesností

4.3.2.4 Přesnost naměřených rozměrů

Vzorky, které byly zařazeny do skupiny částečně skenovatelné a skenovatelné, byly dále posouzeny z hlediska rozměrových charakteristik. Byly konfrontovány jednotlivé naměřené rozměry (Obr. 4.29) vzorků skenovaných bez antireflexního nástřiku (pro ATOS II a ATOS III) a rozměry totožných vzorků skenovaných po aplikaci antireflexní vrstvy (pro ATOS II) vždy s referenčními rozměry ze souřadnicového měřicího stroje. Takto vypočítané odchylky jsou pro jednotlivé sledované prvky vyneseny graficky na následujících obrázcích. Pro zvýšení objektivity byly rozměry získané z křídou upravených vzorků korigovány o teoretickou tloušťku křídového nástřiku, která byla zvolena na základě provedených experimentů (viz kap. 4.4) a s přihlédnutím k dalším výzkumům [61], [64] na velikost 0.015 mm.

První ověřovanou geometrií byl průměr vnitřního válce. Díky nanesené vrstvě antireflexního přípravku vykazuje vnitřní geometrie v porovnání se skutečností zpravidla menší rozměry. Hodnota průměru otvoru byla v tomto případě pro účely vyhodnocení korigována o hodnotu + 0,03 mm.

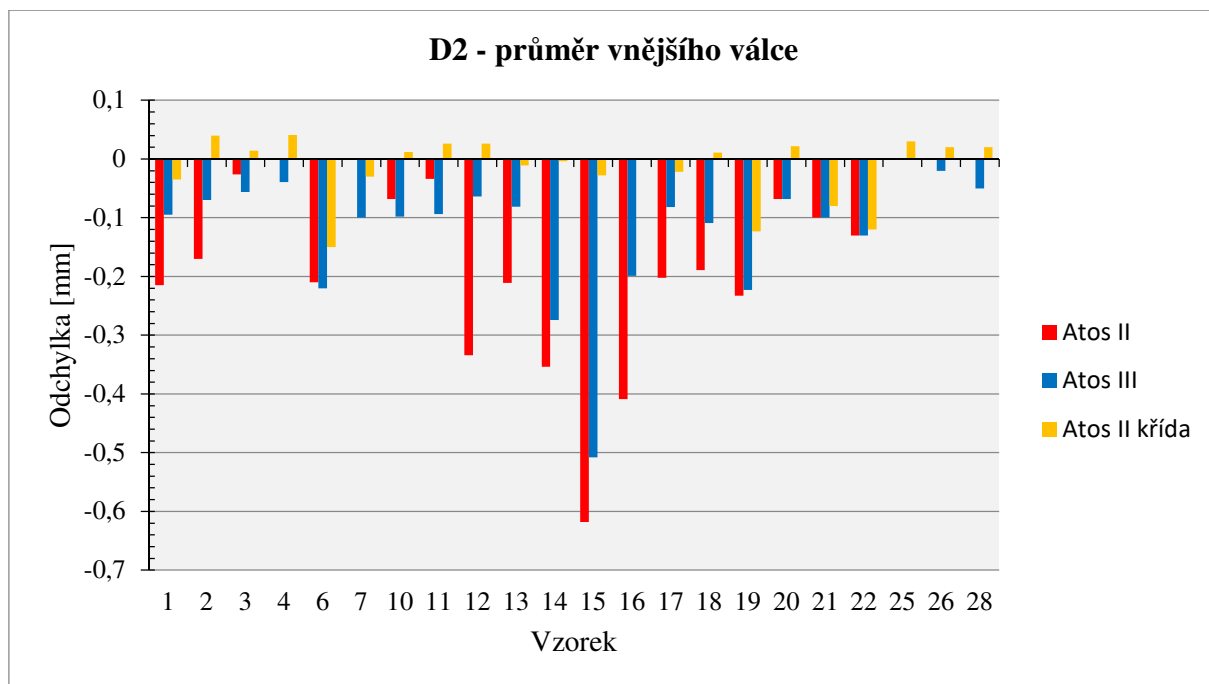


Obr. 4.32 Odchylka průměru vnitřního válce (D1)

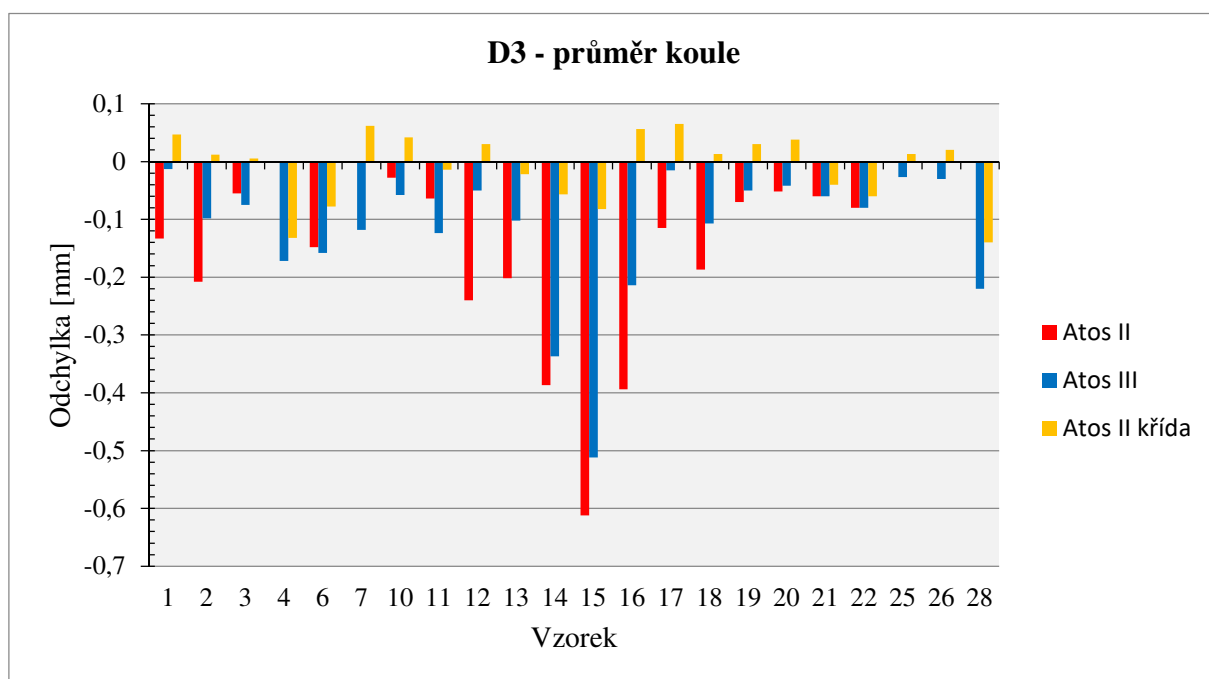
Z výše uvedeného grafu je zřejmé, že výsledky dosažené skenováním neupravených vzorků (odchylky vyjádřené červenými a modrými sloupci) nedosahují ani u jednoho z použitých systémů příliš uspokojivých hodnot. Zatímco vzorky opatřené nástřikem ve většině případů vykazovaly max. odchylku do 0,05 mm, neupravené vzorky se naopak do této tolerance vešly pouze v ojedinělých případech. Nejmenší odchylky od křídou upravených dat dosáhly díly vytištěné pomocí technologie SLS č. 21 a 22 s hodnotou 0,020 mm. Naopak největšího rozdílu odchylek mezi modelem snímaným s křídou a bez křídou dosáhl model č. 15 z materiálu ABS like s matným povrchem vyrobený technologií PolyJet, zde rozdíl činil 0,57 mm pro Atos II a 0,42 mm pro Atos III.

Další geometrií, která byla v rámci tohoto výzkumu podrobena rozměrové analýze, byl vnější průměr válce (Obr. 4.33). Z grafu je patrné, že pokud není povrch opatřen antireflexním nástřikem, s mnoha materiály si skenery neporadí ani v případě, že skenujeme vnější tvary. Při zjišťování odchylek vnějšího průměru válce bylo dosaženo velmi podobných výsledků, pouze odchylky byly opačného znaménka. Nejmenšího rozdílu mezi nekřídovaným a křídovaným vzorkem bylo dosaženo opět na vzorku č. 22, a to shodně pro oba skenery -0,01 mm. Druhý nejlepší výsledek vykazoval model č. 21 s odchylkou -0,02 mm. Nejhuře dopadl ve shodě s předchozím rozměrem znovu vzorek č. 15 s odchylkami -0,59 mm pro systém ATOS II, resp. -0,48 mm pro skener Atos III.

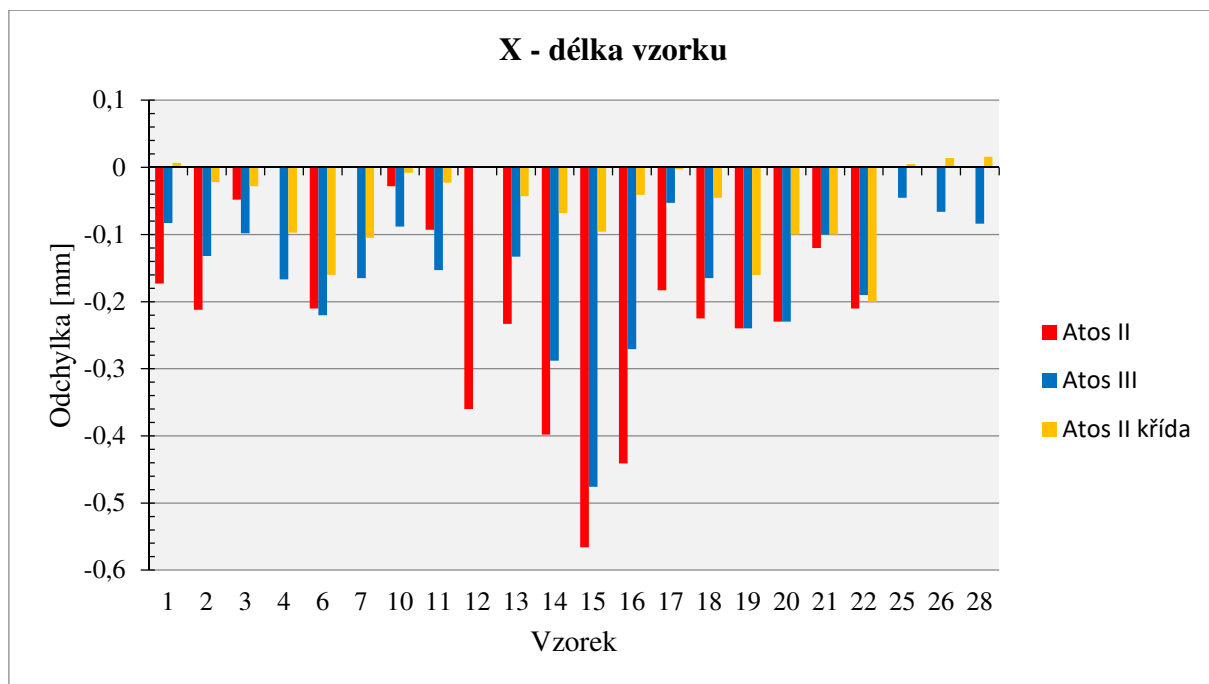
Podobné výsledky vyplynuly i z analýz ostatních sledovaných parametrů, tedy průměr koule, délky modelu v ose X a délky v ose Y (viz Obr. 4.34, Obr. 4.35 a Obr. 4.36).



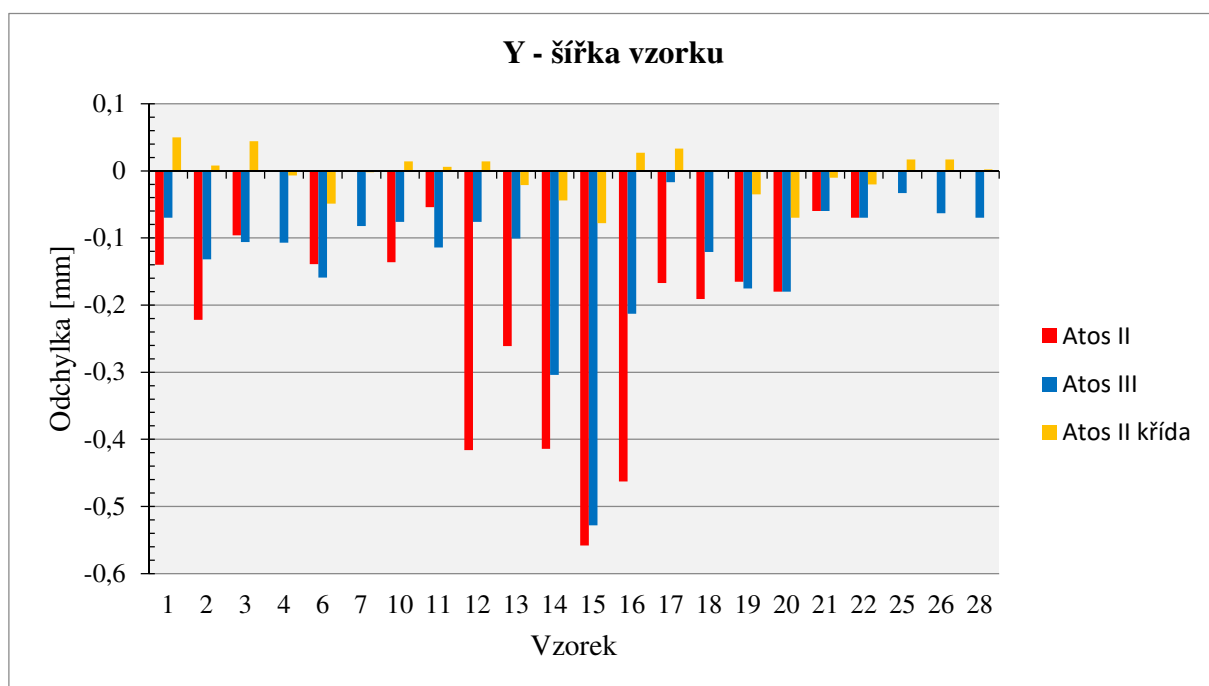
Obr. 4.33 Odchylka průměru vnějšího válce (D2)



Obr. 4.34 Odchylka průměru koule



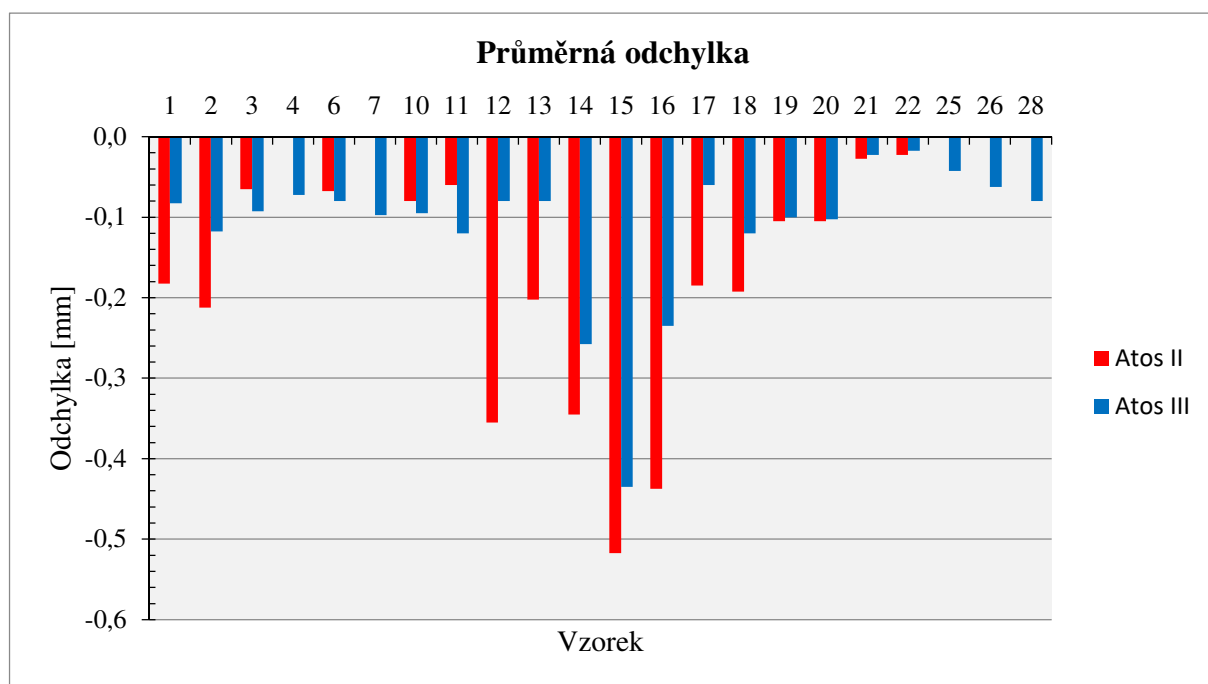
Obr. 4.35 Odchylka délky vzorku (rozměr X)



Obr. 4.36 Odchylka šířky vzorku (rozměr Y)

4.3.3 Diskuze

Výše uvedené výsledky potvrzují, že více než na snímaném tvaru záleží na materiálu a barvě obrobku. Pro všechny čtyři sledované vnější rozměry bylo dosaženo srovnatelných výsledků, a to jak pro vzorky měřené bez úpravy, tak pro vzorky nakřídované. Zároveň byl prokázán předpoklad, že vzorky opatřené matricím nástřikem byly ve většině případů naskenovány s mnohem vyšší přesností. Protože výsledky z měření na souřadnicovém měřicím stroji nemusí být pro určité tvary vždy zcela relevantní, resp. porovnatelné s měřením optickým způsobem na 3D skenerech, bylo přistoupeno ještě k jinému vyjádření problematiky. Byly vypočítány rozdíly (odchylky) mezi rozměry zjištěnými skenováním čistých vzorků a korigovanými rozměry křídovaných vzorků a ty byly následně pro všechny čtyři vnější rozměry (vnější průměr válce, průměr koule, délka X a délka Y) zprůměrovány a graficky zpracovány. Výsledky vypočítané tímto způsobem jsou pro oba posuzované systémy na Obr. 4.37. Tato analýza na první pohled lépe ukazuje, jak velkých chyb se dopustíme, pokud opticky nevhodný povrch skenujeme bez křídového nástřiku. Pokud u některého vzorku není odchylka pro ATOS II zobrazena (červený sloupec nabývá nulové hodnoty), neznamená to, že by chyba byla nulová, ale daný vzorek nebyl tímto systémem vůbec bez nástřiku naskenován a tedy nebyl posuzován z rozměrového hlediska.



Obr. 4.37 Průměrné odchylky vnějších prvků mezi nekřídovaným a křídovaným vzorkem

Z výsledků je patrné, že např. vzorek č. 15 v matné povrchové úpravě je systémem ATOS II naskenován s průměrnou odchylkou -0,52 mm pro vnější rozměry (Obr. 4.37) a 0,57 pro rozměr vnitřní (Obr. 4.32) za předpokladu, že není nakřídován. Z toho vyplývá, že u specifických materiálů systém nesnímá skutečný povrch, ale světlo proniká částečně do materiálu a plocha je nasnímaná až o několik desetin pod svým reálným povrchem (což potvrzuje např. i [62]). Přestože tedy v tomto konkrétním případě byl vzorek plně naskenován (procento naskenovaného povrchu u vzorku č. 15 přesáhlo 90%), lze vyvodit závěr, že materiál ABS like je bez úpravy povrchu antireflexním přípravkem „neskenovatelný“. Dále je zřejmé, že v tomto případě je rozhodující materiálové složení vzorku, nikoli jeho povrchová úprava, neboť druhý model ze stejného materiálu v lesklé povrchové úpravě (č. 16)

vykazoval také velmi výrazné chyby, neboť mrak bodů byl zachycen přibližně 0,22 mm pod reálným povrchem. Velmi špatných výsledků dosáhl dále bílý vzorek č. 14 z materiálu ABS White a vzorek č. 12 z fotopolymeru Vero Magenta v lesklém provedení, shodně s normálovou chybou na povrchu okolo -0,17 mm.

Výrazně lepších výsledků nebylo dosaženo ani novějším systémem ATOS III Triple Scan. Tento skener, ač dosahoval v některých ohledech o něco lepších výsledků, u výše uvedených materiálů taktéž nebyl schopen křídou neupravené povrchy naskenovat ve správných rozměrech. Ve shodě se systémem ATOS II se i zde nejméně přesně podařilo naskenovat vzorek č. 15, který byl nasnímán cca 0,22 mm pod reálným povrchem. Na rozdíl od skeneru ATOS II zde navíc nebyl vzorek plně zdigitalizován, neboť procento nasnímaného povrchu dosahovalo pouze okolo 68%. Druhý nejhorší v pořadí byl model z materiálu ABS white (č. 14), jehož normálová odchylka dosahovala přibližně 0,13 mm.

Vzorek	Nasken. povrch [%]	Odchylka D1 [mm]	Odchylka D2 [mm]	Odchylka koule D3 [mm]	Odchylka X [mm]	Odchylka Y [mm]	Průměr odchylek [mm]
1	92.3	0.190	-0.180	-0.180	-0.180	-0.190	-0.183
2	91.9	0.230	-0.210	-0.220	-0.190	-0.230	-0.213
3	57.3	0.070	-0.040	-0.060	-0.020	-0.140	-0.065
4	11.7	-	-	-	-	-	-
5	4.7	-	-	-	-	-	-
6	57.5	0.050	-0.060	-0.070	-0.050	-0.090	-0.067
7	7.0	-	-	-	-	-	-
8	1.6	-	-	-	-	-	-
9	4.7	-	-	-	-	-	-
10	56.7	0.100	-0.080	-0.070	-0.020	-0.150	-0.080
11	88.3	0.060	-0.060	-0.050	-0.070	-0.060	-0.060
12	88.8	0.340	-0.360	-0.270	-0.360	-0.430	-0.355
13	90.0	0.210	-0.200	-0.180	-0.190	-0.240	-0.202
14	88.5	0.350	-0.350	-0.330	-0.330	-0.370	-0.345
15	90.9	0.570	-0.590	-0.530	-0.470	-0.480	-0.517
16	90.4	0.390	-0.410	-0.450	-0.400	-0.490	-0.438
17	92.7	0.150	-0.180	-0.180	-0.180	-0.200	-0.185
18	92.1	0.160	-0.200	-0.200	-0.180	-0.190	-0.193
19	95.0	0.030	-0.110	-0.100	-0.080	-0.130	-0.105
20	93.5	0.050	-0.090	-0.090	-0.130	-0.110	-0.105
21	89.7	0.020	-0.020	-0.020	-0.020	-0.050	-0.028
22	89.3	0.020	-0.010	-0.020	-0.010	-0.050	-0.023
23	1.1	-	-	-	-	-	-
24	0.9	-	-	-	-	-	-
25	1.0	-	-	-	-	-	-
26	0.0	-	-	-	-	-	-
27	0.0	-	-	-	-	-	-
28	0.7	-	-	-	-	-	-

Tab. 4.10 Odchylky sledovaných rozměrů (křídována vs. nekřídováno) – ATOS II

S ohledem na obě posuzovaná kritéria je možné říci, že relativně korektně jsou skenovatelné materiály, u kterých lze bez úpravy antireflexním nástřikem naskenovat více než 50% dostupné plochy, SW dokáže bez problémů vygenerovat alespoň částečný mesh a zároveň nedochází k celkové délkové odchylce rozměrů o více než 0,1 mm, resp. plocha není zachycena s větší chybou než 0,05 mm. Pro systém ATOS II nám dle tohoto měřítka z testovaných 28 vzorků vyjde pouze 8 uspokojivých materiálů, jak je patrné z Tab. 4.10. Nejpřesnější vzorky jsou v pravém sloupci tabulky zvýrazněny zeleně, vzorky splňující zvolené kritérium max. chyby do 0,1 mm žlutě a vzorky s větší chybou nebo neskenovatelné jsou označeny červeně.

Jak je patrné z Tab. 4.11, systém ATOS III Triple Scan dokázal v rámci nastaveného kritéria uspokojivě zdigitalizovat až dvojnásobné množství vzorků. Z toho u dvou modelů (č. 25 a 26) byla bohužel zachycena pouze vnější geometrie. Tento výsledek se může zdát poměrně přijatelný, nicméně uvedený počet vychází z poměrně volně nastavených limitů. Pokud bychom požadovali dodržet toleranci do 0,05 mm na délkovém rozměru a skenovatelnost alespoň 80% plochy povrchu, pro oba systémy by vyhověly pouze dva vzorky.

Vzorek	Nasken. povrch [%]	Odchylka D1 [mm]	Odchylka D2 [mm]	Odchylka koule D3 [mm]	Odchylka X [mm]	Odchylka Y [mm]	Průměr odchylek [mm]
1	93.6	0.070	-0.060	-0.060	-0.090	-0.120	-0.083
2	94.2	0.110	-0.110	-0.110	-0.110	-0.140	-0.118
3	93.3	0.080	-0.070	-0.080	-0.070	-0.150	-0.093
4	63.9	0.090	-0.080	-0.040	-0.070	-0.100	-0.073
5	30.8	-	-	-	-	-	-
6	85.5	0.050	-0.070	-0.080	-0.060	-0.110	-0.080
7	79.0	0.110	-0.070	-0.180	-0.060	-0.080	-0.098
8	1.5	-	-	-	-	-	-
9	13.0	-	-	-	-	-	-
10	94.5	0.120	-0.110	-0.100	-0.080	-0.090	-0.095
11	94.3	0.120	-0.120	-0.110	-0.130	-0.120	-0.120
12	95.1	0.080	-0.090	-0.080	-0.060	-0.090	-0.080
13	94.6	0.070	-0.070	-0.080	-0.090	-0.080	-0.080
14	84.6	0.240	-0.270	-0.280	-0.220	-0.260	-0.258
15	67.8	0.420	-0.480	-0.430	-0.380	-0.450	-0.435
16	89.1	0.190	-0.200	-0.270	-0.230	-0.240	-0.235
17	94.3	0.040	-0.060	-0.080	-0.050	-0.050	-0.060
18	93.6	0.080	-0.120	-0.120	-0.120	-0.120	-0.120
19	95.4	0.040	-0.100	-0.080	-0.080	-0.140	-0.100
20	93.3	0.040	-0.090	-0.080	-0.130	-0.110	-0.102
21	91.6	0.020	-0.020	-0.020	0.000	-0.050	-0.023
22	91.3	0.020	-0.010	-0.020	0.010	-0.050	-0.018
23	34.0	-	-	-	-	-	-
24	35.7	-	-	-	-	-	-
25	68.8	-	-0.030	-0.040	-0.050	-0.050	-0.042
26	64.4	-	-0.040	-0.050	-0.080	-0.080	-0.063
27	2.3	-	-	-	-	-	-
28	70.8	0.100	-0.070	-0.080	-0.100	-0.070	-0.080

Tab. 4.11 Odchyly sledovaných rozměrů (křídována vs. nekřídována) – ATOS III

Z výsledků je evidentní, že v současné době není zatím možné provádět optickou digitalizaci mnoha povrchů bez použití zmatňujících přípravků. Je tedy nutné znát, jak se jednotlivé materiály chovají, pokud je skenujeme bez této úpravy povrchu, které tak skenovat lze a které nikoli. Obecně mohou nastat tři základní případy měřeného povrchu. Ideální je součást, kterou je možné digitalizovat optickými 3D skenery bez použití matnících nástřiků a rozměry korespondují s reálným modelem. Druhý extrém je takový, kdy optické vlastnosti povrchu jsou natolik nevhodné (hladký, lesklý, průhledný, černý povrch), že bez zmatnění není povrch vůbec naskenován. Nejvíce riziková je však třetí možnost. Jde o povrchy, které skener i bez antireflexního nástřiku relativně bez problémů naskenuje, ale rozměry vykazují chybu oproti skutečnosti. Jak potvrdil i tento výzkum, s takovým chováním se nejčastěji setkáváme např. u částečně lesklých (průsvitných) plastových hmot, u modelů z 3D tiskáren apod. Největší hrozba zde spočívá v tom, že bez nástřiku nebo při nedokonalém nástřiku získáme zkreslené výsledky, často i v řádech desetin mm. Změřené rozměry (vnější) jsou v tomto případě zpravidla menší, než je skutečnost. Bez této znalosti by mohlo dojít k hrubým chybám při interpretaci výsledků měření.

Na základě našeho výzkumu můžeme do první skupiny (materiály, jejichž rozměry lze ještě považovat za skenovatelné bez antireflexního nástřiku, aniž by došlo k výraznému zkreslení rozměrových hodnot) zařadit především vzorky tištěné pomocí SLS technologie z materiálu PA 2200, které i bez nástřiku křídou vykazovaly velmi přesných výsledků. Průměrný rozdíl rozměrů skenovaných bez nástřiku a s nástřikem je pouze kolem 0,02 mm pro oba typy skeneru. Přijatelných odchylek bylo dosaženo také u druhého páru vzorků vyrobených technologií SLS. Též modely vyrobené technologií FDM (materiál ABS black) vykazují relativně dobrou shodu.

Zcela neskenovatelné (tedy zařaditelné do druhé skupiny) jsou především pro systém ATOS II silně lesklé materiály, jako např. vzorky vyrobené třískovým obráběním z materiálu polyamid, teflon, hliník, mosaz, ocel a samozřejmě průhledné materiály vyrobené 3D tiskem (VeroClear, SLA Durable). Podobně se chovají i výrobky z čirého skla.

Do třetí, nejrizikovější skupiny, tedy materiálů, které je sice možné z hlediska zachycení povrchu naskenovat, ale rozměry neodpovídají realitě, lze zařadit např. technologii PolyJet, konkrétně materiál PureWhite a ABS like, který dosáhl vůbec nejhoršího výsledku v experimentu. U staršího skeneru (Atos II) byly rozměry v průměru menší až o 0,52 mm a u novějšího skeneru až 0,44 mm. Velice špatných výsledků bylo dosaženo také pro materiál ABS white pro technologii FDM. Vesměs se jedná o výrobky s částečně průsvitným povrchem, podobné chování se tak dá očekávat např. i u výrobků z vosku, nebo u biologické tkáně (kůže).

Zcela mimo kategorie lze zařadit materiály Vero pro technologii PolyJet, jejíž výsledky jsou nejvíce diskutabilní. Z výsledků je zřejmé, že zde záleží i na kombinaci barvy materiálu a barvy osvětlení skeneru (což potvrzuje i [45]). Např. odstín VeroGray nebyl v požadované toleranci zachycen ani jedním skenerem, naproti tomu Vero Black zachytily oba systém ve správných rozměrech. Zajímavým překvapením pak byl odstín VeroCyan, který starším systémem ATOS II byl zachycen relativně přesně, zatímco nový systém ATOS III lesklý vzorek naskenoval vůbec, v matném provedení byly rozměry mimo toleranci.

Je tedy evidentní, že i u moderních systémů pracujících na optickém principu snímání, je často nutné použít antireflexní nástřiky. Zmatnění povrchu totiž sjednotí optické vlastnosti modelů a dle uvedeného výzkumu je toto jediná cesta, jak spolehlivě naskenovat i opticky nevhodné povrchy se zaručenou přesností.

4.4 Vliv antireflexních nástřiků

Jak potvrdily nejen závěry testu prezentované v předchozí kapitole, velký vliv na kvalitu a přesnost 3D skenování má v neposlední řadě úprava a druh povrchu měřené součásti. U mnoha materiálů kontrolovaných dílů se bez antireflexních nástřiků stále neobejdeme. Na trhu existuje mnoho různých přípravků pro úpravu povrchu. Ty se liší použitou surovinou, hrubostí zrna, druhem a velikostí balení, samozřejmě v ceně a mnoha dalších parametrech. Je tedy zřejmé, že volba přípravku a způsob aplikace významně ovlivní jak samotné rozměry součásti, tak kvalitu a rychlost digitalizace.

V této rovině byla již publikována řada studií (viz kap. 2.1.4) s různými závěry. Většina výzkumů byla zaměřena pouze jednostranně na jeden či několik málo přípravků. Ty se neustále vyvíjí a na trh přicházejí nové produkty. Záměrem tedy bylo navázat na tyto výzkumy a provést podrobnou analýzu celkem 7 přípravků, které se v současné době nejčastěji používají k úpravě povrchu při optickém skenování. Cílem výzkumu bylo experimentálně porovnat tyto přípravky a popsat jejich vliv na přesnost 3D digitalizace. K testování byly zvoleny preparáty různých výrobců primárně určené pro úpravu povrchů před 3D skenováním, ale i vývojky používané pro penetrační zkoušky. Byla zkoumána tloušťka nástřiků, opakovatelnost a kvalita nástřiku, vliv obsluhy nanášející antireflexní vrstvu a vliv materiálu měřeného objektu. Digitalizace probíhala na optickém 3D skeneru firmy GOM - ATOS II 400. Přípravky byly aplikovány na válcový kalibr a sadu kalibračních koulí. Elektronovým mikroskopem byla analyzována struktura jednotlivých prášků. V neposlední řadě byla testována omyvatelnost jednotlivých přípravků. Část výsledků byla zveřejněna v publikaci zařazené do světově uznávané databáze [100].

Pro účely testování byly zvoleny produkty (Tab. 4.12, Obr. 4.38) speciálně určené pro antireflexní nástřiky při optickém skenování. To zahrnuje antireflexní křídové spreje od několika firem (např. Helling, MR-Chemie GmbH) a titanový prášek s označením TiO_2 . Testováno bylo i několik tzv. vývojek, které jsou primárně určeny k penetračním zkouškám, ale díky vhodným vlastnostem se také nezdíraje používají pro zmatnění povrchu při optickém skenování. Jejich výhodou je např. možnost nanášení stříkací pistolí s velkou šířkou záběru a její snadná omyvatelnost vodou. Jako sedmý vzorek byl zvolen specifický odpařovací přípravek, cyclododecanový sprej. Jeho aplikace je výhodná na materiály, ze kterých by běžný přípravek nebylo možné očistit (např. textil).

Označení	Název	Bližší určení
A	Rutile Titanium White	TiO_2 prášek pro přípravu antireflexního roztoku
B	Helling 3D Anti-Glare-Spray	Sprej pro antireflexní nástřiky při 3D skenování
C	MR 2000 Anti – Reflex L	Sprej pro antireflexní nástřiky při 3D skenování
D	Standard-Chek Entwickler Helling	Vývojka (často používaná pro antireflexní nástřiky)
E	MR 70 Vývojka bílá	Vývojka
F	Vývojka Ardrex	Vývojka
G	Cyclododecan - Spray	Samo - odpařující se nástřik pro 3D skenování

Tab. 4.12 Testované produkty



Obr. 4.38 Testované produkty

Titanový prášek neboli oxid titaničitý (označení TiO_2) (vzorek A) – jedná se o chemickou sloučeninu titanu a kyslíku, který se v přírodě vyskytuje v několika minerálních formách. Uměle připravený oxid titaničitý bývá označován jako titanová běloba [101]. Tato ve vodě nerozpustná látka ve formě prášku se používá ve směsi s vhodným rozpouštědlem, nejčastěji s etanolem a nanáší se za pomoci stříkací „airbrushové“ pistole. V některých případech se do roztoku může přidat kapička modrého inkoustu. Suspenze pak získá světle modrý nádech a usnadní aplikaci na bílé objekty, na kterých je jinak přípravek při nanášení špatně zřetelný [16]. Velikost drobných částic TiO_2 je cca 0,2 - 0,35 μm . V případě, že je nástřík správně aplikován, lze v ideálním případě docílit velmi tenké tloušťky nanesené vrstvy, dle výrobců cca od 1 μm . Ve srovnání s ostatními zmatňujícími přípravky lze dosáhnout znatelně slabší vrstvy, proto je vhodný pro přesná měření a případnou nutnost zmatnění kalibračních artefaktů. Mezi jeho největší nevýhody patří vyšší cena a náročnost přípravy roztoku [61] [102], případně také poměrně malý záběr „airbrushové“ pistole při nanášení a horší odstranitelnost přípravku z měřeného objektu.

Křídové přípravky speciálně vyvinuté pro bezdotykové 3D skenování (vzorky B, C) používají nejčastěji jako hlavní složku uhličitan vápenatý CaCO_3 . Křída je pórovitý, drobnivý a slabě zpevněný ekvivalent vápence o vysokém stupni čistoty. Díky cenové dostupnosti a relativní jednoduchosti aplikace patří mezi nejčastěji používané. Tyto přípravky jsou dostupné nejčastěji ve formě sprejů o objemu kolem 500 ml. Průměrná velikost částic se pohybuje v jednotkách mikrometrů. Díky větší tloušťce nanesené vrstvy se však nedoporučují pro zmatňování kalibračních etalonů [103], [104].

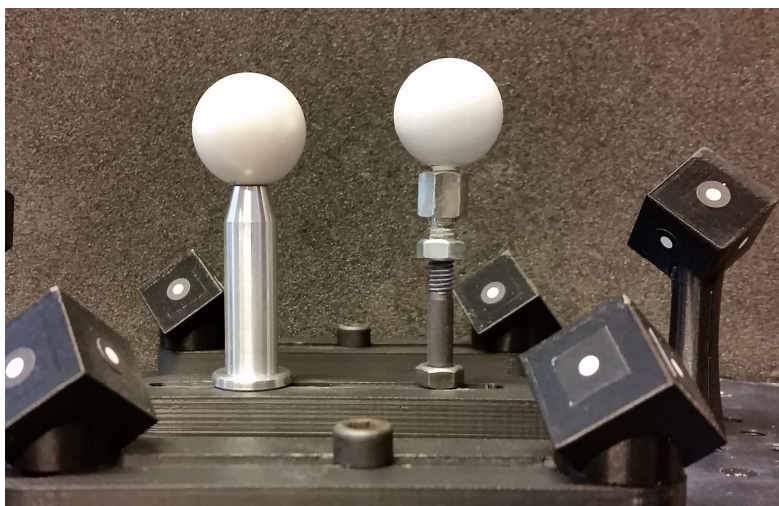
Vývojky (vzorky D, E, F) jsou v kombinaci s dalšími přípravky primárně určeny pro kontrolu povrchových vad výrobků, trhlin a pórů různých typů materiálů. Samostatně však splňují požadavky pro zmatňující antireflexní nástříky, proto se i z důvodu nižší ceny nezřídka používají pro úpravu povrchu při 3D digitalizaci. Velikost zrna udávaná výrobcem se pohybuje v jednotkách až desítkách mikrometrů [103]. Přípravky jsou opět dostupné ve formě sprejů nebo ve větších objemech pro nanášení stříkací pistolí.

Cyclododecan spray (vzorek G) je chemická hydrofobní sloučenina ($C_{12}H_{24}$) patřící do skupiny nasycených alkalických uhlovodíků, která je rozpustná v nepolárních organických rozpouštědlech. Jeho zajímavou vlastností je schopnost samovolné sublimace. To tento přípravek předurčuje pro speciální aplikace úpravy povrchů především tam, kde by jiný prostředek bylo problematické odstranit. Látka je pomalu těkavá a doba odpaření nanesené antireflexní vrstvy závisí na její tloušťce, použitém rozpouštědle, teplotě či struktuře povrchu a pohybuje se v rozmezí několika hodin až dnů. Velkou nevýhodou je nemožnost nanesení slabých vrstev, neboť tloušťka je odhadována až kolem 1 mm [61], [105].

V nedávné době se na trhu objevil nový sublimující a bezsezbytku se odpařující přípravek na bázi rozpouštědel s označením Reflecon Tarnish (ve variantách 10-HC, 11-HC, 12-HC). Jedná se o odpařovací přípravek bez použití rizikových Cyclododecane sloučenin. Dle výrobce jsou jeho výhodami větší a homogenní pokrytí, hladká a jemně rozptýlená bílá prášková vrstva, mnohem nižší zápach, nižší aerosolové výpary v pracovní oblasti. Jeho cena je několikanásobně vyšší než cena výše uvedených přípravků, nicméně slibovaná slabší vrstva oproti klasickému Cyclododecanovému spreji může z tohoto přípravku činit zajímavou alternativu pro speciální aplikace. Protože se jedná o novinku a tento přípravek nebyl v době realizace experimentu na trhu dostupný, v testech není zahrnut.

4.4.1 Popis experimentů

Během experimentu byly jednotlivé přípravky opakovaně aplikovány na etalony různých tvarů a materiálů (10 opakování pro každý etalon a každý preparát). Jejich nanášení se v praxi provádí nejčastěji ručně a při zohlednění tvarové složitosti skenovaných dílů je na zřeteli, že jeho výsledná vrstva nebude naprosto rovnoměrná po celé ploše. Cílem bylo docílit ideálního limitního nástřiku za pomoci „slabé“ (minimální možné) i „silné“ (běžně využívané) antireflexní vrstvy. Vrstva musela být natolik celistvá a silná, aby subjektivně zabránila nechtěným odleskům, ale zároveň nesmělo dojít k výraznému ovlivnění rozměru měřeného objektu. Pro experiment byl jako etalon zvolen válečkový kalibr pro díry (o jmenovitém průměru 48 mm), tedy kovová válcová plocha s lesklým broušeným povrchem. Rozměr a tvar byly ověřeny na souřadnicovém měřicím stroji. Chyba průměru i válcovitosti byla při opakovaném měření pod 1 μm . V rámci experimentů byly použity i etalony jiných materiálů a tvarů, např. koncové měřky, nebo přesné keramické koule (lesklé i matné) – viz Obr. 4.39. Tyto výzkumy sledovaly, jaký má podkladový materiál a tvar vzorku vliv na rovnoměrnost a tloušťku naneseného matného prášku. Aplikaci přípravků provádělo několik pracovníků, zkušených i nezkušených, a bylo ověřováno, zda i tento faktor má vliv na sledované parametry. Test probíhal v laboratorních podmínkách při konstantní teplotě a vlhkosti.



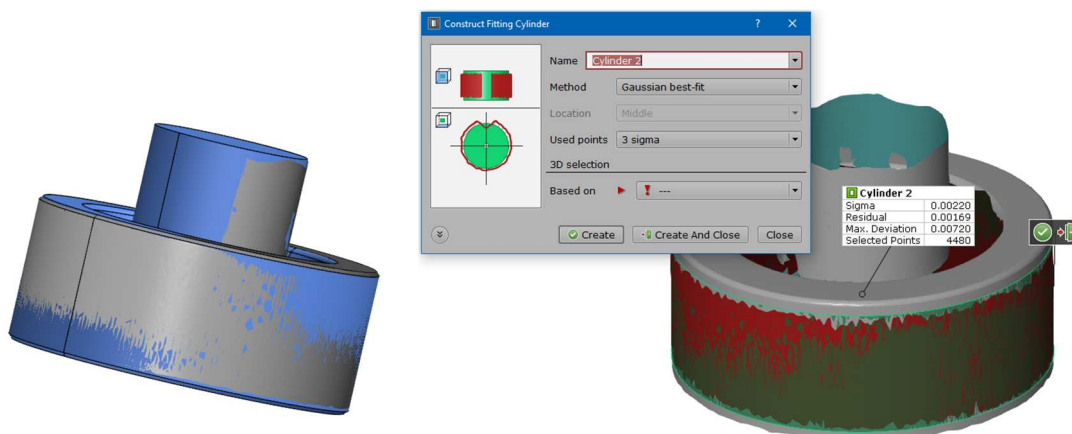
Obr. 4.39 Lesklá (vlevo) a matná (vpravo) koule

Skenování bylo realizováno optickým 3D skenerem od firmy GOM - ATOS II s měřicím objemem MV 250 mm. Měřicí systém byl před samotným měřením kalibrován s použitím standardizovaného kalibračního etalonu „calibration panel“ dle postupu určeného výrobcem daného zařízení. Dle GOM Acceptance testu je maximální odchylka měření uvedeného zařízení – „maximum deviation“ pro parametr „Sphere spacing error“ do 0.017 mm, pro parametr „Probing error (max. sigma)“ do 0.004 mm. Na etalon (mimo měřenou plochu) i na měřicí stůl byly nalepeny referenční body $\varnothing$ 3 mm. Po nanesení antireflexní vrstvy byl etalon umístěn na měřicí stůl a bylo sejmuto 10 skenů v rámci 360°. Mrak bodů byl zpracován (jednotlivé snímky byly pomocí referenčních bodů transformovány do společného souřadného systému) a byla vypočítána polygonální síť. Zpracování nasnímaných dat i následné vyhodnocení probíhalo v SW GOM Inspect Professional.



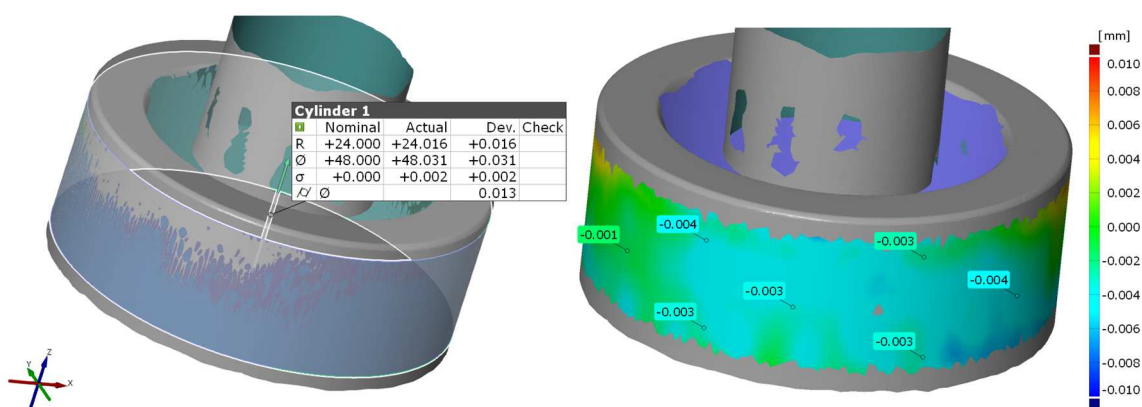
Obr. 4.40 Etalon opatřený antireflexním náštříkem (vlevo), proces skenování (vpravo)

Za účelem automatického vyhodnocení a opakovatelnosti byl aktuální naskenovaný model nejprve vyrovnán pomocí funkce BestFit (Obr. 4.41 vlevo) na nominální CAD model. Následoval výpočet průměru válcové plochy, chyby válcovitosti a dalších veličin. Při výpočtu se pracovalo s výběrem bodů na celé válcové ploše, vyjma plochy cca 1 mm od okrajů (Obr. 4.41 vpravo). Tento postup byl zvolen z důvodu eliminace nepřesností měření, které mohou poblíž hran vzniknout.



Obr. 4.41 Mesh vyrovnaný na CAD model metodou BestFit (vlevo), konstrukce prvku „Cylinder“

Pro konstrukci válcové plochy (pro účely výpočtu průměru, poloměru) z mraku bodů byla použita metoda “Gaussian best-fit” s Gaussovým rozdělením 3σ . Chyba válcovitosti byla počítána ze všech vybraných bodů, jak stanovuje norma (Obr. 4.42 vlevo). Zároveň byly vytvořeny barevné mapy odchylek, pro vizuální kontrolu tvaru válce (Obr. 4.42 vpravo). Výsledky byly zpracovány v SW MS Excel a graficky interpretovány pomocí tzv. krabicových grafů (umožňují graficky znázornit data pomocí kvartilů).



Obr. 4.42 Výpočet průměru válce a válcovitosti (vlevo), barevná mapa odchylek tvaru (vpravo)

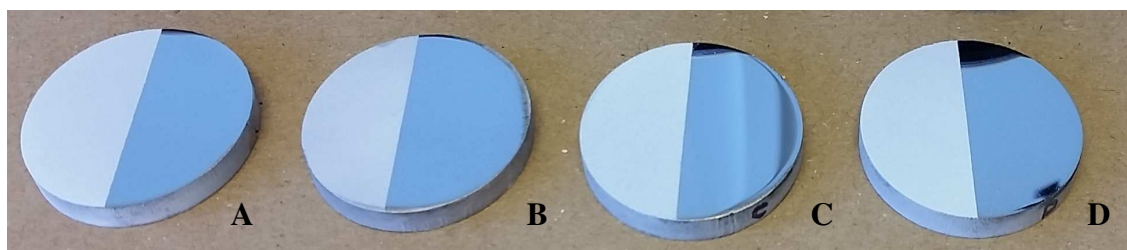
Druhotným cílem tohoto výzkumu bylo posouzení omyvatelnosti testovaných přípravků z různých povrchů. Problém nastává především u drsných, pórovitých nebo tmavých povrchů, ze kterých se přípravky odstraňují podstatně komplikovaněji, než z povrchů hladkých. Dobře patrné a viditelné jsou i po umytí a zaschnutí zbytky křidy (mapy) například na černých plastových vstřikovaných dílech. Schopnost snadno odstranit přidanou vrstvu matnicího nástřiku je proto důležitá především u velkých a členitých objektů, zvlášť pokud je požadováno, aby díl nebyl nástřikem znehodnocen.

Testování omyvatelnosti probíhalo jak na kovovém hladkém povrchu (Obr. 4.43 vlevo), tak na členitém díle z černého plastu (Obr. 4.43 vpravo). Samotné mytí probíhalo bez mechanického kontaktu s čištěnou plochou. Díl byl pouze opláchnut proudem tekoucí vody.



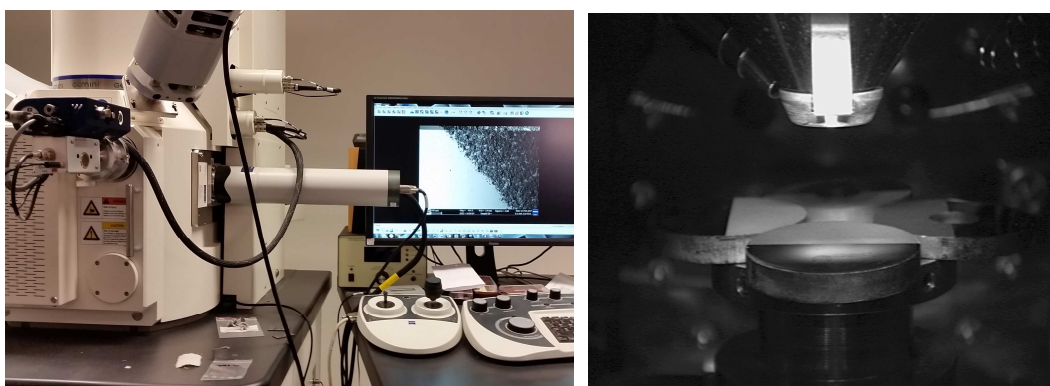
Obr. 4.43 Kovový a plastový povrch po umytí nástřiku

Kromě měření na optickém 3D skeneru byl výzkum zaměřen i na detailní mikroskopickou analýzu struktury a tloušťky jednotlivých nástřiků. Pro tento účel byly přípravky aplikovány na metalografické podložky. Polovina plochy byla opatřena maskovací páskou, která byla po nástřiku sejmuta. Vzniklo tak rozhraní mezi plochou s nástřikem a bez nástřiku (Obr. 4.44).

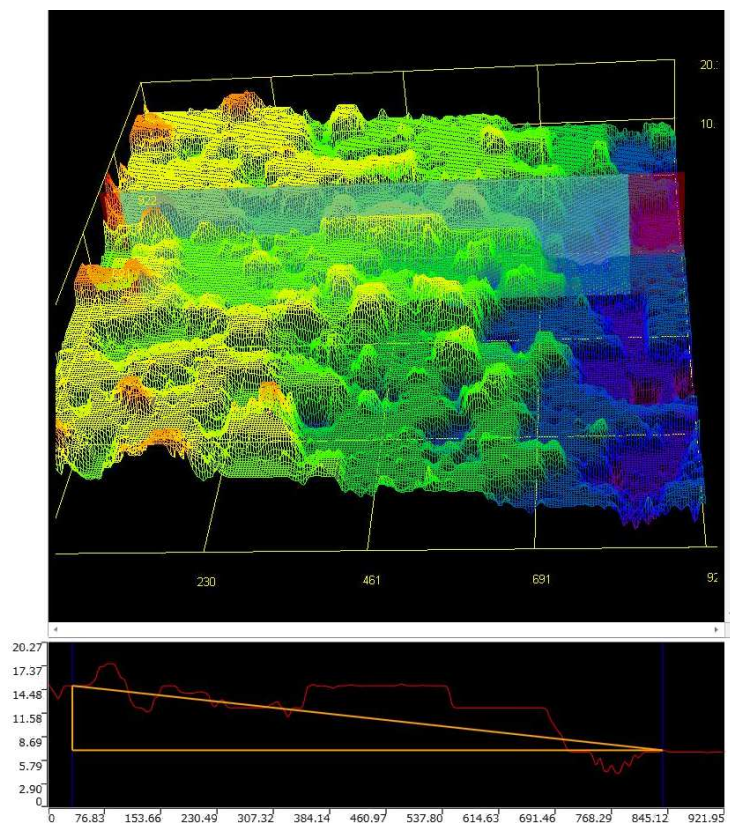


Obr. 4.44 Vzorky připravené pro optický mikroskop

Takto připravené vzorky byly vyhodnoceny pomocí optického a elektronového mikroskopu (Obr. 4.45). Prvotním záměrem bylo přímé měření tloušťky nástřiku (výšky schodu rozhraní), které by eliminovalo chyby měření ze strany optického skeneru. Z důvodu hrubé struktury nástřiků bylo však ve velkém zvětšení problematické spolehlivě určit směrodatnou hladinu povrchu nástřiku (Obr. 4.46). K měření tloušťky se tedy z důvodu nízké spolehlivosti toto měření nevyužilo. Byly však pořízeny záběry jednotlivých struktury přípravků a to až na úroveň zrn (desetin mikrometrů).



Obr. 4.45 Elektronový mikroskop (vlevo), komora elektronového mikroskopu se vzorky (vpravo)



Obr. 4.46 Struktura přechodu nástriku z 3D optického mikroskopu

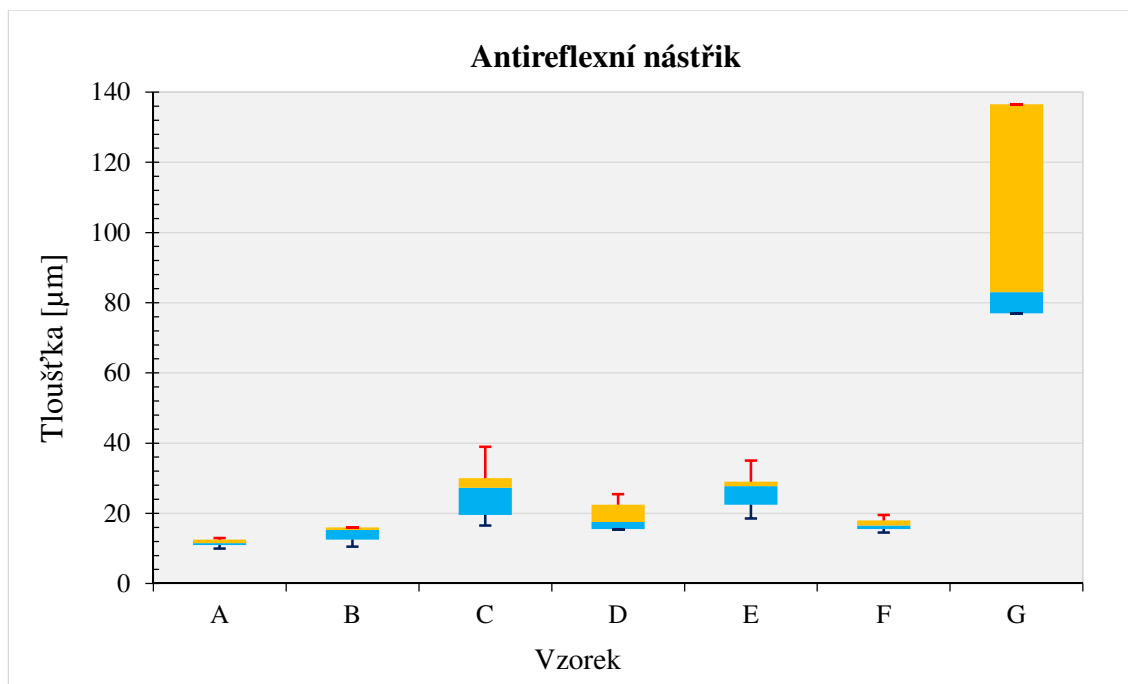
4.4.2 Výsledky měření

4.4.2.1 Válcový etalon

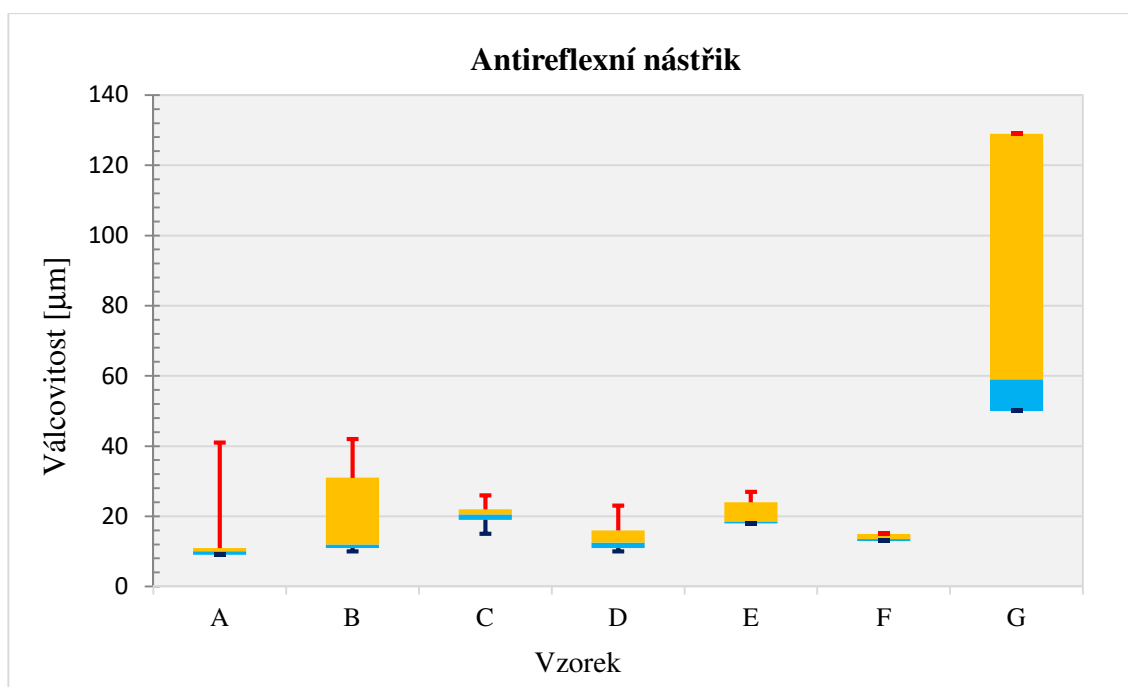
Výsledné odchylky poloměru měřeného válce od nominální hodnoty poloměru, tedy teoretická tloušťka antireflexní vrstvy, je pro všechny vzorky shrnuta v Tab. 4.13 a na Obr. 4.47. V tabulce a na Obr. 4.48 také vidíme maximální chybu tvaru měřené válcové plochy, tedy chybu válcovitosti. Ta je způsobena nerovnoměrným nanesením antireflexní vrstvy, částečně samotnou nepřesností skeneru, ale největších odchylek je v tomto případě dosahováno paradoxně při slabé (nedostatečné) tloušťce nástriku. Pokud dojde v nějakém místě k odrazu promítaného světla, optika skeneru v tomto místě plochu špatně interpretuje a vzniká chyba měření (viz Obr. 4.49 vlevo).

Tloušťka antireflexní vrstvy [μm]							
Vzorek	A	B	C	D	E	F	G
Minimum	10	11	17	16	19	15	77
Medián	12	15	27	18	28	17	83
Maximum	13	16	39	26	35	20	137
Geometrická nepřesnost (válcovitost) antireflexní vrstvy [μm]							
Minimum	9	10	15	10	18	13	50
Medián	10	12	21	13	19	14	59
Maximum	41	42	26	23	27	15	129

Tab. 4.13 Výsledky měření válcového etalonu

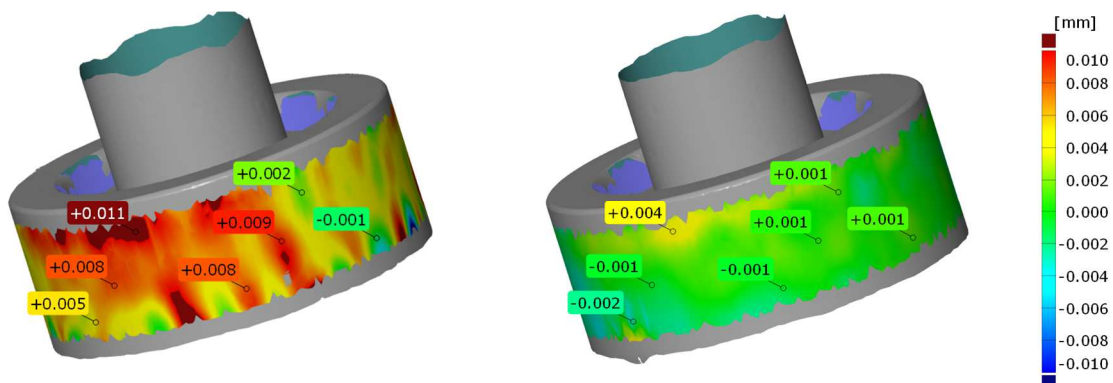


Obr. 4.47 Tloušťka antireflexní vrstvy na válcového etalonu



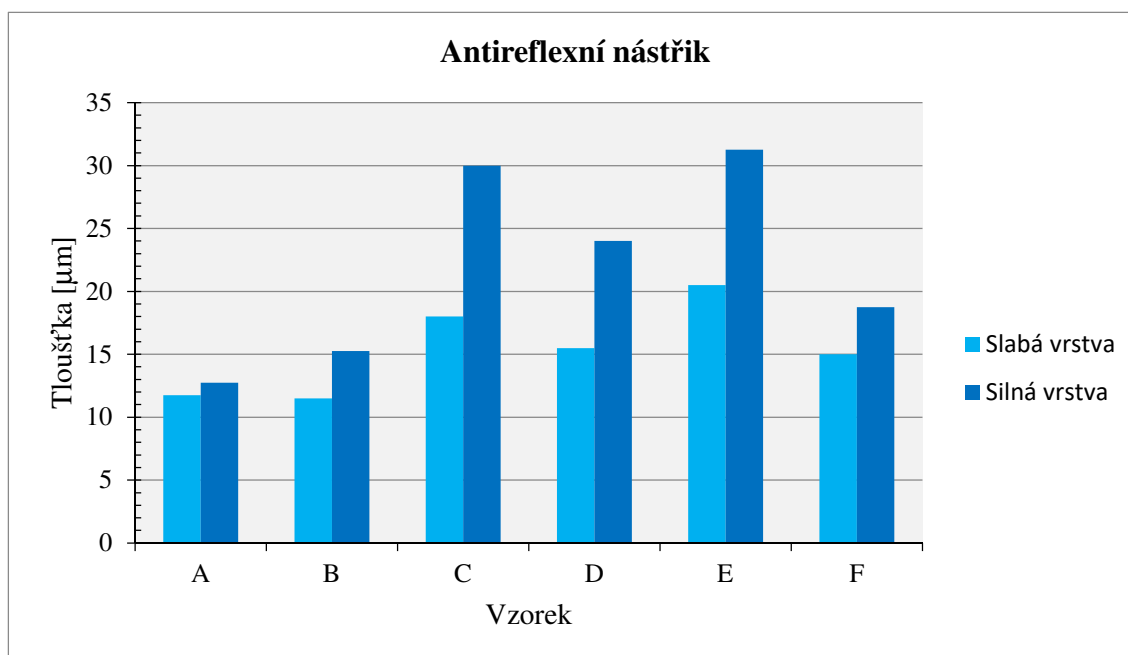
Obr. 4.48 Chyba tvaru válcového etalonu

Z grafu na Obr. 4.47 je patrné, že slabé tloušťky nástříku je docíleno u vzorků A - F. Zde se pohybujeme ve většině případů v rozmezí 10 – 30 μm . U vzorků B a F je to maximálně do 20 μm , u titanového prášku (A) dle očekávání nejméně, kolem 10 μm . Velmi výrazně se odchyľuje vzorek G, cyclododecan spray, s chybou často přesahující i 100 μm . U vzorků A, B a F je zároveň malý rozptyl jednotlivých hodnot, což svědčí o dobré opakovatelnosti a menší závislosti tloušťky vrstvy na zkušenosti obsluhy.

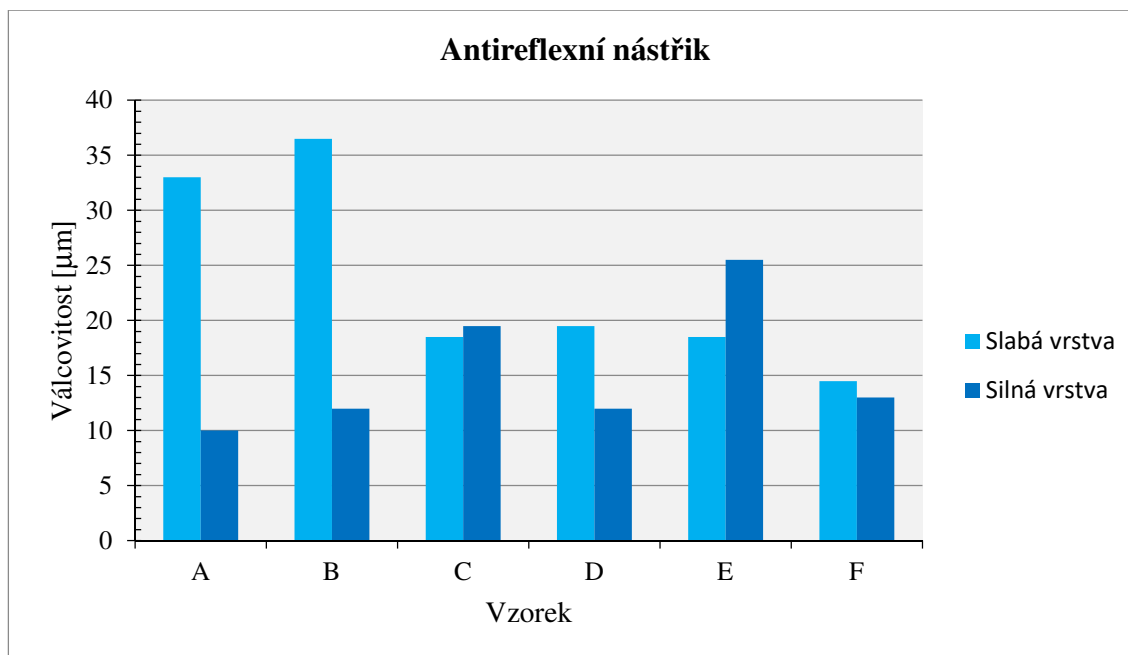


Obr. 4.49 Vlivu tloušťky nástriku na válcovitost (vlevo – nedostatečná tloušťka /“slabá“/, vpravo – běžně používaná tloušťka /“silná“/; přípravek A)

Aby bylo lépe patrné, jak malé množství přidaného nástriku ovlivňuje výsledky měření z hlediska rozměru a tvaru, bylo v druhé fázi provedeno vyhodnocení dvou tloušťek nástriku odděleně ve dvou skupinách. Do první skupiny byly zahrnuty všechny vzorky, které byly nastříkány dle zkušenosti obsluhy minimálním avšak postačujícím množstvím přípravku (označeno jako „slabá vrstva“) a do druhé skupiny výstupy z měření vzorků, které byly opětovně lehce přestříkány, aby nanesená vrstva byla o něco silnější a s vyšší jistotou dostatečná (označeno jako „silná vrstva“). V tomto přídě nebyl do testů zahrnut cyclododecanový preparát (označen G). Zpracované výsledky jsou vyneseny v následujících dvou grafech:



Obr. 4.50 Tloušťka antireflexní vrstvy na válcového etalonu v závislosti na množství nástriku



Obr. 4.51 Chyba tvaru válcového etalonu v závislosti na množství nástržiku

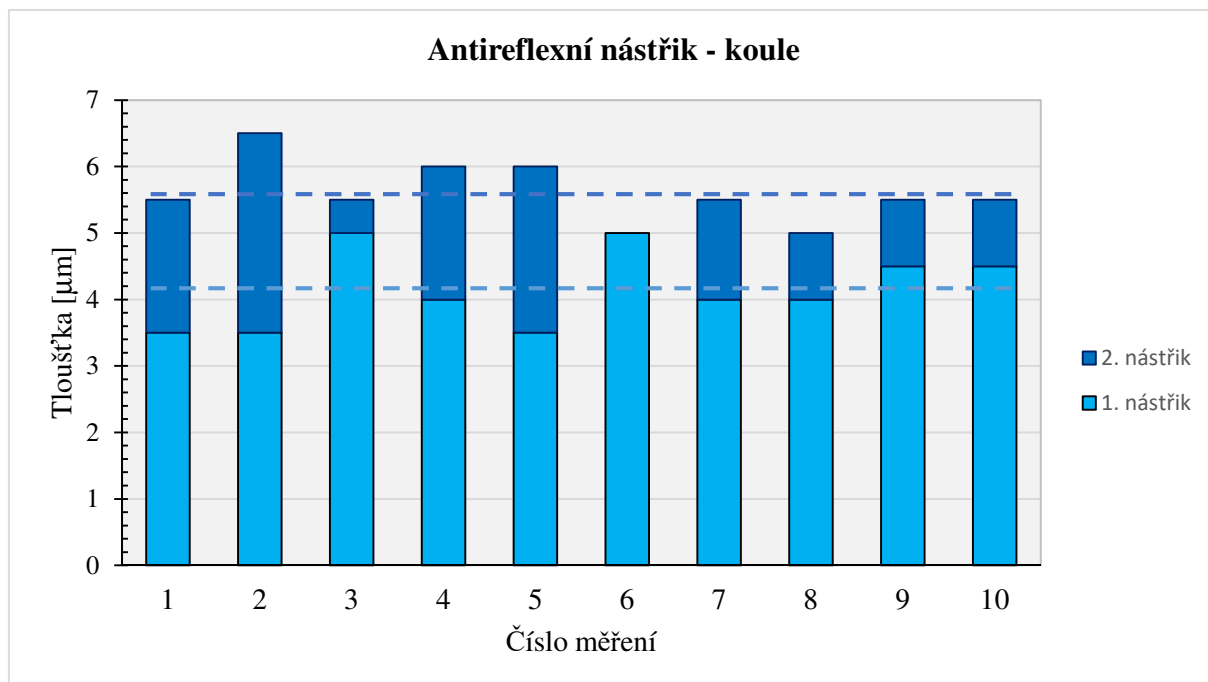
První z grafů na Obr. 4.50 jasným způsobem ilustruje, že přidání druhého nástržiku logicky o několik μm zvýšilo sílu nanesené vrstvy. Především u přípravků s hrubším zrnem (C – F) je nárůst markantnější. Jemnější přípravky nejsou na proměnlivost nanášení a obecně na vnější vlivy tak citlivé. To potvrzuje i mnohem menší rozptyl mezi maximální a minimální zjištěnou vrstvou z deseti různých měření na Obr. 4.47. A to i za předpokladu, že v tomto prvním případě byly do výsledků zahrnuty jak vzorky ošetřované nezkušeným, tak velmi zkušeným operátorem.

Ještě zajímavější jsou výstupy chyby tvaru válcového elementu uvedené na Obr. 4.51. Zde je číselně vyjádřen již dříve zmíněný fakt, že slabá vrstva má mnohdy negativní vliv na kvalitu snímaných dat, což se projeví nárůstem chyby tvaru prvku (GD&T). Zde je trend naprosto opačný a naopak přípravky, které dosahují z hlediska tloušťky nanesené vrstvy nejlepších výsledků (vzorky A a B), jsou nejvíce náchylné na nedostatečnou sílu vrstvy. Jak je z grafu patrné, u titanové běloby a spreje Helling 3D Anti-Glare-Spray došlo po mírném zvýšení množství naneseného prášku (z hlediska tloušťky pouze v řádu jednotek mikrometrů – viz Obr. 4.50) až k trojnásobnému snížení zdánlivé chyby tvaru (válcovitosti). U ostatních preparátů nebyl tento trend pozorován a velikost změny a trend nebylo možné jednoznačně určit.

4.4.2.2 Kulový etalon

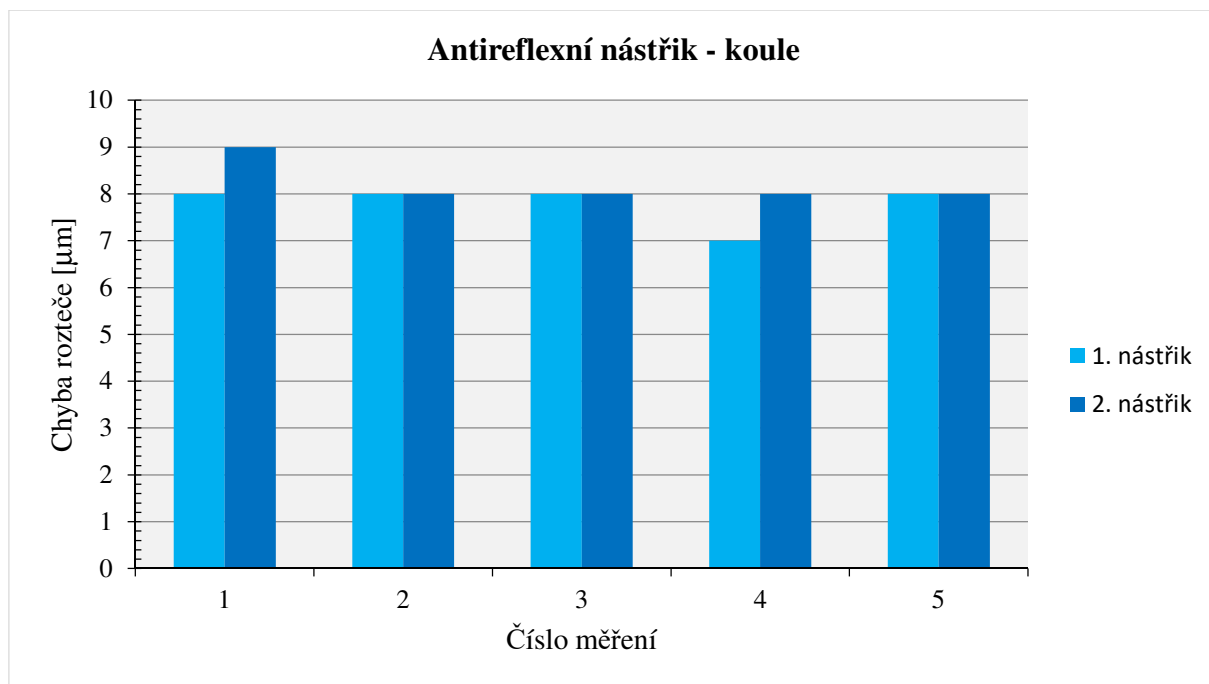
Pro ověření výsledků a potvrzení vlivu různé tloušťky nástržiku na jednotlivé sledované parametry byl test pro nej přesnější přípravek (preparát A – TiO_2) proveden ještě jednou, tentokrát ale pro kulový etalon (popsaný v kap. 4.1.4). Vzhledem k použitému MV 250 byl na etalonu pro vyhodnocení zvolen pár středně velkých koulí (průměr 20 mm, rozteč 115 mm). Opět byl proveden dvojí nástržik. První aplikace znamenala menší množství prášku, druhý nástržik měl zajistit jeho rovnoměrnější rozložení a lepší krytí. Byly vypočítány odchylky mezi naměřenými průměry kuliček (levé i pravé) a jejich nominální hodnotou, a to po prvním a po druhém nástržiku. Jejich polovina vyjadřující teoretickou tloušťku nástržiku je pro jednotlivá měření vynesena do grafu na Obr. 4.52.

Z něho je patrné, že průměrný rozdíl mezi první a druhým nástrikem byl pouhých 1,5 μm a celková průměrná tloušťka nástriku se pohybovala kolem 5,6 μm . To je méně, než bylo dosaženo na válcové ploše.



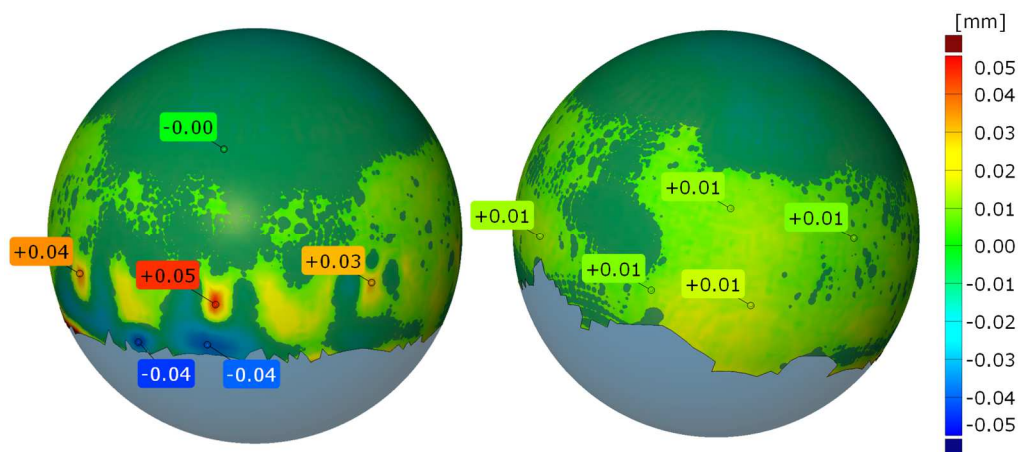
Obr. 4.52 Tloušťka antireflexní vrstvy na kulovém etalonu (přípravek A)

Další obrázek (Obr. 4.53) potvrzuje, že kvalita, provedení a síla nástriku téměř vůbec neovlivňuje velikost rozteče (což je z principu výpočtu logické). Na vzorku byly naměřeny téměř totožné hodnoty (tedy souřadnice středů kuliček zůstávají beze změn). Zjištěná průměrná odchylka od nominální hodnoty 8 μm koresponduje s chybou zjištěnou v kap. 4.1.6.1 a je dána limity (přesností) samotného 3D skeneru. Pozitivní je však zjištění, že je zde vysoká opakovatelnost, kdy výsledky nejsou ovlivněny způsobem měření ani množstvím naneseného matného prášku.



Obr. 4.53 Vliv nástříku na chybu rozteče kuliček (přípravek A)

Tento experiment zároveň znovu potvrdil, že kvalita nástříku (především jeho nedostatečné množství) má vliv na rovnoměrnost naskenovaných dat. To ilustruje barevné vyjádření odchylek naskenovaného povrchu koule od ideálního kulového prvku – viz Obr. 4.54. Je zde patrné, že při dostatečném a kvalitně provedeném nástříku je povrch prvku naskenován rovnoměrněji (vpravo), než v případě nedostatečného zmatnění, kdy díky místním odleskům může docházet k určitým nepravidlostem naskenovaného povrchu a lokálním chybám (vlevo). Tento fakt negativně ovlivňuje výpočet souřadnic jednotlivých bodů a snižuje objektivitu měření. V rozporu se skutečností totiž zdánlivě zvyšuje velikost parametru Probing error form a obecně zvyšuje chybu tvaru skenovaných prvků.



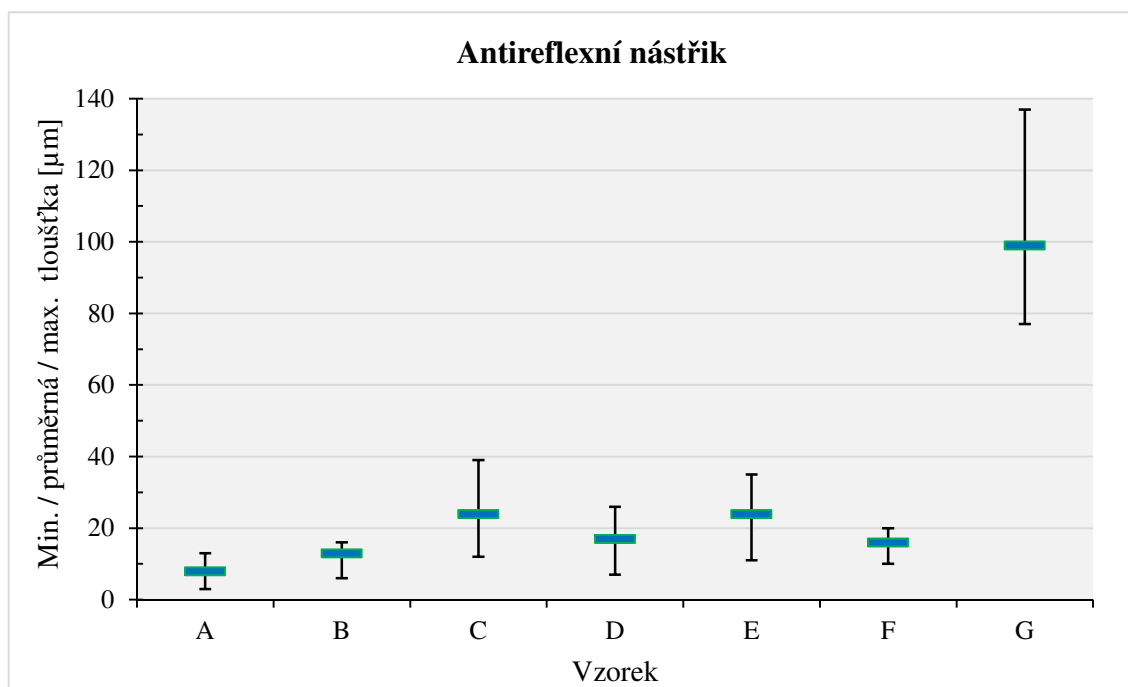
Obr. 4.54 Barevná mapa odchylek ve vazbě na kvalitu a tloušťku provedeného nástříku (vlevo – 1. nástřík (v místě rovníku nedostatečný), vpravo 2. nástřík)

4.4.2.3 Shrnutí

Souhrnné výsledky rozsáhlé analýzy (zahrnující matný i lesklý podklad, válcový i kulový etalon) jsou sumarizovány v Tab. 4.14 a na Obr. 4.55. Minimálních hodnot je dosahováno především u matných podkladů, kde není vyžadována tak silná vrstva (v praxi např. černý plast). Více prášku je naopak nutné nanést na vysoce lesklé povrchy (broušený kov). Z výsledků je patrné, že nejslabší vrstva a tedy nejmenší ovlivnění rozměrů součásti je dosahováno u TiO₂ - vzorek A (minimum 3 μm) a přípravku 3-D Helling - vzorek B (minimum 6 μm).

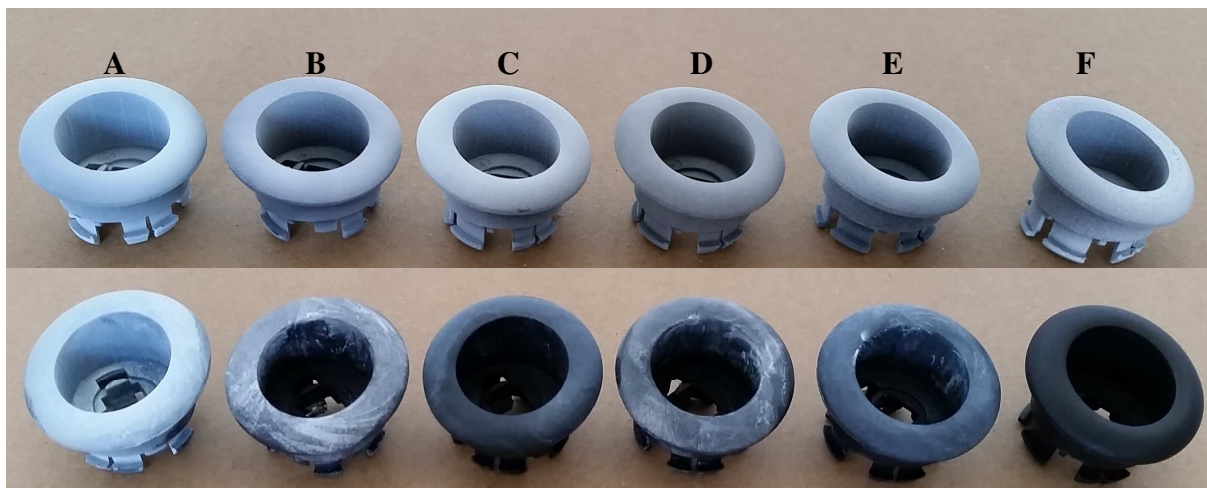
	A	B	C	D	E	F	G
Minimum [μm]	3	6	12	7	11	10	77
Průměr [μm]	8	13	24	17	24	16	99
Maximum [μm]	13	16	39	26	35	20	137

Tab. 4.14 Výsledná tloušťka antireflexní vrstvy (zahrnující válec, koule; povrch lesklý, matný)



Obr. 4.55 Výsledná tloušťka antireflexní vrstvy (zahrnující válec, koule; povrch lesklý, matný)

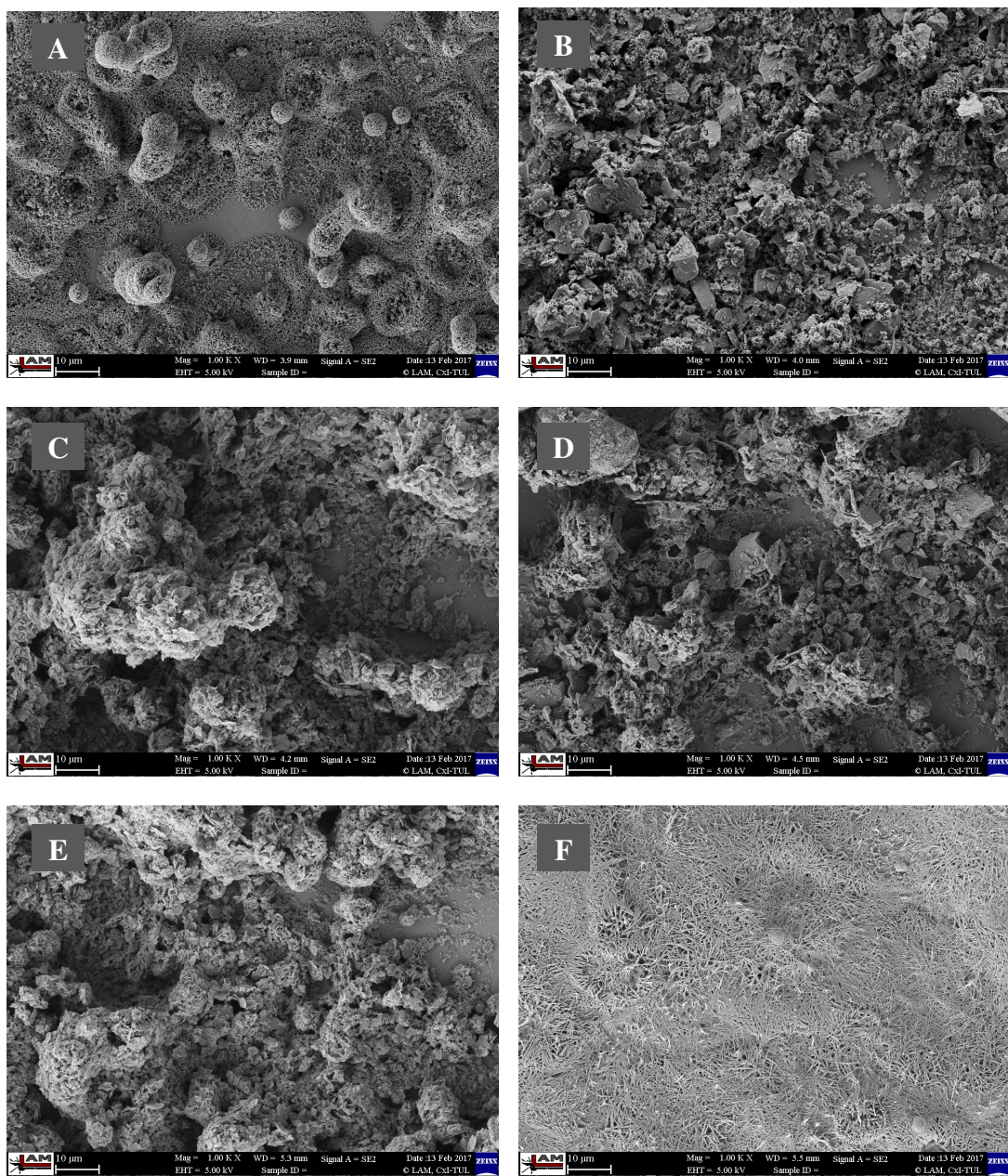
Každý z představených antireflexních přípravků je jinak omyvatelný. Některé přípravky lze poměrně snadno očistit vodou, některé je ale problematické odstranit i za pomoci etanolu či speciálních čističů. Opět záleží i na povrchu a barvě podkladového materiálu. Zbytky křídly nejvíce vyniknou na černých součástkách. Porovnání omyvatelnosti přípravků z černého plastového dílu prostým proudem vody je na Obr. 4.56.



Obr. 4.56 Vzorky před (nahore), po (dole) umytí proudem vody

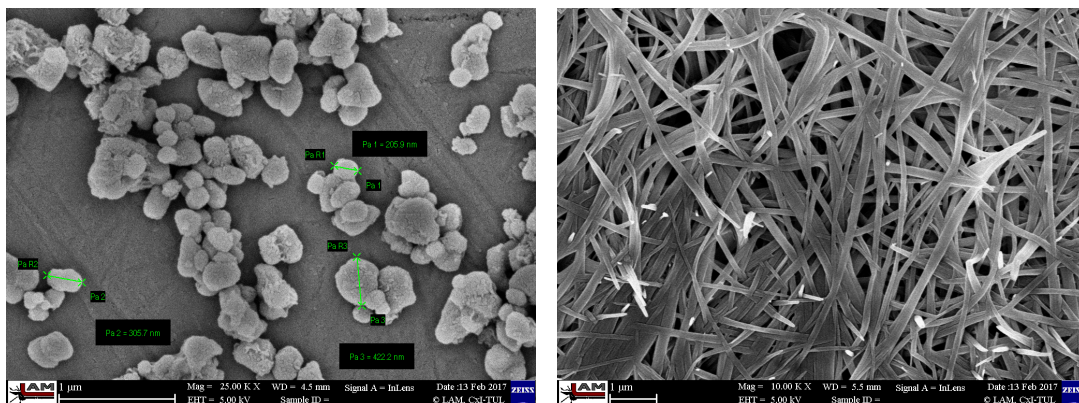
Nejhorších výsledků omyvatelnosti bylo dosaženo u TiO_2 (vzorek A). Struktura nástřiku touto sloučeninou zůstala i po opláchnutí proudem vody víceméně neměnná a přípravek bylo ze vzorku nezbytné očistit mechanicky za pomoci etanolu. Oxid titaničitý je hydrofobní látka, tedy ve vodě nerozpustná, tento výsledek tedy byl očekávatelný. Naopak nejlépe bylo možné odstranit přípravek MR 2000 (C) a Vývojku Ardrex (F). Pouhé opláchnutí vodou (bez mechanického působení) dokázalo dokonale přípravek smýt z testované součásti.

Mikroskopické zkoumání přípravků přineslo detailní pohled na strukturu jednotlivých prášků. Na elektronovém mikroskopu bylo provedeno snímání při zvětšení 100x, 1000x a 10 000x. Vyobrazení pro zvětšení 1000x je na Obr. 4.57.



Obr. 4.57 Přípravky pod elektronovým mikroskopem při 1000x zvětšení

Z obrázků je patrná struktura, tvar i velikost jednotlivých zrn. Ta je nejmenší u TiO_2 (vzorek A) a pohybuje se kolem 200 – 400 nm (patrné z 25 000x zvětšení – viz Obr. 4.58 vlevo.). V nástřiku 3-D Helling (vzorek B) je mnoho fragmentů menších než 1 μm, ale i částice dosahují velikosti téměř 10 μm. Podobných výsledků dosahují i další preparáty C, D a E. Naprosto odlišná kompozice je u přípravku F. Struktura této vývojky je tvořena velmi jemnou propletenou sítí vláken, která tvoří celistvý homogenní povrch (viz 10 000x zvětšení na Obr. 4.58 vpravo).



Obr. 4.58 Přípravky pod elektronovým mikroskopem, přípravek A – zvětšení 25 000 x (vlevo), přípravek F – zvětšení 10 000x (vpravo)

4.4.3 Diskuze

V současné době není zatím možné provádět optickou digitalizaci některých povrchů bez použití zmatňujících přípravků. Je tedy nutné znát, jak jednotlivé přípravky ovlivní rozměrové a tvarové charakteristiky výrobků, jaká je jejich aplikovatelnost a jak snadno je lze případně z výrobku odstranit.

Z našeho výzkumu vyplynulo, že nejvhodnějším preparátem pro úpravu povrchu je oxid titaničitý (vzorek A). Při použití tohoto přípravku bylo dosaženo nejtenčí vrstvy (průměrně 8 μm) a byl prokázán nejmenší vliv na přesnost měření z hlediska rozměrových charakteristik. Výborných výsledků bylo dosaženo i při použití antireflexního nástřiku 3-D Helling (B) a vývojky Ardrex (F) s průměrnou tloušťkou 13 μm , resp. 16 μm . Je však nutné mít na zřeteli, že skenované rozměry jsou ovlivněny nejen zvoleným přípravkem a množstvím naneseného prášku, ale také podkladovým materiálem. Nejméně přípravku pro úpravu povrchu obecně vyžadují černé plastové díly (zde je prioritní zesvětlení povrchu a postačuje velmi slabá vrstva), středně silného nástřiku je třeba u lesklých povrchů (lesklý kov, plast apod.) a nejsilnější vrstva je dle našich zkušeností nutná při skenování plně průhledných či vysoce odrazivých materiálů (sklo, zrcadlo).

Tloušťka nanesené vrstvy má také výrazný vliv na měření geometrické přesnosti. Bylo prokázáno, že nedostatečná vrstva může výrazně zkreslit výsledky měření geometrie tvaru prvků (rovinnost, válcovitost apod.). Tento vliv byl velmi výrazný především u nástřiku A a B (TiO_2 a 3D Helling), u kterých geometrická odchylka válcovitosti kalibru dosahovala při slabém nástřiku až 40 μm v porovnání s 10 μm při standardně silném nástřiku. Z experimentu tedy vyplývá, že antireflexní nástřik je třeba provést nejen rovnoměrně, ale je podstatné nalézt kompromis mezi slabou a silnou tloušťkou vrstvy tak, aby výsledky měření nebyly ovlivněny jak nedostatečným nástřikem (hrozí nedokonalé oskenování a zvýraznění chyby tvaru), tak nadbytečně silnou vrstvou (vyšší ovlivnění skutečného rozměru kontrolovaného dílu). To vyžaduje značnou zkušenost a zručnost obsluhy.

4.5 Vliv ostatních parametrů

Mnohaleté zkušenosti, výzkum a experimentální měření naznačují, že je mnoho dalších faktorů (vnější vlivy, nastavení parametrů při skenování, zvolená strategie snímání atd.), které více či méně ovlivňují výslednou přesnost zdigitalizovaného modelu. V rámci další fáze praktické části byla proto provedena řada experimentálního měření, která by měla ukázat, jaké aspekty nejvíce ovlivňují přesnost a spolehlivost optické 3D digitalizace.

4.5.1 Zásady správného měření

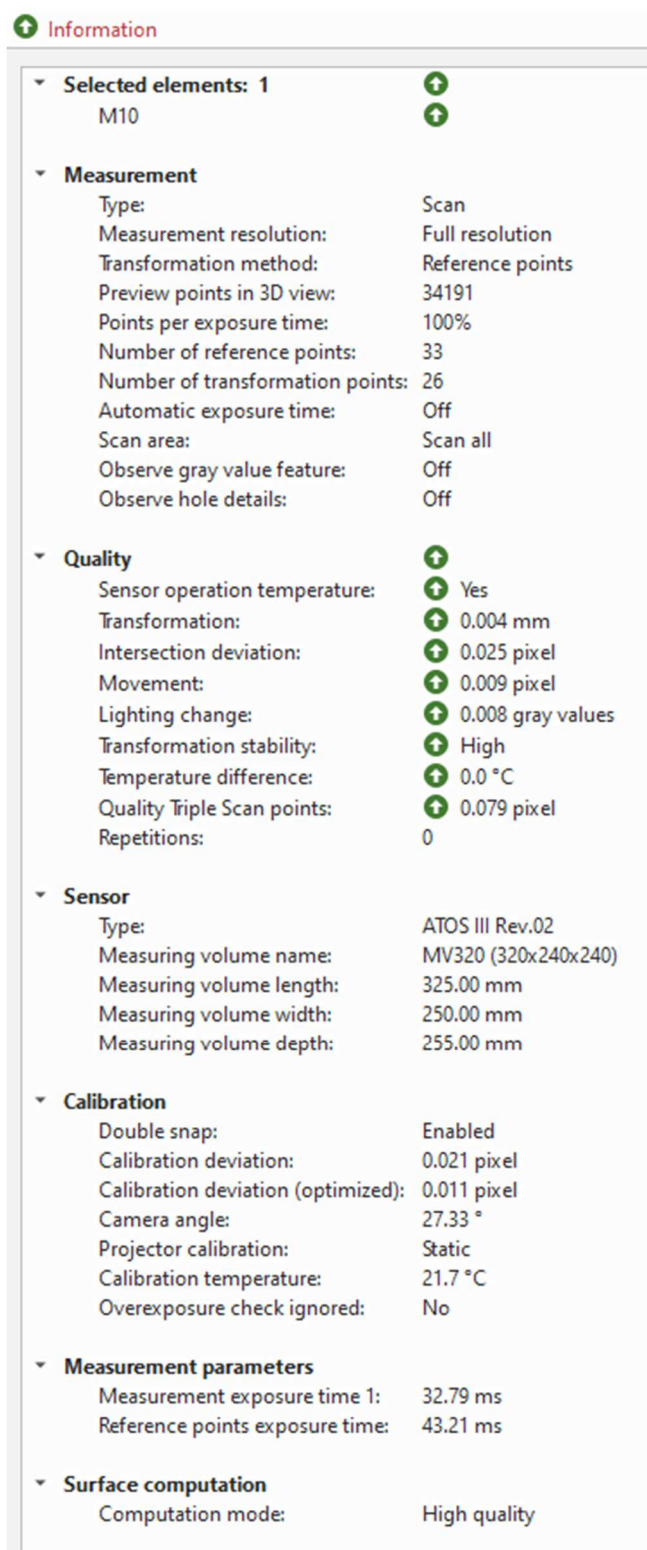
Stejně jako při každém jiném měření i při optické digitalizaci je doporučováno dodržovat určité zásady. Mezi ty nejdůležitější patří:

- Seřízení a kalibrace systému (skeneru).
- Zahřátí skeneru na provozní teplotu.
- Použití originálních referenčních bodů a bodů správné velikosti dle zvoleného měřicího objemu.
- Správné rozmístění referenčních bodů na měřenou součást nebo použití vhodného měřicího přípravku.
- Nastavení správných světelných podmínek (clony, doby expozice).
- Zmatnění měřeného dílu u opticky nevhodného povrchu pomocí antireflexních nástřiků.
- Dodržení doporučených měřicích postupů a zvolení správné strategie měření (počet snímků, úhel kamer, stabilní upnutí měřeného dílu atp.).

Skener je při měření řízen softwarem GOM ATOS Professional. Systém umožňuje zobrazit informace o kvalitě měření či kalibrace a zároveň disponuje několika samo-kontrolními mechanismy, které mohou uživatele upozornit, pokud je něco v nepořádku (viz Obr. 4.59). Je to např.:

- Kontrola viditelnosti dostatečného počtu referenčních bodů.
- *Movement check* - sleduje, zda nedošlo k pohybu mezi kamerou a měřeným objektem během snímání. Monitoring funguje na základě vyhodnocení obrazových pixelů. Defaultní hodnota je 0,1 – 0,2 pixelu.
- *Transformation check* - hlídá přesnost transformace jednotlivých skenů do společného souřadného systému.
- *Calibration check* - kontrola, zda není systém nutné znovu kalibrovat (pokud střední hodnota odchylky referenčního bodu přesáhne 0,1 pixelu).
- *Lighting change* - kontrola změny světelných podmínek během snímání. Pokud se okolní světlo během měření změní, může to vést k chybám v datech (vlny na povrchu). Výchozí hodnota je 0,5 - 1,0 hodnoty šedé.
- *Minimum Mask Threshold* - kontrola, zda je kontrast dostačující.
- *Temperature check* - kontrola, zda byl před měřením senzor dostatečně temperován.

Protože samo-monitoring je založen na pozorování referenčních bodů, kontrola není aktivní, pokud nejsou viditelné žádné referenční body. Pro vysokou spolehlivost měřicího procesu je proto referenční body vždy lépe používat.



Obr. 4.59 Dostupné informace o každém měření v SW GOM ATOS Professional

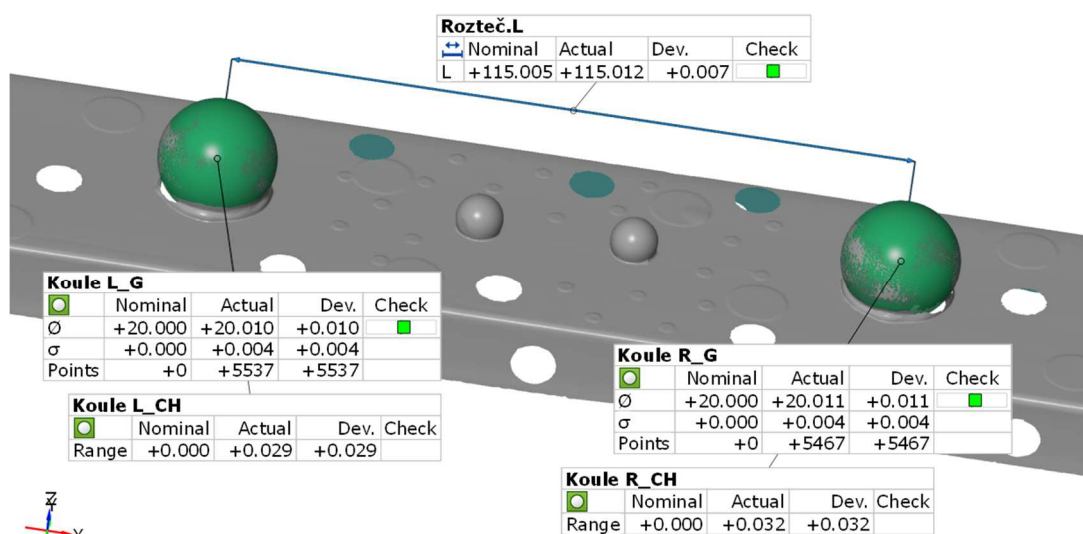
4.5.2 Popis experimentů

Na základě zkušeností a s přihlédnutím k těmto kontrolním mechanismům a zásadám správného měření byly vytipovány rizikové vlivy, u kterých obsluha často chybí (ať už úmyslně nebo neúmyslně), nebo u kterých není zřejmé, jaký mohou mít dopad na výslednou přesnost měření. Pro výzkum byly zvoleny tyto aspekty:

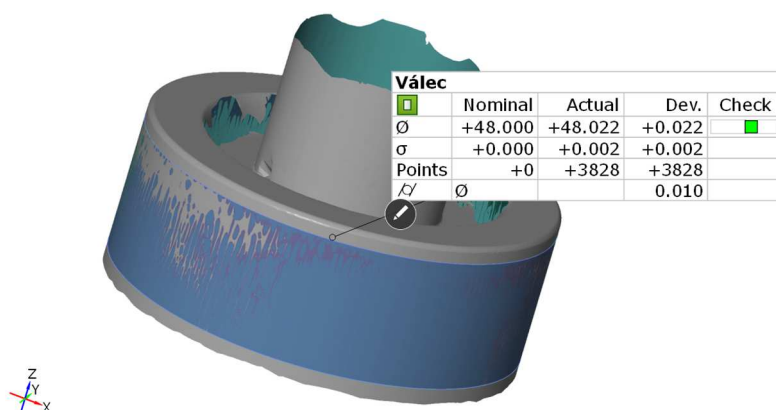
- Kalibrace přístroje
- Čas expozice
- Počet snímků
- Úhel skeneru
- Zahřátí skeneru
- Clona kamer
- Kvalita referenčních značek

V závislosti na druhu experimentu byly použity dva různé etalony. První byl válečkový kalibr pro díry (o jmenovitém průměru 48 mm) používaný i v rámci některých předchozích experimentů (viz Obr. 4.40 vlevo). Druhým modelem pro měření byl etalon vyrobený a ověřený za účelem realizace Acceptance testu (viz kap. 4.1.4). Vzhledem k tomu, že experiment byl prováděn systémem ATOS II s MV250 mm, byl na etalonu v rámci vyhodnocení použit pár koulí o jmenovitém průměru 20 mm, se známou roztečnou vzdáleností 115.005 mm (Obr. 4.8). Na oba artefakty byla nanášena tenká vrstva titanového nástřiku z důvodu zabránění odlesků.

Snahou bylo, aby měřené veličiny a samotný postup měření co možná nejlépe korespondoval s tzv. acceptance testy (blíže kap. 4.1). Proto byly jako měřené veličiny v našich experimentech zvoleny: U etalonu s koulemi průměry obou kulových prvků, parametr Range (udávající tvarovou chybu prvku – „kulovitost“) a roztečná vzdálenost koulí (viz Obr. 4.60). U válečového etalonu jeho průměr a chyba válcovitosti (viz Obr. 4.61). Ostatní měřené veličiny byly pouze doplňkové a nevstupovaly do statistického vyhodnocení.



Obr. 4.60 Měřené rozměry u kulového etalonu



Obr. 4.61 Měřené rozměry u válcového etalonu

V první fázi byly oba etalony zdigitalizovány za přísného dodržení všech doporučení a postupů měření. Charakteristické hodnoty, podmínky měření a způsob vyhodnocení, které je nutné dodržet (podrobněji popsány také v kap. 4.1.1):

- Senzor a všechny jeho komponenty jsou nastaveny dle specifikace výrobce.
- Před kalibrací je třeba dodržet dobu zahřívání senzoru. Kalibrace musí proběhnout v požadovaných limitech.
- Měření je prováděno s nastavením kvality „high“ a nastavením rozlišení „full“.
- Dobu expozice je třeba zvolit tak, aby byly měřicí snímky správně exponovány.
- Pro polygonizaci (výpočet meshe) je volen postprocessing „Standard“
- Výběr bodů naskenovaného elementu pro následné proložení prvku je realizováno měřicími principy na základě nominální geometrie. Při výpočtu se pracovalo s výběrem bodů na celé ploše prvku, vyjma oblasti cca 1 mm od okrajů.
- Pro účely rozměrů jsou prvky vypočteny metodou nejmenších čtverců (funkce Gaussův BestFit) za použití cca 99,7% všech bodů (použitím filtrace 3 Sigma). Pro GD&T do výpočtu vstupují všechny body výběru v souladu s použitou normou.
- Je třeba dodržet stabilní teplotu a vlhkost, nesmí docházet ke změně světelných podmínek během celého měření.
- Prostředí, ve kterém se provádí měření, musí být bez mechanických vibrací.

Výsledky z prvního měření vstupovaly do dalších experimentů jako referenční a sloužily k porovnání posuzované veličiny (průměr prvku, rozteč apod.) při změně jednoho ze zkoumaných faktorů. Každé měření bylo několikrát opakováno, aby byly vyloučeny náhodné chyby obsluhy. Výsledky byly zprůměrovány a graficky zpracovány.

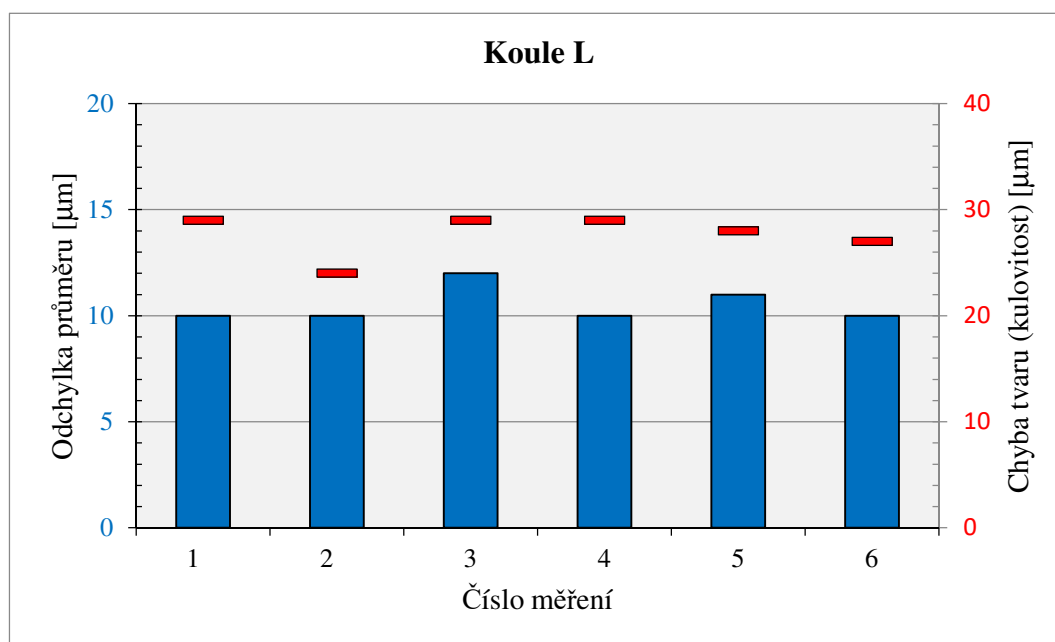
4.5.3 Výsledky měření

4.5.3.1 Referenční měření

Pro referenční měření byly zvoleny ideální podmínky dle pravidel, uvedených v předchozí kapitole. Zkoumané aspekty byly nastaveny též na optimální hodnoty:

- Skener byl temperován na provozní teplotu (min. 20 minut).
- Systém byl před měřením kalibrován s použitím standardizovaného kalibračního etalonu „calibration panel“ dle postupu určeného výrobcem daného zařízení.
- Byly použity originální referenční body $\varnothing$ 3 mm.
- Byl nastaven optimální čas expozice (pro naše podmínky čas závěrky při snímání cca 11 ms).
- Úhel skeneru byl nastaven na 45° vzhledem k horizontální rovině.
- V rámci 360° bylo pořízeno 10 snímků etalonu.

V rámci acceptance testu jsou dle normy prováděna pouze 3 měření (přičemž každé při jiné pozici skeneru). Abychom zvýšili spolehlivost, pro stanovení referenční hodnoty jsme každý etalon digitalizovali celkem 6x. Rozptyl jednotlivých výsledků byl však v řádu maximálně jednotek mikrometrů. Byly vypočítány odchylky jednotlivých sledovaných parametrů (tedy rozdíl mezi rozměrem zjištěným digitalizací v porovnání s nominální hodnotou).



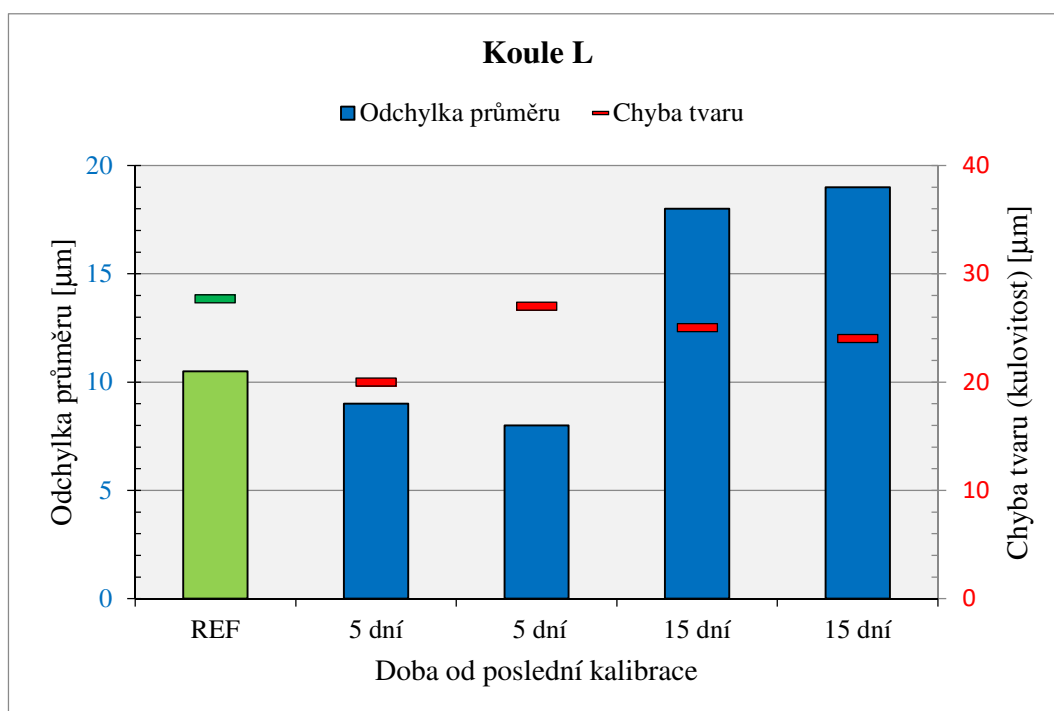
Obr. 4.62 Referenční měření (kulový etalon – levá koule)

Jak je patrné z Obr. 4.62, průměrná odchylka rozměru levé koule byla 10 μm , Range („kulovitost“) 29 μm . Srovnatelné výsledky byly dosaženy pro pravou kouli. Referenční chyba vzdálenosti středu koulí byla 10 μm . Zjištěné údaje korespondují s acceptance testem provedeným se stejným etalonem v rámci kap. 4.1.6.1. U válcového etalonu byly jako reference zjištěny: chyba průměru 21 μm , válcovitost 10 μm . Tyto odchylky zahrnují nejen nedokonalost optické metody snímání, ale i

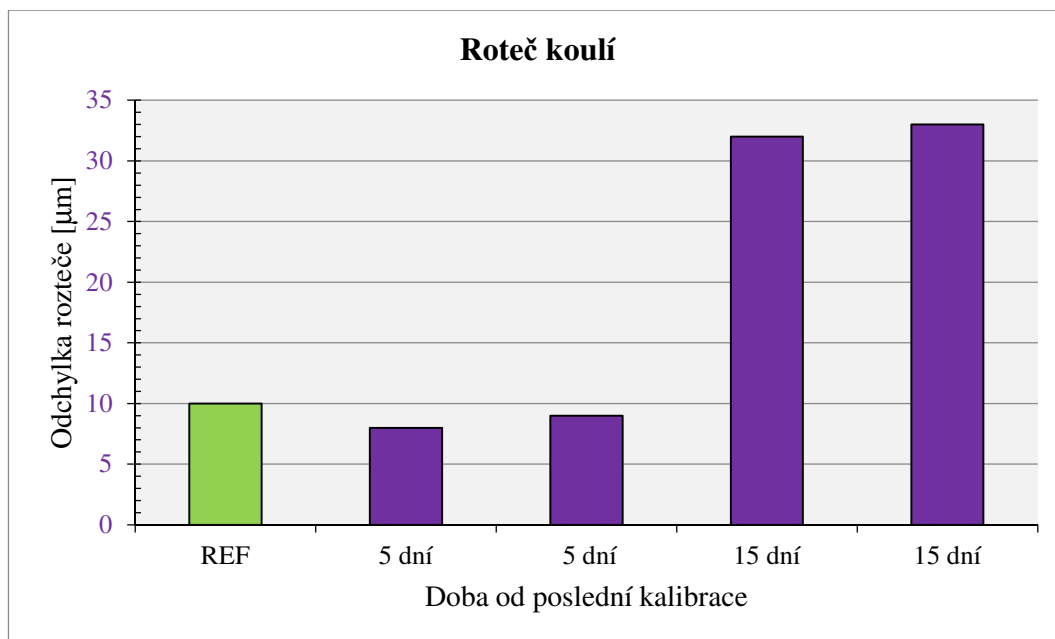
vliv antireflexního nástriku. Jeho tloušťka se dle našeho výzkumu provedeného v kap. 4.4.2 pohybuje pro použitý přípravek (TiO_2) v průměru okolo 8 -12 μm , dle výzkumu jiných autorů v rozmezí cca 5 – 13 μm . To potvrzuje i fakt, že byly naměřeny kladné odchylky průměrů prvků. Podmínky měření i antireflexní nástrih byl v rámci všech experimentů neměnný a nebude tak mít vliv na další experimenty. V následujících experimentech je referenční měření označeno jako „REF“.

4.5.3.2 Kalibrace skeneru

Jak bylo uvedeno v kap. 3.4.1.2, dle výrobce je nutné provádět kalibraci před prvním spuštěním měření s nově nainstalovanou sadou objektivů nebo po změně optiky (výměně objektivů, změně jejich nastavení apod.) Obecně je doporučováno realizovat uživatelskou kalibraci také v pravidelných časových intervalech, po každém transportu zařízení či výraznější změně teploty okolí. Systém rovněž na základě samokontrolních mechanismů dokáže uživatele upozornit, že je skener pravděpodobně dekalibrován (parametr „Intersection deviation“ na Obr. 4.59) a je vhodné uskutečnit novou kalibraci. Funkci je však třeba mít aktivní a musí být používány referenční body. Tyto skutečnosti svádí k tomu, že pokud je skener používán v laboratoři za stálých podmínek a systém sám nehlásí nutnost nové kalibrace, neprovádět kalibraci příliš často. Zkušenosti však ukazují, že doba od poslední kalibrace může mít výrazný vliv na přesnost měření. V rámci našeho experimentu bylo provedeno měření s odstupem 5 a 15 dní od poslední kalibrace. Výsledky pro kulový etalon jsou patrné na následujících grafech. Měření bylo vždy dvakrát opakováno, pro potvrzení výsledku.



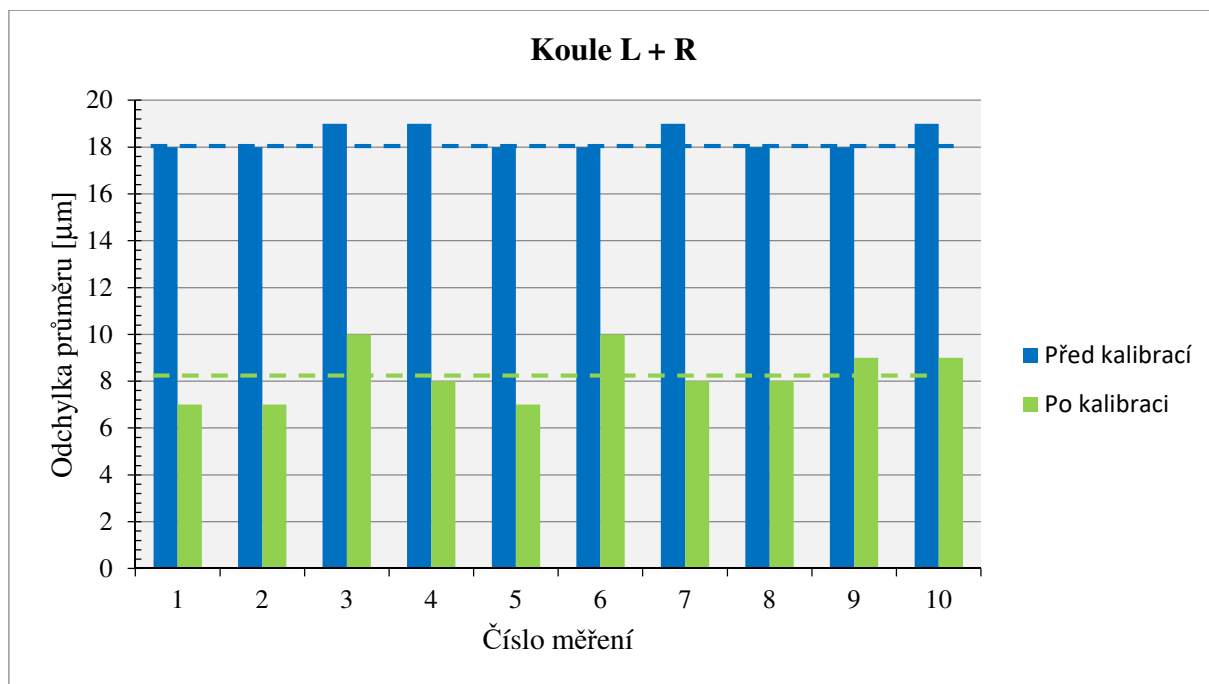
Obr. 4.63 Vliv kalibrace skeneru (kulový etalon – levá koule)



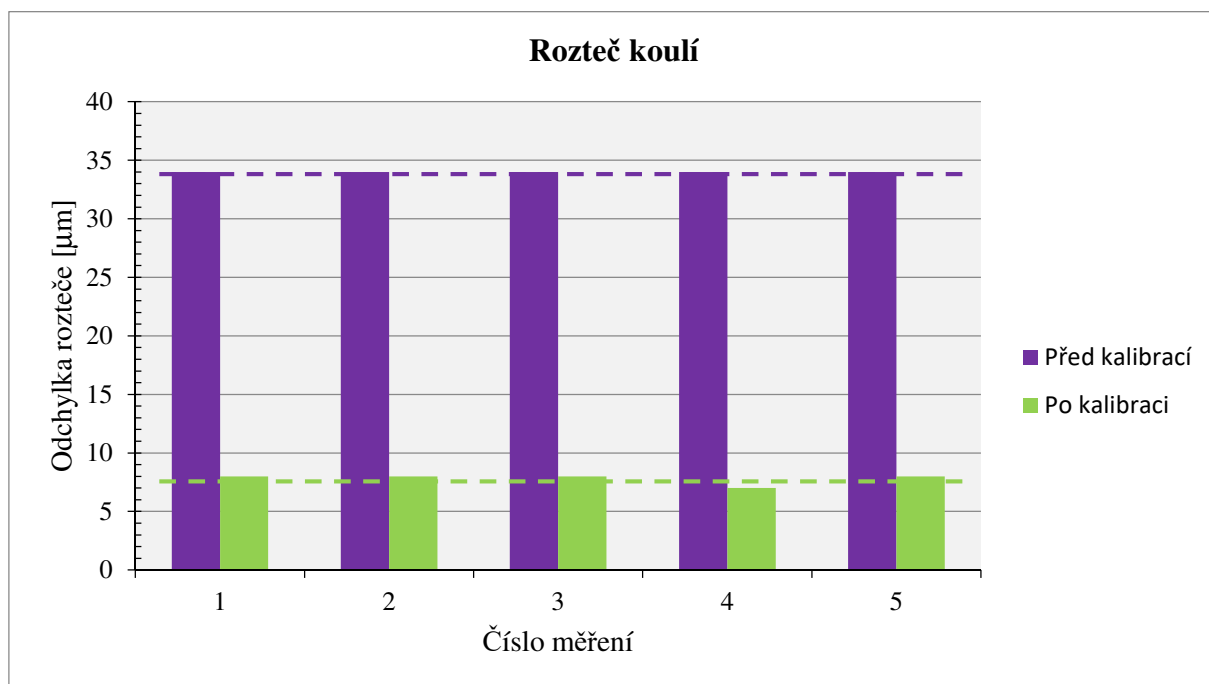
Obr. 4.64 Vliv kalibrace skeneru (kulový etalon – rozteč)

Ukazuje se, že s rostoucím časem od poslední kalibrace dochází k růstu chyby měření jak u malých prvků (chyba průměru koule byla po 15 dnech dvojnásobná), tak u měření na delší vzdálenosti (chyba rozteče koulí byla po stejné době dokonce více než trojnásobná). Tento trend není pravidelný, jindy byl pozorován růst chyby do záporných hodnot. Vliv doby od poslední kalibrace na chybu tvaru prvků se neprokázal.

Potvrzení těchto výsledků dokládá jiný experiment, provedený po delší časové prodlevě podobným způsobem. Nejprve byla provedena digitalizace kulového etalonu na zařízení, u kterého již uběhla doba cca 10 dní od poslední kalibrace. Skener během této doby však nebyl vystaven žádnému výraznému kolísání teplot ani mechanickému namáhání. Přístroj byl po celou dobu v neměnných laboratorních podmínkách, pouze na něm bylo několikrát realizováno měření. Digitalizace byla opakována celkem pětkrát. Poté byla vykonána kalibrace systému dle doporučených postupů a proces digitalizace byl opět pětkrát zopakován. Z každého měření byl vypočítán průměr pravé a levé koule a jejich rozteč. Tyto hodnoty získané digitalizací byly porovnány s nominálními rozměry. Zjištěné odchylky průměrů kuliček jsou uvedeny na Obr. 4.65, odchylka roztečné vzdálenosti na Obr. 4.66.



Obr. 4.65 Vliv kalibrace skeneru (kulový etalon – 5x levá koule, 5x pravá koule)



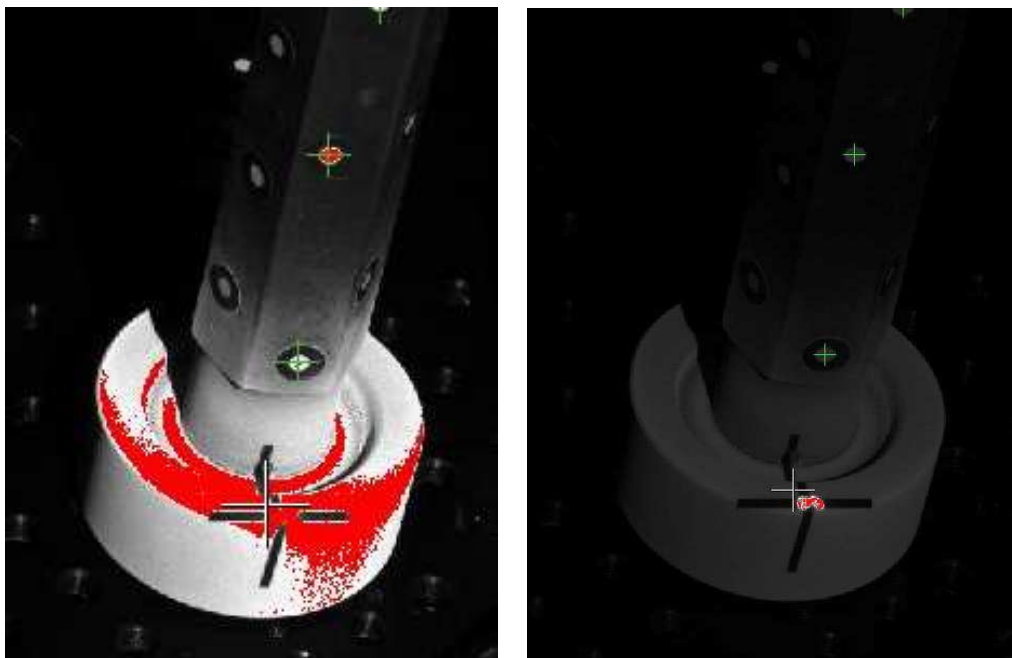
Obr. 4.66 Vliv kalibrace skeneru (kulový etalon – rozteč)

Z uvedených výstupů je zřejmé že výsledky „po kalibraci“ korespondují s referenčním měřením uvedeném v kap. 4.5.3.1. Naměřené hodnoty jsou pro všechna měření velmi stabilní a odchylky mají minimální rozptyl od průměrné hodnoty (čárkovaná přímka). Srovnáním výstupů z čerstvě a dříve kalibrovaného přístroje však ukazují velké rozdíly. U aktuálně zkalibrovaného skeneru byly naměřené rozměry mnohem blíže nominálním hodnotám – chyba byla výrazně menší. Odchylka průměru koule

byla u „kalibrovaného“ systému zhruba 2x menší. V případě rozteče dosahovala chyba „nekalibrovaného“ systému dokonce téměř čtyřnásobku v porovnání s aktuálně kalibrovaným zařízením. Opět se tedy potvrdilo, že pro co nejpresnější měření je nutné provádět kalibraci přístroje co nejčastěji bez ohledu na zdánlivě bezproblémovou funkci přístroje.

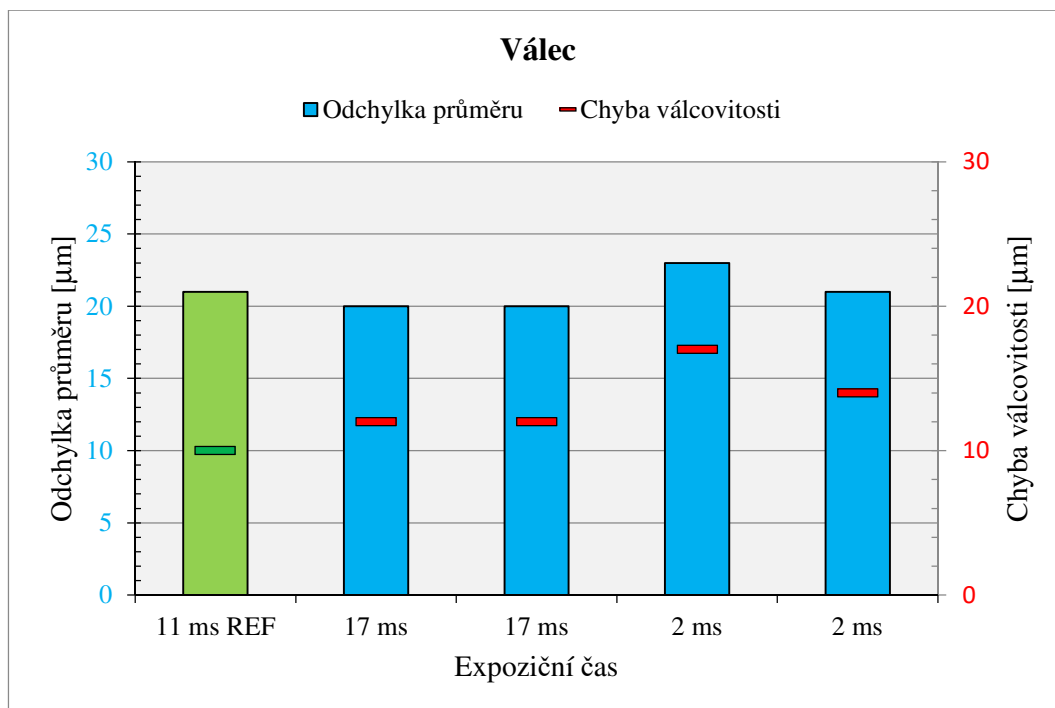
4.5.3.3 Čas expozice

Jak již bylo řečeno, expozici snímků lze ovlivnit změnou času závěrky kamer v řídicím SW skeneru. Optimálně exponovaný objekt je takový, kdy živý pohled na scénu kamerou je dostatečně světlý – kontrastní, ale nevykazuje přexponovaná (přepálená) místa – ty SW zvýrazní červenou barvou (viz Obr. 4.67 vlevo). Tento experiment měl potvrdit nebo vyvrátit, zda špatně nastavená expozice při skenování může mít vliv na přesnost měření. S referenčním vzorkem (měřeným při optimální expozici – čas závěrky 11 ms) bylo porovnáno měření při přexponované (čas expozice 17 ms) a podexponované scéně (čas expozice 2 ms) – viz Obr. 4.67.

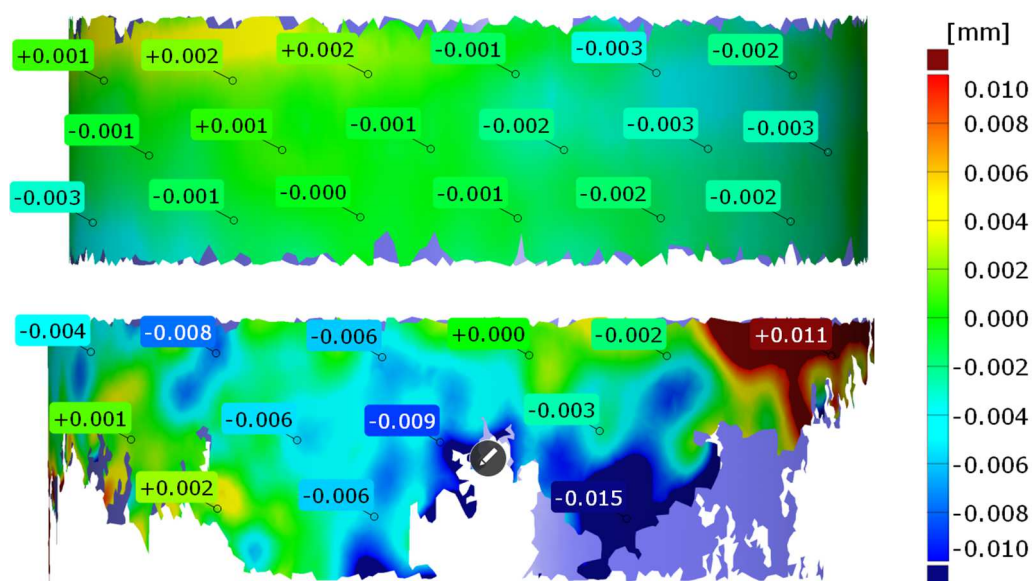


Obr. 4.67 Přexponovaná (vlevo) a podexponovaná (vpravo) scéna – válcový etalon

Jak je patrné z grafu na Obr. 4.68, i poměrně výrazné změny expozice neměly významný vliv na kvalitu a přesnost měření a výsledky se pohybují v blízkosti referenční hodnoty. Jisté problémy mohou nastat za situace, že objekt je tak extrémně přexponován, nebo podexponován, že daná oblast není vůbec nasnímána. V přechodové oblasti pak může dojít k chybné interpretaci dat a narůstá chyba tvaru prvku. To dokládá Obr. 4.69, na kterém je barevná mapa vyjadřující chybu válcovitosti 55 μm pro výrazně podexponovaný objekt (čas expozice 1.3 ms), v porovnání s barevnou mapou správně exponovaného etalonu (11 ms), kde je chyba válcovitosti pouze 10 μm .



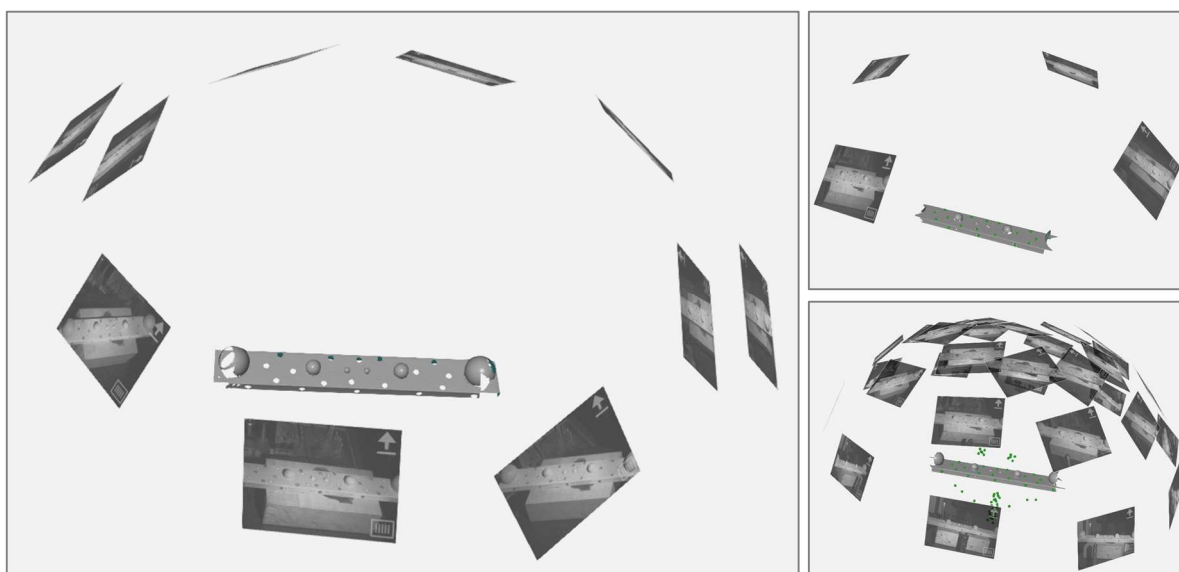
Obr. 4.68 Vliv času expozice (válcový etalon)



Obr. 4.69 Barevná mapa reprezentující chybu válcovitosti (nahore: REF, čas expozice 11 ms; dole: extrémně podexponováno, čas expozice 1.3 ms)

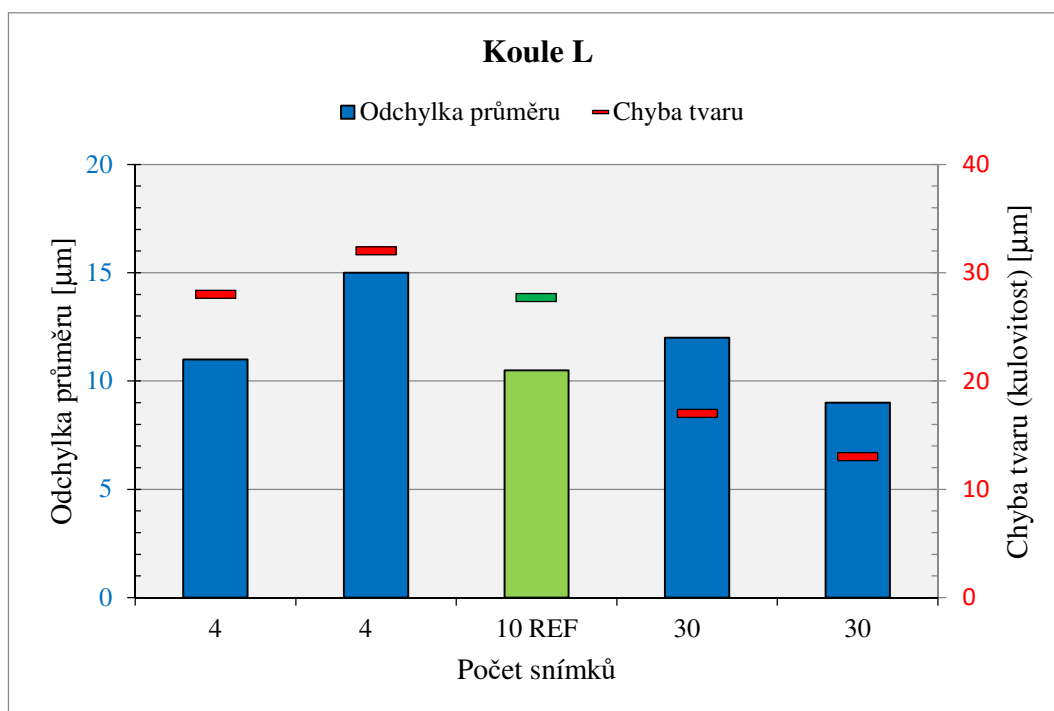
4.5.3.4 Počet snímků

Cílem této analýzy bylo vyšetřit, jak počet snímků, ze kterých je složený výsledný model, ovlivňuje kvalitu tohoto modelu. Nutný minimální počet snímků je v praxi velmi závislý na velikosti a tvarové složitosti měřeného objektu. V našem případě bylo pro kulový etalon jako referenční hodnota zvoleno 10 snímků - v souladu s acceptance testem. Dále bylo provedeno měření se 4 a s 30 snímky rovnoměrně rozmístěnými kolem měřeného objektu (viz Obr. 4.70). Výsledky pro kulový etalon – levou kouli jsou na Obr. 4.71.



Obr. 4.70 Pozice skenování (REF 10 snímků, 4 snímky, 30 snímků)

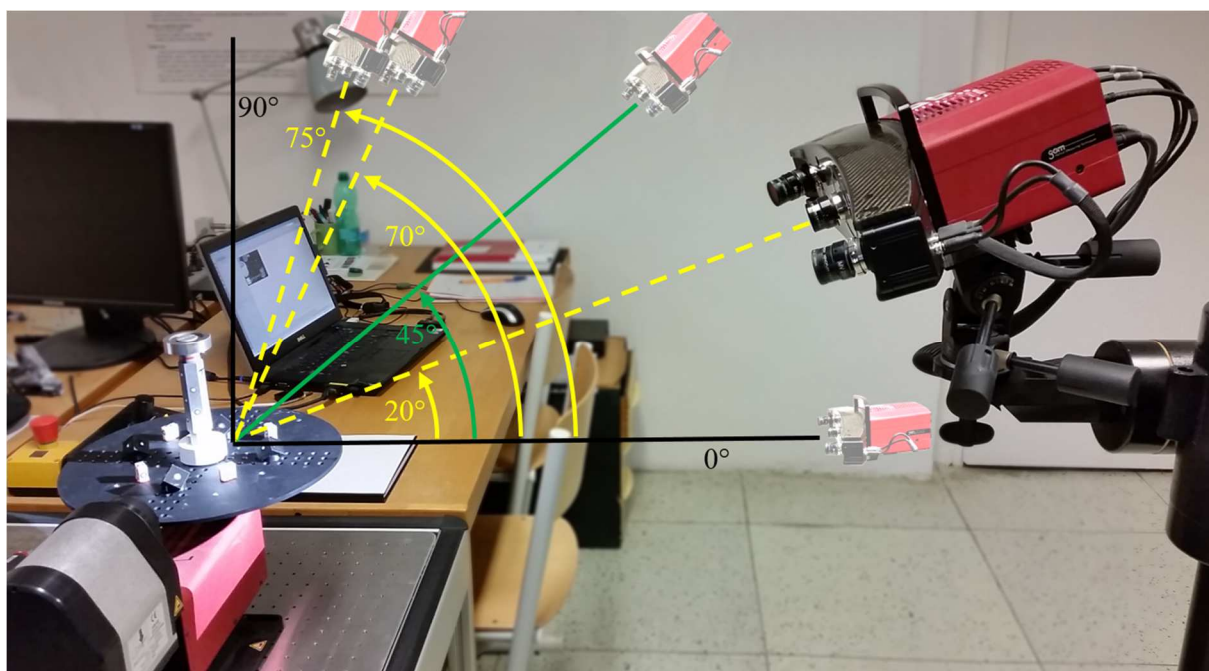
Dle očekávání se potvrdilo, že na rozteč prvků nemá tento parametr žádný vliv. Podobné je to u rozměrových charakteristik prvků (průměr koule, válce), kde bylo možné pozorovat pouze minimální vliv s diskutabilním trendem. Jak je patné z Obr. 4.71, jediné co může počet snímků částečně ovlivnit, jsou hodnoty tvaru prvku. Zatímco referenční vzorek vykazoval chybu kulovitosti 29 μm , s rostoucím počtem snímků klesla chyba téměř na polovinu. U válcovitosti byl však tento pokles méně výrazný.



Obr. 4.71 Vliv počtu snímků (kulový etalon – levá koule)

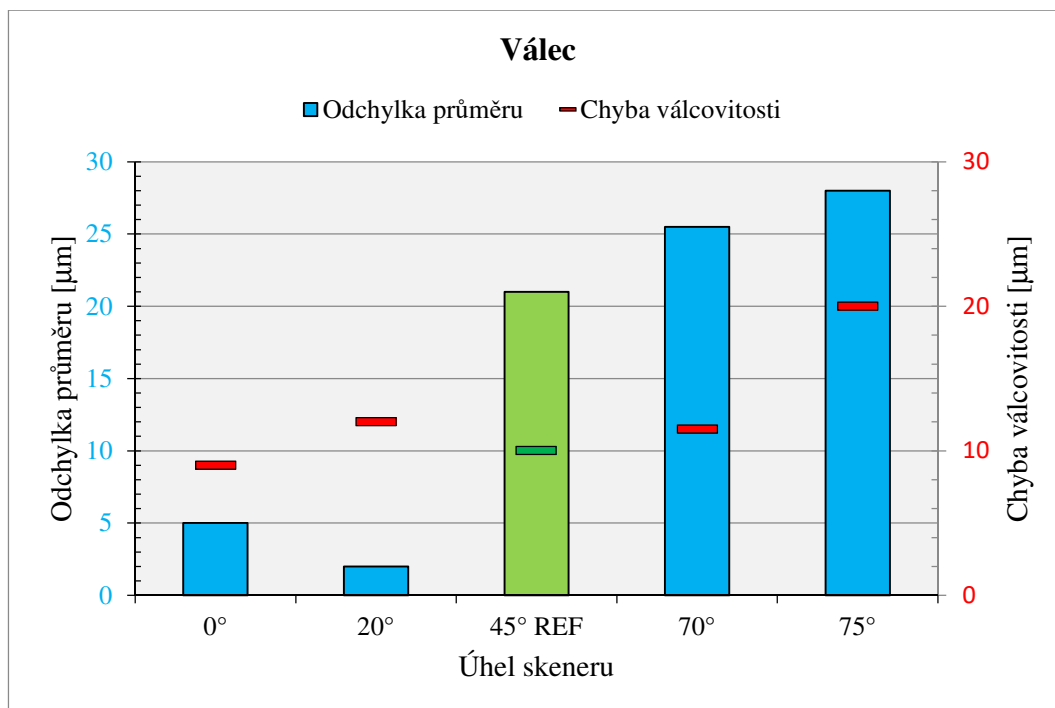
4.5.3.5 Úhel skeneru

V rámci tohoto experimentu byl zkoumán vliv úhlu skeneru vůči skenované ploše na přesnost měření. Výrobce doporučuje nastavení skeneru nejlépe kolmo (0°) nebo max. pod úhlem 60° k měřené ploše. Obecně jsou ale na objektech složitějších tvarů plochy pod různými úhly a tento požadavek není možné dodržet. Z praxe víme, že limitní úhel, kdy ještě dojde k uspokojivému naskenování plochy je cca 70° . V rámci našeho experimentu byl měřen válečkový etalon. Bylo provedeno měření pro úhel 0° (skener kolmo k měřené ploše), 20° , 45° (REF), 70° a 75° (Obr. 4.72).



Obr. 4.72 Úhle skeneru vůči měřené ploše

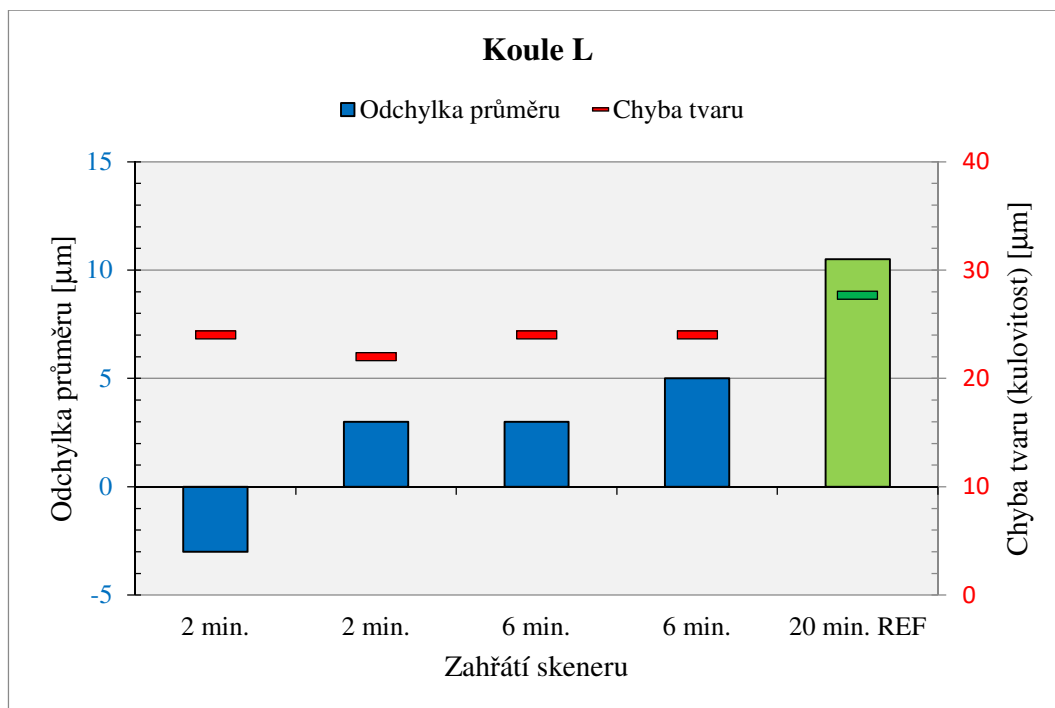
Experiment potvrdil, že až při úhlu nad 70° může dojít k růstu chyby tvaru, jinými slovy, úhel skeneru vzhledem k měřené ploše nemá na tento parametr žádný vliv. Výraznější rozptyl byl zaznamenán u rozměru prvku. Zatímco při úhlech blízkých kolmému pohledu na plochu byla absolutní chyba pod $5\text{ }\mu\text{m}$ (relativní odchylka až $-19\text{ }\mu\text{m}$ od referenční hodnoty), při úhlu 70° , resp. 75° vzrostla na více než $25\text{ }\mu\text{m}$ (relativní odchylka až $6\text{ }\mu\text{m}$ od referenční hodnoty). Referenční vzorek s úhlem 45° vykazoval chybu $21\text{ }\mu\text{m}$ (Obr. 4.73). Odečteme-li však teoretickou vrstvu antireflexního nástriku, zdá se, že právě při měření pod úhlem 45° bylo dosaženo nejpresnější hodnoty (uvažujeme tloušťku nástriku $2 \times 10\text{ }\mu\text{m}$). Chyby jsou však pro všechny pozice skeneru poměrně malé a můžeme prohlásit, že ani na průměr prvku nemá úhel skeneru podstatný vliv.



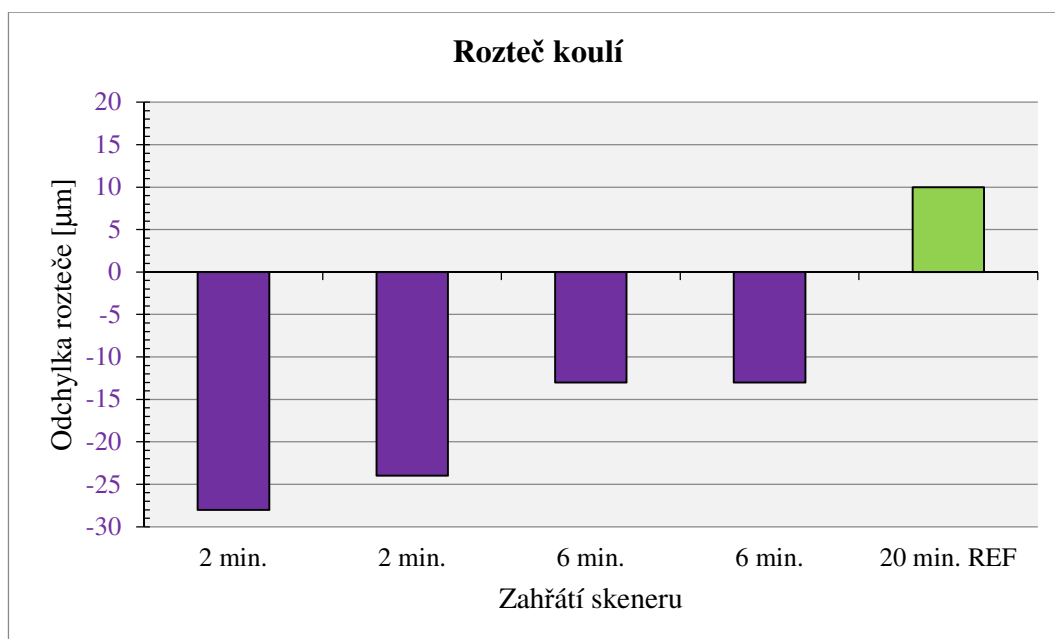
Obr. 4.73 Vliv úhlu skeneru vůči měřené ploše (válcový etalon)

4.5.3.6 Zahřátí skeneru

Po spuštění systému SW upozorňuje uživatele, že je třeba vyčkat cca 20 minut před započítáním měření. Je to čas potřebný na temperování zařízení. Toto však obsluhou bývá nezdědky opomíjeno, a tak nás zajímalo, jestli nedostatečné zahřátí skeneru na provozní teplotu ovlivní výsledky měření. Digitalizace byla provedena na kulovém etalonu v čase cca 2 a 6 minut po zapnutí systému. Výsledky byly opět srovnány s referenční hodnotou, tedy měřením po standardním zahřátí (více než 20 min.). Výsledky jsou uvedeny na Obr. 4.74 a Obr. 4.75.



Obr. 4.74 Vliv doby zahřátí skeneru (kulový etalon – levá koule)



Obr. 4.75 Vliv doby zahřátí skeneru (kulový etalon – rozteč)

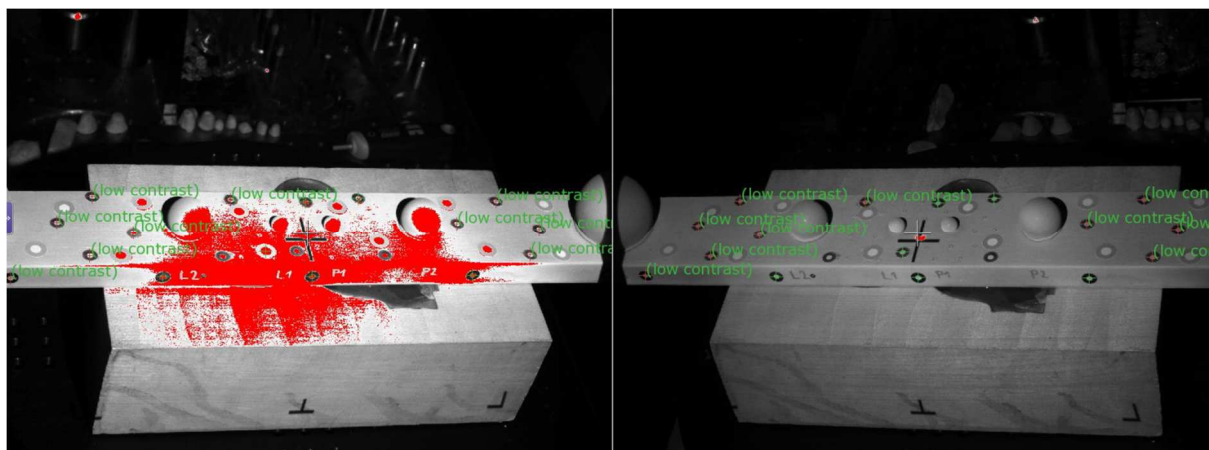
Z výsledků této analýzy je zřejmý poměrně výrazný negativní vliv nedostatečně temperovaného zařízení na výslednou rozměrovou přesnost. Se zkracující se dobou zahřátí systému rostla záporná odchylka průměru koule od referenčních hodnot (až $-13 \mu\text{m}$ při 2 minutách). Z pohledu absolutních chyb se sice může zdát, že odchylka průměru u nezahřátého skeneru je menší než u referenční hodnoty, opět zde ale nesmíme zapomenout na korekci tloušťky matnicího nástřiku. U větších rozměrů byl tento trend ještě markantnější. Při 6 minutách vykazoval rozdíl rozteče vůči referenční hodnotě odchylku $-23 \mu\text{m}$, při 2 minutách dokonce až $-35 \mu\text{m}$. Zde jde již o čistý antireflexním nástřikem neovlivněný rozměr. Pouze na tvar prvku („kulovitost“) neměl tento aspekt žádný vliv.

4.5.3.7 Clona kamer

Jedním z důležitých zásad správného měření je správně seřízený hardware skeneru. Jde například o nastavení vzdálenosti měření, zaostření projektoru a kamer, nastavení clony projektoru a kamer, seřízení polarizačních filtrů apod. Clonu kamer je třeba nastavit nejen na vhodnou hodnotu, ale především mít obě kamery seřízeny stejným způsobem. Seřizovací algoritmus je velmi citlivý a i nepatrný rozdíl ve clonovém čísle mezi levou a pravou kamerou je při seřizování patrný. Protože toto seřizování se v praxi provádí zřídka kdy, zajímalo nás, zda případné rozvážení clony mezi kamerami bude mít vliv na výsledky měření. Za tímto účelem jsme úmyslně zvýšili hodnotu clony pravé kamery o 1 expoziční hodnotu (EV) v porovnání s levou kamerou a při tomto nastavení provedli měření etalonů.



Obr. 4.76 Změna clonového čísla z 8 na 11 pro pravou kameru (+1 EV)



Obr. 4.77 Pohled levé a pravé kamery (rozdíl expozice)

Přestože výrobce tvrdí, že toto seřízení má i při menších změnách výrazný vliv na přesnost měření, v rámci našeho experimentu se překvapivě žádný ze sledovaných parametrů (průměr koule, kulovitost, rozteč koulí) téměř nezměnil a odpovídal s mírnými výkyvy referenční hodnotě.

4.5.3.8 Referenční body

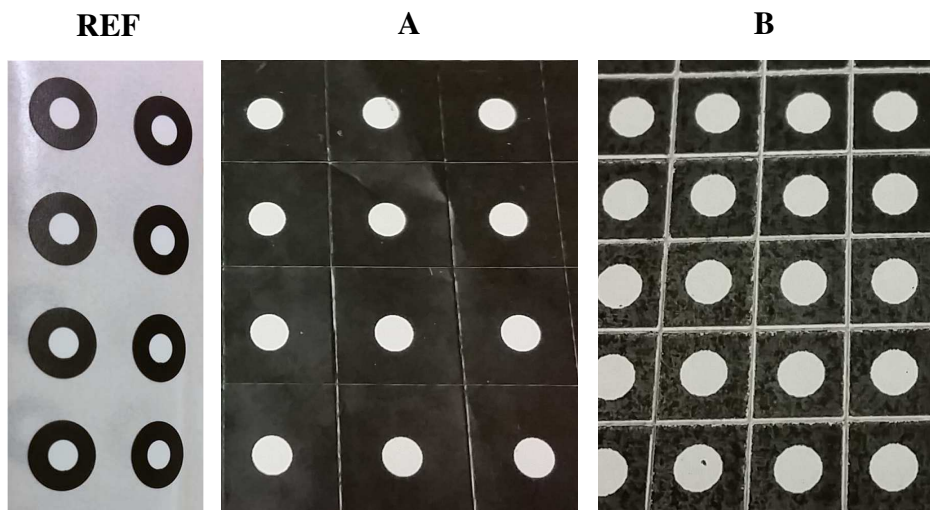
Měření objekt, okolí nebo měřicí přípravek je nutné před vlastní digitalizací opatřit tzv. referenčními značkami. Jsou to samolepící nebo magnetické body definovaného rozměru a geometrie (bílý bod na černém pozadí). Slouží k transformaci jednotlivých snímků do jednoho společného souřadného systému. Rozlišujeme značky kódované a nekódované (viz Obr. 3.44.).

Rozhodující je zvolit vhodnou velikost, která je výrobcem doporučena v závislosti na použitém měřicím objemu a rozlišení kamer. Pro použitý systém a MV 250 je doporučován bod o $\varnothing$ 3 mm. Neméně důležitá je kvalita bodu (podkladový papír, dokonalá kruhovitost bodu, kontrast bílá / černá). Výrobce samozřejmě navrhuje používat jím prodávané originální referenční body, které splňují rozběhovou a tvarovou přesnost. U nich je sice zaručena vysoká kvalita, díky vysoké ceně se však často setkáváme se snahou nahradit tyto značky body vlastní výroby. Cílem tohoto experimentu bylo tedy ověřit, zda kvalita bodu má skutečně zásadní vliv na přesnost 3D digitalizace.

Pro účely experimentu byly zvoleny jednak originální body (REF měření), dále vlastní body o průměru 3 mm vytištěné na laserové tiskárně Konica Minolta Bizhub C35 na velmi kvalitní fotografický papír od firmy Avery Zweckwork (tento papír je dle výrobce odolný vůči vodě i mastnotě a je stálý v rozmezí teplot $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $80\text{ }^{\circ}\text{C}$), a body vytištěné na běžné laserové tiskárně HP LaserJet Pro MFP M125nw na standardní samolepící papír od firmy OCE. Tyto body byly navíc vyrobeny jak v požadovaném průměru 3 mm, tak v průměru o několik desetin menším a větším. Sledován byl také vliv velikosti černého pozadí (viz Tab. 4.15 a Obr. 4.78).

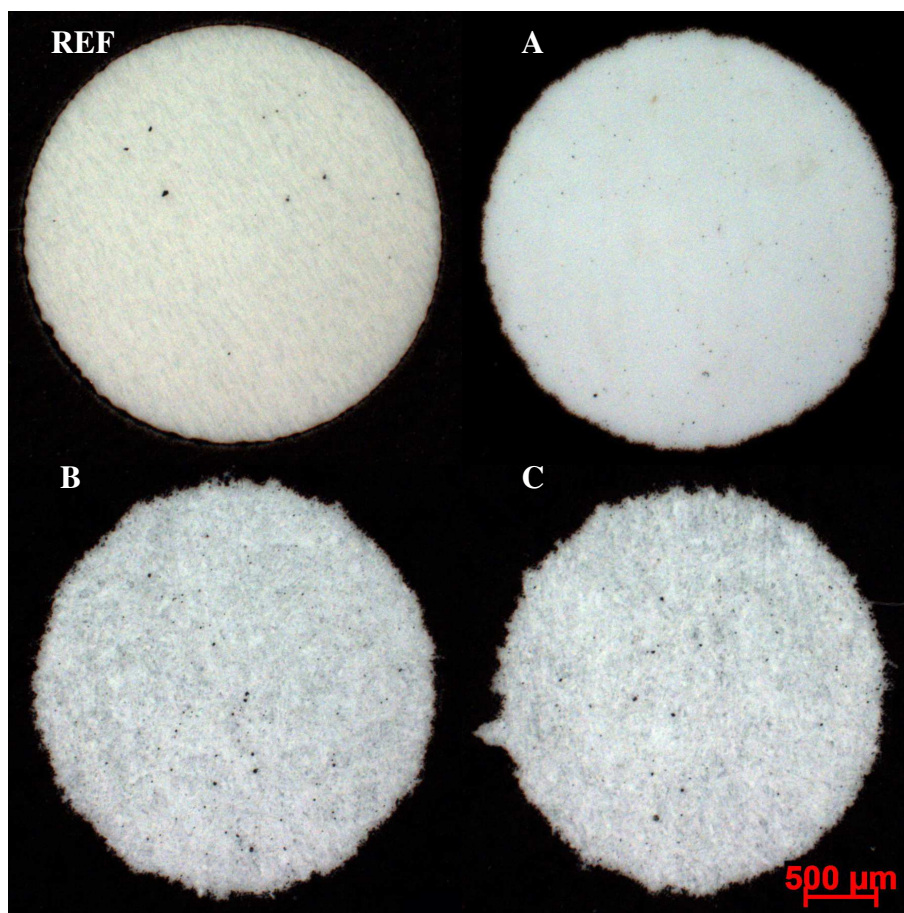
Označení	$\varnothing$ [mm]	Popis
REF	3	Originální bod
A	3	Neoriginální bod, kvalitní papír
B	3	Neoriginální bod, standardní papír
C	2.8	Neoriginální bod, standardní papír, menší průměr
D	3.2	Neoriginální bod, standardní papír, větší průměr
E	3	Stejný jako B, větší plocha černého pozadí

Tab. 4.15 Použité referenční body



Obr. 4.78 Ukázka použitých referenčních bodů (zleva REF, A, B)

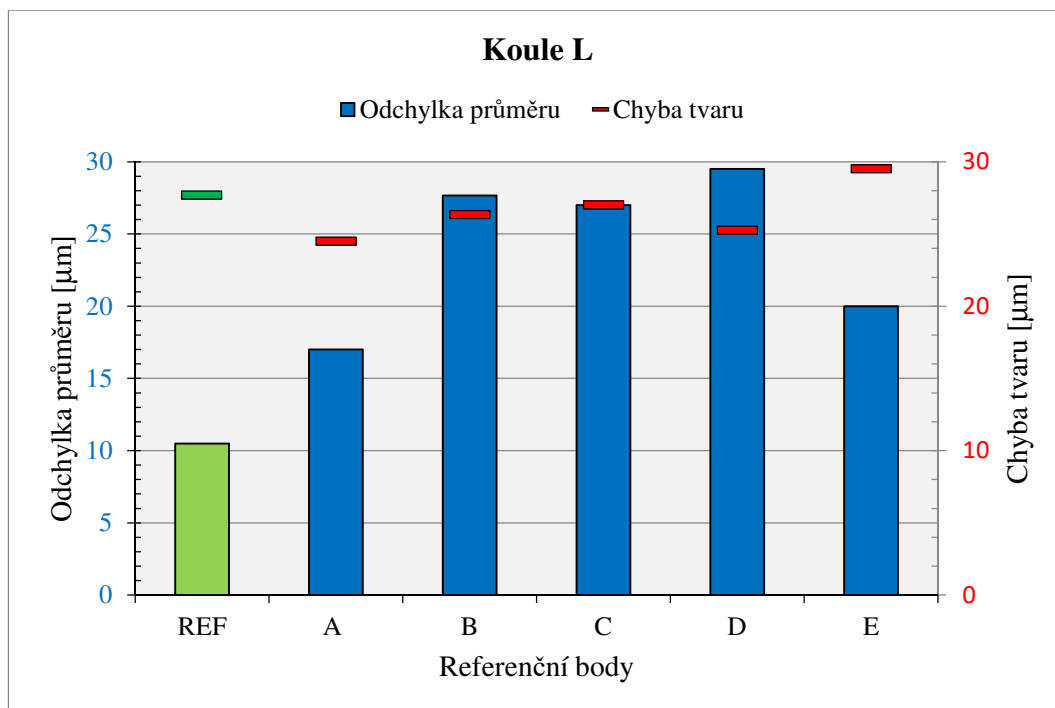
Pro dokladování rozměrů a kvality tisku byly body podrobeny měření na optickém mikroskopu – viz Obr. 4.79.



Obr. 4.79 Referenční body pod optickým mikroskopem

Nezvětšené body vypadají na první pohled všechny velice podobně. Až teprve analýza pomocí optického mikroskopu ukázala markantní rozdíly v kvalitě. Především body vytištěné na obyčejný papír (body B – E) vykazují výrazně neostře kontury (viz Obr. 4.79).

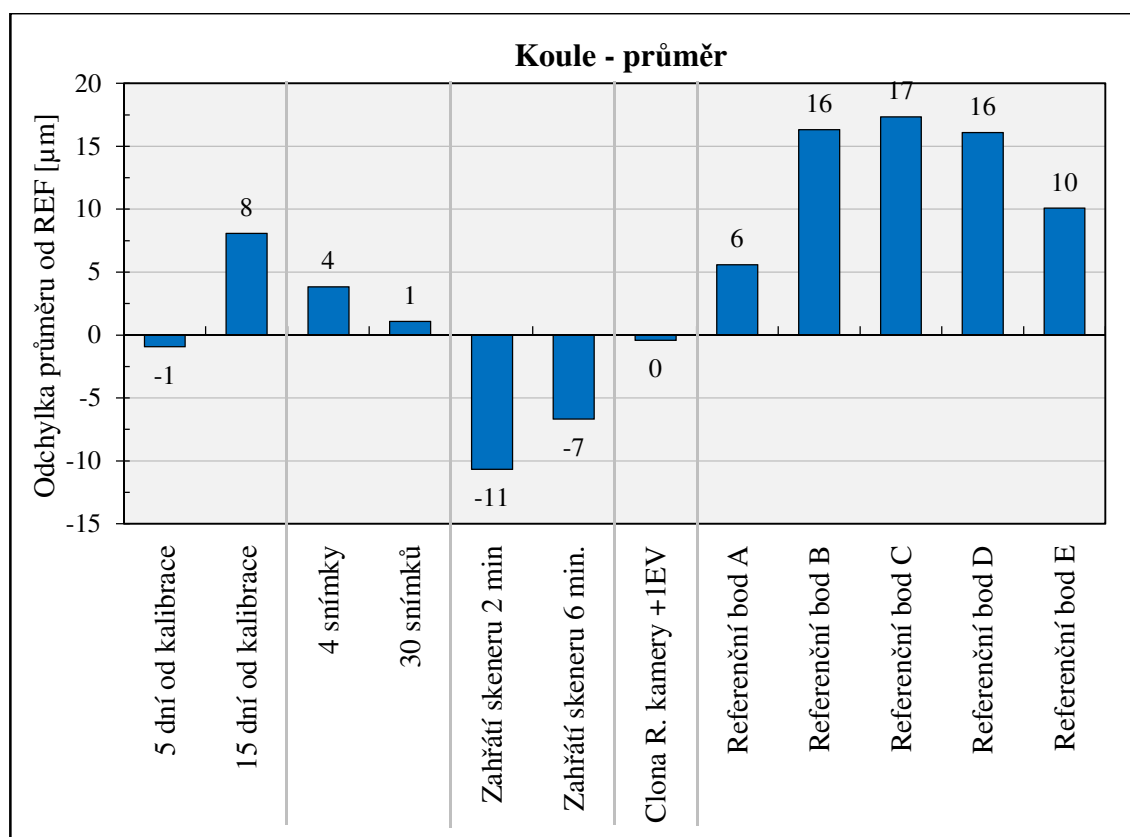
Výsledky této analýzy přinesly zajímavá zjištění. Na tvar prvku (Range – kulovitost) ani na roztečnou vzdálenost neměly použité referenční body žádný vliv. Obě veličiny vykazovaly pro všech 5 „nekvalitních“ bodů maximální odchylku 3 μm od hodnot naměřených při použití originálních bodů. Jiná situace je však u rozměrových hodnot prvků - jak dokládá Obr. 4.80. Odchylka průměru koulí rostla se zhoršující se kvalitou referenčního bodu. Zatímco pro bod A byla vzdálena od referenční hodnoty 7 μm, pro body B – D již kolem 18 μm. Mírné zlepšení lze pozorovat u bodu E, který měl stejné vlastnosti jako body B – D, ale byla použita větší plocha černého pozadí. Z výsledků dále vyplývá, že průměr bodu nemá vliv na žádný sledovaný parametr. Všechny odchylky (a to i průměr koule) u bodů C (Ø 2.8 mm) a D (Ø 3.2) byly srovnatelné s bodem B (Ø 3 mm).



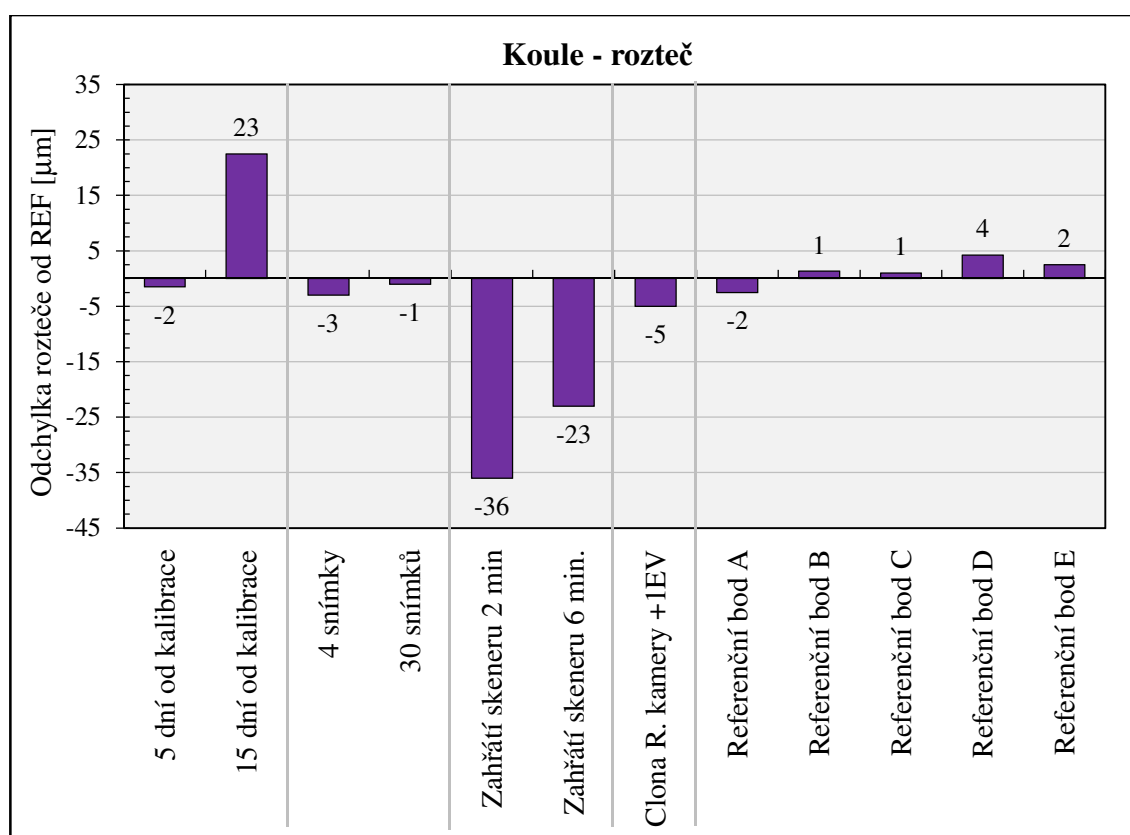
Obr. 4.80 Vliv použitých referenčních bodů (kulový etalon – levá koule)

4.5.3.9 Shrnutí výsledků

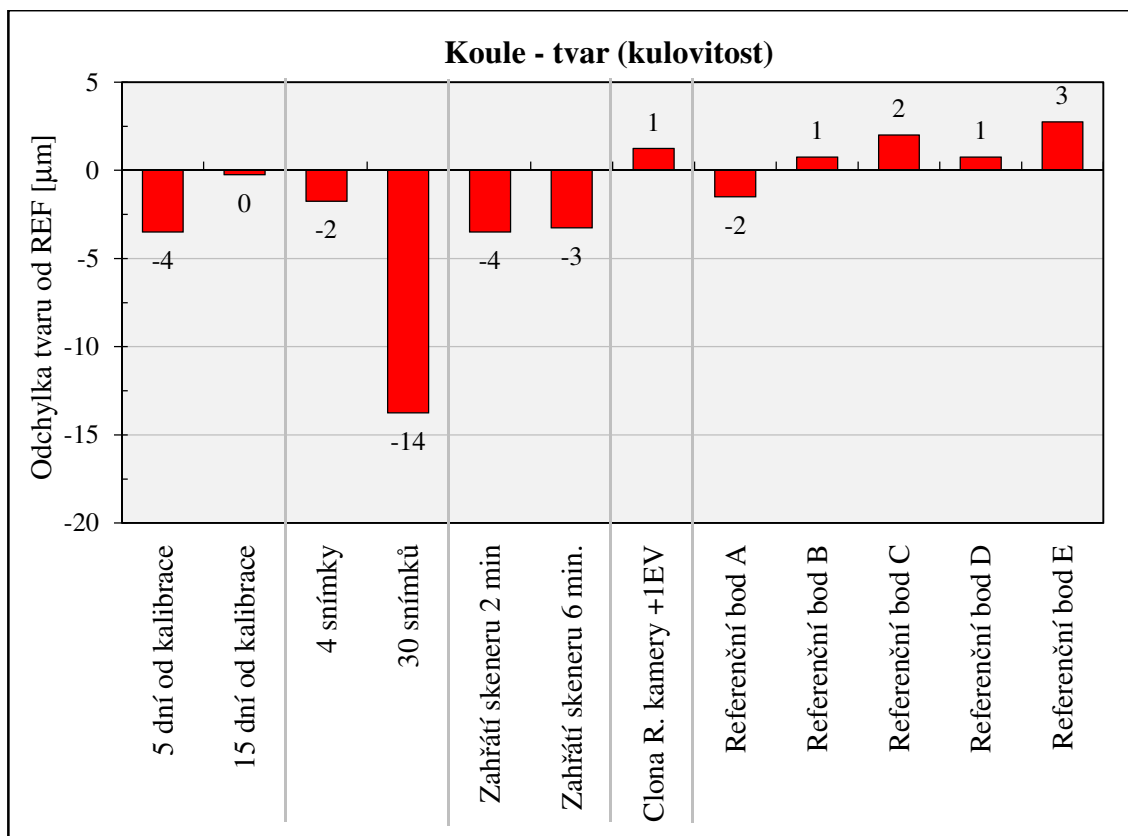
Výsledky všech provedených měření v rámci jednotlivých analýz byly zprůměrovány a byl vždy vypočítán rozdíl mezi touto střední a referenční hodnotou. U kulových prvků byly do výsledného výpočtu zahrnuty údaje zjištěné pro pravou i levou kouli. Celkové shrnutí realizovaných analýz je patrné z dále uvedených grafů.



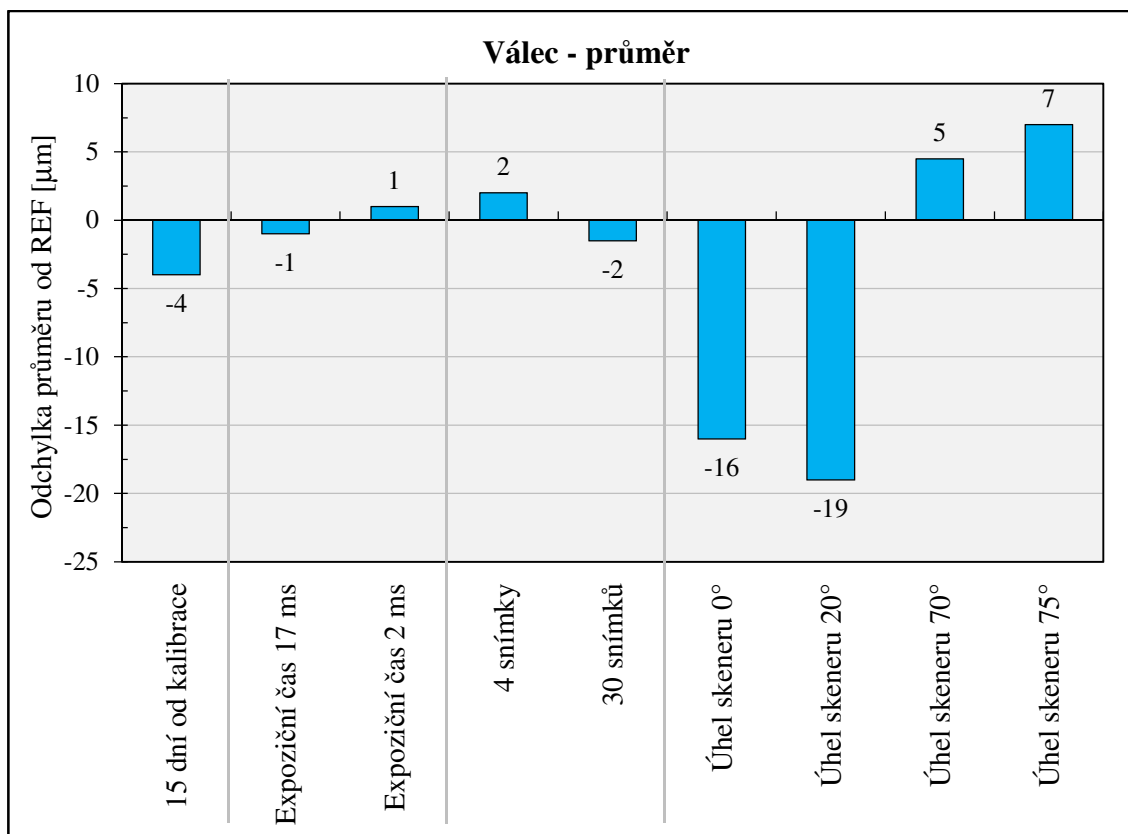
Obr. 4.81 Celkové shrnutí (kulový etalon – průměr koulí)



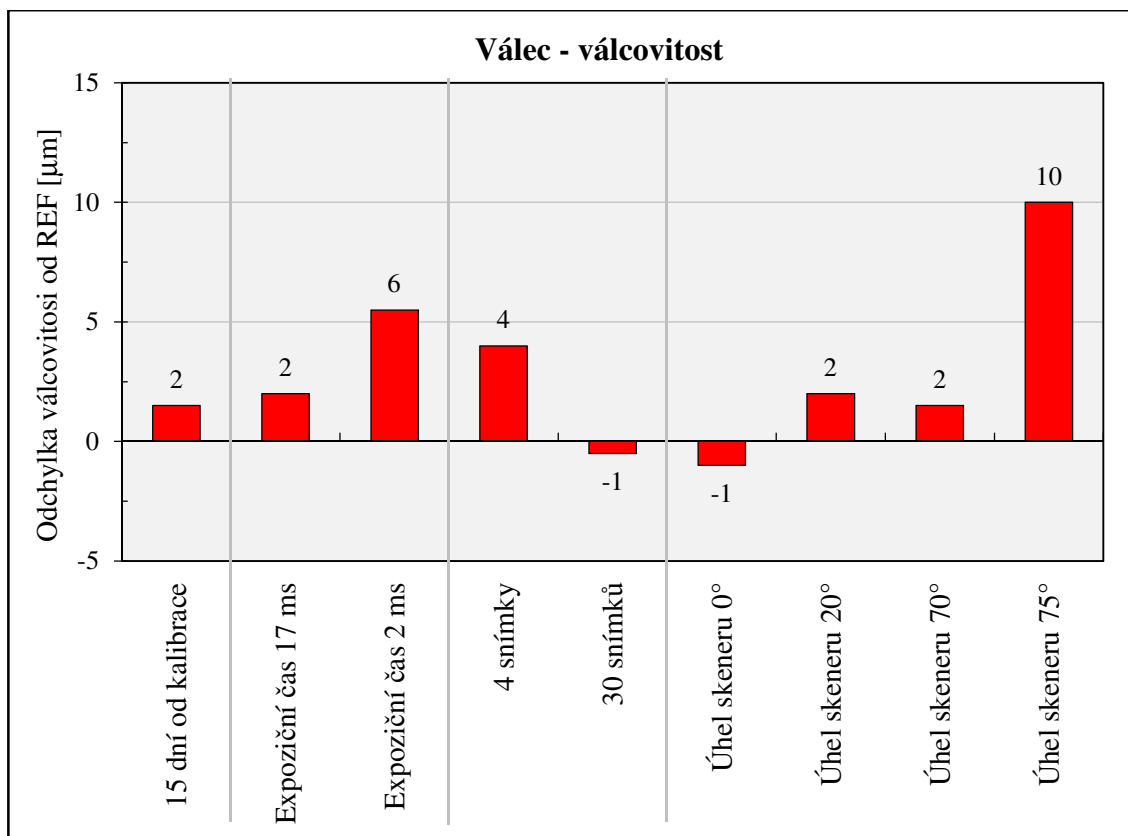
Obr. 4.82 Celkové shrnutí (kulový etalon – roztečná vzdálenost koulí)



Obr. 4.83 Celkové shrnutí (kulový etalon – Range („kulovitost“))



Obr. 4.84 Celkové shrnutí (válcový etalon – průměr válce)



Obr. 4.85 Celkové shrnutí (válcový etalon – válcovitost)

4.5.4 Diskuze

Tato část výzkumu byla zaměřena na komplexní posouzení vlivu různých nastavení a externích podmínek na přesnost optické 3D digitalizace.

Z experimentů vyplynulo, že největší vliv na rozměrovou přesnost prvků (např. průměr koule, válec) mělo nedodržení zásady zahřátí skeneru na provozní teplotu, nepravidelná kalibrace zařízení a použití nekvalitních referenčních bodů (viz Obr. 4.81 a Obr. 4.84). Test s neoriginálními značkami též upozornil na fakt, že pro přesnost měření nemá až tak zásadní význam průměr referenčního bodu, ale především kvalita použitého papíru a tisku. Kalibrace a zahřátí skeneru měly podstatný vliv i na spolehlivost při měření roztečné vzdálenosti koulí (Obr. 4.82). Naopak vliv ostatních zkoumaných parametrů (počet snímků, rozdílná clona mezi levou a pravou kamerou, správnost expozice objektu při měření) se na rozměrovou přesnost neprokával. Výsledek analýzy sledující vliv úhlu skeneru k měřené ploše je diskutabilní. Při uvažování tloušťky antireflexního nástřiku se zdá, že nejpřesnějších hodnot bylo dosaženo okolo úhlu 45°. Naopak při příliš kolmém úhlu docházelo k odchylkám do záporných hodnot od referenční hodnoty.

Ovlivnění tvarových hodnot prvků je téměř u všech sledovaných parametrů zanedbatelný. Pouze výjimečně extrémní hodnoty některého aspektu dokázaly zvrátit stabilní hodnoty válcovitosti nebo „kulovitosti“ (Obr. 4.83 a Obr. 4.85). V jednom případě došlo ke zhoršení válcovitosti při velmi velkém úhlu naklopení skeneru (75° od normály měřené plochy), ve druhém případě mělo zvýšení počtu snímků pozitivní vliv na parametr Range, tedy „kulovitost“. Tvarové charakteristiky jsou podstatně více náchylné na kvalitu antireflexního nástřiku, jak ukázaly předchozí analýzy.

Výsledky uvedeného výzkumu mají význam pro praxi především z pohledu zjištění, že většina parametrů nemá výrazný vliv na přesnost měření a ukazuje vysokou robustnost tohoto systému. Ukázalo se, že měření pomocí optického 3D skeneru ATOS je jen velmi málo náchylné na vliv vnějších faktorů a na chyby obsluhy. Žádný ze sedmi zkoumaných aspektů nedokázal ani při limitní změně nastavení samostatně ovlivnit chybu tvarové či rozměrové přesnosti sledovaných hodnot o více než 30 μm . Na druhou stranu je třeba si uvědomit, že pokud by došlo k nasčítání několika negativních vlivů dohromady, může to mít již významný dopad na spolehlivost měření. Proto je třeba doporučeným zásadám a postupům věnovat dostatečnou pozornost. Pro co nejpresnější měření je nutné především provádět kalibraci přístroje co nejčastěji bez ohledu na zdánlivě bezproblémovou funkci přístroje, je třeba dodržovat čas pro zahřátí skeneru a používat kvalitní referenční body.

4.6 Shrnutí

Praktická část habilitační práce přináší souhrn nejdůležitějších výsledků výzkumu a výstupů experimentálního měření, kterému se autor v posledních letech v oblasti 3D digitalizace věnoval. Výzkum probíhal individuálně nebo v rámci týmového řešení projektové činnosti s kolegy či se studenty. Část dílčích výstupů byla prezentována na mezinárodních konferencích nebo publikována ve vědeckých periodikách, eventuálně byly v dílčí formě uvedeny v závěrečných pracích studentů spolupracujících na daném projektu.

V práci byl představen postup ověřování přesnosti 3D skenerů pomocí tzv. acceptance testu v souladu s normou VDI / VDE 2634. Pro tento účel byl navržen, vyroben a verifikován speciální etalon a kulovými artefakty, celkem pro 3 měřicí objemy skeneru ATOS II. Stejný způsobem je možné postupovat i při verifikaci novějšího systému ATOS III Triple Scan. Experiment potvrdil, že uvedený etalon a kalibrační postup lze bez problémů použít i v nelaboratorních podmínkách. Kromě ověření přesnosti optického 3D skeneru lze navržený etalon použít pro různorodé další testy a experimenty.

V rámci dalšího výzkumu byl sledován vliv různých faktorů a procesních parametrů na kvalitu a přesnost 3D digitalizace. S ohledem na optické vlastnosti povrchu skenovaného dílu byly stanoveny tři skupiny materiálů. Do první skupiny jsou zahrnuty takové materiály, které je možno přesně skenovat bez použití antireflexního nástřiku, druhá skupina obsahuje materiály, které bez nástřiku nelze oskenovat vůbec, a do poslední nejrizikovější skupiny spadají objekty s takovými povrchovými vlastnostmi, kdy je sice možné díl poměrně dobře zdigitalizovat, ale díky částečně průsvitnému povrchu je naskenován ve špatných rozměrech, zpravidla menší. Sem spadají především díly vyrobené 3D tiskem z fotopolymérů. Chyba zachycení povrchu těchto materiálů byla až kolem 0,25 mm směrem do materiálu, což znamenalo, že vnější prvky byly identifikovány s rozměry až o 0,5 mm menší, naopak vnitřní o stejnou hodnotu větší. Vzhledem k tomu, že se potvrdilo, že ani nová generace optického skeneru používající projekční jednotku s modrým LED osvětlením nedokáže v požadované přesnosti bez zmatujících nástřiků velkou část materiálů zdigitalizovat, byl v další fázi experimentů testován vliv antireflexních přípravků na přesnost měření.

Výzkum zkoumající tloušťku nástřiků používaných pro antireflexní úpravu povrchu potvrdil, že pro skenování s vysokou přesností je nejvhodnější použít roztok z titanového prášku, kde se tloušťka vrstvy pohybovala pod 0,01 mm. Jako další velice dobrý přípravek, s tloušťkou vrstvy pod 0,015 mm, byl křídový sprej Helling 3D Anti-Glare-Spray. Naopak zcela nevhodný pro přesné měření je samoodpařovací přípravek Cyclododecan - Spray s tloušťkou vrstvy v průměru 0,1 mm. Množství potřebného prášku bylo také ovlivněno materiálem měřeného objektu. Nejméně nástřiku vyžadují např.

černé plastové díly, kde se síla potřebná pro kvalitní oskenování pohybovala na spodní hranici zjištěného rozmezí, středně silnou vrstvu aplikujeme při skenování lesklých materiálů (např. obrobený kov) a nejsilnější nástřik je nutný u silně lesklých či průhledných objektů (sklo, průhledný plast, chromované díly apod.). Síla vrstvy má vliv nejen na rozměry, ale i na geometrickou přesnost. Ukázalo se, že příliš slabá vrstva nástřiku má negativní vliv na tvarové charakteristiky prvku a může výrazně zkreslit výsledky měření geometrie prvků. Z výzkumu jasně vyplynulo, že je třeba věnovat zvýšenou pozornost rovnoměrnosti a dostatečnému množství antireflexního nástřiku. Je důležité najít kompromis mezi minimální a maximální tloušťkou tak, aby měření nebylo ovlivněno jak nedostatečným nástřikem, kdy hrozí nedokonalé oskenování, nárůst šumu a zvýšení chyby tvaru kontrolovaných prvků, tak zbytečně silnou vrstvou, která naopak výrazněji ovlivní reálný rozměr měřeného objektu. To vyžaduje značnou zkušenost a zručnost obsluhy.

Poslední kapitola praktické části se věnuje mnoha dalším parametrům, které obsluha v rámci procesu digitalizace musí nebo může řídit. Bylo testováno, jak se chovají výsledky měření v závislosti na kalibraci skeneru, nastavení expozičního času při snímání, zda jsou rozměry a tvar výrobku ovlivněny počtem skenů nebo úhlem mezi skenerem a skenovanou plochou, popřípadě špatně nastavenou clonou obou kamer. Také byl sledován vliv doby temperace systému po zapnutí a vliv kvality a rozměru referenčních značek, používaných pro transformaci jednotlivých skenů do společného souřadného systému. Ukázalo se, že systém ATOS je z uživatelského pohledu velmi robustní a pokud obsluha dodrží elementární pravidla a doporučované postupy a současně skenujeme objekt s vhodnými optickými vlastnosti, resp. je povrch správně upraven antireflexním nástřikem, nemělo by dojít k digitalizaci výrobku se špatnými rozměry. Nicméně z pohledu zajištění nejvyšší přesnosti je třeba doporučit především častou kalibraci systému, důsledně dodržovat čas pro zahřátí skeneru na provozní teplotu a používat kvalitní referenční značky.

5 ZÁVĚR

5.1 Vlastní přínos práce

Předložená habilitační práce přináší komplexní a podrobný pohled na problematiku bezkontaktního skenování se zaměřením na využití těchto systémů pro kontrolu rozměrové a tvarové kvality výrobků. Práce v první řadě poukazuje na faktory, které mohou přímo nebo nepřímo ovlivňovat přesnost měření těmito systémy.

V úvodní části je zpracována podrobná rešerše současného stavu poznání, následuje popis principů bezkontaktního snímání a způsobů transformace do společného souřadného systému. Hlavní přínos z hlediska teoretického charakteru je uveden v kapitole pojednávající o faktorech, které mají vliv na přesnost měření. Tato nejrozsáhlejší kapitola teoretické části práce na základě vlastní autorovi zkušenosti krok po kroku definuje jednotlivá úskalí při měření, poukazuje na nejčastější chyby a především vysvětluje správné postupy při digitalizaci a inspekci za pomoci optických skenerů. Probrány jsou otázky výběru vhodného systému pro digitalizaci, jeho seřízení a kalibrace, dále je pozornost věnována parametrům a okolním podmínkám při skenování, správným postupům a strategii při měření. V poslední části této kapitoly je zdůrazněna důležitost korektních postupů při zpracování a vyhodnocení dat. To zahrnuje editaci polygonální sítě, vyrovnání souřadného systému a především správně provedenou inspekci, tedy selekci mraku bodů, volbu metody proložení elementárních prvků a korektní postup při kontrole rozměrů, úhlů a určování tolerancí tvaru a polohy. Kromě poskytnutí teoretického základu pro praktickou experimentální část, mají tyto poznatky a zkušenosti sami o sobě velký význam v edukativní oblasti a mohou být využity jak při výuce této problematiky, tak jako doporučení pro měření v praxi.

Praktická část přináší nové poznatky do problematiky přesnosti měření optických skenerů. Hlavním cílem práce byl výzkum vybraných aspektů ovlivňujících kvalitu a přesnost inspekce s použitím optických 3D skenerů ATOS. Je vysvětlena metodika pro realizaci tzv. Acceptance testu, který je u optických 3D skenerů používán pro verifikaci jejich přesnosti v akreditačních laboratořích. Byl navržen a úspěšně ověřen vlastní etalon pro realizaci tohoto testu. Výsledky provedeného Acceptance testu s využitím tohoto etalonu se v rámci doporučených limitů shodovaly s hodnotami deklarovanými výrobcem systému. Etalon tak byl způsobilý pro použití v dalších fázích experimentů. V těch byl prakticky zkoumán vliv materiálu měřeného obrobku, vliv použitých antireflexních nástřiků a mnoha dalších parametrů na přesnost optické 3D digitalizace. Bylo navrženo a použito mnoho vlastních postupů, které lze analogicky využít při posuzování systémů jiných výrobců. Zjištěné a v práci popsane poznatky a výsledky tak mají přínos jak pedagogického, tak vědeckého charakteru a umožní vyvarovat se chyb při digitalizaci a zajistit vysokou spolehlivost tohoto způsobu inspekce v praxi.

5.1.1 Shrnutí výsledků práce

- **Systematické a komplexní shrnutí poznatků o problematice optické 3D digitalizace**, s detailním zaměřením na faktory, jež mohou mít vliv na přesnost měření.
- **Představení metodiky pro posuzování způsobilosti práce a přesnosti měření optických bezkontaktních systémů** (dle norem VDI/VDE 2634, Acceptance test).
- **Konstrukce etalonu pro realizaci tzv. Acceptance testu v místních laboratorních podmínkách**. Ověření etalonu a porovnání výsledků zkoušky s údaji z akreditované laboratoře.
- **Stanovení přesnosti měření optického 3D skeneru ATOS** (provedení Acceptance testu) pro 3 měřicí objemy a verifikace postupů v místních laboratorních podmínkách.
- **Provedení analýzy přesnosti skeneru ATOS pro 3 měřicí objemy na tvarově členitém objektu, stanovení závislosti skenovatelného detailu na použitém měřicím objemu a rozlišení CCD čipu kamer**. Bylo zjištěno, že pro kvalitní oskenování všech detailů je třeba, aby rozlišení systému bylo ideálně 10x jemnější, než je nejmenší rozměr měřeného prvku.
- **Vliv povrchových vlastností skenovaných vzorků na přesnost digitalizace**. Na základě materiálu a barvy povrchu byly stanoveny 3 základní kategorie: a) modely, které lze bez problému skenovat i bez úpravy povrchu, b) vzorky, které bez úpravy povrchu nelze skenovat vůbec nebo velmi omezeně, c) vzorky, které lze bez úpravy povrchu skenovat, ale s výraznou chybou rozměru. Z pohledu výzkumu použité barvy světla (modré, bílé) projektoru skeneru bylo zjištěno, že při použití modrého spektra sice dochází k mírnému zlepšení co do skenování reflexních povrchů, ale ani skener s tímto typem projekční jednotky nedokáže u velké řady materiálů vytvořit kvalitní nebo přesný sken bez úpravy povrchu pomocí matnících prášků.
- **Vliv matnících nástřiků na přesnost skenování**. Byla provedena analýza tloušťky 7 typů antireflexních nástřiků. Jako nejvhodnější přípravek pro úpravu povrchu byl stanoven oxid titaničitý, u kterého bylo dosaženo nejtenčí vrstvy – průměrně 8 μm , a sprej 3-D Helling s průměrnou tloušťkou 13 μm . Nejslabší tloušťku přípravku vyžadují tmavé matné díly, střední vrstvy je třeba u lesklých povrchů a nejsilnější vrstva je dle zkušenosti a testů třeba u průhledných a vysoce odrazivých materiálů. Dále bylo prokázáno, že nedostatečná vrstva může negativně zkreslit výsledky měření geometrických tolerancí, především tvaru prvku.
- **Vliv nastavení skenovacího procesu a externích podmínek na přesnost optické 3D digitalizace**. Největší vliv na rozměrovou přesnost má nedodržení zásady zahřátí skeneru na provozní teplotu, nepravidelná kalibrace zařízení a použití nekvalitních neoriginálních referencí bodů. Vliv ostatních zkoumaných parametrů (počet snímků, rozdílná clona mezi levou a pravou kamerou, správnost expozice objektu při měření) měl na rozměrovou přesnost zanedbatelný vliv.

5.2 Slovo závěrem

Nejen konvenční měření, ale dnes již poměrně běžná moderní 3D digitalizace jsou jednou z mnoha důležitých složek každého výrobního procesu, často již od fáze návrhu (designu) výrobku, přes ověřování a prvotní prototypovou výrobu až po kontrolu v procesu sériové produkce. Průmyslová výroba by bez užívání metrologických postupů v silném konkurenčním prostředí neuspěla. Proto je nezbytné, aby každý výrobní podnik měl útvar věnující se této problematice. Tak jako ve všech odvětvích, tak i v oblasti měření a kontroly je možné získat konkurenční výhodu kvalifikovaným používáním nejmodernějších zařízení a metod, které zvyšují produktivitu a efektivitu celého výrobního procesu. Důležité je, že nestandardní výstupy z inspekce (specifické měřicí reporty o kvalitě - např. tzv. barevná mapa odchylek od nominálního CAD modelu) prováděné na základě 3D virtuálního modelu naskenovaného dílu se stále častěji dostávají do povědomí kompetentních lidí z oboru a díky tomu se stávají uznávaným standardem při kontrole kvality. V některých oborech je použití optické digitalizace téměř jedinou možností, jak změřit či zdokumentovat artefakt, neboť je nezbytné, abychom se při měření mechanicky měřeného objektu nedotýkali. Jedná se např. o křehké modely, historicky cenná díla, poddajné výrobky nebo objekty svými rozměry velmi velké.

Používání systémů pro bezkontaktní 3D skenování doznalo v posledních letech v oblasti vývoje, inovací, výroby a při zajišťování kvality dílů značného rozvoje. Optická digitalizace se postupně rozšířila z univerzitních laboratoří přes oddělení vývoje nových produktů až do sériové výroby a dílenského prostředí v průmyslovém podniku. Z tohoto důvodu jsou však přístroje častěji a v širším měřítku obsluhovány i méně zkušenými uživateli a možná i proto je pozorovatelný trend výrobců o co možná nejvyšší jednoduchost při řízení skenovacího procesu (ovládání hardwaru), při zpracování naskenovaných dat a při samotné inspekci (obsluhu softwaru). S tím souvisí důraz na vysokou uživatelskou přívětivost systémů, při zachování dostatečné robustnosti a spolehlivosti měřicího procesu. Důsledkem je zvyšující se míra automatizace jednotlivých kroků skenovacího procesu, jednodušší kalibrační procedura a snazší konfigurace systému. Na druhou stranu se mnohdy snižuje možnost detailního nastavení procesních parametrů, což především zkušeným uživatelům znesnadňuje vyšší míru uživatelské editace.

Nové generace přístrojů se zpravidla chlubí vyšší rychlostí skenování, vyšším rozlišením, popřípadě vyšší přesností. Snahou výrobců je také zavádět takové technologie, které by umožňovaly digitalizovat opticky nevhodné objekty bez nutnosti jejich úpravy pomocí antireflexních nástřiků. K tomu jsou využívány např. specifické barvy (vlnové délky) světla projekčních jednotek, objevují se speciální režimy pro rozpoznání a eliminaci odlesků na součásti, nebo pokročilé algoritmy při zpracování obrazu (mraku bodů). Za účelem zvyšování produktivity a účinnosti kontroly je globálním trendem zvyšující se míra automatizace celého inspekčního procesu, tedy jak samotné digitalizace, tak následného zpracování a vyhodnocení naskenovaných dat. Může se jednat o částečnou automatizaci s využitím různých periférií (řízených otočných stolů) či kooperativního robota nebo o plnou robotickou automatizaci, kterou výrobce často dodává tzv. na klíč. Takové řešení lze pak využít např. pro plně automatizovanou kontrolu ve výrobní lince. To přináší změnu myšlení a uspořádání pracovišť ve výrobě. Zatímco v minulosti bylo běžné, že měření probíhalo nezávisle na výrobním taktu v měrové laboratoři, dnes je typické přibližovat měřicí proces výrobě a mít in-line kontrolní pracoviště jako bezprostřední součást výrobní linky. V některých odvětvích průmyslu (např. výroba karoserií automobilů, kritické komponenty vstřikovacích systémů motorů) takto probíhá 100% kontrola všech vyrobených komponent. Pokud budou výrobky kontrolovány v reálném čase přímo ve výrobní lince, lze díky vizualizaci dat a sledování trendů odhalit vznikající problém a odstranit jeho příčinu dříve, než dojde k výrobě zmetků

[3]. Smyslem a cílem těchto kroků je vyšší míra automatizace výrobního procesu, zvýšení kvality a produktivity.

Ve spojitosti se současným a předpokládaným budoucím vývojem optické 3D digitalizace a s rostoucí spolehlivostí a přesností těchto systémů je pravděpodobné, že budou tato zařízení stále více expandovat do mnoha dalších oborů a oblastí lidské činnosti. Dá se předpokládat, že v určitých zjednodušených modifikacích dojde k jejich masovému nasazení i v přístrojích běžné spotřeby. Profesionální systémy budou i nadále nepostradatelnou alternativou konvenčních dotykových způsobů měření a postupně je v mnoha odvětvích zcela nahradí. To povede k dalšímu zvyšování produktivity, flexibility a kvality výroby, stejně tak jako ke zvyšování rychlosti inovace stávajících a vývoje nových produktů [70].

6 LITERATURA

6.1 Seznam použitých zdrojů

- [1] DAVID VALA, David Vala, Zdenek SLANINA a Wojciech WALENDZIUK. Mining Shaft Inspection by Laser Photogrammetry. *Elektronika ir Elektrotechnika* [online]. 2016, **22**(1), 40–43–43 [vid. 2019-05-20]. ISSN 2029-5731. Dostupné z: doi:10.5755/j01.eie.22.1.14109
- [2] KOŠŤÁK, Ondřej. *Kalibrace optických souřadnicových měřicích strojů GOM ATOS*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [3] HRČKA, Marián. Měření v rámci celého výrobního řetězce. *MM Průmyslové spektrum* [online]. nedatováno, (Březen 2019), 40–44 [vid. 2020-01-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-v-ramci-celeho-vyrobniho-retezce.html>
- [4] GOM, mbH. *GOM Acceptance Test (Certificate): Acceptance/Reverification According to VDI/VDE 2634, Part 3*. B.m.: Braunschweig, Germany. 2012
- [5] GOM, mbH. *GOM Acceptance Test – Process Description, Acceptance Test according to the Guideline VDI/VDE 2634 Part 3*. B.m.: Braunschweig, Germany. 2014
- [6] MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. *Obsluha měřicích zařízení - bezkontaktní metody (Učební texty)*. B.m.: Technická univerzita v Liberci. 2015
- [7] MARTÍNEZ, Susana, Eduardo CUESTA, Joaquín BARREIRO a Braulio ÁLVAREZ. Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2010, **46**(5–8), 621–629 [vid. 2020-01-28]. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-009-2106-8
- [8] BRAJLIH, Tomaz, Tadej TASIC, Igor DRSTVENSEK, Bogdan VALENTAN, Miodrag HADZISTEVIC, Vojko POGACAR, Joze BALIC a Bojan ACKO. Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2011, **57**(11), 826–833 [vid. 2019-04-16]. ISSN 00392480. Dostupné z: doi:10.5545/sv-jme.2010.152
- [9] IULIANO, Luca, Paolo MINETOLA a Alessandro SALMI. Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers. *Measurement Science and Technology* [online]. 2010, **21**(10), 105102 [vid. 2020-01-28]. ISSN 0957-0233, 1361-6501. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/21/10/105102
- [10] MARTÍNEZ-PELLITERO, Susana, Eduardo CUESTA, Sara GIGANTO a Joaquín BARREIRO. New procedure for qualification of structured light 3D scanners using an optical feature-based gauge. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2018, **110**, 193–206 [vid. 2019-04-15]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2018.06.002
- [11] CHEN, S., Y.F. LI, J. ZHANG a W. WANLIANG. *Active sensor planning for multiview vision tasks*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-77072-5.
- [12] GORTHÍ, Sai Siva a Pramod RASTOGI. Fringe projection techniques: Whither we are? *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2010, **48**(2), 133–140 [vid. 2020-01-22]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2009.09.001

- [13] BELLOCCHIO, Francesco, N. Alberto BORGHESE, Stefano FERRARI a Vincenzo PIURI. *3D Surface Reconstruction - Multi-Scale Hierarchical Approaches* [online]. New York, NY: Springer New York, 2013 [vid. 2020-01-20]. ISBN 978-1-4614-5631-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4614-5632-2
- [14] SONG, Zhang, ed. *Handbook of 3D machine vision: optical metrology and imaging*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. Series in optics and optoelectronics. ISBN 978-1-4398-7219-2.
- [15] HARDING, Kevin G., ed. *Handbook of optical dimensional metrology*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2013. Series in optics and optoelectronics. ISBN 978-1-4398-5481-5.
- [16] NAVRÁTIL, Robert. *Technologie skenování ve 3D*. 2013. vyd. nedatováno.
- [17] BREUCKMANN, Bernd. 25 Years of High Definition 3D Scanning: History, Start of the Art, outlook. In: *EVA London 2014: Proceedings of the EVA London 2014 on Electronic Visualisation and the Arts*. 2014, s. 262–266.
- [18] CHREN, Tibor. *Optické scanovací systémy*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [19] WEIDNER, Lukáš. *Trojrozměrné skenovací systémy*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [20] SVATÝ, Zdeněk. *Využití fotogrammetrie ve znalecké praxi*. Praha, 2012. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní.
- [21] SALVI, Joaquim, Jordi PAGÈS a Joan BATLLE. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition* [online]. 2004, **37**(4), Agent Based Computer Vision, 827–849 [vid. 2019-06-04]. ISSN 0031-3203. Dostupné z: doi:10.1016/j.patcog.2003.10.002
- [22] SALVI, Joaquim, Sergio FERNANDEZ, Tomislav PRIBANIC a Xavier LLADO. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition* [online]. 2010, **43**(8), 2666–2680 [vid. 2019-06-04]. ISSN 00313203. Dostupné z: doi:10.1016/j.patcog.2010.03.004
- [23] GUPTA, M., A. AGRAWAL, A. VEERARAGHAVAN a S. G. NARASIMHAN. Structured light 3D scanning in the presence of global illumination. In: *CVPR 2011: CVPR 2011* [online]. 2011, s. 713–720. Dostupné z: doi:10.1109/CVPR.2011.5995321
- [24] GUPTA, Mohit, Amit AGRAWAL, Ashok VEERARAGHAVAN a Srinivasa G. NARASIMHAN. A Practical Approach to 3D Scanning in the Presence of Interreflections, Subsurface Scattering and Defocus [online]. 2012 [vid. 2019-06-04]. Dostupné z: doi:10.7916/D82F7Z62
- [25] ĎURIŠ, Miroslav. *Návrh programu pro dekodování vzoru u 3D skeneru s proužkovou projekcí*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [26] ROMANOVSKÝ, Jiří. *3D skener pro výukové účely*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [27] BÁTRLA, Martin. *Výzkumný 3D skener pro účely skenování problematických povrchů*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.

- [28] ZHANG, Yujia a Alper YILMAZ. Structured light based 3D scanning for specular surface by the combination of gray code and phase shifting. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2016, **XLI-B3**, 137–142 [vid. 2019-06-04]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B3-137-2016
- [29] KOBAYASHI, T., T. HIGO, M. YAMASAKI, K. KOBAYASHI a A. KATAYAMA. Accurate and Practical 3D Measurement for Translucent Objects by Dashed Lines and Complementary Gray Code Projection. In: *2015 International Conference on 3D Vision: 2015 International Conference on 3D Vision* [online]. 2015, s. 189–197. Dostupné z: doi:10.1109/3DV.2015.29
- [30] HUANG, Xiao, Jian BAI, Kaiwei WANG, Qun LIU, Yujie LUO, Kailun YANG a Xianjing ZHANG. Target enhanced 3D reconstruction based on polarization-coded structured light. *Optics Express* [online]. 2017, **25**(2), 1173 [vid. 2019-06-04]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.25.001173
- [31] HUANG, Xiao, Yujie LUO, Jian BAI, Ruiqi CHENG, Kejing HE, Kaiwei WANG, Qun LIU, Yupeng LUO a Juan DU. Polarimetric target depth sensing in ambient illumination based on polarization-coded structured light. *Applied Optics* [online]. 2017, **56**(27), 7741–7748 [vid. 2019-06-04]. ISSN 2155-3165. Dostupné z: doi:10.1364/AO.56.007741
- [32] CHIBA, N., S. ARAI a K. HASHIMOTO. Feedback projection for 3D measurements under complex lighting conditions. In: *2017 American Control Conference (ACC): 2017 American Control Conference (ACC)* [online]. 2017, s. 4649–4656. Dostupné z: doi:10.23919/ACC.2017.7963673
- [33] SHENG, Hong, Jing XU a Song ZHANG. Dynamic projection theory for fringe projection profilometry. *Applied Optics* [online]. 2017, **56**(30), 8452 [vid. 2019-06-04]. ISSN 1559-128X, 2155-3165. Dostupné z: doi:10.1364/AO.56.008452
- [34] ZHAO, Huijie, Xiaoyue LIANG, Xiaochun DIAO a Hongzhi JIANG. Rapid in-situ 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2014, **54**, 170–174 [vid. 2019-06-04]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2013.08.002
- [35] RAO, Li a Feipeng DA. High dynamic range 3D shape determination based on automatic exposure selection. *Journal of Visual Communication and Image Representation* [online]. 2018, **50**, 217–226 [vid. 2019-06-04]. ISSN 1047-3203. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvcir.2017.12.003
- [36] FENG, Hsi-Yung, Yixin LIU a Fengfeng XI. Analysis of digitizing errors of a laser scanning system. *Precision Engineering* [online]. 2001, **25**(3), 185–191 [vid. 2020-01-23]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/S0141-6359(00)00071-4
- [37] BOEHLER, Wolfgang, M. Bordas VICENT a Andreas MARBS. Investigating laser scanner accuracy. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2003, **34**(Part 5), 696–701.
- [38] KELLER, Petr. Bezkontaktní měření rovinných rozměrů pomocí metod zpracování digitálního obrazu. In: *XIV gemeinsames Wissenschaftliches Kolloquium TU Dresden - TU Liberec*. Germany: TU Dresden, 2003, s. 7–12. ISBN 3-86005-371-X.
- [39] KELLER, Petr. *Bezkontaktní měření rozměrů zpracováním digitálního obrazu* [online]. Liberec, 2003. Doktorská práce. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38742>

- [40] MARTÍNEZ, S., E. CUESTA, J. BARREIRO a B. ÁLVAREZ. Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2010, **48**(12), 1238–1246 [vid. 2020-01-28]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2010.06.007
- [41] VUKAŠINOVIĆ, Nikola, Drago BRAČUN, Janez MOŽINA a Jože DUHOVNIK. The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2010, **50**(1), 265–274 [vid. 2019-05-21]. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-009-2493-x
- [42] VUKAŠINOVIĆ, Nikola, Marjan KOROŠEC a Jože DUHOVNIK. The Influence of Surface Topology on the Accuracy of Laser Triangulation Scanning Results. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 2010, **56** (2010)(1), 23–30.
- [43] BARBERO, Basilio Ramos a Elena Santos URETA. Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design* [online]. 2011, **43**(2), 188–206 [vid. 2019-03-28]. ISSN 0010-4485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2010.11.005
- [44] MOROVIČ, Ladislav a Peter POKORNÝ. Optical 3D Scanning of Small Parts. *Advanced Materials Research* [online]. 2012, **468–471**, 2269–2273 [vid. 2020-01-24]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.468-471.2269
- [45] MONGON, Bill, Jürgen PFEIFER a Erik KLAAS. What light color should a White-Light-Scanner use? In: *Coordinate Metrology Society Conference*. 2012, s. 11.
- [46] BERNAL, C., B. DE AGUSTINA, M.M. MARÍN a A.M. CAMACHO. Performance Evaluation of Optical Scanner Based on blue LED Structured Light. *Procedia Engineering* [online]. 2013, **63**, 591–598 [vid. 2019-04-15]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.08.261
- [47] VAGOVSKÝ, Juraj, Ivan BURANSKÝ a Augustín GÖRÖG. Evaluation of Measuring Capability of the Optical 3D Scanner. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **100**, 1198–1206 [vid. 2019-04-17]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.01.484
- [48] KURZ, Michael, Thomas ATTIN a Albert MEHL. Influence of material surface on the scanning error of a powder-free 3D measuring system. *Clinical Oral Investigations* [online]. 2015, **19**(8), 2035–2043 [vid. 2019-04-15]. ISSN 1432-6981, 1436-3771. Dostupné z: doi:10.1007/s00784-015-1440-5
- [49] BRAUER-BURCHARDT, Christian, Peter KUHMSTEDT a Gunther NOTNI. Combination of Air- and Water-Calibration for a Fringe Projection Based Underwater 3D-Scanner. In: *Computer Analysis of Images and Patterns: Computer Analysis of Images and Patterns, Proceedings, Part II* [online]. Valletta, Malta: Springer International Publishing, 2015, s. 49–60 [vid. 2020-01-22]. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-319-23116-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-23117-4 5
- [50] KERSTEN, ThomasP., Heinz-Jurgen PRZYBILLA a Maren LINDSTAEDT. Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* [online]. 2016, **2016**(5), 271–283 [vid. 2020-01-24]. ISSN 1432-8364. Dostupné z: doi:10.1127/pfg/2016/0305
- [51] CAMPANELLI, Valentina, Stephen M. HOWELL a Maury L. HULL. Accuracy evaluation of a lower-cost and four higher-cost laser scanners. *Journal of Biomechanics* [online]. 2016, **49**(1), 127–131 [vid. 2020-01-22]. ISSN 00219290. Dostupné z: doi:10.1016/j.jbiomech.2015.11.015

- [52] GERBINO, Salvatore, Domenico Maria DEL GIUDICE, Gabriele STAIANO, Antonio LANZOTTI a Massimo MARTORELLI. On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **84**(9–12), 1787–1799 [vid. 2019-11-21]. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-7830-7
- [53] EIRÍKSSON, E. R., J. WILM, D. B. PEDERSEN a H. AANÆS. Precision and accuracy parameters in structured light 3-D scanning. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2016, **XL-5/W8**, 7–15 [vid. 2020-01-24]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XL-5-W8-7-2016
- [54] MIKÓ, Balázs, István CZÖVEK a Áron HORVÁTH. Investigation of Accuracy of 3D Scanning. In: *MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference: The publications of the MultiScience - XXXI. MicroCAD International Scientific Conference* [online]. B.m.: University of Miskolc, 2017 [vid. 2020-01-21]. ISBN 978-963-358-132-2. Dostupné z: doi:10.26649/musci.2017.082
- [55] FRANKE, Jakub. *Ověření spolehlivosti laserového 3D skeneru*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké čení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [56] KOTERAS, Robert, Michał WIECZOROWSKI, Piotr ZNANIECKI a Natalia SWOJAK. Measurement strategy as a determinant of the measurement uncertainty of an optical scanner. *Archives of Mechanical Technology and Materials* [online]. 2019, **39**(1), 26–31 [vid. 2020-01-23]. ISSN 2450-9469. Dostupné z: doi:10.2478/amt-2019-0005
- [57] CHEN, Long, Yi-Kun XIONG, Sen ZHOU, Ying-Qian NI a Jun XIONG. Development of a calibration device for the optical scanner. In: *Tenth International Conference on Graphics and Image Processing (ICGIP 2018): Tenth International Conference on Graphics and Image Processing (ICGIP 2018)* [online]. B.m.: International Society for Optics and Photonics, 2019, s. 110692Z [vid. 2020-02-03]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2524385
- [58] GIVI, Mehrdad, Luc COURNOYER, Greg REAIN a Brian J. EVES. Performance evaluation of a portable 3D imaging system. *Precision Engineering* [online]. 2019, **59**, 156–165 [vid. 2020-02-03]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2019.06.002
- [59] NÁVRAT, Jakub. *Porovnání měřicích metod pro kontrolu kvality dílů*. Ostrava, 2019. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie.
- [60] MAŘAN, Jakub. *Posouzení hledisek ovlivňujících přesnost 3D optické digitalizace*. Liberec, 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [61] DOKOUPIL, Filip. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké čení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [62] VALINASAB, Behzad. *Atomization-based Spray Coating for Improved 3D Scanning* [online]. Victoria, 2014. Thesis. University of Victoria, Department of Mechanical Engineering. Dostupné z: <https://dspace.library.uvic.ca/handle/1828/5417>
- [63] VALINASAB, Behzad, Maxym RUKOSUYEV, Jason LEE, Junghyuk KO a Martin B.G. JUN. Improvement of Optical 3D Scanner Performance Using Atomization-Based Spray Coating. *Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* [online]. 2015, **24**(1), 23–30 [vid. 2020-01-23]. ISSN 2508-5093. Dostupné z: doi:10.7735/ksmte.2015.24.1.023

- [64] PALOUSEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNY, Josef BEDNAR, Tomas KOUTECKY a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials* [online]. 2015, **40**, 1–9 [vid. 2019-03-28]. ISSN 0925-3467. Dostupné z: doi:10.1016/j.optmat.2014.11.020
- [65] ZEMAN, Jakub. *3D skenování lesklých povrchů*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké čení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [66] HRUBOŠ, David. *Aplikace velmi tenkých zmatňujících nástrůků*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké čení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [67] HRUBOŠ, David, Tomáš KOUTECKÝ a David PALOŠEK. An experimental study for determination of an application method and TiO₂ powder to ensure the thinnest matte coating layer for 3D optical scanning. *Measurement* [online]. 2019, **136**, 42–49 [vid. 2019-05-17]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2018.12.058
- [68] PEREIRA, João Rogério Machado, Ivan DE LIMA E SILVA PENZ a Fabio Pinto DA SILVA. Effects of different coating materials on three-dimensional optical scanning accuracy. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. 2019, **11**(4), 168781401984241 [vid. 2019-04-15]. ISSN 1687-8140, 1687-8140. Dostupné z: doi:10.1177/1687814019842416
- [69] ARIAS COTERILLO, Agustin, Rikardo MINGUEZ GABIÑA, Eneko SOLABERRIETA MENDEZ, Nestor GOICOECHEA LARRACOECHEA, Jokin GOROZIKA BIDAURRATZAGA, Egoitz SIERRA URIA a Javier Ignacio MUNIOZGUREN COLINDRES. Effect of the matte powder coating on the accuracy of the measurement of a conical characteristic by optical techniques. *DYNA-Ingeniería e Industria* [online]. 2019, **94**(1), 209–214 [vid. 2020-02-03]. ISSN 19891490. Dostupné z: doi:10.6036/8897
- [70] MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. 3D skenery pro použití v průmyslu. *AUTOMA - časopis pro automatizační techniku*. 2015, **2015**(12), 34–374. ISSN 1210-9592.
- [71] GOM, mbH. *ATOS Triple Scan, Uživatelská příručka - Hardware, ATOS III Rev. 02*. B.m.: Braunschweig, Germany. 2011
- [72] KÁLOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. *Optické metody měření 3D objektů* [online]. [vid. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [73] Produkty, 3D skenery, ATOS. *MCAE* [online]. [vid. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/kategorie/atos/>
- [74] RASTOGI, Pramod K. *Holographic Interferometry: Principles and Methods*. B.m.: Springer, 2013. ISBN 978-3-540-48078-5.
- [75] HEXAGON - Produkty. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. [vid. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products>
- [76] *Trimble TX6 3D Laser* [online]. [vid. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.trimble.com/3d-laser-scanning/tx6>
- [77] FARO Focus 3D Laser Scanner. *FARO Technologies UK Ltd* [online]. [vid. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.faro.com/en-gb/products/construction-bim-cim/faro-focus/>
- [78] CREAFORM. *Portable & Robot Mounted 3D Scanners and CMM Solutions* | *Creaform* [online]. [vid. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en>

- [79] MCAE, Systems s.r.o. *Základy akvizice, GOM Software 2017, Fotogrammetrie*. B.m.: Kuřim, Česká republika. 2017
- [80] GOM. *ATOS - Industrial 3D Scanning Technology* [online]. [vid. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos.html>
- [81] GOM, mbH. *GOM Inspect Professional 2018 (Direct help)*. B.m.: Braunschweig, Germany
- [82] HOFMAN, Miroslav. *Analýza přesnosti 3D digitalizace s využitím optických skenerů*. Liberec, 2013. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [83] GOM, mbH. Virtual Clamping. In: . B.m.
- [84] DVOŘÁČEK, František. Kurz obecné metrologie a kalibrace měřidel. In: . Technická univerzita v Liberci. 25. leden 2019.
- [85] GOM, mbH. *ATOS Triple Scan - User Manual Hardware, ATOS III Rev. 02*. B.m.: Braunschweig, Germany. 2013
- [86] MCAE, Systems s.r.o. *ATOS 2017*. B.m.: Kuřim, Česká republika. 2017
- [87] Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH. *Kuchařka - Strategie dotykového měření pro souřadnicovou měřicí techniku*. 8. vyd. B.m.: Oberkochen, Germany, nedatováno.
- [88] GOM, mbH. *How to measure the distance between planes - Knowledge Base - GOM Service Area* [online]. [vid. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://support.gom.com/display/KNOWLEDGE/How+to+measure+the+distance+between+planes>
- [89] MENDRICKÝ, Radomír. Determination of Measurement Accuracy of Optical 3D Scanners. *MM Science Journal* [online]. 2016, **2016**(06), 1565–1572. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2016_12_2016183
- [90] Verein Deutscher Ingenieure - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. *VDI/VDE 2634, Part 3. Optische 3-D-Messsysteme Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten*. B.m.: Düsseldorf, Germany. 2018
- [91] FRKAL, Martin. *Návrh kalibračního etalonu pro stanovení přesnosti měření optických 3D skenerů*. Liberec, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [92] *Česká technická norma; Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení; ČSN EN ISO 1101*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. srpen 2017
- [93] SIGMUND, Marek. *Strategie hodnocení odchyly kruhovitosti na třísouřadnicovém měřicím stroji: autoreferát doktorské disertační práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2010. ISBN 978-80-248-2284-6.
- [94] *Redhill Precision Specialty Balls > ISO 3290* [online]. [vid. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.redhillballs.com/north-america/en/company/iso-3290>
- [95] MENDRICKÝ, Radomír. Precision Analysis of Optical 3D Digitisation of Shaped Elements. In: *Applied Mechanics and Materials* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, s. 177–182. Novel Trends in Production Devices and Systems II. ISBN 978-3-03835-313-3. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.693.177

- [96] MENDRICKY, Radomir. Analysis of Measurement Accuracy of Contactless 3D Optical Scanners. *MM Science Journal* [online]. 2015, **2015**(October), 711–716. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2015_10_201541
- [97] MENDRICKY, Radomir a Ondrej LANGER. Influence of the Material on the Accuracy of Optical 3D Digitalisation. *MM Science Journal* [online]. 2019, **2019**(March), 2783–2789 [vid. 2019-03-27]. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019_03_2018121
- [98] LANGER, Ondřej. *Analýza vlivu materiálu obrobku na přesnost optické 3D digitalizace*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [99] LEVÍNSKÁ, Barbora. *Vliv zmatňujících nástřiků na přesnost optické 3D digitalizace*. Liberec, 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [100] MENDŘICKÝ, Radomír. Impact of Applied Anti-Reflective Material on Accuracy of Optical 3D Digitisation. In: *Materials Science Forum* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2018, s. 335–344. Novel Trends in Production Devices and Systems IV. ISBN 978-3-0357-1265-0. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.919.335
- [101] *Oxid titaničitý* [online]. 2020 [vid. 2020-02-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Oxid_titani%C4%8Dit%C3%BD&oldid=18139683
- [102] Dr. Hoffmann. *Oxid titaničitý čistý, 99+%; 250g* [online]. [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.drhoffmann.cz/oxid-titanicity-cisty-99plus-250g-id352.html>
- [103] PAPco, s.r.o. *Ostatní metody a zkoušky* [online]. [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.papco.cz/produkty/ostatni-metody-a-zkousky>
- [104] Helling GmbH. *3-D Laserscanning* [online]. [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.helling.de/en/article/?kategorie=Sichtprfung&id=54&selected=59>
- [105] ARTPROTECT. *Cyklododekan* [online]. Dostupné z: <http://art-protect.cz/wp-content/uploads/2014/12/02-Cyklododekan-Spray.pdf>

6.2 Vybrané vlastní publikace související s řešenou problematikou

- {1} MENDŘICKÝ, Radomír. Optické 3D skenování a jeho využití v praxi. In: *Národní tandemová konference Konstruování - Green Engineering: Národní tandemová konference Konstruování - Green Engineering. Sborník příspěvků*. Liberec: TU v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-937-0.
- {2} MENDŘICKÝ, R.: *Výzkum 3D tvarů dílů automobilového zámku s využitím optických metod měření*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2012.
- {3} ZELENÝ, Petr, Radomír MENDŘICKÝ a Jiří ŠAFKA. Využití metod Reverse Engineering v oblasti módního designu. In: *The 7th International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow: Proceedings of 7th Annual International Conference 2013 Manufacturing Systems Today and Tomorrow*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. ISBN 978-80-7494-024-8.
- {4} MENDŘICKÝ, R., LACHMAN, M., KELLER, P., ZELENÝ, P., ŠAFKA, J.: *Technická pomoc při projektech: Analýza možných řešení montáže PUR těsnění na automobilové karoserie*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2013.
- {5} MENDŘICKÝ, R.: *Výzkum tvarové a rozměrové přesnosti nástřiku automobilových skel s využitím optických metod měření*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2013.
- {6} KELLER, Petr, Radomír MENDŘICKÝ, Petr ZELENÝ a Přemysl POKORNÝ. Porovnání metod 3D měření a digitalizace rozměrů strojních součástí. In: *The 8th International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow: Proceedings of 8th Annual International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow 2014*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-150-4.
- {7} MENDŘICKÝ, Radomír. Optické 3D skenování a jeho využití v praxi. In: *The 8th International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow: Proceedings of 8th Annual International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow 2014*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-150-4.
- {8} MENDŘICKÝ, Radomír. Precision Analysis of Optical 3D Digitisation of Shaped Elements. In: *Applied Mechanics and Materials* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, s. 177–182. Novel Trends in Production Devices and Systems II. ISBN 978-3-03835-313-3. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientificc.net/AMM.693.177
- {9} MENDŘICKÝ, Radomír. Use of Optical Methods for Dimensional Analysis of Multi-Part Moulds. In: *Applied Mechanics and Materials* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, s. 387–392. Novel Trends in Production Devices and Systems II. ISBN 978-3-03785-944-5. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientificc.net/AMM.474.387

- {10} MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. Precision Analysis of Part Manufacturing Using SLM Method. In: *Applied Mechanics and Materials* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, s. 183–188. Novel Trends in Production Devices and Systems II. ISBN 978-3-03835-313-3. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.693.183
- {11} ŠAFKA, Jiří, Radomír MENDŘICKÝ a Petr ZELENÝ. Use of Reverse Engineering Methods in the Field of Fashion Design. In: *Applied Mechanics and Materials* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, s. 189–194. Novel Trends in Production Devices and Systems II. ISBN 978-3-03835-313-3. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientificc.net/AMM.693.189
- {12} MENDŘICKÝ, R.: *Vliv galvanického pokovování na deformaci plastových výlisků*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2014.
- {13} MENDŘICKÝ, R.: *Výzkum tvarové a rozměrové přesnosti nástřiku automobilových skel s využitím optických metod měření 2*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2014.
- {14} MENDŘICKÝ, R.: *Analýza tvarové přesnosti problematických partií automobilového zámku s využitím optických metod měření*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2014.
- {15} DRÁTOVNÍK, Karel a Radomír MENDŘICKÝ. Zpracování strojních součástí pomocí reverzního inženýrství. In: *The 9th International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow: 9th Annual International Scientific Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow 2015*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-256-3.
- {16} KELLER, Petr a Radomir MENDRICKY. Parameters influencing the precision of SLM production. *MM Science Journal* [online]. 2015, **2015**(03), 705–710. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2015_10_201540
- {17} MENDRICKY, Radomir. Analysis of Measurement Accuracy of Contactless 3D Optical Scanners. *MM Science Journal* [online]. 2015, **2015**(October), 711–716. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2015_10_201541
- {18} MENDŘICKÝ, Radomír. Using Contactless Scanners for Quality Inspection. In: *Laboratorní metody: Proceedings of the conference Laboratory Methods*. Liberec: ReproArt Liberec s.r.o., 2015, s. 70–73.
- {19} MENDŘICKÝ, Radomír. Výzkum geometrické přesnosti nástřiku automobilových skel. In: *The 9th International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow: 9th Annual International Scientific Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow 2015*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-256-3.
- {20} MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. 3D skenery pro použití v průmyslu. *AUTOMA - časopis pro automatizační techniku*. 2015, **2015**(12), 34–374. ISSN 1210-9592.

- {21} ŠAFKA, Jiří, Radomír MENDŘICKÝ, Michal ACKERMANN a Daniel TUHÁČEK. Shape and size accuracy of 3D-printed ALSi12 parts. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2015, **21**(4), 278–284. ISSN 1335-1532.
- {22} MENDŘICKÝ, R. *Analýza tvarové přesnosti svařence hlavové opěrky s využitím optických metod měření*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2015.
- {23} MENDŘICKÝ, R. *Inspekce tvaru ozdobné lišty automobilového skla*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2015.
- {24} MENDŘICKÝ, R. *Rozměrová optimalizace kavity formy pro výrobu krycích lišt*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2015.
- {25} MANLIG, František, František KOBLASA, Radomír MENDŘICKÝ, Petr KELLER, Petr ZELENÝ, Radek VOTRUBEC a Michal MOUČKA. Na cestě ke vzdělávání 4.0. *Control Engineering*. 2016, **84**(5), 32–37. ISSN 1896-5784.
- {26} MENDRICKY, Radomir. Accuracy Analysis of Additive Technique for Parts Manufacturing. *MM Science Journal* [online]. 2016, **2016**(05), 1502–1508. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2016_11_2016169
- {27} MENDRICKY, Radomir. Determination of Measurement Accuracy of Optical 3D Scanners. *MM Science Journal* [online]. 2016, **2016**(06), 1565–1572. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2016_12_2016183
- {28} MENDŘICKÝ, Radomír. Using Contactless Scanning for Quality Control of Automotive Parts. In: *Materials Science Forum* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2016, s. 324–333. Novel Trends in Production Devices and Systems III. ISBN 978-3-03835-728-5. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.862.324
- {29} MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. *Operation of measuring equipment, Contact-less methods*. Education materials. B.m.: Vysokoškolský podnik Liberec. prosinec 2016. Rozsah: 27 pages.
- {30} MENDŘICKÝ, R. *Výzkum přesnosti výroby automobilových skel s využitím optických metod měření*. [souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2016.
- {31} MENDŘICKÝ, R. *Analýza tvarové přesnosti výrobků s využitím optických metod měření*. [souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2016.
- {32} MANTADA, Phaneendra, Radomir MENDRICKY a Jiri SAFKA. Parameters Influencing the Precision of Various 3D Printing Technologies. *MM Science Journal* [online]. 2017, **2017**(05), 2004–2012 [vid. 2019-03-27]. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2017_12_201776
- {33} MENDŘICKÝ, Radomír. Using Contactless Scanners for Quality Inspection. In: *MATEC Web of Conferences* [online]. B.m.: France: EDP Sciences, 2017, s. 4 pages. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20178901011

- {34} MENDŘICKÝ, Radomír. Výzkum v oblasti 3D digitalizace a reverzního inženýrství realizovaný v rámci závěrečných prací na Katedře výrobních systémů a automatizace. In: *The 10th International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow: 10th Annual International Scientific Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow 2017*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017. ISBN 978-80-7494-370-6.
- {35} ŠAFKA, J., R. MENDŘICKÝ a M. ACKERMANN. *Analýza zhodnocení výrobní přesnosti 3D tiskáren pro dentální aplikace*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2017.
- {36} DOSTALOVA, T., M. KASPAROVA, P. KRIZ, S. HALAMOVA, M. JELINEK, P. BRADNA a R. MENDRICKY. Intraoral scanner and stereographic 3D print in dentistry—quality and accuracy of model—new laser application in clinical practice. *Laser Physics* [online]. 2018, **28**(12), 125602 [vid. 2019-03-27]. ISSN 1054-660X, 1555-6611. Dostupné z: doi:10.1088/1555-6611/aae067
- {37} MENDRICKY, Radomir. Aspects Affecting Accuracy of Optical 3D Digitization. *MM Science Journal* [online]. 2018, **2018**(March), 2267–2275. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2018_03_2017106
- {38} MENDŘICKÝ, Radomír. Impact of Applied Anti-Reflective Material on Accuracy of Optical 3D Digitisation. In: *Materials Science Forum* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2018, s. 335–344. Novel Trends in Production Devices and Systems IV. ISBN 978-3-0357-1265-0. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.919.335
- {39} SONI, Rakeshkumar D. a Radomír MENDŘICKÝ. Dimensional stability of parts manufactured by additive technology. In: *Studentská vědecká a odborná činnost 2018: Studentská vědecká a odborná činnost 2018: Strojírenství*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2018, s. 91–100. ISBN 978-80-7494-412-3.
- {40} SRIKANTHAN, Aravindprasad, Radomir MENDRICKY a Petr KELLER. Development of Reverse Engineering Methodology for the Production of Machine Part. *MM Science Journal* [online]. 2018, **2018**(October), 2429–2435. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2018_10_2017116
- {41} ACKERMANN, Michal, Jiří ŠAFKA, Lukáš ČAPEK, Jiří BOBEK a Radomír MENDŘICKÝ. Selective laser melting technology and individual Ti-6Al-4V implants. *MM Science Journal* [online]. 2019, **2019**(June), 2867–2871 [vid. 2019-03-27]. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019_06_2018123
- {42} DOSTALOVA, Tatjana, Magdalena KASPAROVA, Karel CHLEBORAD, Miroslav JELÍNEK, Pavel BRADNA a Radomir MENDRICKY. Intraoral scanner and stereographic 3D print in orthodontics. In: *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE: Lasers in Dentistry XXV* [online]. San Francisco, California, United States: SPIE, 2019. ISBN 978-1-5106-2356-9. Dostupné z: doi:10.1117/12.2507233

- {43} MENDRICKY, Radomir a Ondrej LANGER. Influence of the Material on the Accuracy of Optical 3D Digitalisation. *MM Science Journal* [online]. 2019, **2019**(March), 2783–2789 [vid. 2019-03-27]. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019_03_2018121
- {44} MENDRICKY, Radomir a Vratislav MALY. Draft design solution for automated 3D scanning of persons. *MM Science Journal* [online]. 2019, **2019**(05), 3418–3425 [vid. 2019-12-12]. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019_12_2019005
- {45} MENDŘICKÝ, Radomír. Využití optické 3D digitalizace v rámci závěrečných prací na katedře Výrobních systémů a automatizace. In: *The 11th International Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow: Proceedings of 11th Annual International Scientific Conference Manufacturing Systems Today and Tomorrow 2019*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019, s. 88–92. ISBN 978-80-7494-506-9.
- {46} MENDŘICKÝ, R. *Analýza tvarové přesnosti automobilových skel nové generace*. [Souhrnná výzkumná zpráva]. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2019.