

**VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA**

Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi

**NEKONVENČNÍ POSTUPY ANALÝZY VOLNĚ  
TVAROVANÝCH PLOCH**

Diplomová práce

Autor práce: Adam Reich, BEng

Vedoucí práce: Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.

Jihlava 2026

# Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce:	<b>Bc. Adam Reich</b>
Studijní program:	Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Garant studijního programu:	doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.
Název práce:	<b>Nekonvenční postupy analýzy volně tvarovaných ploch</b>
Vedoucí práce:	Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.
Cíl práce:	Cílem práce je návrh a zdokumentování postupů přesného měření tvarových a rozměrových parametrů složitých modelů. Složitost spočívá především ve výskytu volně tvarovaných funkčních ploch, případně kombinací specifických tvarových a rozměrových charakteristik explicitně vyjádřených ploch. Na případových studiích jsou definovány metrologické charakteristiky navržené metody měření s využitím metrologického 3D scanneru, kde východiskem je přesný digitální 3D model, vytvořený v nástroji CAD. Současně je navrženo využití 3D dat, získaných zpětnou analýzou modelu, pro následné využití při optimalizaci strojních součástí ve všech fázích životního cyklu, primární vývoje a technické přípravy výroby.

## Abstrakt

Volně tvarované plochy představují významnou výzvu současné metrologie, protože jejich geometrická komplexnost překračuje možnosti tradičních měřicích metod. Tato diplomová práce se zabývá návrhem a experimentálním ověřením nekonvenční metody měření volně tvarovaných ploch s využitím ručního 3D skeneru založeného na laserové triangulaci a open source softwaru CloudCompare. Cílem bylo vytvořit transparentní, reprodukovatelný a prakticky použitelný postup, který umožní analyzovat volně tvarované plochy.

Navržená metodika zahrnuje přípravu měření, rekonstrukci polygonové sítě, zarovnání pomocí rigidního ICP, výpočet odchylek metodou C2M a odhad nejistot. Experimentální ověření bylo provedeno na volně tvarované ploše vrtule, jejíž geometrie zahrnuje tenké hrany, vysokou křivost a lokální oblasti s omezenou viditelností. Výsledky ukázaly dobrou globální shodu skenu s CAD modelem a očekávanou variabilitu lokálních odchylek. Zarovnání se ukázalo jako stabilní a opakovatelně poskytovalo shodné hodnoty ICP RMS.

Práce potvrzuje, že otevřený software a ruční 3D skener mohou tvořit funkční základ pro nekonvenční měření volně tvarovaných ploch. Metoda poskytuje prakticky využitelné výstupy, jako jsou barevné mapy odchylek, histogramy a řezy pro CAD analýzu, a představuje krok směrem k rozvoji dostupných metrologických postupů pro komplexní geometrie.

## Klíčová slova

Volně tvarované plochy; Metrologie; 3D sken; Reverzní inženýrství

## Abstract

Free-form surfaces represent a significant challenge in modern metrology, as their geometric complexity exceeds the capabilities of traditional measurement methods. This thesis focuses on the design and experimental verification of a non-conventional method for measuring free-form surfaces using a handheld laser-triangulation 3D scanner and the open-source software CloudCompare. The aim was to develop a transparent, reproducible, and practically applicable workflow that enables the analysis of free-form surfaces.

The proposed methodology includes measurement preparation, reconstruction of a triangulated mesh, alignment using rigid ICP, deviation evaluation via the Cloud-to-Mesh method, and an experimental estimation of alignment uncertainty. The method was validated on a free-form propeller featuring thin edges, high curvature, and locally occluded regions. The results demonstrated good global agreement between the scan and the CAD model and expected variability of local deviations. Alignment proved highly stable, consistently yielding identical ICP RMS values across repeated trials.

The findings confirm that open-source tools combined with a handheld 3D scanner can form a functional basis for non-conventional measurement of free-form surfaces. The method provides practically useful outputs, including deviation maps, histograms, and CAD-ready cross-sections, and represents a meaningful step toward accessible metrological procedures for complex geometries.

## Keywords

Free-form surfaces; Metrology; 3D scanner; Reverse engineering

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom/a toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 14. dubna 2026

.....

Podpis studenta

## Poděkování

*Děkuji doktoru Dvořákovi za odborné vedení diplomové práce. Také děkuji docentu Kolmanovi za garantování studijního programu Aplikované techniky pro průmyslovou praxi. V neposlední řadě chci poděkovat Archimédovi za jeho přínos vědě, technice a inženýrství.*

# Obsah

<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam zkratk.....</b>	<b>12</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>13</b>
<b>1 Teoretická část .....</b>	<b>14</b>
1.1 Základy metrologie .....	14
1.2 Volně tvarované plochy v inženýrství .....	19
1.3 3D snímací technologie.....	23
1.4 Reverzní inženýrství a volně tvarované plochy.....	27
1.5 Nekonenční metody analýzy volně tvarovaných ploch .....	30
1.6 Metrologické charakteristiky nekonvenčního měření volně tvarovaných ploch .....	35
1.7 Identifikované mezery v literatuře .....	36
<b>2 Návrh metodiky měření .....</b>	<b>38</b>
2.1 Definice.....	39
2.2 Příprava.....	42
2.3 Zpracování .....	43
2.4 Výpočet úchylek.....	45
2.5 Metrologické zhodnocení .....	47
2.6 Výstup.....	49
<b>3 Experimentální měření .....</b>	<b>51</b>
3.1 Cíl experimentu.....	51
3.2 Experimentální sestava.....	51
3.3 Postup měření .....	54
3.4 Získaná data .....	56
3.5 Zpracování dat .....	56
3.6 Výpočet odchylek.....	60
3.7 Metrologické zhodnocení experimentu .....	64
<b>4 Diskuse .....</b>	<b>69</b>
4.1 Experiment versus metoda.....	69
4.2 Experiment versus řešerše .....	69
4.3 Nekonenční metody měření volně tvarovaných ploch.....	70
4.4 Co by šlo udělat jinak a co se osvědčilo.....	70
4.5 Osobní reflexe.....	70
4.6 Prostor pro další práci.....	70
4.7 Praktické využití výsledků .....	70
4.8 Shrnutí .....	71
<b>5 Závěr.....</b>	<b>72</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>73</b>
<b>Přílohy.....</b>	<b>77</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Metrologická návaznost.....	15
Obrázek 2: Kontaktní měřidlo – zuboměr.....	16
Obrázek 3: Aparáty souřadnicové metrologie .....	17
Obrázek 4: Ukázky určování prvků na základě analytických geometrií, ISO 17450-1.....	18
Obrázek 5: Kontinuita – zleva doprava: C0 (křivky sdílejí bod v místě spoje), C1 (křivky sdílejí tangent v místě spoje), C2 (křivky sdílejí zakřivení v místě spoje), C3 (křivky sdílejí změnu rychlosti zakřivení v místě spoje) .....	19
Obrázek 6: NURBS – nalevo 2D křivka s pěti styčnými body, napravo 3D helix se třinácti styčnými body .....	20
Obrázek 7: Aproximace povrchu, zleva doprava – polygonová síť z diskrétních bodů, isoparametrické křivky, aproximace povrchu.....	20
Obrázek 8: Část karoserie s CMM .....	21
Obrázek 9: Model ušní chrupavky.....	21
Obrázek 10: Asférická čočka .....	22
Obrázek 11: Klasifikace 3D snímacích technologií s důrazem na optické (Imaging) systémy ....	24
Obrázek 12: Nanokoordinační měřicí přístroj (IBS-ISARA 400).....	24
Obrázek 13: (a) Schéma laserové triangulace, (b) linie laseru promítnutá na skenovaný komponent.....	25
Obrázek 14: Schéma systému strukturovaného světla.....	25
Obrázek 15: Schéma interferometru pro měření optiky s volně tvarovanou plochou; (a) měřicí sestava, (b) kalibrační sestava.....	26
Obrázek 16: Schéma SEM obrazové analýzy.....	27
Obrázek 17: RE flowchart.....	28
Obrázek 18: Rozdíl mezi sítí (diskrétní reprezentace povrchu, červená) a analytickým modelem .....	29
Obrázek 19: Metoda husté optické rekonstrukce – (a) Původní objekt s projekcí vzorů, (b) obraz renderovaný z tvarů vzorů, (c) obraz renderovaný z centroidů vzorů.....	31
Obrázek 20: Metoda hustých lokálních skenů kombinovaných s globálními pozičními daty.....	32
Obrázek 21: Filtrace šumu – nalevo je neměřený tvar s šumem (červeně), napravo pak tvar po filtraci .....	33
Obrázek 22: Flowchart metody upravení hustoty vzorkování podle lokálního zakřivení.....	34
Obrázek 23: Flowchart s kódovanou projekcí vzorů s laserovou triangulací.....	34
Obrázek 24: Upnutí zkoumané volně tvarované plochy (vrtule), markery viditelné, podložka pod vrtulí, 3D skener je viditelný za podložkou. ....	53
Obrázek 25: LaserPatch režim, na obrazovce je možné vidět real-time záznam naskenovaných bodů. ....	55
Obrázek 26: neucelená polygonizace na ostří vrtule, zvýrazněno červeně, software ScanViewer. ....	57
Obrázek 27: CAD model (vlevo) a 3D sken (vpravo) ve stejném souřadném systému, různé natočení, software CloudCompare. ....	58
Obrázek 28: Přiřazení párových bodů $R_n-A_n$ (R: Referenced, A: Aligned) v softwaru CloudCompare. ....	58

Obrázek 29: Výsledná transformační matice a RMS po hrubém zarovnání, software CloudCompare. ....	59
Obrázek 30: Výsledná transformační matice a RMS po ICP zarovnání, software CloudCompare. ....	59
Obrázek 31: Mapa odchylek 3D skenu vůči CAD modelu s barevným měřítkem, software CloudCompare. ....	61
Obrázek 32: Histogram odchylek, software CloudCompare .....	62
Obrázek 33: Histogram odchylek s rozšířenou statistickou funkcionalitou, software CloudCompare. ....	63
Obrázek 34: Provedení vybraného řezu – CAD model a 3D sken jsou ve stejném souřadném systému jako při výpočtu mapy úchylek, řez tedy zobrazuje prostorový rozdíl, který způsobil velikost úchyly, software CloudCompare.....	64
Obrázek 35: Exportovaný řez (Obrázek 33) v CAD softwaru, software FreeCAD. ....	64

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled návrhu metodiky měření.....	38
Tabulka 2: Průměry výpočetních a statistických hodnot vzorků (zarovnání) 1 – 5, (hodnoty jsou zaokrouhlené na dvě desetinná místa).....	60
Tabulka 3: Procento povrchu 3D skenu které leželo v dané toleranci vůči CAD modelu. Např. 49,80 % u vzorku 3 znamená, že 49,80 % povrchu 3D skenu leželo v toleranci $\pm 0,5$ mm vůči CAD modelu v měření č. 3.....	62

## Seznam zkratek

AI	Artificial Intelignece
C2M	Cloud to Mesh
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CMM	Coordinate Measuring Machine
CSYS	Coordinate System
CT	Computed Tomography
ČMI	Český metrologický institut
GPS	Geometric Product Specification
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
ICP	Iterative Closest Point
INR	Implicit Neural Networks
ISO	International Organization for Standardization
k	Koefficient rozšířené nejistoty
LT	Laser Triangulation
MRI	Magnetic Resonance Imaging
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
OCT	Optical Coherence Tomography
PS	Chyba snímání (Probing error)
RE	Reverzní inženýrství (Reverse Engineering)
RMS	Root Mean Square
SD	Chyba rozteče koulí (Sphere spacing error)
SDF	Signed Distance Function
SEM	Scanning Electron Microscopy
ToF	Time of Flight
U	Rozšířená nejistota

## Úvod

Volně tvarované plochy představují v současném inženýrství jeden z nejdynamičtěji se rozvíjejících prvků konstrukce i výroby. Jejich využití sahá od aerodynamicky optimalizovaných komponent přes optické systémy až po individuálně přizpůsobené bioinženýrské implantáty. Společným jmenovatelem těchto aplikací je vysoká geometrická komplexnost, která překračuje možnosti tradičních metrologických postupů. Zatímco analytické tvary lze popsat explicitními rovnicemi a měřit konvenčními nástroji, volně tvarované plochy vyžadují husté vzorkování, pokročilé algoritmy rekonstrukce a sofistikované metody porovnání s nominálním modelem. Právě tato kombinace geometrické složitosti a absence standardizovaných postupů činí z měření volně tvarovaných ploch oblast, ve které stále považovat nové metody za „nekonvenční“.

Cílem této diplomové práce je navrhnout, popsat a experimentálně ověřit metodu měření volně tvarovaných ploch pomocí ručního 3D skeneru založeného na laserové triangulaci. Metoda je koncipována tak, aby byla prakticky realizovatelná v laboratorních podmínkách, transparentní, reprodukovatelná a nezávislá na proprietárních softwarových řešeních. Zvláštní důraz je kladen na metrologické aspekty celého procesu – od přípravy měření přes rekonstrukci povrchu až po výpočet odchylek a odhad nejistot. Práce se zároveň snaží zaplnit mezeru mezi teoretickými poznatky o volně tvarovaných plochách a jejich skutečným měřením v prostředí, které nedisponuje specializovanými průmyslovými systémy.

Motivací pro výběr tématu je nejen technologická aktuálnost, ale také praktická potřeba vytvořit ucelený postup, který umožní laboratoři efektivně pracovat s volně tvarovanými plochami. Dosavadní praxe byla limitována proprietárním softwarem, jenž neposkytoval nástroje pro metrologickou analýzu ani možnost transparentního zpracování dat. Otevřený software CloudCompare a doplňkové nástroje CAD tak představují cestu k metodě, která je nejen funkční, ale také dlouhodobě udržitelná.

Práce je strukturována do pěti hlavních částí. Teoretická část shrnuje poznatky z metrologie, reprezentace volně tvarovaných ploch a 3D snímacích technologií. Následuje návrh metodiky, experimentální ověření, diskuse výsledků a závěr. Výstupem je nejen ověřená metoda, ale také kritická reflexe jejích limitů a možností dalšího rozvoje.

# 1 Teoretická část

Volně tvarované plochy představují v moderním inženýrství příležitost i výzvu, protože umožňují vytvářet funkčně optimalizované produkty, ale jejich popis a měření je problematické. Technologie 1. průmyslové revoluce umožnily masovou výrobu produktů s analyticky popsatelnou geometrií, a spolu s tím se vyvinuly i metrologické nástroje tyto geometrie měřit a popisovat (Winchester, 2018). Technologie 4. průmyslové revoluce – pokročilé výrobní technologie, zejména víceosé CNC, aditivní výroba a pokročilé CAD/CAM uvádí (Zhou a kol., 2019) a (Stornelli, Ozcan, a Simms, 2022), dnes umožňují ekonomicky vyrábět i geometricky komplexní a analyticky obtížně popsatelné plochy, často označované jako volně tvarované plochy. Metrologické postupy původně určené pro analytické geometrie jsou ovšem pro měření volně tvarovaný ploch nedostačující. Nicméně, je to právě měření volně tvarovaných ploch, které je jedním z hlavních ekonomických faktorů širšího využití výhod volně tvarovaných ploch.

Ale co jsou volně tvarované plochy? Definice jsou různé, protože různé aplikace volně tvarovaných ploch odrážejí různé způsoby jejich využití. Například mohou být definovány jako „nerotačně symetrické odchylky od základních sfér,“ (Yao, Anderson a Rolland, 2018). Nebo jako „komplexní tvary, které věrně vyjadřují funkční specifikaci výrobku (...) a které lze jen obtížně popsat rovnicí či jakýmkoli obecným tvarem,“ (El-Hayek a kol., 2014), případně pouze jako „nepravidelná povrchová geometrie,“ (Chen a kol., 2015). Společné pro všechny definice však je, že volně tvarované plochy jsou zároveň obtížně měřitelné a důležité změřit pro jejich výrobu.

Metrologie je vědecká disciplína zabývající se měřením, a pokud je aplikována na problematiku měření volně tvarovaných ploch, může být potenciálně užitečná při vývoji nekonvenčních měřících postupů vedoucích k vyšší efektivitě využití volně tvarovaných ploch (Yao, Anderson a Rolland, 2018). Metrologie tak může představovat spojovací článek mezi nově vznikajícími výrobními technologiemi a konstrukčními požadavky s cílem vytvořit efektivní analýzu pro měření volně tvarovaných ploch, jak uvádí (Ghim a kol., 2014). Následující podkapitoly integrují poznatky z metrologie, počítačové reprezentace v systémech CAD/CAM a inženýrství v kontextu měření volně tvarovaných ploch.

## 1.1 Základy metrologie

Metrologie je věda o měření, která zajišťuje spolehlivost a porovnatelnost výsledků napříč vědou i průmyslem. Metrologie se dále dělí do kategorií, z nichž nejpodstatnější pro tuto práci je technická metrologie. V kontextu měření volně tvarovaných ploch lze narazit například na souřadnicovou nebo geometrickou metrologii, které mohou sami o sobě nespadat přesně do jedné určité kategorie, právě protože měření volně tvarovaných ploch je relativně čerstvý obor.

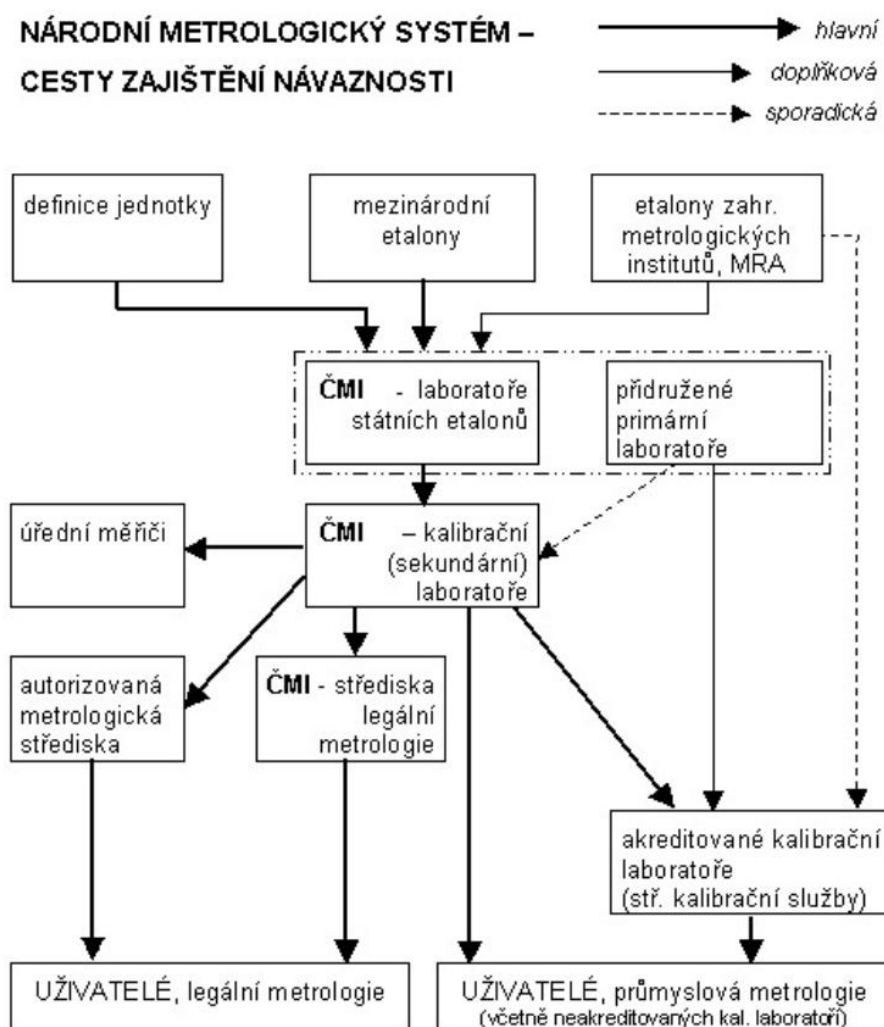
### 1.1.1 Definice a úloha metrologie

Metrologie tvoří základ nejenom vědy, techniky, inženýrství a obchodu, ale také dalších oblastí lidské činnosti, protože určuje a kontroluje, co a jak je měřeno. Metrologie se tradičně dělí do čtyř hlavních oblastí:

1. Fundamentální metrologie se zabývá základy metrologického systému a soustavy měřících prostředků, realizací etalonů a metodami měření.

2. Průmyslová (technická) metrologie zajišťuje jednotnost a přesnost měření ve strojírenství a zahrnuje také kalibraci pracovních měřidel.
3. Legální metrologie chrání veřejnost před nesprávným měřením v obchodě, státní správě, na pracovišti či v jiných oficiálních nebo regulovaných oblastech a stanovuje právní požadavky na měřidla.
4. Vědecká metrologie se zabývá vývojem etalonů a jejich uchováváním, včetně realizace jednotek SI.

Klíčovým pojmem metrologie je metrologická návaznost, která je obvykle zakotvena v národní legislativě (např. *Zákon č. 119/2000 Sb., o metrologii v České republice*). Každé měření by mělo být návazné prostřednictvím řetězce kalibrací se známou nejistotou až k jednotkám SI (*Obrázek 1*). V České republice je nejvyšším metrologickým orgánem ČMI, (Tichá a Mrkvica, 2012).



**Obrázek 1: Metrologická návaznost**  
Zdroj: Český metrologický institut, n.d.

### 1.1.2 Metrologické pojmy a terminologie

Základní metrologické pojmy jsou popsány v normě ČSN 01 0115 *Názvosloví v metrologii*, která již není platnou normou, nicméně stále obsahuje obecně používané definice. Široké skupiny definic zahrnují: veličiny a jednotky, měření a jeho přesnost, chyby a opakovatelnost, měřicí přístroje a měřidla a etalony. Všechna měření by měla být doplněna odhadem nejistoty. Podle (Tichá, 2004) se rozlišují:

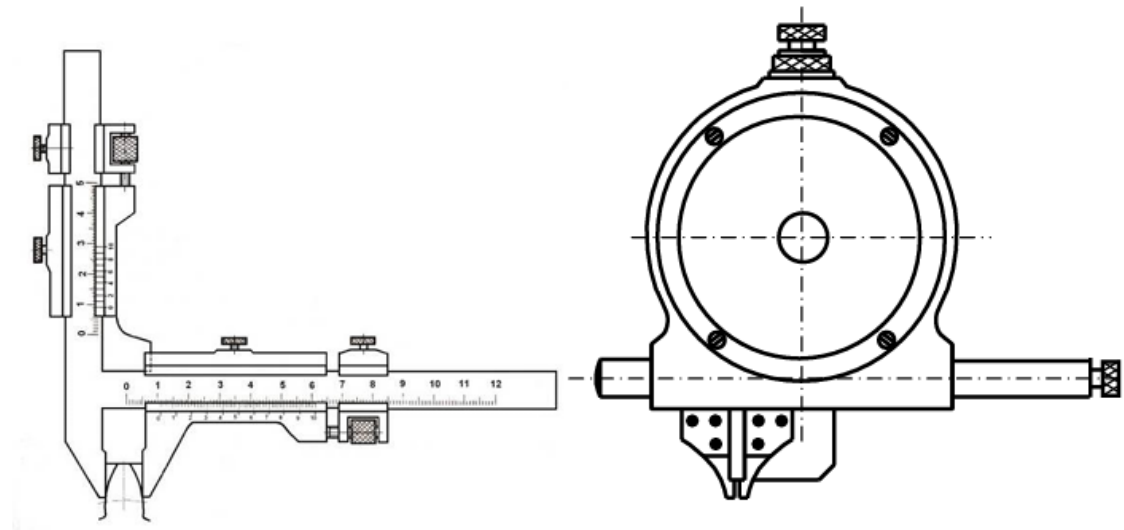
- nejistoty typu A, které se vyhodnocují statisticky z opakovaných měření,
- nejistoty typu B, které se získávají z kalibračních certifikátů, specifikací výrobce nebo odborného odhadu.

Komponenty nejistoty typu A, a typu B se následně kombinují do standardní nejistoty, která se poté násobí koeficientem rozšíření (obvykle  $k = 2$ ) za účelem získání rozšířené nejistoty.

U geometrických měření je také důležitý faktor kumulace nejistot. Každé měření, a každý záznam o měření (myšleno přesunem dat), případně rekonstrukce povrchu v digitální podobě v sobě zahrnuje určitou nejistotu, která se kumuluje. Podobným způsobem se mohou kumulovat chyby, pokud je přístroj, systém, nebo metoda chybová.

### 1.1.3 Rozměrová a geometrická metrologie

Rozměrová metrologie se zabývá základními měřeními délek a úhlů. Tradičními nástroji jsou posuvná měřidla, mikrometry, koncové měřky a úhelníky, která jsou omezena na jednoduché geometrické tvary a fyzický kontakt (Obrázek 2). Geometrická metrologie toto rozšiřuje na hodnocení tvarových, orientačních a polohových tolerancí, jak jsou definovány v normách, například *ISO 1101*, (Tichá a Mrkvica, 2012). Vzhledem k tomu, že velká část výzkumu v oblasti nekonvenční analýzy volně tvarovaných ploch má globální charakter, je důležité zohlednit i jiné normy, například *ASME Y14.5*, používané v USA.



Obrázek 2: Kontaktní měřidlo – zuboměr.

Zdroj: Tichá a Mrkvica, 2012

Geometrické tolerance tradičně zahrnují rovinnost, kruhovitost, válcovitost a profilové tolerance (Tichá, 2004). Pro volně tvarované plochy je nejrelevantnější tolerance profilu povrchu, která určuje, o kolik se skutečný povrch může odchýlit od nominálního CAD modelu. Vyhodnocení této tolerance vyžaduje hustě naměřená data a porovnávací metody, (Poniatowska a Werner, 2010). Dalším důležitým aspektem je textura povrchu. Parametry drsnosti popisují mikroměřítkovou texturu povrchu. Vlnitost popisuje odchylky s delší vlnovou délkou. Moderní normy, jako *ISO 25178*, zavádějí plošné parametry textury povrchu, které jsou pro volně tvarované plochy vhodnější než tradiční parametry drsnosti, (Gao, Felgner a Brand, 2025).

#### 1.1.4 Souřadnicová metrologie

Souřadnicová metrologie (*coordinate metrology*) je rychle se rozvíjející vědní oblast, uvádí (Štádek, 2016), která „poskytuje vědecký základ pro provádění měření a prostorové zobrazování trojrozměrných geometrických objektů,“ uvádí a podporuje aplikace od výrobního inženýrství až po biomedicínu. Dále zdůrazňuje, že samotná přesnost měřicího zařízení je jen jedna složka. Celková přesnost závisí také na referenčním modelu, akumulaci chyb, chování snímače a vlivech okolního prostředí. Dále upozorňuje, že složitá geometrie volně tvarovaných ploch zvyšuje šíření nejistot. Při použití některého ze souřadných systémů (Obrázek 3), je nutné dbát správné kalibrace, která by se měla opírat o platný standard, například *ISO 10360*.



Obrázek 3: Aparáty souřadnicové metrologie

Zdroj: Štádek, 2016

### 1.1.5 Normativní rámec

Měření volně tvarovaných ploch vyžaduje normativní rámec, který určuje, jak se geometrie specifikuje, jak se vytváří referenční soustavy a jak se rozhoduje o shodě s tolerancí. Základní podmínkou všech geometrických měření jsou standardní podmínky *ISO 1*, která zajišťuje srovnatelnost výsledků mezi laboratoři.

Normy *ISO 17450-1* a *ISO 17450-2* definují obecné principy geometrické specifikace výrobků (GPS), včetně toho, jak interpretovat geometrické prvky a operátory u ploch, které nemají analytický tvar. U volně tvarovaných ploch je tento rámec zásadní, protože jejich tvar nelze popsat jednoduchými prvky, jako je rovina nebo válec (*Obrázek 4*). Pro správné zarovnání skenovaných dat vůči CAD modelu je klíčová norma *ISO 5459*, která stanovuje pravidla pro tvorbu a použití prvkových soustav. Norma *ISO 1101* určuje způsob zápisu geometrických tolerancí, zejména tolerance profilu povrchu, která je pro volně tvarované plochy relevantní. *ISO 14253-1* pak stanovuje rozhodovací pravidla pro posuzování shody s tolerancí s ohledem na nejistotu měření. Tyto normy společně zajišťují, že měření volně tvarovaných ploch je nejen technicky proveditelné, ale také metrologicky obhajitelné a v souladu s mezinárodními standardy.

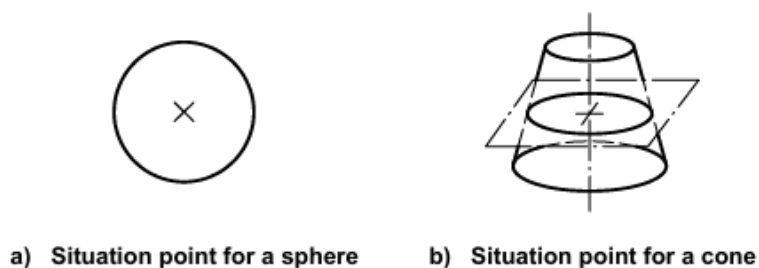


Figure 1 — Example of situation points

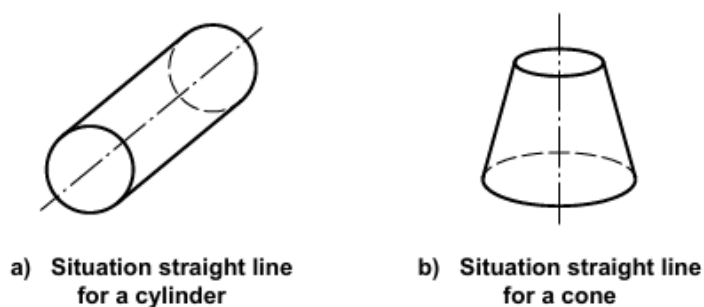


Figure 2 — Example of situation straight lines

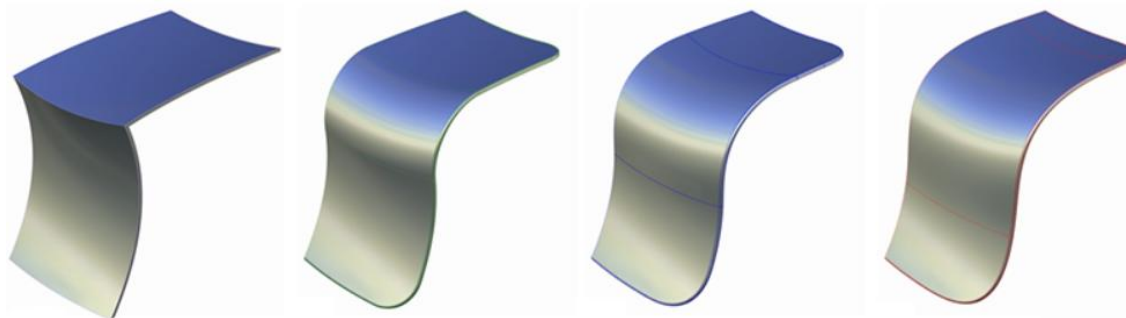
Obrázek 4: Ukázky určování prvků na základě analytických geometrií, *ISO 17450-1*

Zdroj: (*ISO 2011c*)

## 1.2 Volně tvarované plochy v inženýrství

Volně tvarované plochy se staly nezbytným prvkem moderního inženýrství, i přes svou obtížnou měřitelnost. Jejich popis se opírá o pokročilé reprezentace – jako jsou NURBS, mračna bodů, polygonové sítě nebo implicitní neuronové modely, které dokážou zachytit jejich neanalytickou geometrii. Jejich využití v leteckém, automobilovém, bioinženýrském, či optickém průmyslu zároveň klade vysoké nároky na přesnost a funkčnost. Současně jejich strmé sklony, velké odchylky od nominálního tvaru a citlivost na podmínky skenování překračují limity tradičních metrologických nástrojů. Nepoměrně velké část výzkumu volně tvarovaných ploch je kladena optickým systémům, oproti jiným specializacím. Jeden z důvodů se jeví, že optika je technologickým jádrem měřících systémů, které mohou volně tvarované plochy analyzovat, a z logiky věci dává smysl se soustředit právě na jejich vývoj. Nebo, jak zachycuje výrok: “pokud něco nelze změřit, nejde to vyrobit” (Mahr Inc., 2019). Tuto skutečnost odráží i tato kapitola, a optické systémy jsou příležitostně zdůrazněny extra.

### 1.2.1 Matematické reprezentace volně tvarovaných ploch



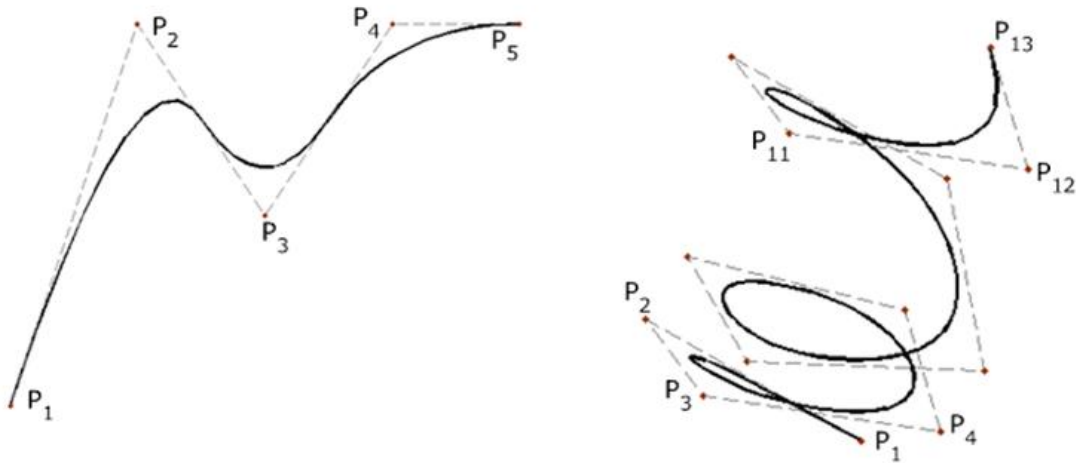
**Obrázek 5: Kontinuita – zleva doprava: C0 (křivky sdílejí bod v místě spoje), C1 (křivky sdílejí tangent v místě spoje), C2 (křivky sdílejí zakřivení v místě spoje), C3 (křivky sdílejí změnu rychlosti zakřivení v místě spoje)**

*Zdroj: Autodesk, 2025*

Volně tvarovanou plochu lze v kontextu matematické reprezentace definovat jako komplexní geometrii, která popisuje tvarovou specifikaci výrobku a kterou je obtížné popsat standardní rovnicí (El-Hayek a kol., 2014). Podstatné matematické vlastnosti volně tvarovaných ploch zahrnují kontinuitu tvaru, tvarové priority (*shape priors* – známá data o tvaru před tím, než se zná tvar, používaný v implicitních modelech) a rozlišení povrchu, které jsou zásadní pro metrologické posouzení výrobku vůči jeho modelu. Jak uvádí (Lee, Park a Son, 2001), volně tvarované geometrie vyžadují alespoň C1 kontinuitu (Obrázek 5), pro potřeby skenovatelnosti. Několik klíčových metod matematické reprezentace, jak je uvádí (Tzathas, Maragos a Roussos, 2023), je uvedeno níže.

Dle (Saini, Kumar a Gulati, 2017), jsou volně tvarované plochy efektivně reprezentovány parametrickými (explicitními) modely, zejména B-spliny (*B-splines*) a NURBS (Obrázek 6). NURBS poskytují jednotný matematický model popisující jak tradiční geometrické plochy, tak plochy volně tvarované. V metodě NURBS jsou plochy popsány pomocí styčných bodů (*control points*), uzlových vektorů (*knot vectors*) a racionálních B-spline bazových funkcí, které umožňují přesnou reprezentaci tvaru. NURBS jsou používány v CAD systémech, protože umožňují popsat volně

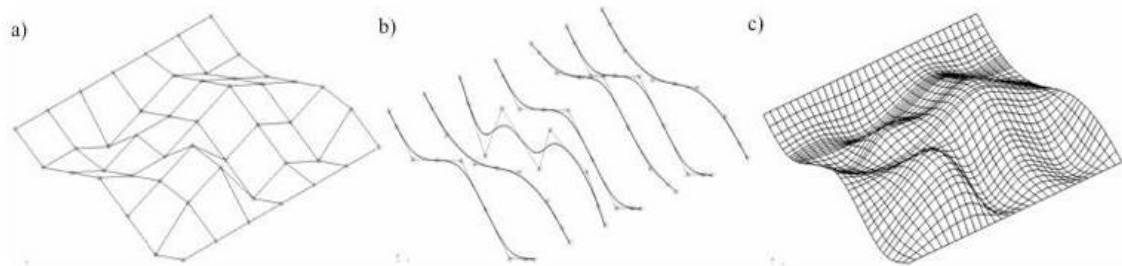
tvárouané plochy s přesně definovanými tvarovými vlastnostmi. Jak bude rozvedeno dále, přesnou podobu volně tvarovaných ploch není vždy snadné přesně převést do CAD modelu.



**Obrázek 6: NURBS – nalevo 2D křivka s pěti styčnými body, napravo 3D helix se třinácti styčnými body**

*Zdroj: Saini, Kumar a Gulati, 2017*

Dalším způsobem reprezentace volně tvarovaných ploch, jak uvádí (Zang a kol., 2018), jsou mračna bodů a polygonové sítě, které se používají například v metodách laserového skenování. Mračna bodů se skládají z diskretních (explicitních) 3D souřadnic získaných přímo ze skenovacího systému, ovšem skenování může vytvářet rozsáhlé datové soubory, které jsou náročné na zpracování a náchylné na šum. Polygonové sítě vznikají propojením těchto bodů do polygonů, čímž vytvářejí spojitou aproximaci povrchu (Obrázek 7). Jak dále uvádí (Zang a kol., 2018), metody založené na polygonálních sítích se často používají při zjednodušování mračen bodů, protože zachycují sousední vztahy a lokální kontinuitu povrchu.



**Obrázek 7: Aproximace povrchu, zleva doprava – polygonová síť z diskretních bodů, isoparametrické křivky, aproximace povrchu**

*Zdroj: Poniatowska a Werner, 2010*

Volně tvarované plochy mohou být reprezentovány také implicitními modely, například INR využívajícími metodu SDF, která kóduje geometrii povrchu jako nulovou hodnotu spojitě funkce, (Tzathas, Maragos a Roussos, 2023), kde záporná hodnota je uvnitř objektu a kladná mimo něj. Jak dále zdůrazňuje (Tzathas, Maragos a Roussos, 2023), na rozdíl od tradičních CAD modelů nejsou INR vázány na pevné prostorové rozlišení a lze je vzorkovat v libovolné hustotě. Ačkoliv se tato metoda ve výrobě příliš nepoužívá, uplatňuje se v simulacích, optimalizaci a pokročilém zpracování geometrie, kde jejich spojitost nabízí výhody oproti NURBS nebo polygonálních sítím.

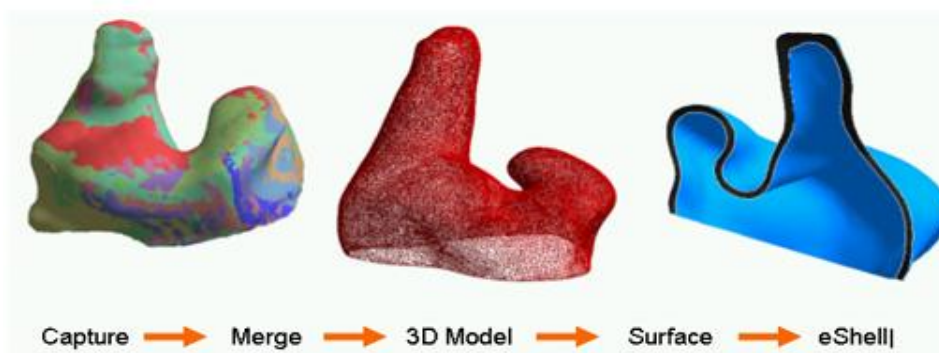
### 1.2.2 Průmyslové aplikace volně tvarovaných ploch

V leteckém průmyslu se volně tvarované plochy používají k optimalizaci proudění vzduchu a snížení odporu, (Chen a kol., 2015). V automobilovém průmyslu se prostřednictvím analýzy karosářských dílů (volně tvarované plochy) kontroluje jejich strukturálního chování při provozu a nárazových zkouškách (Obrázek 8), (Gerbino a kol., 2016). V bioinženýrství jsou individuálně přizpůsobené implantáty s volně tvarovanými plochami klíčové pro zlepšení kvality života (Obrázek 9), (Baghaie a kol., 2017). V optickém inženýrství umožňují volně tvarované plochy dosahovat vyšší výkonnosti optických systémů, (Yao, Anderson a Rolland, 2018), (Obrázek 10). Populární 3D tisk a další hobby metody často také produkují volně tvarované plochy. Je však důležité zdůraznit, že aby mohly být takové díly použity v inženýrské praxi, musí celý povrch dílu splňovat metrologické požadavky pro danou aplikaci. Jakákoli přítomnost vad nebo nepřesností měření může být nákladná, což zvyšuje cenu těchto dílů, (Lee, Park a Son, 2001).



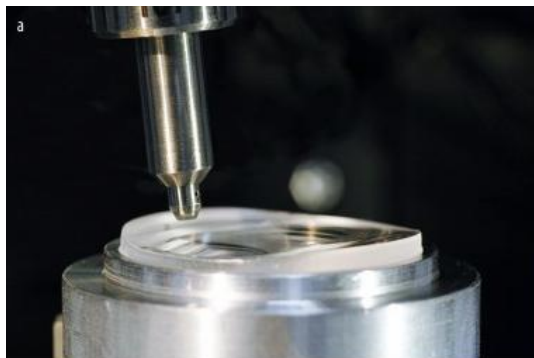
Obrázek 8: Část karoserie s CMM

Zdroj: Gerbino a kol., 2016



Obrázek 9: Model ušní chrupavky

Zdroj: Geng, 2011



**Obrázek 10: Asférická čočka**  
*Zdroj: Berger a Wendel, 2018*

### 1.2.3 Proč jsou volně tvarované plochy obtížně analyzovatelné

Volně tvarované optické plochy jsou obtížně analyzovatelné, protože vykazují velké odchylky od nominálního tvaru a strmé sklony, které kladou vysoké nároky na dynamický rozsah a citlivost existujících metrologických nástrojů (Yao, Anderson a Rolland, 2018). Většina vysoce přesných metrologických systémů byla původně navržena pro symetrické optické prvky, což znamená, že sonda nemůže zůstat kolmá k povrchu v celé geometrii, a měření tak musí probíhat pod šikmými úhly, (Berger a Wendel, 2018). To může vést k systematickým chybám nebo k nutnosti přísné kalibrace, uvádí (Berger a Wendel, 2018), a (Yao, Anderson a Rolland, 2018). Tyto skutečnosti činí metrologii hlavním nákladovým faktorem při výrobě volně tvarovaných optických ploch, (Yao, Anderson a Rolland, 2018).

Nicméně, i neoptické volně tvarované plochy mají svá úskalí. Jak uvádí (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014), geometrická složitost volně tvarovaných ploch překračuje možnosti základních měřicích technik i u dílů, jako jsou části odpružení auta. Přesnost 3D skenování je vysoce citlivá na úhel snímání, vzdálenost, teplotu a rozlišení zařízení, což zvyšuje nejistotu měření, uvádí (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014), a (Jiang, Wang a Wang, 2019). Stávající metody filtrování šumu jsou navíc primárně navrženy pro data z laserového skenování a nejsou přímo použitelné pro data z CMM ani pro filtraci jejich chyb, zmiňuje (Jiang, Wang a Wang, 2019). Oblasti snímané pod nízkým úhlem vyžadují více skenů, což zavádí odchylky mezi mračny bodů a dále komplikuje rekonstrukci volně tvarovaných ploch, dále uvádí (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014), a (Jiang, Wang a Wang, 2019). V praktických scénářích RE jsou navíc původní díly často opotřebované, takže jejich změřená geometrie neodpovídá originálnímu návrhu a nelze spolehlivě odvodit rozměry, (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014).

Dále, konvenční CMM získávají data bod po bodu, a mohou deformovat měkké materiály, což je činí neefektivními pro zachycení volně tvarovaných ploch, zmiňuje, (Lee, Park a Son, 2001). Ačkoli laserové skenery nabízejí vyšší rychlost sběru dat, absence zavedených metodik analýzy znamená, že strategie skenování často závisí na intuici odborníka, což vede k chybám, (Lee, Park a Son, 2001). Celkově lze říct, analyzovatelnost volně tvarovaných ploch je nepřímo úměrná jejich geometrické nepravidelnosti a velikosti, protože přesnost měření klesá a celkový měřicí úkol se stává složitějším, (Chen a kol., 2015).

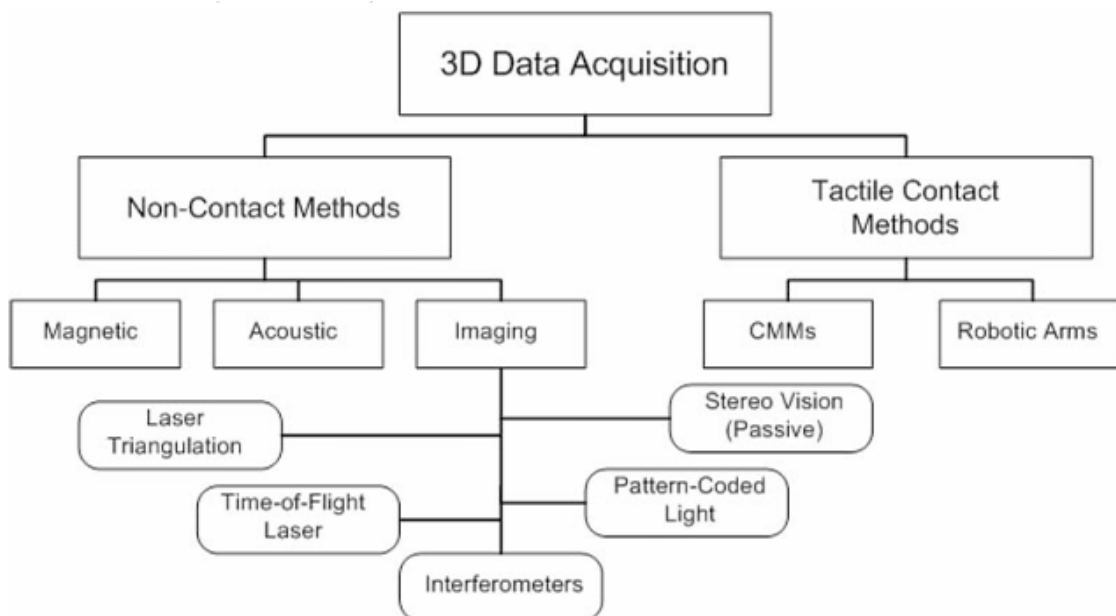
#### 1.2.4 Požadavky na měření volně tvarovaných ploch

Požadavky na měření volně tvarovaných ploch definují nezbytný základ pro jejich metrologické posouzení a vyplývají z jejich inherentní geometrické složitosti (*podkapitola 1.2.1*), z přísných funkčních nároků průmyslových aplikací (*podkapitola 1.2.2*) a z praktických omezení a zdrojů chyb v reálných měřicích systémech (*podkapitola 1.2.3*). Přesné měření volně tvarovaných ploch vyžaduje:

1. Volně tvarované plochy musí být reprezentovány matematickým modelem, například NURBS, polygonové sítě nebo implicitní neuronové reprezentace, aby bylo možné smysluplně porovnat změřená data s nominálním návrhem (*podkapitola 1.2.1*).
2. Přesné měření vyžaduje vzorkování povrchu s takovou hustotou, která odpovídá jeho geometrické složitosti (*podkapitoly 1.2.1 a 1.2.3*). Měřicí systémy proto musí poskytovat dostatečné prostorové rozlišení a adaptivní strategie vzorkování pro dostatečné pokrytí.
3. Přesné měření volně tvarovaných ploch vyžaduje kontrolu prostředí a geometrických faktorů (*podkapitola 1.2.3*). Měřicí systémy musí udržovat stabilní měřicí geometrii (vzorek se nesmí vůči měřicímu aparátu vychylovat v čase), minimalizovat šikmý dopad paprsku nebo sondy a kompenzovat vlivy prostředí.
4. Přesné měření vyžaduje pokročilé metody filtrování a zpracování chyb (*podkapitola 1.2.3*). Nezbytné jsou filtry šumu, integrace více skenů a modelování nejistot, které umožňují spolehlivě pracovat s daty zatíženými chybami.
5. Průmyslové aplikace vyžadují, aby byly volně tvarované plochy měřeny kompletně, nikoli pouze vybrané prvky (*podkapitoly 1.2.2 a 1.2.3*). Přesné měření tedy vyžaduje systémy schopné úplného, nedestruktivního a efektivního pokrytí povrchu.
6. Požadavky na měření musí odrážet funkční a bezpečnostní nároky aplikace (*podkapitoly 1.2.2 a 1.2.3*). Přesné měření proto vyžaduje rámce odchylek, které odpovídají jak konstrukčnímu záměru, tak reálným funkčním požadavkům.

### 1.3 3D snímací technologie

Ačkoliv objemové zobrazovací metody, jako CT nebo MRI, patří mezi 3D měřicí systémy, tak tyto techniky se primárně zaměřují na vnitřní struktury a nejsou stěžejní pro metrologii vnějších volně tvarovaných ploch. Dominantním formátem pro měření volně tvarovaných ploch jsou povrchové zobrazovací metody, především mračka bodů, a z nich vyvozené reprezentace, které jsou generovány mnoha snímacími technologiemi, přiblíženy níže (*Obrázek 11*).



**Obrázek 11: Klasifikace 3D snímáčích technologií s důrazem na optické (Imaging) systémy**

*Zdroj: Page a kol., 2005*

### 1.3.1 CMM

Podstatou CMM je fyzická interakce mezi dotykovou sondou a povrchem, která umožňuje získávání 3D souřadnic. Jsou schopné dosahovat mikrometrové až submikrometrové přesnosti (Obrázek 12). (Yao, Anderson a Rolland, 2018), je popisuje jako „průmyslový pracovní nástroj metrologie volně tvarovaných ploch“, a to díky jejich přesnosti při měření složitých tvarů. Jak zdůrazňuje (Štádek, 2016), souřadnicová metrologie tvoří základ souřadnicové metrologie, zahrnujícím kalibraci a shodu s normami ISO 10360. Díky tomu jsou CMM nenahraditelné pro referenční měření a ověření nejistot. Navzdory své přesnosti nejsou CMM vhodné pro husté vzorkování volně tvarovaných ploch. (Chen a kol., 2015) uvádí, že tyto metody jsou časově náročné pro úplné popsání povrchu volně tvarovaných ploch, protože geometrie volně tvarovaných ploch často vyžadují hustá mračna bodů. Dalším omezením je přístupnost. Jak ukazuje (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014), orientace sondy významně ovlivňuje nejistotu a oblasti s nízkým úhlem geometrie, nebo hluboké otvory, mohou být zcela nepřístupné. Kontakt může také deformovat měkké materiály. Nanokoordinační měřicí přístroj (IBS-ISARA 400)



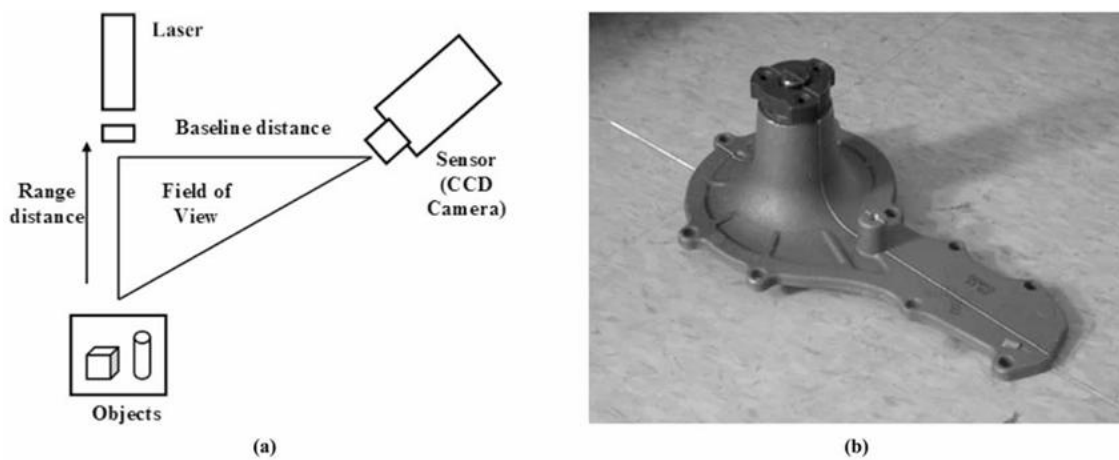
**Obrázek 12: Nanokoordinační měřicí přístroj (IBS-ISARA 400)**

*Zdroj: Štádek, 2016*

### 1.3.2 Optické triangulační systémy

Optické triangulační systémy jsou rapidně se rozvíjející technologie pro 3D měření, uvádí (Page a kol., 2005). Fungují na principu projekce strukturovaného osvětlení povrchu a analýzy jeho deformace z jednoho či více pohledů. Do této kategorie spadá laserová triangulace a strukturované světlo, které (Sładek, 2016) uvádí jako klíčové bezkontaktní metody měření.

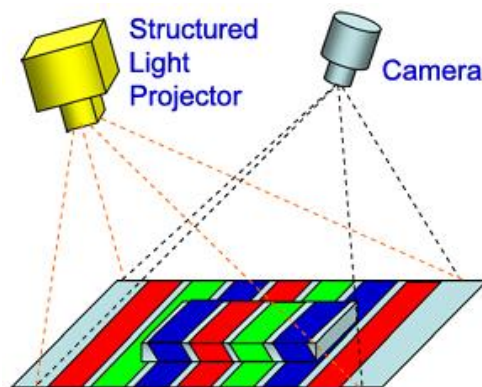
(Page a kol., 2005) popisuje laserovou triangulaci jako metodu, při níž je na povrch promítán laserový bod nebo čára a 3D souřadnice jsou rekonstruovány z jeho posunu v obraze kamery, schopná produkovat hustá mračka bodů, avšak její přesnost je silně ovlivněna orientací povrchu (Obrázek 13). (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014) uvádí, že je potřebné zohlednit úhel snímání a vzdálenost skenování pro správné vyhodnocení výsledků a že oblasti s nízkým úhlem zkrusují snímání bod do hyperbolického tvaru, což ilustruje citlivost na sklon a odrazivost povrchu.



Obrázek 13: (a) Schéma laserové triangulace, (b) linie laseru promítnutá na skenovaný komponent

Zdroj: Page a kol., 2005

Systémy strukturovaného světla, uvádí (Geng, 2011), rekonstruují povrch projekcí strukturovaných vzorů na daný povrch a pozorováním změny tvaru promítaného vzoru (Obrázek 14). Varianty zahrnují jednosnímkové kódované vzory, zmiňuje (Reiss a Tommaselli, 2011), a rekonstrukci založenou na učení (Nguyen a kol., 2022). Nízký úhel dopadu zkrusuje projekční vzory, uvádí (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014) a (Geng, 2011) uvádí, že kvalita rekonstrukce závisí na viditelnosti a odrazivosti povrchu.



Obrázek 14: Schéma systému strukturovaného světla

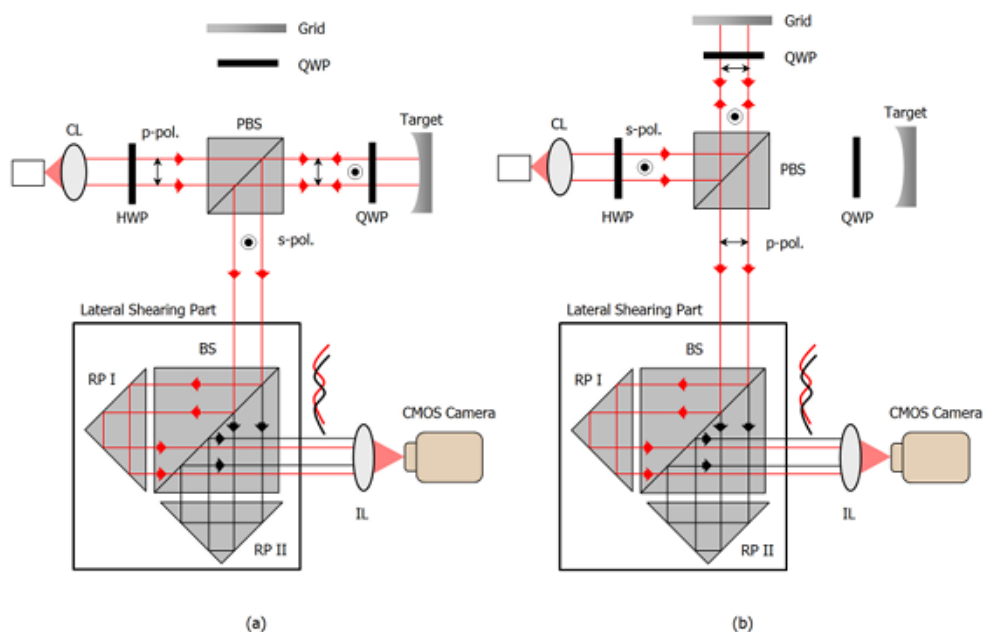
Zdroj: Geng, 2011

### 1.3.3 ToF systémy

ToF systémy označuje (Sładek, 2016) jako bezkontaktní souřadnicové měřicí systémy, založené na měření doby návratu paprsku. Jsou vhodné pro zachycení velkorozměrové geometrie a pro vytváření globálních referenčních rámců, avšak jejich rozlišení je příliš nízké pro detailní inspekci volně tvarovaných ploch. Jak uvádí (Yao, Anderson a Rolland, 2018), volně tvarované optické povrchy vyžadují nástroje schopné měřit odchylky povrchu a sklony s mnohem vyšší přesností, než můžou nabídnout ToF systémy. Z tohoto důvodu ToF systémy plní pouze podpůrnou roli v multisenzorových pracovních postupech, a tedy, poskytují hrubou globální geometrii, nikoli jemné metrologické detaily.

### 1.3.4 Interferometrie a konfokální mikroskopie

Interferometrie a konfokální mikroskopie představují nejpřesnější dostupné bezkontaktní metody pro metrologii volně tvarovaných ploch (Obrázek 15). (Yao, Anderson a Rolland, 2018) popisuje interferometrii jako nejčastější optickou testovací techniku, poskytující nanometrovou úroveň přesnosti. Konfokální mikroskopie popisuje (Yao, Anderson a Rolland, 2018) jako součást rozlišovacích optických systémů, které vytvářejí hustá mračna bodů pomocí hloubkově rozlišeného skenování. Tyto systémy používají optické sondy, které si zachovávají přibližnou kolmost vůči měřenému povrchu což umožňuje velmi přesná lokální měření. Interferometrie a konfokální mikroskopie sdílejí podobná omezení: omezený dynamický rozsah, citlivost na strmé sklony, malé zorné pole, pomalé mechanické skenování a nutnost důkladné kalibrace, (Yao, Anderson a Rolland, 2018).

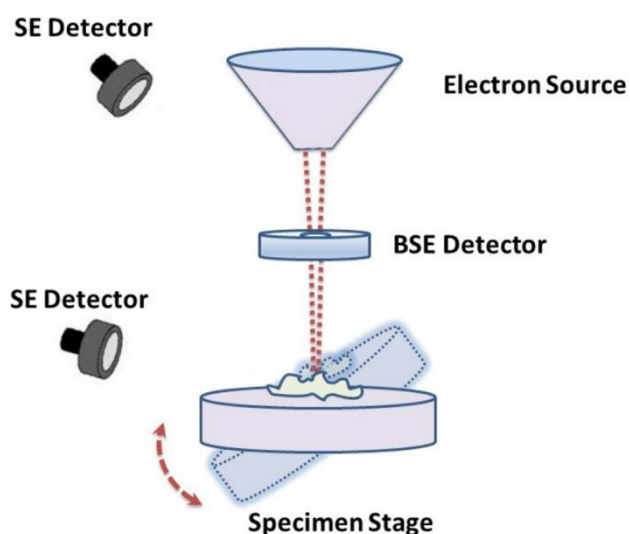


Obrázek 15: Schéma interferometru pro měření optiky s volně tvarovanou plochou; (a) měřicí sestava, (b) kalibrační sestava

Zdroj: Ghim a kol., 2014

### 1.3.5 Mikroskopická 3D rekonstrukce

Mikroskopická 3D rekonstrukce rozšiřuje metrologii volně tvarovaných ploch do nanoskopické oblasti. (Baghaie a kol., 2017) uvádí několik přístupů používaných pro tento účel, včetně mnohasnímkové SEM obrazové analýzy (*multi-view SEM imaging*), (Obrázek 16), fotometrického stereo (*fotometric stereo*) a rekonstrukce založené na hustém párování (*dense matching reconstruction*) nebo optickém toku (*optical flow*). Tyto metody cílí na povrchy, jejichž prvky jsou příliš malé, příliš strmé nebo příliš jemně strukturované na to, aby je bylo možné zachytit triangulací nebo interferometrií. Tyto metody však mají velmi malé zorné pole, dlouhé časy akvizice, environmentální požadavky (například vakuový provoz u SEM), a komplexní kalibrace.

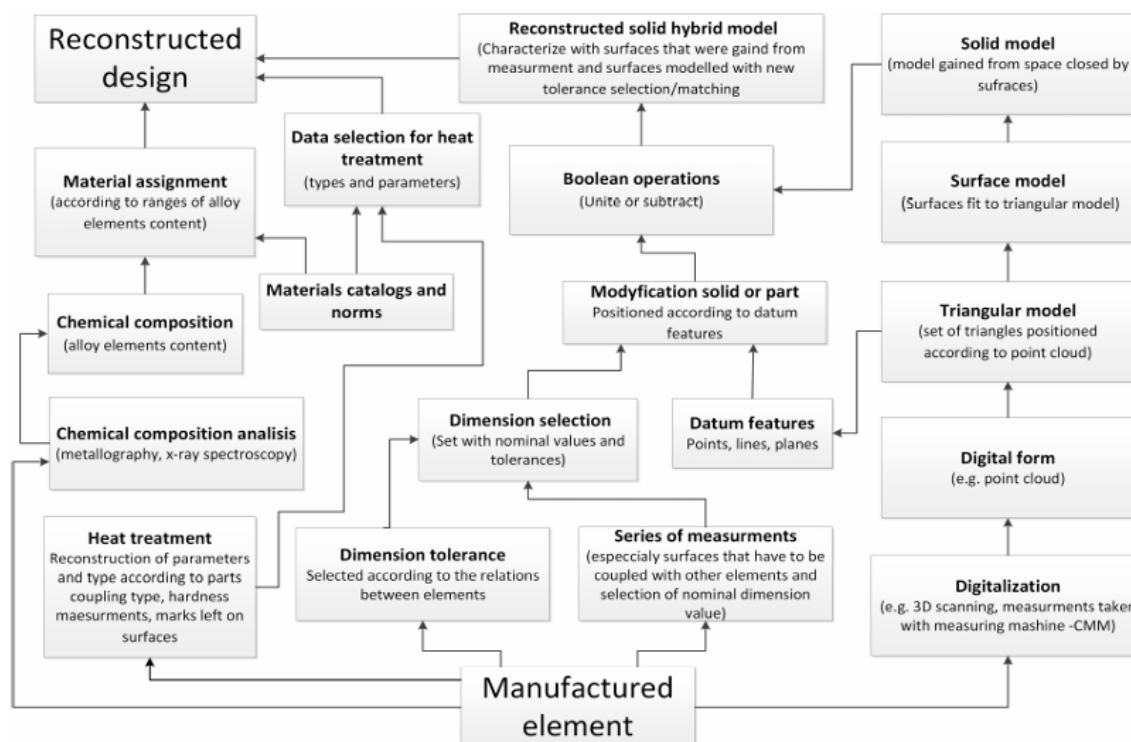


Obrázek 16: Schéma SEM obrazové analýzy

Zdroj: Baghaie a kol., 2017

## 1.4 Reverzní inženýrství a volně tvarované plochy

RE rekonstruuje digitální model fyzického objektu v situacích, kdy původní konstrukční data nejsou dostupná nebo jsou neúplná (Obrázek 17). Tato metodika může být použitelná u volně tvarovaných ploch, které, ačkoliv mají plná konstrukční data, tak kvůli komplexnosti tvaru postrádají matematicky přesný popis. Využití RE je vhodné také proto, že moderní 3D skenovací systémy zachycují informace o povrchu fyzických objektů rychle a přesně, což umožňuje, za využití metodik RE, vytvářet počítačové modely, které jsou téměř identické se svými reálnými předlohami, jak uvádí (Hsieh, 2012). Pracovní postup začíná digitalizací, uvádí (Page a kol., 2005), při níž měřicí systémy získávají prostorová data v podobě mračna bodů, které tvoří základ pro tvorbu polygonové sítě nebo jinou rekonstrukci povrchu. Jakmile je vytvořena aproximace povrchu, geometrie je dále přenesena do CAD modelu, který umožňuje redesign, analýzu odchylek nebo výrobu.



Obrázek 17: RE flowchart

Zdroj: Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014

#### 1.4.1 Zpracování mračna bodů

Zpracování mračna bodů znamená převod skenovacích dat na strukturovanou datovou sadu vhodnou pro rekonstrukci. (El-Hayek a kol., 2014) zdůrazňuje, že volně tvarované plochy vyžadují husté vzorkování, avšak nezpracovaná mračna bodů často obsahují šum, odlehlé body a nepravidelné rozestupy. Filtrování šumu odstraňuje disasociované body od měřené geometrie způsobené úhlem snímání, vzdáleností nebo omezeními senzoru. (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014) ukazuje, že nízký úhel dopadu deformuje laserový bod vytváří nespolehlivé body, které je nutné odstranit. Odstranění odlehlých bodů eliminuje izolované body pocházející ze zastíněných nebo špatně osvětlených oblastí. Pokud nejsou odstraněny, mohou způsobit díry nebo výstupky v rekonstruovaném povrchu.

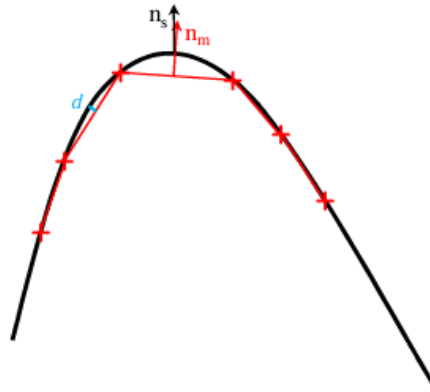
#### 1.4.2 Metody rekonstrukce povrchu

Rekonstrukce povrchu převádí zpracované mračno bodů na spojitou geometrickou reprezentaci. U volně tvarovaných ploch je tento krok zásadní, protože jejich geometrie je obvykle asymetrická a postrádá analytický popis.

Síťování (*meshing*) vytváří diskrétní reprezentaci povrchu (polygonové sítě), (El-Hayek a kol., 2014) jej popisuje jako „lineární interpolaci bodů, která na nich vytváří strukturu“, což umožňuje organizovat bodovou množinu a připravit ji pro další zpracování.

Pokud je vyžadován model připravený pro CAD, rekonstrukce povrchu nahrazuje bodová data parametrickými plochami, tedy plochami, které se nejvíce podobají naměřeným bodům. (Hsieh,

2012) zdůrazňuje, že cílem RE je vytvářet „počítačové modely, které jsou téměř identické se svými reálnými předlohami“, což obvykle zahrnuje aproximaci pomocí NURBS nebo jiných parametrických forem. (El-Hayek a kol., 2014) uvádí, že pokud existuje analytický model (např. asférická plocha), lze strukturovanou množinu bodů s tímto modelem asociovat (Obrázek 18). Pokud neexistuje, je nutná parametrické doplnění povrchu.



**Obrázek 18: Rozdíl mezi sítí (diskrétní reprezentace povrchu, červená) a analytickým modelem**

Zdroj: El-Hayek a kol., 2014

#### 1.4.3 Registrace a zarovnávání skenů

Registrace zarovnává více skenů do jednoho souřadnicového systému. To je nezbytné zejména tehdy, když je nutné volně tvarované plochy snímat z více pohledů kvůli zakrytí. (Page a kol., 2005) uvádí, že oblasti s nízkým úhlem snímání mohou vyžadovat dodatečné skeny k doplnění celé geometrie, což činí registraci nevyhnutelnou. Iterativní zarovnání minimalizuje polohové rozdíly mezi překrývajícími se oblastmi. Princip je patrný u (El-Hayek a kol., 2014), kde je zdůrazněna potřeba strukturovaných bodových množin a správné asociace s podkladovou geometrií. Registrace založená na prvcích využívá geometrické prvky, jako jsou osy otvorů nebo referenční roviny. (Page a kol., 2005) tento přístup demonstruje na příkladu, kde jsou referenční objekty použity k umístění a zarovnání CAD prvků vůči naskenované geometrii. Globální nebo lokální zarovnání je implikováno požadavkem spojit více skenů a kontrolovat odchylky v celém datasetu, tvrdí (Chen a kol., 2015). Globální zarovnání stanovuje celkový souřadnicový rámec, zatímco lokální zpřesnění redukuje zbytkové chyby. Registrace zajišťuje, že vícehledová data tvoří koherentní základ pro rekonstrukci CAD modelu.

#### 1.4.4 Integrace do CAD

Konverze registrovaných skenů do CAD se opírá o aproximaci povrchu, tedy nahrazení strukturovaného mračka bodů, či polygonové sítě za spojitě matematické reprezentace (NURBS), uvádí (Chen a kol., 2015). Protože změřená geometrie často neodráží konstrukční záměr, je nutné tolerance znovu přiřadit na základě funkčních vztahů, nikoli podle surových měření, jak uvádí (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014).

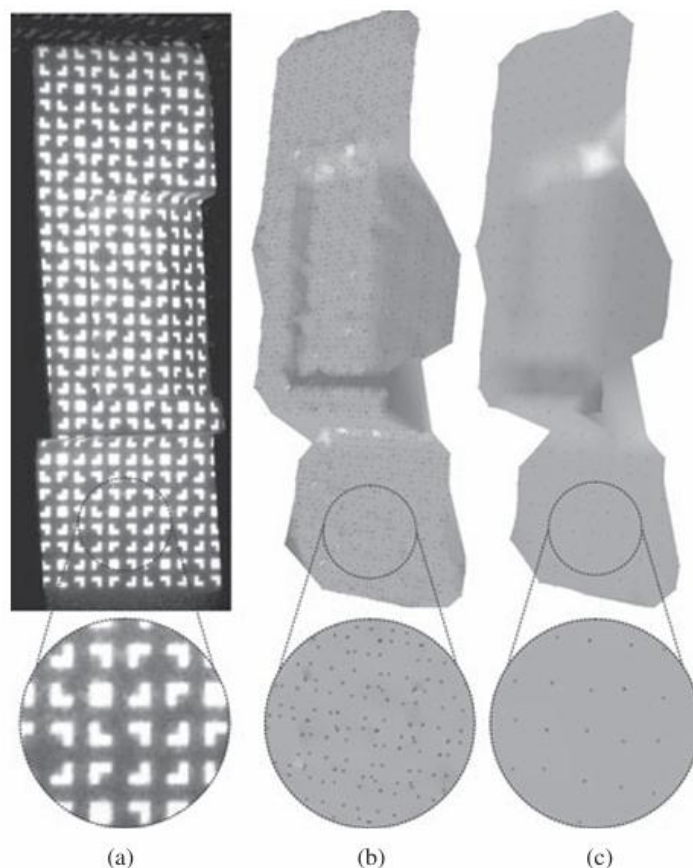
## 1.5 Nekonvenční metody analýzy volně tvarovaných ploch

Aby bylo možné popsat současné nekonvenční metody měření volně tvarovaných ploch, je potřeba je alespoň z části vymezit oproti těm konvenčním. Konvenční metody tvoří historický i technologický základ pro analýzu volně tvarovaných ploch. Vycházejí z širší oblasti souřadnicové metrologie, která, jak uvádí (Šladek, 2016), prošla vývojem od raných kontaktních systémů až k rozmanité skupině optických, či multisenzorových měřicích technologií. Navzdory tomuto pokroku ovšem přetrvávají významná omezení. Jak zdůrazňuje (Yao, Anderson a Rolland, 2018), nedostatek vhodných měřicích technologií je hlavní příčinou bránící širšímu průmyslovému rozšíření produktů s volně tvarovanými plochami. Tato kapitola shrnuje konvenční metody analýz volně tvarovaných ploch: CMM, optické skenování, fotometrické stereo. CMM již bylo probráno v *podkapitole 1.3.1*. Optické skenování, které je založené na technologii laserové triangulace, a fotometrické stereo které je založené na technologii strukturovaného světla, byli jako technologie probrány v *podkapitole 1.3.2*.

Nekonvenční metody analýzy volně tvarovaných ploch se vyvinuly jako reakce na omezení konvenčních metod. Jak ukázaly předchozí kapitoly, CMM, optické skenování a fotometrické přístupy často selhávají u povrchů se strmými sklony, vysokou odrazivostí, zakrytím nebo tam, kde je nezbytné husté vzorkování. Metody představené v této kapitole představují posun směrem k adaptivnějším strategiím.

### 1.5.1 Metody husté optické rekonstrukce

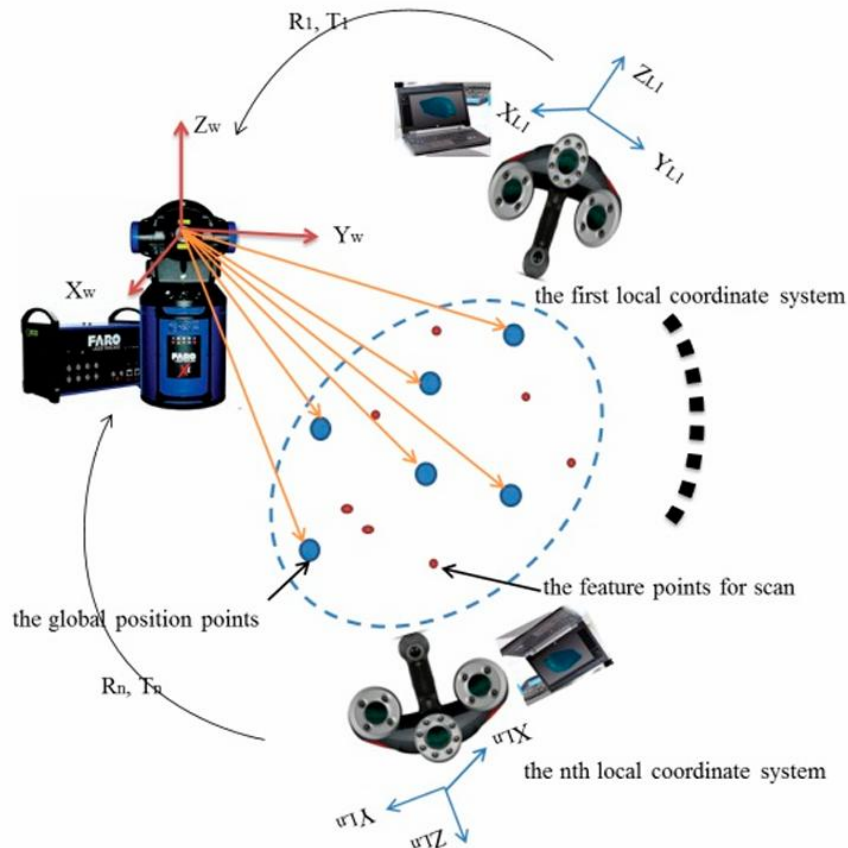
Metody husté optické rekonstrukce (*high-density optical reconstruction methods*) představují nekonvenční metodu měření volně tvarovaných ploch pomocí strukturovaného světla. Strukturované světlo je dobře zavedená technika, avšak několik přístupů představuje nekonvenční varianty. (Reiss a Tommaselli, 2011) představuje metodu, která dosahuje husté rekonstrukce z jediného projekčního vzoru, čímž odpadá potřeba sekvenčního fázového posunu a snižuje se citlivost na pohyb či vibrace za cenu snížené přesnosti (*Obrázek 19*). (Reiss a Tommaselli, 2011) zdůrazňuje, že systém je navržen pro jednorázovou projekci (*single-shot projection*), což umožňuje rychlou akvizici hustých geometrických informací. (Nguyen a kol., 2022) tento koncept dále rozvíjí zavedením dekódování založeného na strojovém učení. Namísto klasického indexace vzorů používá trénovaný model, který interpretuje projekční vzor, čímž zvyšuje robustnost při neúplně nasnímaném povrchu. Tento přístup je nekonvenční, protože vylučuje požadavek více projekcí, a tím částečně odpadá s tím spojená nejistota.



**Obrázek 19: Metoda husté optické rekonstrukce – (a) Původní objekt s projekcí vzorů, (b) obraz renderovaný z tvarů vzorů, (c) obraz renderovaný z centroidů vzorů**

*Zdroj: Reiss a Tommaselli, 2011*

Další metodu představuje (Zang a kol., 2018), která modifikuje chování skeneru na základě lokálního zakřivení a složitosti rysů. (Zang a kol., 2018) zdůrazňuje, že metoda přizpůsobuje skenovací parametry tak, aby poskytla hustší vzorkování v kritických oblastech, čímž zlepšuje kvalitu rekonstrukce bez nadměrného prodloužení času měření. (Chen a kol., 2015) popisuje obdobnou metodu, kde jsou husté lokální skeny kombinovány s globálními pozičními daty, což zajišťuje jak detail, tak globální přesnost (Obrázek 20). Tyto metody jsou nekonvenční, protože se odklánějí od rovnoměrného vzorkování a místo toho využívají geometrické, adaptivní nebo hybridní strategie, které zajišťují, že složité oblasti volně tvarovaných ploch získají potřebnou hustotu měření.



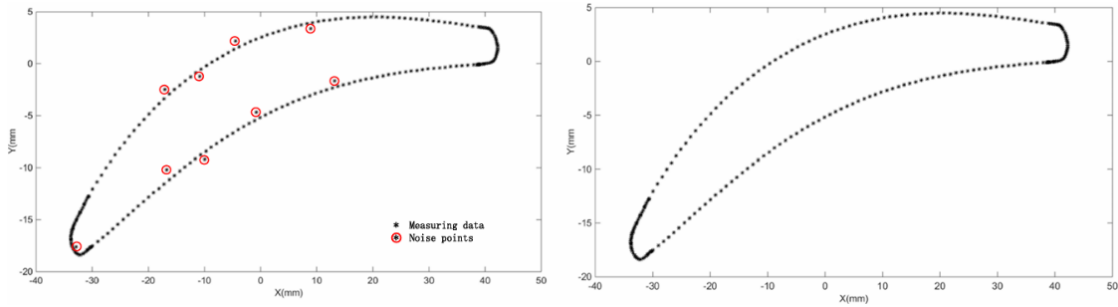
Obrázek 20: Metoda hustých lokálních skenů kombinovaných s globálními pozičními daty

Zdroj: Chen a kol., 2015

### 1.5.2 Rekonstrukce povrchu založená na strojovém učení a umělé inteligenci

Metody založené na strojovém učení a umělé inteligenci představují rychle se rozvíjející oblast analýzy volně tvarovaných ploch. Narozdíl od tradiční metrologie, která spoléhá na explicitní geometrické modely nebo deterministické algoritmy, přístupy řízené AI se učí vzory přímo z dat. Díky tomu dokážou pracovat s neúplnými, šumem zatíženými nebo nepravidelnými měřeními, tedy s podmínkami, které se při skenování složitých volně tvarovaných ploch často vyskytují.

(Tzathas, Maragos a Roussos, 2023) představuje metodu založenou na neuronové síti pro editaci a rekonstrukci tvarů reprezentovaných jako SDF. Ačkoli se ve své práci zaměřuje na interaktivní editaci volně tvarovaných ploch, její klíčový princip neuronové implicitní reprezentace je přímo použitelný pro rekonstrukci volně tvarovaných ploch. Neuronové SDF dokážou reprezentovat velmi složité geometrie s hladkou kontinuitou a mohou dopočítat chybějící oblasti na základě kontextu. (Hartung a kol., 2022) hodnotí systémy AI, které rekonstruují 3D geometrii z jediného snímku. Dále ukazuje, že AI dokáže odvodit věrohodnou 3D strukturu i z extrémně omezených dat, což demonstruje potenciál naučených apriorních znalostí v rekonstrukčních úlohách. Ovšem, (El-Hayek a kol., 2014), varuje před nedostatkem návaznosti u implicitních metod, které postrádají záruky skutečné rekonstrukce povrchu a nelze z nich vyvodit metrologické nejistoty.

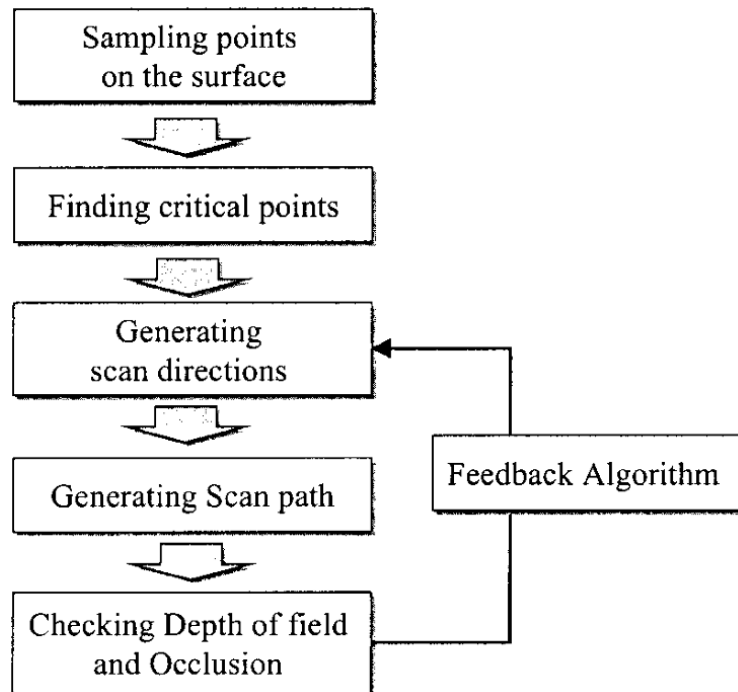


**Obrázek 21: Filtrace šumu – nalevo je neměřený tvar s šumem (červeně), napravo pak tvar po filtraci**  
*Zdroj: Jiang, Wang a Wang, 2019*

Filtrace šumu není metodou měření, ale je klíčovou aktivitou při rekonstrukci volně tvarovaných ploch do digitální reprezentace. (Jiang, Wang a Wang, 2019) představuje metodu, která integruje více vzorků ke snížení šumu v dotekových měřeních, kdy demonstruje princip datově řízené redukce šumu, který je v souladu s přístupy strojového učení (Obrázek 21). (Zang a kol., 2018) popisuje adaptivní skenovací strategie, které implicitně vyžadují klasifikaci nebo segmentaci oblastí povrchu na základě zakřivení nebo složitosti. Tyto metody ukazují, že nekonvenční filtrace šumu a segmentace se opírají o adaptivní chování založené na datech, což tvoří základ pro zpracování řízené umělou inteligencí.

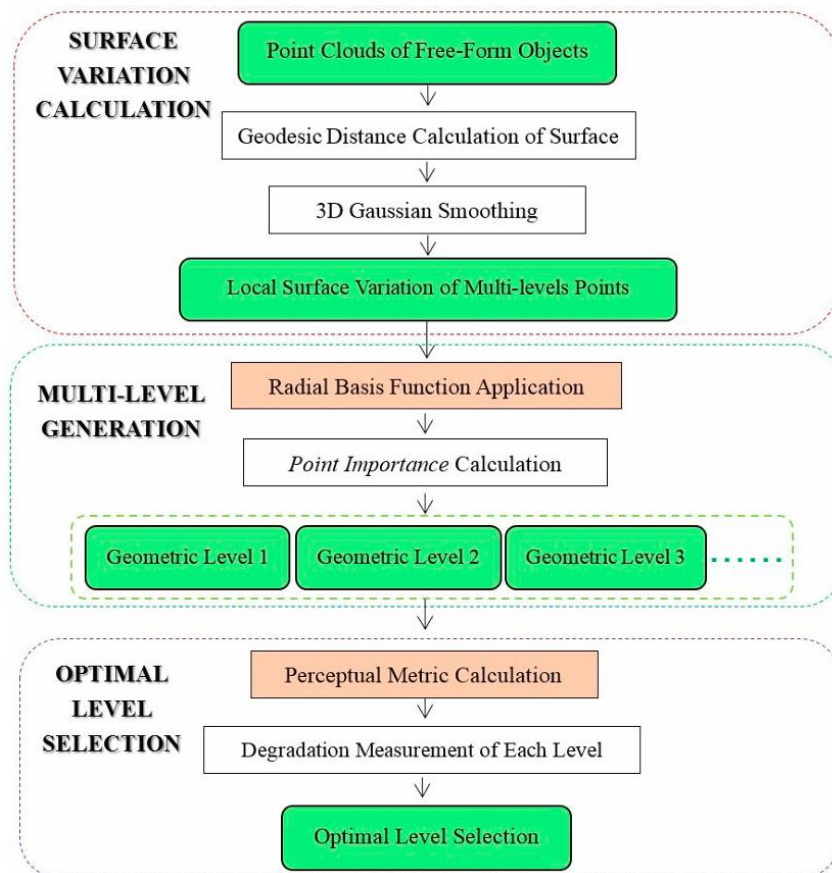
### 1.5.3 Hybridní skenovací metody

Hybridní skenovací metody kombinují více měřicích modalit, víceměřítková data nebo strategie řízené CAD modelem, aby překonaly omezení jednotlivých technik. Optické metody často integrují strukturované světlo s fotogrammetrií nebo sloučením více pohledů (*multi-view fusion*). (Page a kol., 2005) kombinuje kódovanou projekci vzorů s laserovou triangulací (Obrázek 23), (Geng, 2011) uvádí, že strukturované světlo lze doplnit mnohapohledovým 3D vykreslením (*multiple 3D imaging*) pro zlepšení pokrytí. Tyto přístupy společně zlepšují pokrytí, snižují zakrytí a zvyšují kvalitu rekonstrukce. (Sładek, 2016) uvádí rostoucí multisenzorový charakter moderních souřadnicových systémů a (Jiang, Wang a Wang, 2019) ukazuje, že kombinace taktilních a optických dat může zvýšit přesnost prostřednictvím integrace vícera vzorků. To umožňuje pracovní postup, v nichž CMM poskytuje referenční přesnost, zatímco skenery dodávají data. (Lee, Park a Son, 2001) navrhuje plánování laserového skenování na základě CAD modelu povrchu a (Zang a kol., 2018) upravuje hustotu vzorkování podle lokálního zakřivení (Obrázek 22). Tyto metody zajišťují, že kritické oblasti budou změřeny dostatečně a že skenovací trajektorie jsou optimalizovány.



Obrázek 23: Flowchart s kódovanou projekcí vzorů s laserovou triangulací

Zdroj: Page a kol., 2005



Obrázek 22: Flowchart metody upravení hustoty vzorkování podle lokálního zakřivení

Zdroj: Zang a kol., 2018

## 1.6 Metrologické charakteristiky nekonvenčního měření volně tvarovaných ploch

Jak bylo popsáno v předchozích podkapitolách, na rozdíl od tradičního pojetí metrologie, kde jsou měření prováděna pomocí geometricky definovaných prvků, měření volně tvarovaných ploch produkuje hustá prostorová data, jejichž přesnost závisí na parametrech měření jako je geometrie vzorkování, vlastnosti povrchu, podmínky prostředí a rekonstrukční algoritmy. Jak zdůrazňuje (Sładek, 2016), přesnost souřadnicového měřicího systému není nikdy definována pouze jeho maximální dovolenou chybou, naopak, „přesnost měřicího zařízení [...] je pouze jednou ze složek celkové přesnosti měření.“ Skutečná přesnost, (Sładek, 2016) pokračuje, je složená veličina zahrnující geometrické chyby, chyby snímání a chyby interakce kontaktu či optiky, které se kumulují v každém měřeném bodě, a které jsou funkcí již zmíněných parametrů měření.

U optických skenerů závisí na velikosti pixelu kamery, rozlišení projektoru (tj., nejmenší detekovatelná změna měření), geometrii triangulace a rekonstrukčních algoritmech, jak popisuje například (Geng, 2011). Opakovatelnost, diskutovaná ve (Sładek, 2016) pak popisuje konzistenci opakovaných měření za stejných podmínek. U 3D skenování je ovlivněna stabilitou skeneru, podmínkami prostředí a vlastnostmi povrchu. Na rozdíl od CMM, kde je opakovatelnost primárně mechanická, musí optické systémy řešit také osvětlení, odrazivost a úhlově závislé deformace.

### 1.6.1 Zdroje chyb nekonvenčního měření volně tvarovaných ploch

Podmínky prostředí významně ovlivňují přesnost 3D skenování. (Sładek, 2016) zdůrazňuje teplotu jako klíčový faktor ovlivňující souřadnicové systémy, protože zasahuje jak do mechanické stability, tak do chování optických komponent. Optické skenery jsou také citlivé na osvětlení okolí. Například systémy strukturovaného světla vyžadují řízené světelné podmínky, aby byla zajištěna viditelnost vzoru, jak popisuje (Geng, 2011). Vibrace a mechanická nestabilita mohou zavádět šum nebo rozmazání, zejména u jednorázových (*single-shot*) nebo vysokorychlostních systémů.

Dalším faktorem ovlivňující kvalitu měření jsou vlastnosti povrchu. Lesklé nebo reflexní povrchy mohou zahltnit kamery nebo deformovat projekční vzory, což snižuje přesnost rekonstrukce, uvádí (Geng, 2011). Barva a textura ovlivňují kontrast vzoru, zatímco drsnost mění tvar laserového bodu a způsobuje rozptyl. (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014) ukazuje, že strmé sklony způsobují deformaci laseru, což vede k nespolehlivým měřením. Transparentní nebo tmavé povrchy mohou vyžadovat speciální povlaky nebo alternativní měřicí strategie.

V neposlední řadě je významným zdrojem chyb relativní orientace skeneru a objektu. Optické triangulační systémy spoléhají na předvídatelnou geometrii, a šikmý dopad snižuje přesnost a zvyšuje šum. (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014) ukazuje, že oblasti snímání pod nízkým úhlem často vyžadují více skenů, což zvyšuje riziko chyb registrace. Zakrytí a stínění jsou běžné u složitých geometrií, jak uvádí (Geng, 2011) a (Lee, Park a Son, 2001), a vyžadují víceúhlovou akvizici bodů a pečlivé plánování.

### 1.6.2 Vyhodnocení nejistoty nekonvenčního měření volně tvarovaných ploch

(Gao, Felgner a Brand, 2025) a (Sładek, 2016) zdůrazňují potřebu vhodných kalibračních etalonů a standardů u vznikajících kalibračních technologií. Zároveň oba zdůrazňují, že kalibrační měřidla musí odrážet geometrickou složitost volně tvarovaných ploch, aby bylo možné zajistit metrologickou návaznost a spolehlivost měření. Vyhodnocení nejistoty ve 3D skenování lze řídit principy GUM, (OIML, 2008). Nejistoty typu A vznikají ze statistické variability opakovaných měření, zatímco nejistoty typu B vycházejí z kalibračních certifikátů, specifikací výrobce a modelových předpokladů. (Sładek, 2016) zdůrazňuje, že nejistota souřadnicového měření je vícesložková a nelze ji odvodit pouze ze specifikace zařízení. Aplikace GUM na volně tvarované plochy je tím pádem náročná, protože měřicí model je komplexní a prostorově proměnný. Každý bod v mračnu bodů má vlastní příspěvek k nejistotě, ovlivněný lokální geometrií, vlastnostmi povrchu a podmínkami skenování a je nutné to vzít v potaz, jak popisuje (Sładek, 2016).

Registrace zavádí nejistotu zarovnání při spojování více skenů, zejména pokud je překryv omezený, jak uvádí (Chen a kol., 2015), a (Page a kol., 2005). Rekonstrukce povrchu pomocí algoritmů přidává modelovou nejistotu prostřednictvím tvorby sítě a aproximace povrchu. Porovnání s CAD pak odráží jak nejistotu měření, tak věrnost rekonstruovaného povrchu. Filtrace šumu a integrace více vzorků, popsané v (Jiang, Wang a Wang, 2019), mohou nejistotu snížit, avšak mohou také přidat vlastní chybovost. (Sładek, 2016)] popisuje simulační metody, jako jsou virtuální CMM, a odhad nejistoty pomocí neuronových sítí. Tyto nástroje umožňují předpovídat měřicí schopnosti a rozložení nejistoty napříč složitými geometriemi.

## 1.7 Identifikované mezery v literatuře

Literatura analyzovaná v kapitole 1 *Teoretická část* nastínila kontext prostředí volně tvarovaných ploch a odhalila několik příležitostí ke zlepšení nekonvenčního měření těchto ploch. Tyto mezery zdůvodňují potřebu dalšího výzkumu v oblasti nekonvenčních analýz volně tvarovaných ploch.

### 1.7.1 Nedostatek standardizovaných postupů pro volně tvarované plochy

Opakujícím se tématem napříč zdroji je absence standardizovaných postupů pro měření volně tvarovaných ploch. (El-Hayek a kol., 2014) uvádí, že „3D metrologie volně tvarovaných ploch zatím není standardizovaná“, a že přístupy se výrazně liší podle aplikace. Stávající normy, jako *ISO 10360*, se zaměřují na geometrické primitivy a nezohledňují výzvy spojené se složitými, neanalytickými povrchy. Neexistuje jednotný pracovní postup pokrývající plánování měření, skenování, registraci, rekonstrukci a vyhodnocení. Tento nedostatek standardizace vede k nekonzistentním výsledkům a závislosti na expertní intuici.

### 1.7.2 Nedostatečná přesnost konvenčních metod

Konvenční měřicí metody často nesplňují požadavky přesnosti funkčních volně tvarovaných ploch. CMM, ačkoliv přesné, jsou příliš pomalé pro husté vzorkování a nevhodné pro strmé nebo nepřístupné oblasti, popisuje (Yao, Anderson a Rolland, 2018), a (Ghim a kol., 2014). Optické skenery jsou citlivé na odrazivost povrchu, úhel snímání a podmínky prostředí, uvádí (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014), a (Yao, Anderson a Rolland, 2018)]. Interferometrické metody mají potíže se strmými sklony a velkými odchylkami, vyžadují složité zarovnání a kalibraci, uvádí (Yao,

Anderson a Rolland, 2018). Tato omezení ztěžují dosažení spolehlivých měření napříč celými volně tvarovanými plochami.

### 1.7.3 Omezená integrace reverzního inženýrství a metrologie

RE je široce používané pro replikaci a CAD rekonstrukci, avšak jeho integrace s metrologií je stále omezená. (Janik, Grabowik a Ćwikła, 2014) ukazuje, že RE by se dala integrovat jako metodika do měření volně tvarovaných ploch. (Page a kol., 2005) a (Salmi a kol., 2014) demonstrují CAD rekonstrukci založenou na RE, ale neřeší metrologickou návaznost ani nejistotu měření. Existují hybridní RE, jako například kombinace lokálního skenování s globálním určováním Polohy (Chen a kol., 2015) nebo plánování skenování řízené CAD modelem (Chen a kol., 2015).

## 2 Návrh metodiky měření

Metoda popsaná v této kapitole představuje ucelený a normativně ukotvený postup měření volně tvarovaných ploch pomocí optického 3D skeneru založeného na laserové triangulaci. Je vystavěna na principech GPS podle *ISO 17450-1* (ISO, 2011c) a *ISO 17450-2* (ISO, 2012), specifikaci a interpretaci geometrických charakteristik podle *DIN EN ISO 1101* (DIN, 2006), definici soustav základů podle *ISO 5459* (ISO, 2011b), obecných zásad geometrické specifikace a měření podle *ISO 8015* (ISO, 2011a) a referenčních podmínek podle *ISO 1* (ISO, 2016). Metrologické zhodnocení a práce s nejistotou vychází z GUM, (OIML, 2008) a rámce rozhodovacích pravidel podle *ISO 14253-1* (ISO, 2013), zatímco metrologické charakteristiky měřicího systému jsou převzaty z kalibračního listu. Metoda zahrnuje definici měřicího systému dle technické dokumentace, měřené entity, přípravu měření, zpracování dat, výpočet úchylek, metrologické zhodnocení a strukturu výstupu. Přehled jednotlivých kroků je uveden v Tabulce 1.

**Tabulka 1: Přehled návrhu metodiky měření**

Krok metody	Normativní základ	Vstup	Výstup
<b>1. Definice</b>	ISO 17450-1/2, ISO 5459, ISO 1101, ISO 14253-1	Metrologické charakteristiky skeneru	Vymezení entit, referenčního systému, charakteristiky a operací
<b>2. Příprava</b>	ISO 1, ISO 8015, ISO 17450-1/2	Kalibrační podmínky, technické požadavky skeneru	Stabilní prostředí, připravený povrch, správná aplikace markerů, strategie skenování
<b>3. Zpracování</b>	ISO 17450-1/2 (extrakce, filtrace, rekonstrukce, transformace, přiřazení)	Parametry skeneru a softwaru	Zarovnaná, rekonstruovaná a validovaná data připravená pro výpočet úchylek
<b>4. Výpočet úchylek</b>	ISO 17450-1, ISO 1101 (profilová tolerance)	Zarovnaná síť a CAD model	Normálové úchylky, mapa úchylek, histogram, statistiky
<b>5. Metrologické zhodnocení</b>	GUM, ISO 14253-1	$u_{cal}$ , $u_{align}$ , další složky nejistoty	Identifikace zdrojů nejistoty, limity metody, validita výsledků
<b>6. Výstup</b>	ISO 14253-1 (dokumentace), ISO 17450-2	Archiv a export dat, report	Reprodukovatelný, jednoznačný a metrologicky validní výstup

Zdroj: vlastní zpracování

## 2.1 Definice

Tato kapitola vymezuje základní pojmy, entity a principy, na kterých je metoda založena. Definice vycházejí z norem *ISO 17450-1* (ISO, 2011c), *ISO 17450-2* (ISO, 2012), *ISO 5459* (ISO, 2011b), *DIN EN ISO 110* (DIN, 2006)1, a *ISO 14253-1* (ISO, 2013). Jejich jednoznačné stanovení je nezbytné pro správnou interpretaci měření, výpočet úchylek i následné metrologické zhodnocení.

### 2.1.1 Definice měřené entity

Metoda rozlišuje několik typů geometrických entit, které společně tvoří základní rámec použitého GPS systému:

- **„Skutečný povrch:** soubor prvků, které fyzicky existují a oddělují celou součást od okolního média.“ (ISO, 2011c),
- **„Jmenovitý model:** model dokonalého tvaru stanoveného konstruktérem.“ (ISO, 2011c),
- **„Model neideálního povrchu:** model fyzického rozhraní součásti s jeho okolím.“ (ISO, 2011c),
- **„Situační prvek:** bod, přímka, rovina, nebo šroubovice, ze které lze stanovit umístění a/nebo orientaci geometrického prvku.“ (ISO, 2011c),
- **„Neideální prvek:** nedokonalý geometrický prvek plně závislý na modelu neideálního povrchu, nebo na skutečném povrchu součásti.“ (ISO, 2011c),
- **„Extrahovaný prvek:** geometrický prvek stanovující soubor konečného počtu bodů.“ (ISO, 2011c),
- **„Filtrovaný prvek:** neideální prvek, který je výsledkem filtrace neideálního prvku.“ (ISO, 2011c),
- **„Rekonstruovaný prvek:** spojitý geometrický prvek stanovující soubor konečného počtu bodů.“ (ISO, 2011c),
- **„Přiřazený prvek:** ideální prvek stanovený z modelu neideálního povrchu, nebo ze skutečného prvku pomocí operace přiřazení.“ (ISO, 2011c).

Toto rozlišení je nezbytné pro správné provedení operací nezbytných pro správné popsání toho, co je měřeno, a jak je to interpretováno.

### 2.1.2 Definice soustavy základů

Systém základů je definován podle normy (ISO, 2011b), která stanovuje pojmy:

- **„Základní prvek:** skutečný (neideální) integrální prvek použitý pro ustavení základny.“ (ISO, 2011b),
- **„Přiřazený prvek:** skutečný (neideální) integrální prvek použitý pro ustavení základny.“ (ISO, 2011b),
- **„Základna:** jeden nebo více situačních prvků jednoho nebo více prvků přiřazených k jednomu nebo k více skutečným integrálním prvkům, vybraných ke stanovení umístění a/nebo orientace tolerančního pole, nebo ideálního prvku představujícího například virtuální podmínku.“ (ISO, 2011b),

- **„Soustava základů“:** dvou nebo více situačních prvků ustavených v určitém pořadí ze dvou nebo více základních prvků.“ (ISO, 2011b).

V této metodě je soustava základů definována jmenovitým CAD modelem. Markery použité při skenování slouží pouze jako pomocné prvky pro orientaci skeneru a nejsou situačními prvky ve smyslu (ISO, 2011b). Situační prvky definované v (ISO, 2011b) se vztahují ke skutečným nebo přiřazeným geometrickým prvkům dílu, nikoli k externím orientačním značkám.

### 2.1.3 Definice relevantní geometrické charakteristiky

Geometrická charakteristika je definována podle (ISO, 2011c) jako veličina popisující geometrické vlastnosti entity. V této metodě je charakteristikou: *úchylka skutečné plochy od plochy jmenovitého modelu ve směru normály plochy jmenovitého modelu*. Úchylka je definována v (ISO, 2011c) jako „rozdíl mezi hodnotou charakteristiky získanou ze skutečného povrchu součásti, nebo modelu neideálního povrchu, a odpovídající jmenovitou hodnotou.“

### 2.1.4 Definice tolerančního modelu

Toleranční model stanovuje způsob interpretace geometrické charakteristiky. Metoda vychází z konceptu zónové specifikace podle (ISO, 2011c), limitující dovolenou úchylku v rámci ideálního prvku. Směr vyhodnocení je definován jako normála k ploše jmenovitého modelu. Toleranční model v metodě slouží k:

- definici směru úchylky,
- interpretaci znaménka,
- výpočtu statistických charakteristik (např. směrodatná odchylka, RMS, histogram).

Toleranční model zde slouží primárně jako výpočetní rámec, nikoli jako výpočetní nástroj pro posouzení shody stanovených tolerancí. Tato metoda definuje rozhodovací pravidla obecně, ale jejich aplikace je podmíněna existencí tolerance.

### 2.1.5 Definice operací

Metoda využívá operace definované v (ISO, 2011c) a (ISO, 2012):

- **„Extrakce“:** prvková operace použitá k identifikaci určitých bodů neideálního prvku.“ (ISO, 2011c),
- **„Filtrace“:** prvková operace použitá k vytvoření neideálního prvku z neideálního prvku, nebo k transformování jedné variační křivky na jinou pomocí redukce úrovně informací.“ (ISO, 2011c),
- **„Rekonstrukce“:** prvková operace použitá k vytvoření spojitého prvku z extrahovaného prvku.“ (ISO, 2011c),
- **„Přiřazení“:** prvková operace použitá k přiřazení ideálního prvku (prvků) k neideálnímu prvku (prvkům) podle příslušného kritéria.“ (ISO, 2011c),
- **„Transformace“:** operace použitá k převedení jedné variační křivky na jinou.“ (ISO, 2011c),

- **„Operace specifikace:** operace vyjádřená pouze s použitím matematických nebo geometrických výrazů, nebo algoritmů, nebo jejich kombinací a definující část specifikace.“ (ISO, 2012),
- **„Operace ověření:** operace, která je implementována v rámci měření, nebo pomocí měřicího přístroje, nebo v rámci obojího a je ve shodě s *operací skutečné specifikace*.“ (ISO, 2012).

#### 2.1.6 Definice měřicího systému a jeho metrologických charakteristik

Měřicím systémem je optický 3D skener založený na principu laserové triangulace a software pro zpracování mračna bodů generovaného 3D skenerem. Metoda vyžaduje definovat:

- typ měřidla a jeho technickou dokumentaci,
- metrologické charakteristiky z kalibračního listu měřidla (PS, SD, U ( $k = 2$ )),
- návaznost na normy (např. VDI/VDE 2634-3),
- princip měření a jeho omezení.

Tyto charakteristiky tvoří vstupní složku nejistoty měření a jsou nezbytné pro metrologickou validitu metody.

#### 2.1.7 Definice podmínek měření

Podmínky měření musí být v souladu s požadavky:

- Měření za referenčních podmínek (ISO, 2011a),
- uživatelského manuálu měřicího systému, tj., stabilizace zařízení, čistota povrchu, vhodné prostředí.

Metoda předpokládá stabilní teplotu, čistý povrch, rigidní objekt a stabilizovaný měřicí systém. Tyto podmínky ovlivňují kvalitu extrakce dat i výslednou nejistotu.

#### 2.1.8 Definice nejistoty měření a rozhodovacích pravidel

Nejistota měření je definována podle GUM (OIML, 2008) jako kombinace složek:

- $u_{cal}$ : nejistota z kalibrace,
- $u_{rep}$ : opakovatelnost,
- $u_{env}$ : vliv prostředí,
- $u_{alg}$ : algoritmická nejistota,
- $u_{align}$ : nejistota zarovnání.

Rozšířená nejistota je vyjádřena jako:

$$U = k \cdot u_c, \quad k = 2$$

Rozhodovací pravidla jsou definována podle (ISO, 2013), která stanovují, jak se výsledky porovnávají se specifikací. Metoda tato pravidla obsahuje, i když tolerance nemusí být v konkrétní aplikaci stanovena, v závislosti na vstupních datech.

## 2.2 Příprava

Příprava měření představuje soubor kroků, které zajišťují, že měřicí systém, prostředí i měřený objekt splňují podmínky potřebné pro získání metrologicky validních dat. Tyto kroky vycházejí z požadavků norem *ISO 1* (ISO, 2016), *ISO 8015* (ISO, 2011a), *ISO 17450-1* (ISO, 2011c), *ISO 17450-2* (ISO, 2012) a z technických specifikací měřicího systému založeného na laserové triangulaci. Správná příprava je nezbytná pro minimalizaci systematických chyb, stabilitu extrakce dat a reprodukovatelnost výsledků.

### 2.2.1 Stabilizace měřicího systému

Před zahájením měření musí být měřicí systém stabilizován, aby se minimalizoval teplotní drift optických a elektronických komponent. Stabilizace je požadavkem jak norem pro referenční podmínky měření (ISO, 2011a), tak uživatelských pokynů výrobce. Měření by mělo probíhat v prostředí s teplotou blízkou kalibračním podmínkám a bez náhlých teplotních změn, které by mohly ovlivnit přesnost extrakce bodů.

### 2.2.2 Kontrola a příprava prostředí

Prostředí musí splňovat podmínky, které umožňují stabilní a opakovatelné měření. Patří sem teplota blízká 20 °C, stabilní osvětlení bez přímého slunečního záření, absence vibrací a čisté pracovní prostředí bez prachu, oleje nebo vlhkosti, (ISO, 2016). Tyto faktory ovlivňují kvalitu extrakce dat a mohou způsobit šum, ztrátu bodů nebo chyby rekonstrukce.

### 2.2.3 Příprava povrchu měřeného objektu

Povrch měřeného objektu musí být čistý, suchý a bez kontaminace. Laserová triangulace je citlivá na odlesky, mastnotu, prach a další povrchové artefakty, které mohou negativně ovlivnit extrakci bodů, (ISO, 2016). U vysoce lesklých nebo tmavých povrchů může být nutné zvážit použití matovacího spreje, pokud to povaha měření umožňuje.

### 2.2.4 Aplikace markerů

Pokud metoda využívá *marker tracking* pro určování polohy skeneru, je nutné zajistit správné rozmístění markerů na měřeném objektu a v jeho okolí. Markery musí být umístěny tak, aby byly stabilně detekovány všemi optickými snímači skeneru, nesmí být umístěny na ostré hrany nebo silně zakřivené oblasti a jejich rozteč musí odpovídat požadavkům měřicího systému, aby byl snímáný povrch správně připraven k extrakci dle (ISO, 2011c).

### 2.2.5 Volba strategie skenování

Strategie skenování musí být zvolena tak, aby zajistila dostatečné pokrytí povrchu, vhodný úhel dopadu laseru a dostatečný překryv mezi jednotlivými záběry. Volba režimu skenování, vzdálenosti od povrchu a trajektorie pohybu skeneru ovlivňuje hustotu bodů, kvalitu extrakce a přesnost rekonstrukce dle (ISO, 2011c). Viditelnost markerů musí být zajištěna v každém snímku, pokud je použita markerová navigace.

### 2.2.6 Kalibrace skeneru před měřením

Kalibrace je požadavkem výrobce a součástí metrologické návaznosti (ISO, 2012), a musí být provedena v případě změny teplotních podmínek, po transportu zařízení, při zhoršené kvalitě dat, nebo dle pokynů výrobce. Kalibrace pomocí kalibrační desky nastavuje parametry kamer a laseru a zajišťuje, že měřicí systém pracuje v souladu s hodnotami uvedenými v kalibračním listu.

### 2.2.7 Kontrola měřicího systému

Před zahájením měření musí být ověřena funkčnost měřicího systému. To zahrnuje kontrolu detekce markerů, stabilitu laserových linií, správné zobrazování náhledu a celkovou odezvu systému. Tento krok je součástí operace ověření ve smyslu normy (ISO, 2012).

### 2.2.8 Příprava objektu pro zarovnání

Pro správné zarovnání skenu do CAD souřadnicového systému musí být identifikovány a kvalitně naskenovány základní prvky. U volně tvarovaných objektů, kde nejsou k dispozici jednoznačné základní prvky, se používá markerové zarovnání nebo jiný situační prvek definovaný v (ISO 2011c). Zajištění viditelnosti a kvality těchto prvků je nezbytné pro správnou transformaci dat.

### 2.2.9 Příprava software a počítače

Software a hardware musí být připraveny tak, aby umožnily stabilní extrakci a rekonstrukci dat. Patří sem kontrola licencí, ovladačů grafické karty, nastavení výkonového režimu CPU a volba parametrů skenování, jako je expoziční nastavení nebo hustota bodů, (SCANTECH, 2023b). Tyto parametry ovlivňují kvalitu vstupních dat a musí být zvoleny v souladu s požadavky měřicího systému.

### 2.2.10 Zajištění bezpečnosti a správné manipulace

Příprava měření zahrnuje dodržování bezpečnostních pokynů. Laser třídy 2M nesmí být směřován do očí, kabely nesmí být ohýbány nebo namáhány a zařízení nesmí být používáno v prostředí s prachem, výpary nebo nedostatečnou ventilací, dle (SCANTECH, 2023b). Správná manipulace je nezbytná pro bezpečnost obsluhy i pro dlouhodobou stabilitu měřicího systému. Je nezbytné dodržovat bezpečnostních pokynů výrobce a pracoviště.

## 2.3 Zpracování

Zpracování dat představuje sekvenci operací, které převádějí extrahovaná měřicí data do formy vhodné pro výpočet geometrických úchylek. Správné provedení každého kroku je nezbytné pro metrologickou validitu výsledků.

### 2.3.1 Import a prvotní kontrola dat

Po dokončení měření jsou naskenovaná data (ve formě mračna bodů) importována do softwaru 3D skeneru pro jejich další zpracování. Prvním krokem je kontrola integrity dat, která zahrnuje

identifikaci chybějících oblastí, šumu, odlesků a dalších nedostatků extrakce. Tato kontrola je nutná, protože podle (ISO, 2011c) musí extrahovaný prvek reprezentovat skutečný povrch. Pokud data tuto podmínku nesplňují, nelze provést validní výpočet úchylek.

### 2.3.2 Filtrace dat

Filtrace je operace, která odstraňuje šum, izolované body, odlesky a další nedokonalosti, které nejsou reprezentativní pro skutečnou geometrii. Filtrace zajišťuje stabilitu následných kroků, zejména rekonstrukce a přiřazení. V závislosti na charakteru dat mohou být použity statistické filtry, odstranění odlehlých hodnot (*outlier removal*) nebo jemné vyhlazování (*smoothing*), pokud neovlivní skutečnou geometrii.

### 2.3.3 Rekonstrukce povrchu

Rekonstrukce vytváří spojitou reprezentaci povrchu ve formě polygonové sítě. Rekonstrukce musí zachovat topologii a tvar povrchu tak, aby odpovídala skutečnému povrchu. Kvalita triangulace ovlivňuje přesnost následného přiřazení a výpočet úchylek.

### 2.3.4 Zarovnání skenu na CAD

Zarovnání (*alignment / registration*) převádí sken do souřadnicového systému CAD modelu (CAD CSYS) v souladu s konceptem operace ověření. Metoda musí jednoznačně definovat použitý typ zarovnání, např. *marker-based*, *feature-based* nebo *best-fit* (ICP).

Transformace mezi skenem a CAD modelem je provedena jako rigidní (rotace + translace), protože specifikční operátor v GPS neobsahuje škálování a verifikační operátor musí být podle (ISO, 2012) tomuto operátoru co nejbližší. Rigidní transformace tak zajišťuje, že geometrické charakteristiky nejsou změněny.

### 2.3.5 Volba a aplikace přiřazení

Přiřazení lze zvolit v závislosti na možnostech výpočetního algoritmu, ale v souladu s nutným formátem výsledku pro další operace. U volně tvarovaných ploch v této metodě je zvoleno přiřazení bodu k povrchu, přičemž úchylka je vyhodnocena ve směru normály k ploše jmenovitého modelu.

### 2.3.6 Transformace dat

Transformace převádí geometrické entity mezi souřadnicovými systémy. Transformace je výsledkem zarovnání a je aplikována na celý soubor dat, aby byly úchylky vyhodnoceny v CAD souřadnicovém systému.

### 2.3.7 Příprava dat pro výpočet úchylek

Před výpočtem úchylek musí být exportována zarovnaná síť do správného formátu pro další výpočet a ověřeno, že odpovídá správné verzi jmenovitého modelu. Data by neměla být zredukována způsobem, který by ovlivnil výsledek verifikačního operátoru. Tento krok zajišťuje,

že výpočet úchylek probíhá vůči správnému referenčnímu modelu a že výsledky jsou metrologicky validní.

## 2.4 Výpočet úchylek

Výpočet úchylek představuje klíčovou část metody, ve které jsou extrahovaná a zarovnaná měřicí data porovnávána se jmenovitým modelem. Tento krok vychází z definic uvedených v *ISO 17450-1* (ISO, 2011c), *DIN EN ISO 1101* (DIN, 2006) a *ISO 14253-1* (ISO, 2013) a tvoří jádro operace ověření. Metoda zde jednoznačně definuje měřenou veličinu, způsob výpočtu úchylek a podmínky, za kterých jsou výsledky interpretovány.

### 2.4.1 Definice měřené veličiny

Měřenou veličinou je úchylka mezi skutečným povrchem a plochou jmenovitého modelu. U volně tvarovaných ploch se úchylka vyhodnocuje jako normálová vzdálenost mezi skutečným povrchem a plochou jmenovitého modelu. Tento postup vyplývá z definice profilové tolerance podle (DIN, 2006), kde je toleranční zóna tvořena dvěma plochami rovnoběžnými s nominální plochou, což implikuje hodnocení ve směru normály. Normálová vzdálenost je také v souladu s definicí odchylky podle (ISO, 2011c)

### 2.4.2 Výpočet úchylek ve směru normály

Pro každý bod skenu je vypočítána vzdálenost k ploše jmenovitého modelu ve směru normály CAD modelu. Normála musí být odvozena z CAD modelu, nikoli z rekonstruované sítě, aby byla zajištěna jednoznačnost a metrologická správnost. Používá se přiřazení bodu k povrchu, která respektuje definici profilové charakteristiky podle (DIN, 2006).

### 2.4.3 Výpočet bodových úchylek

Výpočet bodové úchylky zahrnuje:

- nalezení nejbližšího bodu na CAD ploše,
- projekci bodu skenu na plochu jmenovitého modelu,
- výpočet vzdálenosti,
- určení znaménka (kladné / záporné) podle orientace normály.

Bodová úchylka je výpočetní krok, zatímco normálová úchylka je metrologická interpretace výsledku. Metoda musí popsat oba aspekty, protože společně tvoří definici úchylek podle (ISO, 2011c).

### 2.4.4 Výpočet mapy úchylek

Mapa úchylek je vizuální reprezentace hodnot úchylek na povrchu měřeného objektu vůči jmenovitému modelu. Obsahuje:

- barevné zobrazení úchylek,
- definovaný rozsah vizualizace,
- histogram rozložení úchylek,

- identifikaci lokálních extrémů.

Ačkoli zahrnuté ISO normy nedefinují mapu úchylek jako nástroj, úchylka je definovaná charakteristika, kterou lze vizuálně interpretovat, a její použití je konzistentní s nálezy v kapitole 1 *Teoretická část*.

#### 2.4.5 Výpočet úchylek podle definovaného referenčního systému

Úchylky musí být interpretovány v soustavě základěn jmenovitého modelu, protože jmenovité hodnoty jsou definovány v souřadném systému CAD modelu. Transformace mezi souřadnicovými systémy musí být rigidní, diskutováno v podkapitole 3.4. Tento krok neznamená nový výpočet úchylek, ale ověření, že úchylky byly spočítány ve správném referenčním rámci.

#### 2.4.6 Kontrola kvality výpočtu

Kontrola kvality výpočtu ověřuje, že výpočet úchylek je metrologicky správný. Zahrnuje:

- kontrolu, že žádný bod neleží mimo CAD model,
- ověření správné orientace normál,
- kontrolu absence šumu nebo artefaktů,
- ověření rigidní transformace.

Kontrola kvality výpočtu je v souladu s požadavkem (ISO, 2012), který stanovuje, že verifikační operátor musí minimalizovat nejistoty a být konzistentní se specifikačním operátorem. Ověření správné orientace normál, absence artefaktů a správné transformace je proto nezbytné pro metrologickou validitu výsledků.

#### 2.4.7 Export výsledků

Výsledky výpočtu úchylek musí být exportovány tak, aby byly reprodukovatelné a archivovatelné. Export zahrnuje:

- mapu úchylek,
- zarovnaná síť a CAD model,
- report obsahující statistiky úchylek.

Tento krok odpovídá požadavkům (ISO 2013) na dokumentaci výsledků měření.

#### 2.4.8 Příprava dat pro metrologické zhodnocení

Před výpočtem nejistoty a metrologického zhodnocení je nutné identifikovat:

- oblasti s největší úchylkou,
- oblasti s potenciálně zvýšenou nejistotou,
- vstupní parametry potřebné pro výpočet kombinované nejistoty podle GUM (OIML, 2008).

Tento krok zajišťuje, že výsledky výpočtu úchylek mohou být dále použity v následujícím kroku.

## 2.5 Metrologické zhodnocení

Metrologické zhodnocení představuje soubor kroků, které ověřují, zda je metoda měření volně tvarovaných ploch metrologicky validní, reprodukovatelná a v souladu s požadavky norem *ISO 17450-1* (ISO, 2011c), *ISO 17450-2* (ISO, 2012), *ISO 14253-1* (ISO, 2013), a GUM (OIML, 2008). Tato kapitola definuje způsob identifikace metrologických charakteristik měřicího systému, výpočet nejistoty měření, posouzení vlivu jednotlivých kroků metody a vyhodnocení jejich limitů.

### 2.5.1 Identifikace metrologických charakteristik skeneru

Metrologické charakteristiky měřicího systému jsou převzaty z kalibračního listu a tvoří základní vstupní složku nejistoty měření dle definice *ISO 14253-1*. Patří sem zejména:

- Chyba snímání (*Probing error*) (PS),
- chyba rozteče koulí (*Sphere spacing error*) (SD),
- rozšířená nejistota  $U$  ( $k=2$ ) vztahující se k PS a SD,
- podmínky kalibrace (teplota, vlhkost, referenční prostředí atd.).

Tyto charakteristiky představují složku  $u_{cal}$ , která je součástí kombinované nejistoty podle GUM (OIML, 2008).

### 2.5.2 Stanovení nejistoty měření

Nejistota měření je v této metodě vystavěna podle principů uvedených v GUM (OIML, 2008). Metoda identifikuje následující složky nejistoty, které mohou být zahrnuty do výpočtu v závislosti na dostupnosti dat:

- $u_{cal}$ : nejistota z kalibrace měřicího systému,
- $u_{rep}$ : nejistota způsobená opakovatelností měření,
- $u_{env}$ : vliv prostředí (teplota, vlhkost, stabilita),
- $u_{alg}$ : algoritmická nejistota (filtrace, triangulace, vyhlazování),
- $u_{align}$ : nejistota zarovnání.

Kombinovaná nejistota je definována jako:

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{rep}^2 + u_{env}^2 + u_{alg}^2 + u_{align}^2}$$

Rozšířená nejistota:

$$U = k \cdot u_c, \quad k = 2$$

Tento postup je v souladu s (ISO, 2013) která vyžaduje zahrnutí nejistoty do interpretace výsledků. V rámci této práce jsou kvantitativně vyhodnoceny složky  $u_{cal}$  a  $u_{align}$ , ostatní jsou diskutovány kvalitativně.

### 2.5.3 Vyhodnocení opakovatelnosti

Opakovatelnost umožňuje vyhodnotit více opakovaných měření za stejných podmínek. Pro každý sken mohou být vypočítány úchytky a jejich standardní úchytky tvoří složku  $u_{rep}$ . Opakovatelnost je složkou typu A podle GUM (OIML, 2008).

#### 2.5.4 Vyhodnocení vlivu zarovnání

Zarovnání je jedním z významných zdrojů nejistoty u optických 3D skenerů. Metoda umožňuje vyhodnotit vliv zarovnání porovnáním výsledků získaných různými typy registrace:

- marker-based zarovnání,
- prvkové zarovnání,
- best-fit (ICP).

Rozdíl mezi výsledky tvoří složku  $u_{\text{align}}$ .

#### 2.5.5 Vyhodnocení vlivu filtrace a zpracování dat

Filtrace, triangulace a další kroky zpracování dat mohou ovlivnit hodnoty úchylek. Metoda umožňuje porovnat výsledky pro:

- hrubá data,
- filtrovaná data,
- síť.

Rozdíl mezi hodnotami poskytuje odhad vlivu algoritmických kroků  $u_{\text{alg}}$ .

#### 2.5.6 Vyhodnocení vlivu prostředí

Metoda umožňuje vyhodnotit vliv prostředí porovnáním podmínek měření s podmínkami kalibrace. Úchylky teploty, vlhkosti nebo vibrací mohou ovlivnit stabilitu měřicího systému i měřeného objektu. Tyto vlivy tvoří složku  $u_{\text{env}}$ .

#### 2.5.7 Vyhodnocení limitů metody

Metoda identifikuje oblasti, ve kterých může optické skenování vykazovat zvýšenou nejistotu nebo selhání, například:

- hluboké kapsy a úzké štěrby,
- ostré hrany,
- lesklé nebo tmavé povrchy,
- místa s omezenou viditelností.

Tyto limity jsou součástí požadavků (ISO, 2012), která stanovuje, že metoda musí být použitelná v praxi a její omezení musí být známa.

#### 2.5.8 Vyhodnocení shody

Metoda je formulována tak, aby byla obecně použitelná i pro posouzení shody podle (ISO, 2013). Tato norma stanovuje, že měřicí nejistota musí být zohledněna při dokazování shody nebo neshody se specifikací. (ISO, 2013) definuje *rozšířenou nejistotu* jako:

$$U = k \cdot u_c$$

Kompletní výsledek měření je následně vyjádřen jako:

$$y' = y \pm U$$

Tento interval představuje rozsah hodnot, ve kterém se může skutečná hodnota měřené veličiny nacházet, a tvoří základ pro rozhodovací pravidla.

V rámci této práce však není stanovena tolerance, a proto se rozhodovací pravidla (ISO, 2013) neaplikují. Metoda tento krok obsahuje pouze jako obecný rámec pro případy, kdy je tolerance definována.

### 2.5.9 Vyhodnocení opakovatelnosti celé metody

Reprodukovatelnost ověřuje stabilitu celého měřicího procesu, dle (ISO, 2012). Metoda vyžaduje opakování celého postupu:

měření → zpracování → výpočet úchylek → metrologické zhodnocení,

a porovnání výsledků. Tento krok ověřuje, zda je metoda stabilní jako celek, nikoli pouze jako dílčí měřicí systém.

### 2.5.10 Závěrečné metrologické zhodnocení

Závěrečné zhodnocení shrnuje:

- výslednou rozšířenou nejistotu  $U$ ,
- hlavní zdroje nejistoty,
- limity metody,
- posouzení souladu metody s požadavky (ISO, 2011c), (ISO, 2012),
- použitelnost výsledků pro kontrolu kvality, reverzní inženýrství nebo úpravu CAD modelu.

Tento krok uzavírá verifikační proces podle (ISO, 2012) a splňuje požadavky (ISO 2013) na dokumentaci výsledků.

## 2.6 Výstup

Výstupem metody je soubor dokumentovaných výsledků, které jednoznačně popisují úchyly mezi skutečnou a geometrií jmenovitého modelu, včetně všech informací a dat potřebných pro jejich interpretaci, archivaci a případné další použití.

### 2.6.1 Struktura výstupu

Výstup metody zahrnuje následující prvky:

- mapu úchylek s jasně definovaným rozsahem vizualizace,
- statistické a metrologické charakteristiky úchylek, jako je maximální a minimální úchylna, RMS hodnota, histogram a hodnoty relevantní pro metrologické zhodnocení (např. složky nejistoty nebo validace výpočtu),
- zarovnaná síť a jmenovitý model, které umožňují reprodukovatelnost výsledků,
- popis použitého referenčního systému a typu zarovnání,
- informace o použité operaci ověření, tj. sekvenci operací extrakce → filtrace → rekonstrukce → transformace → přiřazení → stanovení úchylek,

- údaje o měřicím systému, které jsou relevantní pro interpretaci výsledků (např. metrologické charakteristiky z kalibračního listu).

Tato struktura zajišťuje, že výsledky jsou jednoznačné, reprodukovatelné a metrologicky validní.

### 2.6.2 Reprodukovatelnost výstupu

Výstup musí být vytvořen tak, aby jej bylo možné reprodukovat nezávisle na čase, obsluze nebo softwarovém prostředí. To zahrnuje:

- Archivaci všech vstupních dat (mračno bodů, síť, CAD model),
- archivaci transformačních matic použitých při zarovnání,
- archivaci nastavení použitých při výpočtu úchylek,
- jednoznačné označení verzí softwaru a datových souborů.

Reprodukovatelnost je požadavkem (ISO, 2012), která stanovuje, že operace ověření musí být opakovatelný a nezávislý na subjektivních rozhodnutích obsluhy.

### 2.6.3 Použitelnost výsledků

Výsledky výpočtu úchylek mohou být použity v různých kontextech, v závislosti na účelu měření:

- Kontrola kvality: identifikace oblastí s nadměrnou úchylností,
- reverzní inženýrství: úprava CAD modelu na základě skutečné geometrie,
- vývoj a optimalizace výroby: analýza systematických úchylek,
- metrologické hodnocení: vstup pro výpočet nejistoty a posouzení shody.

Použitelnost výsledků je dána jejich metrologickou validitou, jednoznačností a návazností na definovaný referenční systém.

### 3 Experimentální měření

Experimentální část této práce ověřuje praktickou použitelnost navržené metody měření volně tvarovaných ploch v podmínkách univerzitní laboratoře, která dosud neměla k dispozici přímočarý a reprodukovatelný postup pro získání metrologicky využitelných dat z ručního 3D skeneru SIMSCAN 22. Ačkoli jednotlivé techniky použité v metodě, jako triangulační skenování, rigidní ICP, C2M vzdálenost či *slicing* nejsou samy o sobě nové, jejich systematická integrace do uceleného metodického postupu představují v kontextu laboratoře nekonvenční metodu měření volně tvarovaných ploch. Dosavadní praxe byla limitována proprietárním softwarem ScanViewer, který jednak neobsahuje nástroje potřebné pro metrologickou analýzu (ICP, C2M, *slicing*), a jednak je vázán licencí na jediný počítač, což znemožňuje širší využití a reprodukovatelnost. Zavedení otevřeného a transparentního metodického postupu založeného na open source softwaru CloudCompare tak umožňuje nejen získat kvalitnější data, ale také vytvořit metodiku, kterou lze opakovat, auditovat a dále rozvíjet.

#### 3.1 Cíl experimentu

Cílem experimentální části je ověřit praktickou použitelnost navržené metody měření volně tvarovaných ploch pomocí ručního 3D skeneru SIMSCAN 22 a posoudit, jak jednotlivé kroky metody fungují v reálných podmínkách měření. Experiment se zaměřuje na ověření:

- kvality extrahovaných dat a identifikace oblastí s chybějící nebo zhoršenou geometrií,
- stability rekonstrukce a zarovnání skenu pomocí *marker-based* orientace a rigidního ICP,
- výpočtu a interpretace mapy úchylek mezi skenem a jmenovitým CAD modelem,
- analýzy histogramu úchylek a základních statistických charakteristik,
- generování řezů (*slicing*) a jejich přenosu do CAD prostředí pro následnou vizuální nebo geometrickou analýzu,
- dílčího metrologického zhodnocení, zahrnujícího kvantifikaci složek  $u_{cal}$  a  $u_{align}$  a kvalitativní posouzení dalších vlivů ( $u_{rep}$ ,  $u_{env}$ ,  $u_{alg}$ ).

Experiment tak umožňuje porovnat ideální metodický postup s jeho praktickou realizací, identifikovat limity metody a posoudit její vhodnost pro praktické aplikace, jako je kontrola kvality, reverzní inženýrství nebo úprava CAD modelů volně tvarovaných ploch.

#### 3.2 Experimentální sestava

Experiment byl navržen tak, aby co nejděrněji odrážel reálné podmínky měření volně tvarovaných ploch ručním 3D skenerem SIMSCAN 22. Tato část popisuje použitý měřicí systém, charakter měřeného objektu, způsob jeho upnutí a podmínky prostředí, které mohou ovlivnit kvalitu extrakce dat a následné metrologické zhodnocení.

### 3.2.1 Měřicí systém

Měření bylo provedeno ručním optickým 3D skenerem SIMSCAN 22, který pracuje na principu binokulární laserové triangulace s modrým laserem o vlnové délce 450 nm. Skener využívá *marker-based tracking* a pro stabilní rekonstrukci vyžaduje současnou viditelnost minimálně čtyř markerů v překryvu obou kamer.

Použitý software:

- ScanViewer: akvizice dat, základní filtrace, rekonstrukce polygonové sítě, export dat,
- CloudCompare: zarovnání na CAD model (markerbased + ICP), výpočet odchylek (C2M vzdálenost), histogram, slicing, export řezů.

Nastavení skeneru během experimentu:

- Exposure: 1.0 ms,
- Point density: 0.5 mm,
- Marker size: 3 mm / 6 mm,
- Scan mode: LaserPatch → Line → Single Line,
- Wrap mode:
  - Fill the Marker,
  - Optimize boundaries,
  - High precision mode,
  - Fill Small Hole,
  - Optimize the Wrap efficiency of large files,
  - Maximum number of edges: 15,
  - Smooth Level: Low,
  - Optimization Level: low.

Tato nastavení odpovídají cíli zachovat co nejvěrnější geometrii volně tvarovaných ploch pro následný výpočet odchylek, bez dodatečného vyhlazování, které by mohlo ovlivnit metrologickou interpretaci.

Metrologické charakteristiky vyjmuté z kalibračního listu (SCANTECH, 2023b):

- Probing error (PS):  $U(k=2) = 0.008$  mm,
- Sphere spacing error (SD):  $U(k=2) = 0.010$  mm,
- Kalibrační podmínky: 20.5 °C, 56 % RH,
- Norma návaznosti: VDI/VDE 2634-3.

Tyto charakteristiky tvoří vstupní složku  $u_{cal}$  ve smyslu kapitola 2 *Návrh metodiky měření* a jsou v experimentu považovány za konstantní, protože nedošlo k transportu zařízení ani k významné změně podmínek oproti kalibraci.

Počítačová sestava:

- Byly splněny minimální softwarové a hardwarové požadavky výrobce pro provoz skeneru a ScanVieweru. Operační systém byl Windows; výkon počítače neomezoval průběh akvizice ani zpracování dat.

### 3.2.2 Měřený objekt

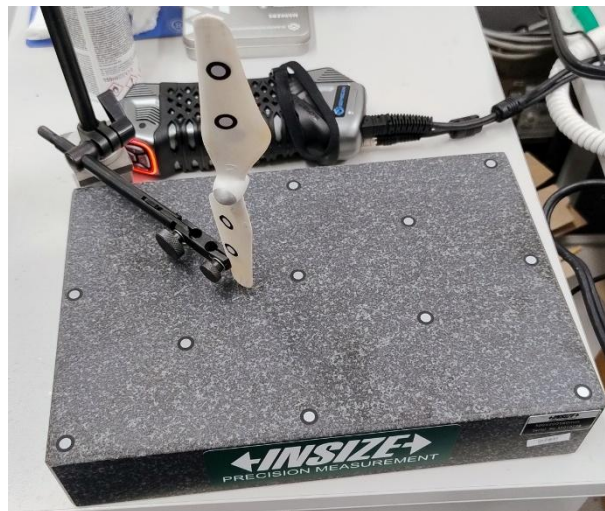
Měřeným objektem byla dvoulistá vrtule z blíže nespecifikovaného plastu o přibližné šířce 200 mm, pravděpodobně určená pro malý dron. Povrch nebyl čištěn ani matován; drobné výrobní nedokonalosti byly vizuálně patrné, ale nebyly identifikovány jako kritické vzhledem k cíli experimentu. Dostupný CAD model vrtule, dle kterého byla fyzická vrtule vyrobena, je v této práci považován za jmenovitý model, tj. ideální geometrickou reprezentaci bez výrobních odchylek. Veškeré výpočty úchylek jsou vztaženy k tomuto jmenovitému modelu. 3D sken se pak vztahuje k naskenované fyzické vrtuli. Vstupní modely pro CAD model a 3D sken v *Příloha B*. Geometrie vrtule kombinovala:

- volně tvarované plochy,
- ostré hrany,
- lokální kapsy a detaily, vyžadující vyšší hustotu bodů,
- oblasti s omezeným přístupem, typické pro ruční skenování.

Tento objekt byl zvolen záměrně, protože reprezentuje typickou volně tvarovanou geometrii s lokálními problematickými oblastmi, které jsou pro nekonvenční měření volně tvarovaných ploch metrologicky zajímavé. Ovšem, části povrchu, které nebyly z důvodu geometrie nebo viditelnosti zachyceny (např. ostří), nejsou součástí měřeného objektu, a proto nejsou zahrnuty do výpočtu úchylek.

### 3.2.3 Upnutí a manipulace

Součást byla upevněna ve svěráku na pracovní podložce, spolu s markery (*Obrázek 24*). Upnutí nebylo optimalizováno z hlediska metrologické tuhosti, což se projevilo drobnými pohyby během skenování (diskutováno v následujících podkapitolách).



**Obrázek 24: Upnutí zkoumané volně tvarované plochy (vrtule), markery viditelné, podložka pod vrtulí, 3D skener je viditelný za podložkou.**

*Zdroj: Vlastní zdroj*

Markery použité při skenování nesloužily jako situační prvek ve smyslu *ISO 5459*. Jejich funkce byla podpora orientace skeneru a stabilizace rekonstrukce během snímání. Souřadnicový systém skenu byl definován softwarem skeneru (ScanViewer) na základě interních algoritmů, nikoli

přímo markery. Markery tedy neplní metrologickou funkci, ale pouze funkci pomocnou. Viditelnost markerů byla zajištěna ve všech relevantních skenovacích pozicích, aby byl zachován stabilní referenční systém pro rekonstrukci a následné zarovnání (Obrázek 24).

### 3.2.4 Podmínky prostředí

Podmínky prostředí odpovídaly běžnému laboratornímu prostředí:

- Teplota: nezaznamenána, předpoklad cca 20 °C (v souladu s běžnými referenčními podmínkami),
- Osvětlení: stabilní, bez přímého slunečního světla
- Vibrace: nevýznamné,
- Pracovní prostředí: čisté, bez prachu a výrazných odlesků, v souladu s požadavky manuálu SIMSCAN 22.

Tyto podmínky jsou v souladu s předpoklady metody uvedenými v kapitole 2 *Návrh metodiky měření* (stabilní teplota, čistý povrch, rigidní objekt, stabilizovaný měřicí systém) a nepředstavovaly dominantní zdroj nejistoty ve smyslu  $u_{env}$ .

## 3.3 Postup měření

Tato část popisuje skutečný průběh měření dvoulisté vrtule pomocí ručního 3D skeneru SIMSCAN 22 (Obrázek 24). Postup vychází z metodických kroků uvedených v kapitole 2 *Návrh metodiky měření*, avšak reflektuje praktická omezení a specifika měření volně tvarovaných ploch.

### 3.3.1 Příprava měřicího systému

Před zahájením měření byl skener SIMSCAN 22 inicializován a ponechán několik minut v provozním režimu, aby se minimalizoval teplotní drift optických a elektronických komponent. Funkčnost systému byla ověřena kontrolou detekce markerů, stability laserových linií a odezvy softwaru ScanViewer, dle manuálu (SCANTECH 2023b).

Kalibrace skeneru nebyla v rámci experimentu prováděna. Zařízení bylo dodáno s platnou kalibrací podle VDI/VDE 2634-3, (SCANTECH 2023a), a během přípravy ani během měření se neprojeví žádné indikace degradace kvality dat, které by vyžadovaly recalibraci. Tento postup je v souladu s metodou, která předpokládá, že kalibrace je nutná pouze při změně teplotních podmínek, transportu zařízení nebo při zhoršené kvalitě dat.

### 3.3.2 Příprava objektu

Povrch vrtule nebyl čištěn ani matován. Drobné povrchové nedokonalosti byly vizuálně patrné, avšak nebyly identifikovány jako kritické vzhledem k cíli experimentu, kterým je ověření funkčnosti metody, nikoli posouzení shody.

Pro marker-based tracking byly na vrtuli aplikovány samolepicí markery. Rozmístění markerů bylo přizpůsobeno geometrii vrtule a zajišťovalo stabilní detekci během skenování, i když

neodpovídalo ideálnímu doporučení výrobce. Viditelnost markerů byla zachována ve všech relevantních skenovacích pozicích.

### 3.3.3 Strategie skenování

Skenování probíhalo s dodržением doporučené pracovní vzdálenosti a vhodného úhlu dopadu laseru, aby se minimalizovaly odlesky a ztráta dat. Použitá strategie zahrnovala tři po sobě jdoucí režimy:

- LaserPatch (křížový sken) – rychlé zachycení hrubé geometrie (Obrázek 25),
- Line scan (liniový sken) – doplnění detailů a zvýšení hustoty bodů,
- Single line scan – lokální doplnění jemných detailů.

Povrch vrtule byl snímán z více úhlů tak, aby byl zajištěn dostatečný překryv jednotlivých záběrů a stabilní viditelnost markerů v zorném poli obou kamer.



**Obrázek 25: LaserPatch režim, na obrazovce je možné vidět real-time záznam naskenovaných bodů.**

*Zdroj: vlastní zdroj*

V některých oblastech, zejména v otvoru pro uchycení osy vrtule, nebylo možné získat kompletní data kvůli omezenému přístupu laseru a kamer. Tyto oblasti nebyly předmětem analýzy a jejich absence neovlivnila metrologickou interpretaci výsledků.

Během skenování došlo k drobným pohybům dílu ve svěráku, což vedlo k lokálně chybějícím datům. Tento jev byl následně řešen manuální filtrací izolovaných bodů a je zohledněn v kvalitativním posouzení složek  $u_{env}$  a  $u_{alg}$ .

## 3.4 Získaná data

Po dokončení skenování byla získána surová 3D data ve formě mračna bodů, která představují extrahovanou geometrii měřeného objektu. Tato část popisuje jejich kvalitu, hustotu, případné nedostatky a faktory, které ovlivnily úplnost a přesnost dat.

### 3.4.1 Hustota bodů

Skenování probíhalo s nastavenou hustotou 0,5 mm. Skutečná hustota bodů se lokálně lišila v závislosti na úhlu dopadu laseru, vzdálenosti skeneru a viditelnosti obou kamer, což je typické pro triangulační skenery. Přesto byla hustota dostatečná pro rekonstrukci volně tvarovaných ploch vrtule i pro následný výpočet odchylek vůči CAD modelu.

### 3.4.2 Šum a izolované body

V surových datech se vyskytovalo malé množství izolovaných bodů. Jednalo se zejména v okolí ostrých hran, v místech s omezenou viditelností, a v oblasti uchycení vrtule ve svěráku. Tyto body byly způsobeny kombinací geometrie dílu (úzké hrany, prudké změny křivosti) a drobných pohybů dílu během skenování. Tyto jevy odpovídají očekávaným limitům ruční triangulace a byly následně odstraněny manuální filtrací, jak je popsáno v kapitole 4.5.1.

### 3.4.3 Chybějící oblasti

V několika místech se objevily lokálně chybějící oblasti, zejména na ostří vrtule (reálná tloušťka odhadem 1 mm), v okolí otvoru pro uchycení osy, kde byl přístup 3D skeneru omezený. Tyto nedostatky jsou typické pro triangulační skenery, které vyžadují současnou viditelnost obou kamer a vhodný úhel dopadu laseru. Chybějící data neměla významný vliv na hlavní cíl experimentu, protože ostří vrtule nebylo součástí měřené entity ve smyslu porovnání s CAD modelem a otvor pro osu nebyl předmětem analýzy. Zároveň byla základní geometrie volně tvarované plochy obou listů byla zachycena kompletně a bez deformací.

### 3.4.4 Viditelnost markerů

Viditelnost markerů byla během celého skenování stabilní. Rozmístění osmi markerů na obou listech vrtule umožnilo plynulý pohyb skeneru kolem objektu a následné bezproblémové spojování jednotlivých záběrů. Marker-based tracking tedy nebyl zdrojem významné nejistoty a neovlivnil kvalitu rekonstrukce ani následné zarovnání.

## 3.5 Zpracování dat

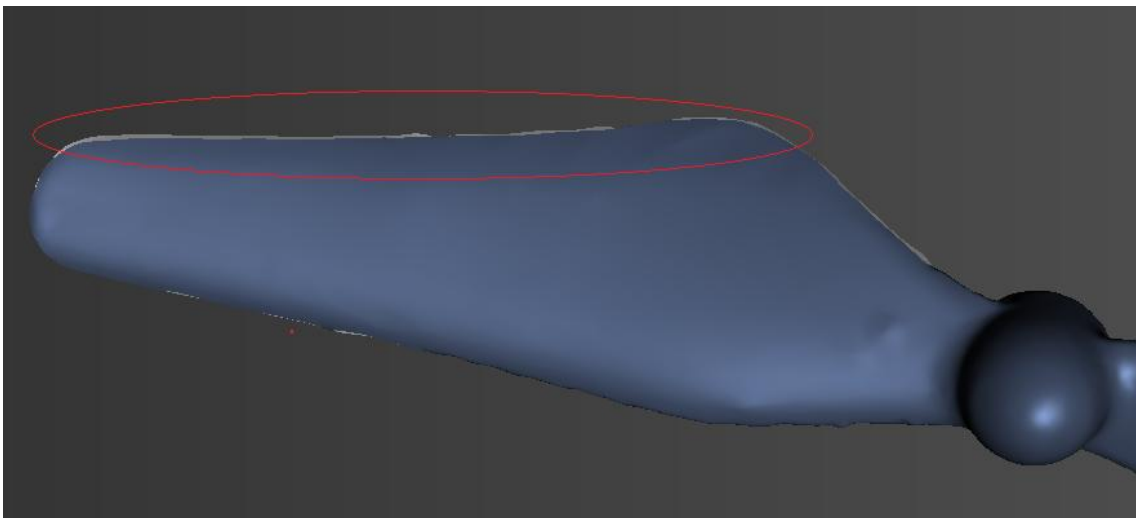
Zpracování dat probíhalo ve dvou softwarových prostředích. Prvotní filtrace a rekonstrukce byly provedeny v ScanVieweru, který je nativním softwarem skeneru SIMSCAN 22. Pro pokročilé kroky, zejména zarovnání na CAD model, výpočet odchylek a generování řezů, byl použit open-source software CloudCompare, protože ScanViewer neposkytuje funkce potřebné pro metrologickou analýzu volně tvarovaných ploch.

### 3.5.1 Filtrace

Po importu mračna bodů do ScanVieweru byla provedena základní filtrace dat. Automatické nástroje pro detekci izolovaných bodů nebylo možné použít, protože software v některých případech nesprávně označoval části vrtule jako izolované komponenty. Tento jev, diskutovaný v kapitole 1 *Teoretická část*, je typický pro triangulační skenery při snímání velmi tenkých hran, oblastí s prudkou změnou křivosti, nebo oblastí s jinak omezenou viditelností optického systému. Z tohoto důvodu byla filtrace provedena manuálně, což umožnilo odstranit skutečné izolované body vzniklé na hranách a v místech s horší viditelností při zachování správné geometrie. Manuální filtrace také umožnila odstranění prvků vzniklých drobnými vibracemi dílu během skenování. Vyhlazování (smoothing) nebylo použito, aby nedošlo k ovlivnění geometrie volně tvarovaných ploch a následného výpočtu normálových odchylek. Tento postup je v souladu s navrhovanou metodou.

### 3.5.2 Rekonstrukce

Rekonstrukce polygonové sítě byla provedena ve ScanVieweru pomocí funkce Wrap, následně Merge. Polygonizace byla stabilní a zachovala topologii volně tvarovaných ploch. Problémy se objevily pouze na ostří vrtule (*Obrázek 26*), kde polygonizace nedokázala spojit velmi úzké oblasti.



**Obrázek 26:** neucelená polygonizace na ostří vrtule, zvýrazněno červeně, software ScanViewer.

*Zdroj: Vlastní zdroj*

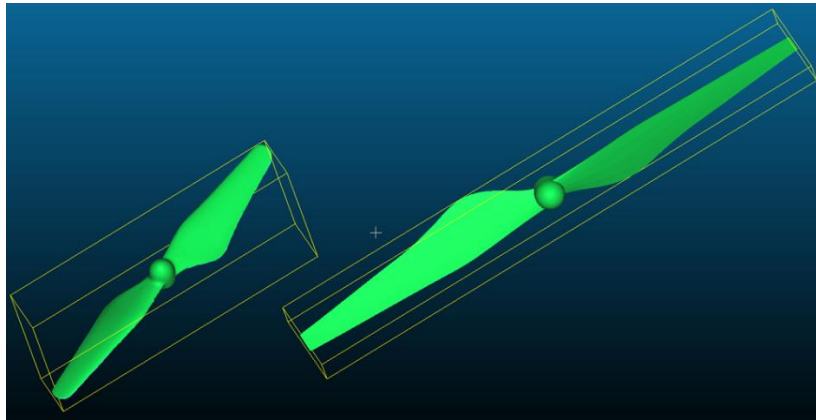
Také v otvoru pro uchycení osy neproběhla kompletní polygonizace, kvůli chybějící části dat. Tyto nedostatky odpovídají očekávaným limitům polygonální rekonstrukce a neovlivnily další kroky analýzy. Rekonstrukce je výpočetní operace, která může přispět k algoritmické nejistotě  $u_{alg}$ , jak je uvedeno v kapitole 2 *Návrh metodiky měření*.

### 3.5.3 Zarovnání

Zarovnání skenu na nominální CAD model nebylo možné provést v softwaru ScanViewer, protože tento nástroj neumožňuje:

- náhled na použité transformační matice,

- použití rigidního ICP algoritmu,
- výpočet odchylek vůči CAD modelu,
- export zarovnaných dat pro následné CAD zpracování.

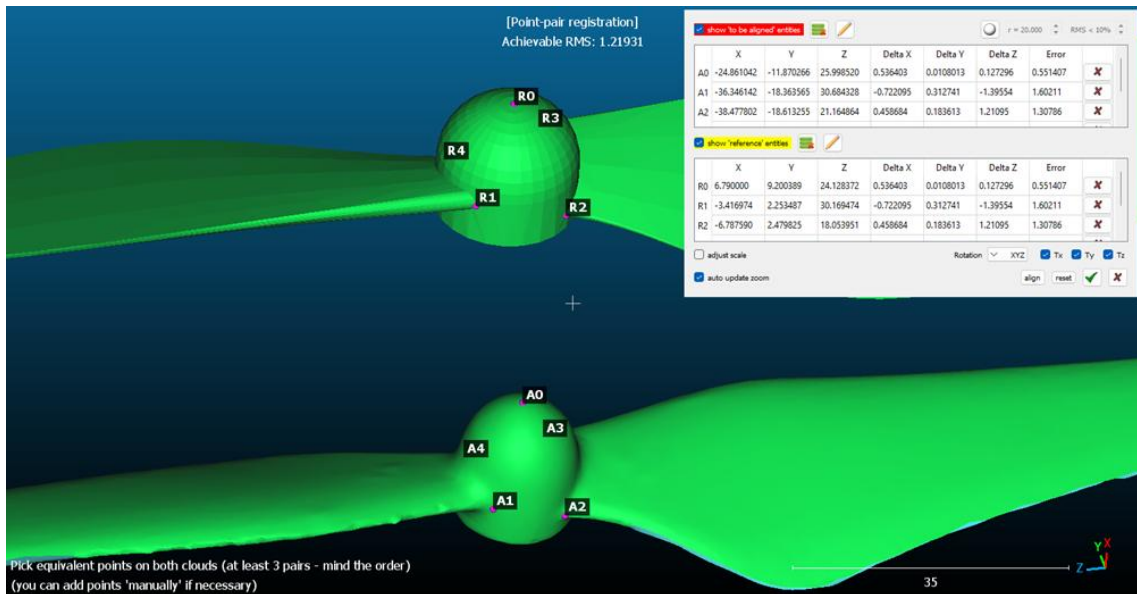


Obrázek 27: CAD model (vlevo) a 3D sken (vpravo) ve stejném souřadném systému, různé natočení, software CloudCompare.

Zdroj: Vlastní zdroj

Z tohoto důvodu byla data exportována do CloudCompare (Obrázek 27), kde proběhlo kompletní zarovnání v souladu s metodou definovanou v kapitole 2 Návrh metodiky měření.

### 1. Hrubé zarovnání



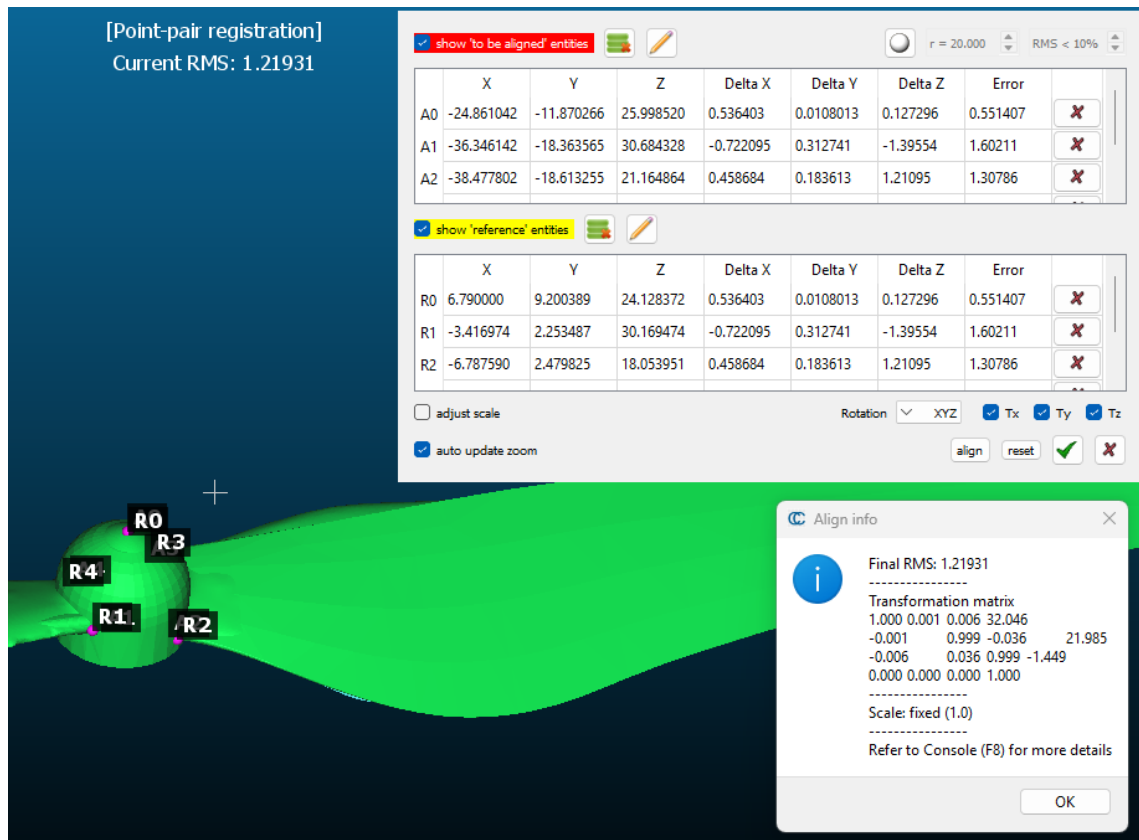
Obrázek 28: Přiřazení párových bodů  $R_n-A_n$  (R: Referenced, A: Aligned) v softwaru CloudCompare.

Zdroj: Vlastní zdroj

Hrubé zarovnání bylo provedeno ručním natočením (*Translate / Rotate*) skenu vůči CAD modelu, následované výběrem pěti párových bodů (*Point Pair Picking*) na sdílených geometrických prvcích ( $R_0-R_4 \leftrightarrow A_0-A_4$ ), (Obrázek 28). Výsledkem hrubého zarovnání byla první transformační matice a hodnota RMS (Obrázek 29). Experimentálně bylo ověřeno, že hodnoty

$$RMS = 0,70 \pm 0,70 \text{ mm}$$

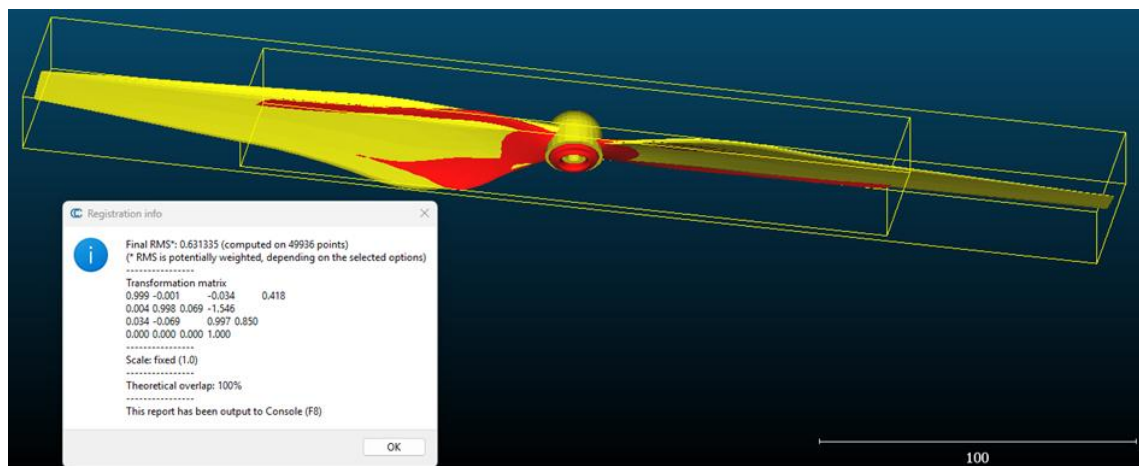
poskytují dostatečně kvalitní počáteční zarovnání pro následné ICP. Tato hodnota odpovídá očekávané variabilitě při ručním výběru párových bodů.



Obrázek 29: Výsledná transformační matice a RMS po hrubém zarovnání, software CloudCompare.

Zdroj: Vlastní zdroj

## 2. Jemné zarovnání (ICP)



Obrázek 30: Výsledná transformační matice a RMS po ICP zarovnání, software CloudCompare.

Zdroj: Vlastní zdroj

Jemné zarovnání bylo provedeno pomocí ICP algoritmu, který minimalizuje součet čtverců vzdáleností mezi nejbližšími body obou povrchů. Rigidní transformace (rotace + translace) je v souladu s navrhovanou metodou, která vyžaduje transformaci bez škálování. Byla ponechána

výchozí nastavení, podrobný popis v Příloha D. Výstupem ICP byla výsledná transformační matice a hodnota ICP RMS, která slouží jako ukazatel kvality zarovnání (Obrázek 30).

### 3. Validace zarovnání

Validace zarovnání proběhla ve třech krocích:

#### 3.a) Vizuální kontrola překrytí

Kontrola vizuálních nesouladů mezi skenem a CAD modelem.

#### 3.b) Posouzení ICP RMS

Hodnota ICP RMS je často používána jako indikátor kvality zarovnání. Neformální zdroje uvádějí, že prakticky použitelné zarovnání bývá spojeno s hodnotou ICP RMS představující přibližně 25 % – 30 % očekávané odchylky mezi skenem a modelem (Tee\_s, 2022). Tyto hodnoty však nejsou normativní ani metrologicky závazné, a slouží jako orientační vodítko. Formální literatura se ovšem shoduje na tom, že hodnota ICP RMS má být co nejnižší a že její interpretace musí být vždy vztažena ke konkrétnímu měřicímu systému, kvalitě dat a charakteru povrchu (Besl a McKay, 1992).

#### 3.c) Posouzení konzistence transformace

Transformační matice byla stabilní při opakovaném ICP, což potvrzuje robustnost zarovnání. Zarovnání bylo vyhodnoceno jako stabilní a metrologicky správné. Nedostatek situačních prvků na samotné vrtuli byl kompenzován marker-based trackingem.

### 3.5.4 Optimalizace

V rámci zpracování nebyla provedena žádná dodatečná optimalizace dat, protože by mohla ovlivnit hodnoty normálových odchylek, bez výrazného přínosu. Zároveň metoda vyžaduje zachování původní geometrie pro metrologickou interpretaci. Optimalizace byla tedy omezena pouze na nezbytnou manuální filtraci izolovaných bodů.

## 3.6 Výpočet odchylek

Výpočet odchylek mezi rekonstruovaným skenem a jmenovitým CAD modelem byl proveden v softwaru CloudCompare, protože ScanViewer neposkytuje funkce potřebné pro metrologickou analýzu volně tvarovaných ploch (C2M vzdálenost, histogram, slicing, export řezů). Tato část popisuje vytvoření mapy odchylek, statistické vyhodnocení a základní interpretaci výsledků. Tabulka 2 ukazuje průměry vybraných hodnot z pěti různých pokusů zarovnání.

**Tabulka 2: Průměry výpočetních a statistických hodnot vzorků (zarovnání) 1 – 5, (hodnoty jsou zaokrouhlené na dvě desetinná místa).**

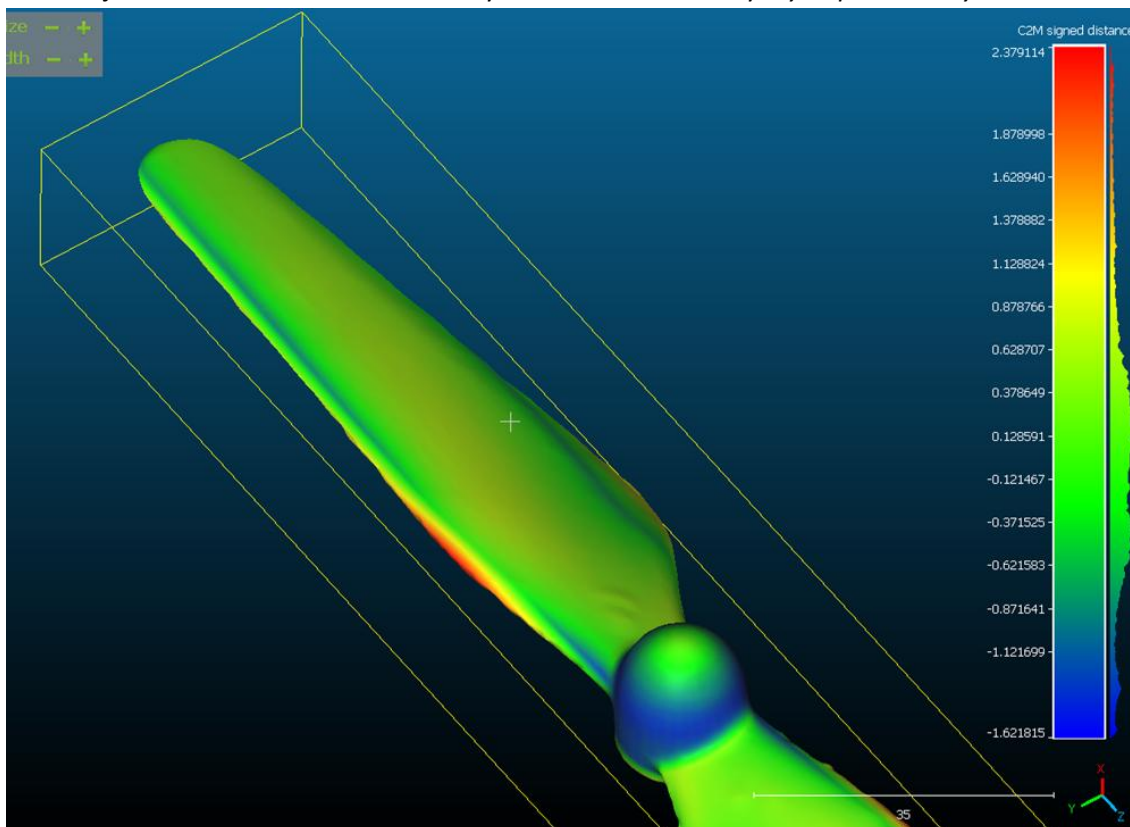
Vzorek	1	2	3	4	5	Arit. průměr
RMS (mm)	1,22	1,24	1,01	1,13	0,98	1,12
ICP RMS (mm)	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Min (mm)	-1,66	-1,62	-1,66	-1,63	-1,66	-1,65
Max (mm)	2,41	2,38	2,40	2,34	3,34	2,37
Prům. odchylka (mm)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Směrodatná odchylna (mm)	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Počet bodů	28931	28931	28931	28931	28931	28931

Zdroj: Vlastní zdroj

### 3.6.1 Mapa odchylek

Po úspěšném zarovnání skenu na CAD model byla vypočtena C2M vzdálenost. Tato veličina určuje vzdálenost každého bodu skenu od jmenovité plochy ve směru nejbližší normály CAD modelu (Obrázek 31). Kladné hodnoty odpovídají více materiálu, záporné hodnoty méně materiálu skenu vůči CAD modelu. Součástí výstupu byla také barevná mapa odchylek, která umožňuje vizuální identifikaci oblastí s vyššími lokálními rozdíly. Výstupní soubory v Příloha A.



Obrázek 31: Mapa odchylek 3D skenu vůči CAD modelu s barevným měřítkem, software CloudCompare.

Zdroj: Vlastní zdroj

Barevná škála:

- zelená – odchylky blízké 0,
- žlutá/oranžová – mírné odchylky,
- červená – kladné extrémy (materiál navíc),
- modrá – záporné extrémy (materiál chybí).

Lokální extrémy:

Získané hodnoty (Tabulka 2):

- minimální odchylka: -1.65 mm
- maximální odchylka: +2.37 mm

Extrémy se nacházely zejména:

- na ostří vrtule (tloušťka cca 1 mm),

- v okolí otvoru pro osu,
- v místech s prudkou změnou křivosti.

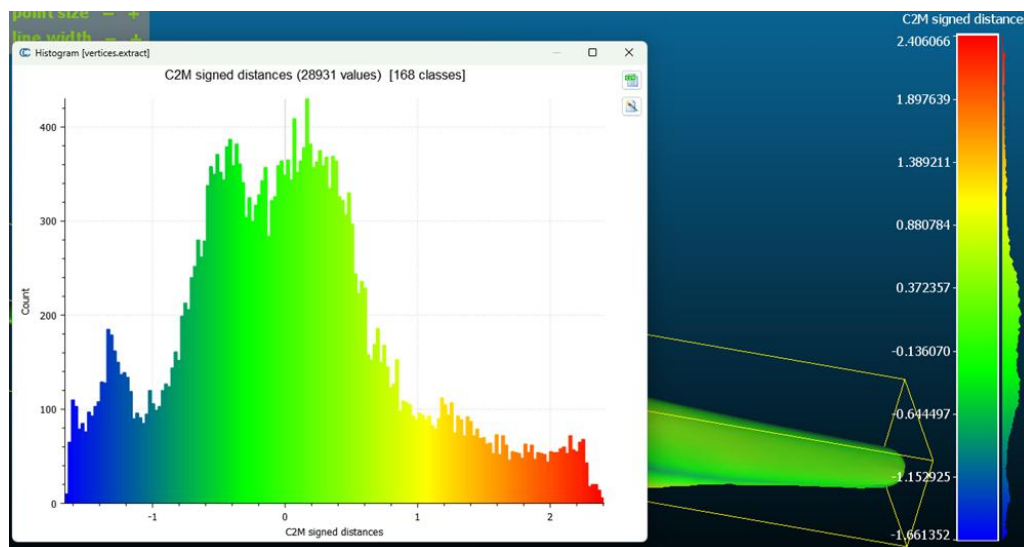
Tyto extrémní odpovídají očekávaným limitům triangulačního skenování, diskutovaný v kapitole 1 *Teoretická část*, a pravděpodobně nejsou důsledkem chyby zarovnání.

### 3.6.2 Statistické charakteristiky

CloudCompare umožnil vytvořit histogram odchylek (Obrázek 32, Obrázek 33) a vypočítal základní statistické parametry, uvedené v Tabulce 2:

- průměrná odchylka – Aritmetický průměr všech odchylek mezi skenem a CAD modelem: 0.04 mm,
- směrodatná odchylka – typická odchylka bodů od CAD modelu: 0.84 mm.

Dále byly exportovány hodnoty histogramu ve formátu vhodném pro zpracování v Excelu, což umožnilo vypočítat podíl bodů skenu, které leží v definovaném rozsahu odchylek vůči jmenovitému CAD modelu.



Obrázek 32: Histogram odchylek, software CloudCompare

Zdroj: Vlastní zdroj

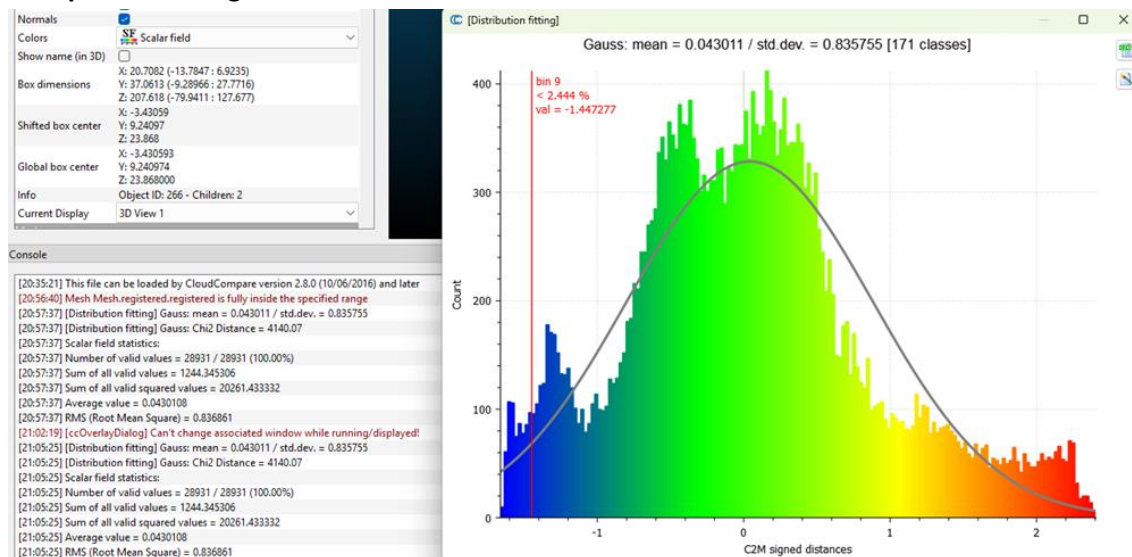
Tento postup neslouží k posouzení normové shody, ale jako deskriptivní analýza kvality skenu a ilustrace toho, jak lze metodu využít pro procentuální vyhodnocení povrchu v uživatelsky zvolené toleranci. Výsledky pro čtyři kontrolní tolerance ( $\pm 0,5$  mm;  $\pm 1,0$  mm;  $\pm 1,5$  mm;  $\pm 2,0$  mm) jsou uvedeny v Tabulce 3. Detailní výpočet je uveden v Příloha C.

**Tabulka 3: Procento povrchu 3D skenu které leželo v dané toleranci vůči CAD modelu. Např. 49,80 % u vzorku 3 znamená, že 49,80 % povrchu 3D skenu leželo v toleranci  $\pm 0,5$  mm vůči CAD modelu v měření č. 3.**

Vzorek	1	2	3	4	5	Arit. průměr
$\pm 0,5$ mm	48,90 %	49,20 %	49,80 %	48,12 %	49,56 %	49,12 %
$\pm 1,0$ mm	76,37 %	76,42 %	76,41 %	76,25 %	76,39 %	76,37 %
$\pm 1,5$ mm	91,33 %	91,34 %	91,60 %	91,69 %	91,62 %	91,52 %
$\pm 2,0$ mm	97,22 %	97,21 %	97,22 %	97,20 %	97,20 %	97,21 %

Zdroj: Vlastní zdroj

## Interpretace histogramu



Obrázek 33: Histogram odchylek s rozšířenou statistickou funkcionalitou, software CloudCompare.

Zdroj: Vlastní zdroj

Histogram odchylek poskytuje základní přehled o rozložení hodnot, avšak jeho interpretace v kontextu volně tvarovaných ploch není jednoznačná. V histogramu byly identifikovány následující prvky:

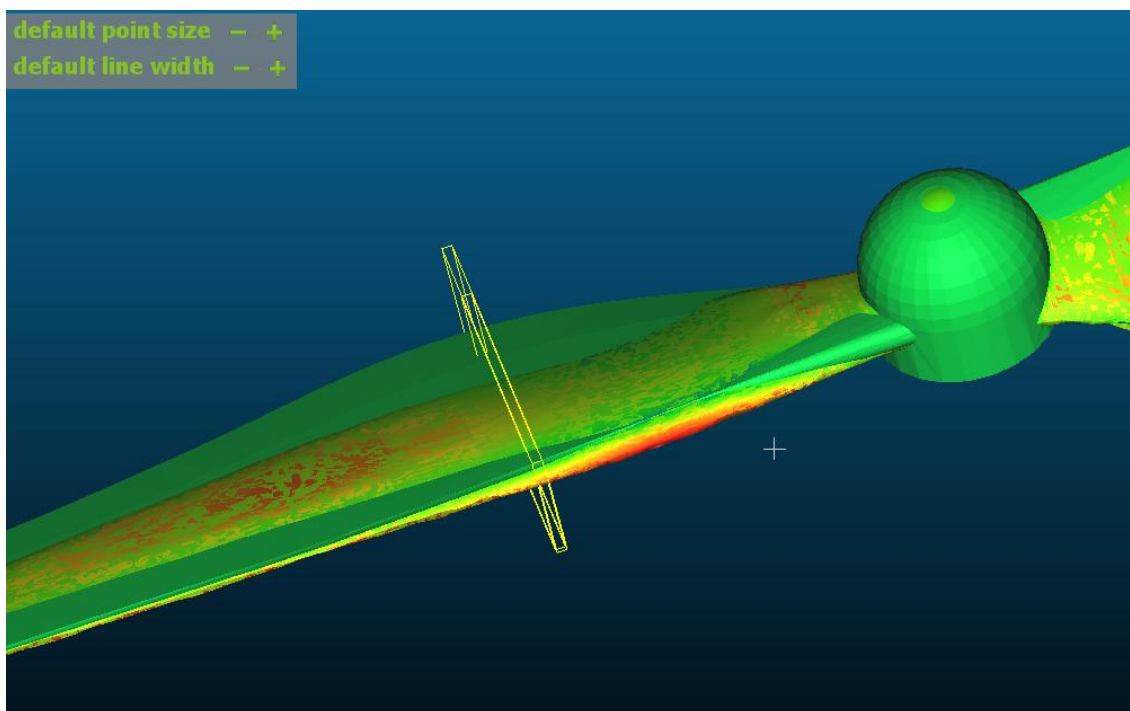
- dvojitý dominantní vrchol v blízkosti 0 mm,
- relativně široké rozložení hodnot,
- přibližně symetrický tvar kolem nuly,
- delší „ocasy“ směrem k extrémním hodnotám.

Tyto prvky odpovídají obecným statistickým charakteristikám rozdělení odchylek, nicméně v rámci tohoto experimentu nebylo jednoznačně určeno, co přesně tyto prvky znamenají z hlediska metrologické interpretace. Z tohoto důvodu je histogram v této práci použit pouze jako deskriptivní nástroj, nikoli jako podklad pro metrologické závěry. Detailnější interpretace by vyžadovala další experimenty, například opakovaná měření, nebo porovnání s jiným skenerem. CloudCompare nabízí rozšířenou statistickou funkcionalitu (Obrázek 33).

### 3.6.3 Export

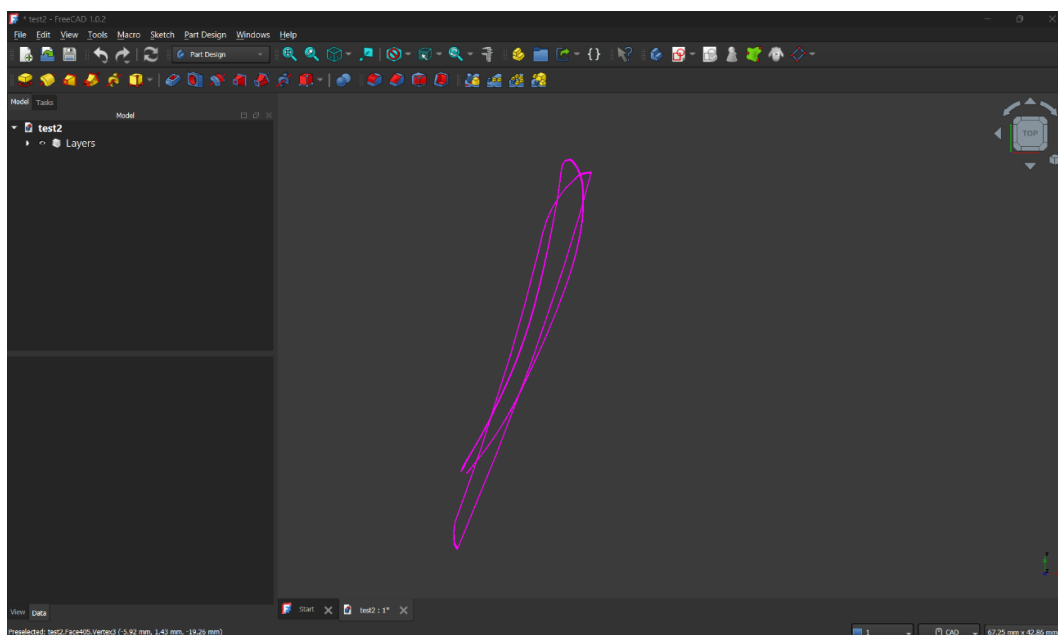
Byly vytvořeny řezy po 1 mm pomocí nativních prostředků v softwaru CloudCompare (Obrázek 34). Tento postup je v souladu s navrhovanou metodou, která předpokládá možnost přenosu výsledků do CAD prostředí (Obrázek 35). Kompletní proces zaznamenán v Příloha D. Řezy umožňují:

- porovnání tvaru CAD vs. sken,
- měření lokálních odchylek,
- vizuální prezentaci výsledků.



**Obrázek 34: Provedení vybraného řezu – CAD model a 3D sken jsou ve stejném souřadném systému jako při výpočtu mapy úchylek, řez tedy zobrazuje prostorový rozdíl, který způsobil velikost úchytky, software CloudCompare.**

*Zdroj: vlastní zdroj.*



**Obrázek 35: Exportovaný řez (Obrázek 33) v CAD softwaru, software FreeCAD.**

*Zdroj: Vlastní zdroj*

### 3.7 Metrologické zhodnocení experimentu

Metrologické zhodnocení experimentu vychází z rámce definovaného v kapitole 2 *Návrh metodiky měření* a aplikuje jej na reálná data získaná během měření dvoulisté vrtule. Vzhledem k charakteru experimentu byly kvantitativně vyhodnoceny pouze složky  $u_{cal}$  a  $u_{align}$ , zatímco

ostatní složky nejistoty byly posouzeny kvalitativně. Tento přístup odpovídá dostupným datům a účelu experimentu, kterým je ověření použitelnosti metody, nikoli úplný výpočet kombinované nejistoty.

### 3.7.1 Nejistota kalibrace

Hodnoty nejistoty kalibrace, ( $u_{cal}$ ), byly převzaty z kalibračního listu skeneru SIMSCAN 22 (SCANTECH, 2023a), který je návazný na normu VDI/VDE 2634-3. Tyto hodnoty charakterizují měřicí systém a v této práci jsou dále použity jako jedna ze složek kombinované nejistoty výsledného měření. Relevantní metrologické charakteristiky jsou:

- chyba snímání (*Probing error*) (PS),
- chyba rozteče koulí (*Sphere spacing error*) (SD),
- rozšířená nejistota U ( $k=2$ ) vztahující se k PS a SD,
- podmínky kalibrace (teplota, vlhkost, referenční prostředí atd.).

Rozšířená nejistota chyby snímání:

$$U_{PS} = 0,008 \text{ mm } (k = 2)$$

Standartní nejistota chyby snímání:

$$u_{PS} = \frac{U_{ps}}{k} = \frac{0,008}{2} = 0,004 \text{ mm}$$

Rozšířená nejistota rozteče koulí:

$$U_{SD} = 0,010 \text{ mm } (k = 2)$$

Standartní nejistota rozteče koulí:

$$u_{SD} = \frac{U_{SD}}{k} = \frac{0,010}{2} = 0,005 \text{ mm}$$

Nejistota kalibrace:

$$u_{cal} = \sqrt{u_{PS}^2 + u_{SD}^2}$$

Nejistota kalibrace:

$$u_{cal} = \sqrt{0,004^2 + 0,005^2} = \sqrt{0,000016 + 0,000025} = 0,006 \text{ mm } (3 \text{ d. m.})$$

Tyto hodnoty představují základní složku nejistoty typu B měřicího systému a jsou považovány za konstantní pro celý experiment, protože během měření nedošlo k žádné změně podmínek, která by vyžadovala recalibraci.

### 3.7.2 Nejistota zarovnání

Nejistota zarovnání, ( $u_{align}$ ), byla odhadnuta na základě opakovaného provedení zarovnání v softwaru CloudCompare. Postup odpovídá variantě popsané v metodě, tedy provedení hrubého zarovnání pomocí párových bodů, následné rigidní ICP a opakování celého procesu s mírně odlišnými výběry párových bodů. Cílem nebylo stanovit formální kombinovanou nejistotu,

ale experimentálně odhadnout variabilitu zarovnání, která je u geometrie volně tvarovaných ploch jedním z dominantních zdrojů nejistoty.

Hodnoty ICP RMS z pěti opakovaných zarovnání:

$$ICP\ RMS = \{0,63; 0,63; 0,63; 0,63; 0,63\} mm$$

Výpočet průměru ( $ICP\ RMS_{prumer}$ ):

$$IPC\ RMS_{prumer} = \frac{(0,63 + 0,63 + 0,63 + 0,63 + 0,63)}{5}$$

$$ICP\ RMS_{prumer} = \frac{(3,15)}{5} = 0,63\ mm$$

Výpočet směrodatné odchylky

1. Odchylky od průměru ( $d_i$ ):

$$d_i = RMS_i - RMS_{prumer} = 0,63 - 0,63 = 0$$

2. Směrodatná odchylka ( $s$ ):

$$s = \sqrt{\left(\frac{(0^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2)}{5 - 1}\right)}$$

$$s = 0\ mm$$

Opakované zarovnání poskytlo identické transformační matice i identickou hodnotu ICP RMS. Důsledkem toho je, že algoritmus ICP v CloudCompare při stejných vstupních datech a stejných parametrech směřuje ke stejnému řešení. Směrodatná odchylka vypočtená z opakování je proto numericky nulová, což však neznamená, že nejistota zarovnání je nulová. Skutečná nejistota zarovnání je ovlivněna kvalitou dat, šumem, hustotou vzorkování a lokální geometrií povrchu. Proto je vhodné interpretovat hodnotu ICP RMS jako konzervativní horní odhad nejistoty zarovnání. V této práci je tedy  $u_{align}$  aproximována hodnotou ICP RMS, tj.  $u_{align} = 0,63\ mm$ , která je chápána jako nejistota typu A.

### 3.7.3 Opakovatelnost měření

Nejistota z opakovatelnosti měření, ( $u_{rep}$ ), nebyla v rámci experimentu ověřena, protože:

- nebyla provedena série opakovaných skenů stejné oblasti,
- nebyl použit referenční přípravek ani fixní měřicí sestava,
- cílem experimentu nebylo stanovit kombinovanou nejistotu, ale ověřit funkčnost metody.

Z tohoto důvodu je  $u_{rep}$  posouzena pouze kvalitativně. Tedy,  $u_{rep}$  nebyla experimentálně stanovena, její velikost nelze odhadnout, a její vliv tudíž nelze kvantifikovat.

### 3.7.4 Vliv prostředí

Nejistota plynoucí z podmínek prostředí, ( $u_{env}$ ), odpovídaly běžnému laboratornímu prostředí (cca 20 °C, stabilní osvětlení, minimální vibrace). Teplota nebyla zaznamenána, což omezuje možnost kvantifikace  $u_{env}$ . Další možné zdroje environmentální nejistoty:

- drobné kolísání teploty,
- lokální změny osvětlení,
- drobný pohyb dílu ve svěráku.

Vzhledem k tomu, že SIMSCAN 22 používá triangulaci s modrým laserem, je citlivost na drobné kolísání teploty a světelné podmínky relativně nízká. Proto lze  $u_{env}$  hodnotit jako nízký, ačkoliv pro kvantitativní zhodnocení nebyl v experimentu prostor, a nelze ho zcela vyloučit

### 3.7.5 Algoritmická nejistota

Nejistota plynoucí z algoritmické nejistoty, ( $u_{alg}$ ), mimo jiné zahrnuje vliv:

- filtrace,
- polygonizace,
- rekonstrukce,
- způsobu výpočtu odchylek (C2M),
- vyhlazování.

V experimentu neproběhlo vyhlazení geometrie. U dalších dílčích složek algoritmické nejistoty lze usuzovat o podílu na jmenované nejistotě, ale v experimentu nebyl prostor se této složce věnovat dopodrobna. V oblastech s úzkou geometrií došlo k viditelnému narušení polygonové sítě, ale je obtížné určit do jaké míry se jedná o chybu skenování, nebo algoritmizace. Ačkoliv technická dokumentace k softwaru CloudCompare nabízí nahlédnutí do fungování algoritmů, neupřesňuje konkrétní hodnotu nejistoty.

### 3.7.6 Souhrn nejistot měření

Nejistota výsledného měření je ovlivněna několika složkami, které se kumulují v průběhu celého procesu měření. Nejistota snímání ( $u_{cal}$ ) je dána specifikací skeneru a podmínkami měření. Nejistota zarovnání ( $u_{align}$ ) je odhadována konzervativně na základě hodnoty ICP RMS, protože opakované zarovnání poskytlo identické výsledky a směrodatná odchylka je numericky nulová. Další složky nejistoty zahrnují vliv rekonstrukce povrchu, filtraci šumu a hustotu vzorkování. Tyto složky nejsou v této práci kvantifikovány, ale jejich vliv je diskutován kvalitativně. Výsledná nejistota měření je tedy interpretována jako kombinace  $u_{cal}$  a konzervativního odhadu  $u_{align}$ , přičemž celkový výsledek je nutné chápat v kontextu charakteru měřené geometrie a použitého měřicího systému.

Nejistota kalibrace  $u_{cal}$  (nejistota typu B) byla zhodnocena v *podkapitole 3.7.1* jako:

$$u_{cal} = 0,006 \text{ mm (3 d. m.)}$$

Nejistota zarovnání  $u_{align}$  (nejistota typu A) byla zhodnocena v *podkapitole 3.7.2* jako:

$$u_{align} = 0,63 \text{ mm}$$

Kombinovaná standartní nejistota:

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{align}^2} = \sqrt{0,006^2 + 0,630^2} = 0,630 \text{ mm (3 d. m.)}$$

Rozšířená nejistota měření

$$U_c = 2 u_c = 2 \cdot 0,630 = 1,260 \text{ mm}$$

Rozšířená nejistota měření  $U_c = \pm 1,26 \text{ mm}$  představuje interval, ve kterém se s pravděpodobností 95 % nachází skutečná hodnota úchylky mezi skenovaným povrchem a jmenovitým CAD modelem. V kontextu tohoto experimentu tedy  $U_c$  vyjadřuje, že výsledky mapy úchylek mohou být zatíženy maximální chybou přibližně  $\pm 1,26 \text{ mm}$ , přičemž dominantním zdrojem této nejistoty je proces zarovnání skenu vůči CAD modelu. Tato hodnota necharakterizuje přesnost jednotlivých bodů skeneru, ale celkovou nejistotu celého měřicího řetězce, zejména vliv zarovnání na výsledné odchyly.

## 4 Diskuse

Experimentální část této práce poskytla příležitost ověřit navrženou metodiku měření volně tvarovaných ploch v reálných podmínkách a současně kriticky posoudit její silné i slabé stránky. Diskuse se proto zaměřuje na porovnání experimentu s metodou, s teoretickými poznatky z rešerše a s širším kontextem tématu nekonvenčních metod měření. Zároveň reflektuje osobní zkušenost získanou během práce a naznačuje směr dalšího vývoje.

### 4.1 Experiment versus metoda

Experiment ukázal, že většina kroků navržené metodiky je v praxi dobře realizovatelná. Příprava měřicího systému, práce s *marker-based trackingem*, rekonstrukce polygonové sítě i výpočet odchylek probíhaly dle navržených metodických kroků. Zvláště robustní se ukázala být část týkající se zarovnání. Rigidní ICP konvergoval stabilně a opakovaně poskytoval shodné výsledky, což naznačuje, že metoda je vhodná i pro geometrie volně tvarovaných ploch bez jednoznačných situačních prvků.

Rozšířená nejistota měření  $U_c = \pm 1,26 \text{ mm}$  se může jevit jako vysoká, avšak její hodnota je dominována nejistotou zarovnání  $u_{align}$ , která byla aproximována hodnotou ICP RMS. Tato hodnota odráží především skutečný rozdíl mezi naskenovaným povrchem a jmenovitým CAD modelem, nikoliv nepřesnost výpočetního algoritmu. Jinými slovy, vysoká hodnota  $U_c$  je důsledkem geometrické nesouladnosti mezi modelem a fyzickým dílem, nikoliv limitem navržené metodiky.

Úskalí se objevila tam, kde je to u volně tvarovaných ploch očekávatelné. Tenké hrany vrtule, hluboké kapsy a oblasti s omezenou viditelností způsobily lokální ztrátu dat a zvýšené odchylky. Tyto jevy nejsou důsledkem metodiky, ale inherentních limitů laserové triangulace. Metoda s nimi počítá, ale experiment ukázal, že jejich vliv je výraznější, než se originálně jevílo při teoretickém návrhu. Podobně se ukázalo, že filtrace dat musí být prováděna opatrně a často manuálně, protože automatické nástroje mohou odstranit validní geometrii.

### 4.2 Experiment versus rešerše

Výsledky experimentu jsou v dobré shodě s tím, co bylo popsáno v teoretické části. Rešerše upozorňovala na několik klíčových problémů: citlivost triangulačních skenerů na úhel dopadu, potíže s tenkými hranami, kumulaci algoritmických chyb a význam zarovnání. Experiment tato tvrzení nejen potvrdil, ale poskytl konkrétní příklady, jak se tyto jevy projevují v praxi.

Literatura například uvádí, že volně tvarované plochy vyžadují husté vzorkování a stabilní měřicí geometrii. Experiment ukázal, že i drobný pohyb dílu ve svěráku vede k izolovaným bodům. Podobně přípravná část experimentu zdůrazňovala, že ICP je citlivé na počáteční zarovnání. Samotný experiment pak potvrdil, že kvalitní hrubé zarovnání je nezbytné, ale také ukázal, že ICP je v praxi robustnější, než by se dalo očekávat.

Rešerše také upozorňovala na absenci standardizovaných postupů pro analýzu volně tvarovaných ploch v laboratořích. Experiment tuto mezeru přímo adresoval a ukázal, že open source software může tuto roli úspěšně plnit, a přímo tak navázat na popsané nekonvenční metody. Konkrétně, využití kombinace konvenčních metod k vytvoření metody nekonvenční.

### 4.3 Nekonvenční metody měření volně tvarovaných ploch

Cílem práce bylo navrhnout a ověřit nekonvenční metodu měření volně tvarovaných ploch. Experiment ukázal, že i přes některé nedokonalosti, zejména v oblasti kvantifikace nejistot, metoda naplňuje premisy tématu. Kombinace ručního 3D skeneru, otevřeného softwaru a metrologicky orientovaného pracovního postupu představuje přístup, který je v kontextu Laboratoře výrobních procesů VŠPJ nový. Výstupy experimentu jsou validní také z hlediska tématu: umožňují analyzovat globální i lokální odchylky, identifikovat problematické oblasti povrchu, provádět řezy a přenášet výsledky do CAD prostředí.

### 4.4 Co by šlo udělat jinak a co se osvědčilo

Pokud by bylo možné experiment zopakovat, největším přínosem by bylo provést sérii opakovaných měření pro jiné objekty s volně tvarovanými plochami, aby bylo možné ověřit metrologické výstupy robustněji. To je oblast, která zůstala otevřená a která by významně posílila metrologickou část práce. Naopak jako velmi robustní se ukázalo:

- rigidní ICP v CloudCompare,
- manuální filtrace izolovaných bodů,
- slicing a export řezů do CAD,
- otevřený software, který poskytl transparentnost a kontrolu nad procesem.

### 4.5 Osobní reflexe

Jedním z největších osobních přínosů této práce bylo uvědomění si, že problém výroby není jen problémem výroby samotné, ale především problémem měření. Ve své práci často předpokládám, že „vím“, jaký tvar má díl mít. Ovšem ve skutečnosti pracuji pouze s různými úrovněmi nejistoty. Neexistuje absolutní jistota, pouze přesnější a méně přesné odhady. Tato zkušenost zásadně změnila můj pohled na metrologii. A tedy, nejistota není chyba, ale přirozená součást každého měření, kterou je třeba chápat, řídit a respektovat.

### 4.6 Prostor pro další práci

Další výzkum může směřovat několika směry. Jedním z nich je další studium opakovatelnosti měření a vlivu strategie skenování na výsledky. Dalším je integrace adaptivního vzorkování podle lokální křivosti, jak naznačuje literatura. Zajímavou oblastí je také automatizace filtrace a rekonstrukce pomocí algoritmů strojového učení nebo využití implicitních reprezentací (SDF, INR) pro přesnější porovnání s CAD modelem.

### 4.7 Praktické využití výsledků

Výsledky experimentu mají přímé praktické využití. Export řezů do CAD umožňuje identifikovat oblasti s největšími odchylkami a otevírají cestu k optimalizaci tvaru nebo reverznímu inženýrství. Barevné mapy odchylek poskytují rychlou vizuální diagnostiku kvality výroby. Otevřený software navíc umožňuje laboratoři VŠPJ rozvíjet vlastní nástroje a postupy, čímž zvyšuje nezávislost na proprietárních řešeních a podporuje dlouhodobou udržitelnost.

## 4.8 Shrnutí

Diskuse ukazuje, že experiment nejen potvrdil funkčnost navržené metody, ale také poskytl hlubší vhled do problematiky měření volně tvarovaných ploch. Metoda je prakticky použitelná, teoreticky podložená a v kontextu laboratoře představuje významný krok vpřed. Zároveň odhalila oblasti, které vyžadují další výzkum, a nabídla konkrétní směry, jak metodu dále rozvíjet. V tomto smyslu experiment splnil svůj účel, protože nejen ověřil metodu nekonvenčního měření volně tvarovaných ploch, poukázal na její silné a slabé stránky, ale také přispěl k autorovu širšímu pochopení této problematiky.

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a experimentálně ověřit metodu nekonvenčního měření volně tvarovaných ploch pomocí ručního 3D skeneru s východiskem přesného digitálního 3D modelu, vytvořený v nástroji CAD. Výsledky ukázaly, že navržená metoda je prakticky realizovatelná, metrologicky interpretovatelná a vhodná pro laboratorní i průmyslové aplikace, přestože pracuje s technologiemi, které nejsou primárně určeny pro vysoce přesné měření volně tvarovaných ploch. Práce tak naplnila svůj hlavní cíl.

Experiment potvrdil většinu teoretických předpokladů uvedených v rešerši. Laserová triangulace se ukázala jako citlivá na úhel dopadu a tenké hrany, což vedlo k lokálním extrémům v mapě odchylek. Rekonstrukce polygonové sítě byla stabilní, ale limitovaná v oblastech s omezenou viditelností. Zarovnání pomocí rigidního ICP bylo naopak velmi robustní a opakovaně poskytovalo shodné výsledky, což potvrzuje, že metoda je vhodná i pro volně tvarované plochy bez jednoznačných referenčních prvků. Výpočet odchylek, histogram a řezy poskytly komplexní pohled na kvalitu skenu a umožnily identifikovat problematické oblasti povrchu.

Z metrologického hlediska se ukázalo, že dominantními zdroji nejistoty nejsou přístrojové chyby, ale geometrie dílu, fyzikální limity triangulace a algoritmické zpracování dat. Přestože nebylo možné stanovit úplnou kombinovanou nejistotu, experimentální odhad  $u_{align}$  a kvalitativní posouzení dalších složek poskytly rámec pro interpretaci výsledků. Metoda tak splňuje požadavky na nekonvenční měření, nepracuje tedy s absolutní jistotou, ale s řízenou a pochopenou nejistotou.

Výsledky práce otvírají prostor pro další výzkum, zejména v oblasti opakovatelnosti měření, adaptivního vzorkování a automatizace zpracování dat. V praktickém využití lze použít do CADu exportované řezy a porovnání s CAD modelem umožňují optimalizaci tvaru, reverzní inženýrství a diagnostiku výroby. Open source software navíc poskytuje laboratoři možnost dalšího rozvoje a nezávislosti. Práce tak představuje nejen metodický přínos, ale i základ pro budoucí inovace v oblasti měření volně tvarovaných ploch.

## Seznam použité literatury

- AUTODESK. Alias 2026 Help: Continuity G0 G1 G2 G3 [online]. Autodesk, 2025 [cit. 2026-03-22]. Dostupné z: <https://help.autodesk.com/view/ALIAS/2026/ENU/?guid=continuity-g0-g1-g2-g3>
- BAGHAIE, Ahmadreza, Ahmad PAHLAVAN TAFTI, Heather A. OWEN, Roshan M. D'SOUZA a Zeyun YU. Three-dimensional reconstruction of highly complex microscopic samples using scanning electron microscopy and optical flow estimation. *PLOS ONE*, 2017, roč. 12, č. 4, e0175078. DOI: 10.1371/journal.pone.0175078.
- BERGER, Gernot a Marc WENDEL. Optical Metrology of Freeforms and Complex Lenses: 3D form measurements of precision optical surfaces based on scanning point interferometry. *Optik & Photonik*, 2018, roč. 13, č. 1, s. 40–43. DOI: 10.1002/opph.201800007.
- ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. Ke stažení: „obr NMSA.jpg“ [online]. Český metrologický institut, n.d. [cit. 2026-03-22]. Dostupné z: <https://cmi.gov.cz/download>
- DIN. DIN EN ISO 1101: Geometrical Product Specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run out. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2006.
- EL HAYEK, N., H. NOUIRA, N. ANWER, M. DAMAK a O. GIBARU. Reconstruction of freeform surfaces for metrology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, sv. 483, čl. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/483/1/012003.
- GAO, Sai, André FELGNER a Uwe BRAND. Metrological Characteristics Based Calibration of Optical Areal Surface Measuring Instruments and Evaluation of Measurement Uncertainty for Surface Texture Measurements. *Instruments*, 2025, roč. 9, č. 2, čl. 11. DOI: 10.3390/instruments9020011.
- GENG, Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, roč. 3, č. 2, s. 128–160. DOI: 10.1364/AOP.3.000128.
- 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*, 2016, roč. 84, s. 1787–1799. DOI: 10.1007/s00170-015-7830-7.
- GHIM, Young Sik, Hyug Gyo RHEE, Angela DAVIES, Ho Soon YANG a Yun Woo LEE. 3D surface mapping of freeform optics using wavelength scanning lateral shearing interferometry. *Optics Express*, 2014, roč. 22, č. 5, s. 5098–5105. DOI: 10.1364/OE.22.005098.
- HARTUNG, Julia, Patricia M. DOLD, Andreas JAHN a Michael HEIZMANN. Analysis of AI-Based Single-View 3D Reconstruction Methods for an Industrial Application. *Sensors*, 2022, roč. 22, č. 17, čl. 6425. DOI: 10.3390/s22176425.
- HSIEH, Cheng Tiao. An efficient development of 3D surface registration by Point Cloud Library (PCL). In: *2012 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2012)*. New Taipei City: IEEE, 2012, s. 729–734. DOI: 10.1109/ISPACS.2012.6473535.

- CHEN, Zhe, Fumin ZHANG, Xinghua QU a Baoqiu LIANG. Fast Measurement and Reconstruction of Large Workpieces with Freeform Surfaces by Combining Local Scanning and Global Position Data. *Sensors*, 2015, roč. 15, č. 6, s. 14328–14344. DOI: 10.3390/s150614328.
- ISO. ISO 1 Geometrical product specifications (GPS) — *Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties*. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.
- ISO. ISO 8015: Geometrical product specifications (GPS) — *Fundamentals — Concepts, principles and rules*. Geneva: International Organization for Standardization, 2011a.
- ISO. ISO 5459: Geometrical product specifications (GPS) — *Geometrical tolerancing — Datums and datum systems*. Geneva: International Organization for Standardization, 2011b.
- ISO. ISO 14253-1: Geometrical product specifications (GPS) — *Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications*. Geneva: International Organization for Standardization, 2013.
- ISO. ISO 17450-1: Geometrical product specifications (GPS) — *General concepts — Part 1: Model for geometrical specification and verification*. Geneva: International Organization for Standardization, 2011c.
- ISO. ISO 17450-2: Geometrical product specifications (GPS) — *General concepts — Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities*. Geneva: International Organization for Standardization, 2012.
- JANIK, Witold, Cezary GRABOWIK a Grzegorz ĆWIKŁA. The Practical Approach to Freeform Shape Elements Reverse Engineering. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, sv. 657, s. 755–759. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.657.755
- JIANG, Rui Song, Wen Hu WANG a Zeng Qiang WANG. Noise filtering and multisample integration for CMM data of free-form surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, roč. 102, s. 1239–1247. DOI: 10.1007/s00170-018-2950-5.
- LEE, K. H., H. PARK a S. SON. A framework for laser scan planning of freeform surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, roč. 17, s. 171–180. DOI: 10.1007/s001700170176.
- Mahr Inc. Challenges and Opportunities in Asphere and Freeform Metrology 6-14-18 [YouTube video]. 2019. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DG3b23vcG2U&t=3149s> (Accessed: 1 March 2026).
- NGUYEN, Andrew Hieu, Zhaoyang WANG, Khanh L. LY, Charlotte Qiong LI a Andrew Hieu NGUYEN. Single-shot 3D shape acquisition using a learning-based structured-light technique. *Applied Optics*, 2022, roč. 61, č. 29, s. 8589–8598. DOI: 10.1364/AO.470208.
- OIML (International Organization of Legal Metrology). *OIML G 1-100:2008 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*. Paris: OIML, 2008. Dostupné z: [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_g/g001-100-e08.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_g/g001-100-e08.pdf) (Accessed 16 March 2026)

- PAGE, David, Andreas KOSCHAN, Sophie VOISIN, Ngozi ALI a Mongi ABIDI. 3D CAD model generation of mechanical parts using coded-pattern projection and laser triangulation systems. *Assembly Automation*, 2005, roč. 25, č. 3, s. 230–238. DOI: 10.1108/01445150510610953.
- PONIATOWSKA, Małgorzata a Andrzej WERNER. Fitting spatial models of geometric deviations of free-form surfaces determined in coordinate measurements. *Metrology and Measurement Systems*, 2010, roč. 17, č. 4, s. 599–610. DOI: 10.2478/v10178-010-0049-x.
- REISS, Mário L. L. a Antonio M. G. TOMMASELLI. A low-cost 3D reconstruction system using a single-shot projection of a pattern matrix. *The Photogrammetric Record*, 2011, roč. 26, č. 133, s. 91–110. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2010.00604.x.
- SAINI, Deepika, Sanjeev KUMAR a Tilak Raj GULATI. NURBS based geometric inverse reconstruction of free-form shapes. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2017, roč. 29, č. 2, s. 116–133. DOI: 10.1016/j.jksuci.2014.12.010.
- SALMI, Alessandro, Enrico ATZENI, Federico CALIGNANO, Paolo MINETOLA a Luca IULIANO. Combined reverse engineering and CAD approach for mould modelling in casting simulation. *International Journal of Cast Metals Research*, 2014, roč. 27, č. 4, s. 213–220. DOI: 10.1179/1743133613Y.0000000101.
- SCANTECH (HANGZHOU) CO., LTD. *Calibration Certificate No. SKJZ 2025071702 for SIMSCAN 3D Scanner*. Hangzhou: SCANTECH (HANGZHOU) CO., LTD., 2023a.
- SCANTECH (HANGZHOU) CO., LTD. *SIMSCAN User Manual V6.3*. Hangzhou: SCANTECH (HANGZHOU) CO., LTD., 2023b.
- SŁADEK, Jerzy A. Introduction. In: *Coordinate Metrology: Accuracy of Systems and Measurements*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2016, s. 1–13. ISBN 978-3-662-48465-4. DOI: 10.1007/978-3-662-48465-4\_1.
- STORNELLI, Andrea, Serdar OZCAN a Christopher SIMMS. Examining the relationship between advanced manufacturing technology adoption and innovation. In: *Event Proceedings: LUT Scientific and Expertise Publications*. Paper presented at the XXXIII ISPIM Innovation Conference “Innovating in a Digital World”, Copenhagen, Denmark, 5–8 June 2022. ISBN 978-952-335-694-8.
- TEE\_S. What’s a good RMS value for alignments? *Reddit – r/Metrology*, 2022. Dostupné z: [https://www.reddit.com/r/Metrology/comments/1afwaiu/whats\\_a\\_good\\_rms\\_value\\_for\\_alignments/](https://www.reddit.com/r/Metrology/comments/1afwaiu/whats_a_good_rms_value_for_alignments/) (Accessed: 7 April 2026).
- TICHÁ, Šárka a Ivan MRKVICA. *Vybrané kapitoly ze strojírenské metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2709-4.
- TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie. Část 1*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004.
- TZATHAS, Petros, Petros MARAGOS a Anastasios ROUSSOS. 3D Neural Sculpting (3DNS): Editing Neural Signed Distance Functions. In: *2023 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. Piscataway: IEEE, 2023, s. 4510–4519. ISBN 978-1-6654-9346-8. DOI: 10.1109/WACV56688.2023.00450.

WINCHESTER, Simon. *Exactly: How Precision Engineers Created the Modern World*. London: William Collins, 2018.

YAO, Jianing, Alexander ANDERSON a Jannick P. ROLLAND. Point-cloud noncontact metrology of freeform optical surfaces. *Optics Express*, 2018, roč. 26, č. 8, s. 10242–10261. DOI: 10.1364/OE.26.010242.

ZANG, Yufu, Bisheng YANG, Fuxun LIANG a Xiongwu XIAO. Novel Adaptive Laser Scanning Method for Point Clouds of Free Form Objects. *Sensors*, 2018, roč. 18, č. 7, čl. 2239. DOI: 10.3390/s18072239.

ZHOU, J., Y. ZHOU, B. WANG a J. ZANG. Human-Cyber-Physical Systems (HCPSs) in the Context of New-Generation Intelligent Manufacturing. *Engineering*, 2019, roč. 5, s. 624–636. DOI: 10.1016/j.eng.2019.07.015.

## Přílohy

*Příloha A* Projektový soubor vypočítaných C2M vzdáleností: C2M

*Příloha A1* Projektový soubor vypočítané C2M vzdálenosti č. 1: project01.bin

*Příloha A2* Projektový soubor vypočítané C2M vzdálenosti č. 2: project02.bin

*Příloha A3* Projektový soubor vypočítané C2M vzdálenosti č. 3: project03.bin

*Příloha A4* Projektový soubor vypočítané C2M vzdálenosti č. 4: project04.bin

*Příloha A5* Projektový soubor vypočítané C2M vzdálenosti č. 5: project05.bin

*Příloha B* CAD model a 3D sken: Input\_mesh

*Příloha B1* CAD model: 1\_CAD\_model.stl

*Příloha B2* 3D sken: 2\_3DScan.stl

*Příloha C* Výpočtové tabulky: Tabulky\_vypocet

*Příloha C1* Výpočet průměrných hodnot: Prum\_Hodnoty

*Příloha C2* Výpočet histogramu č. 1: Hist01

*Příloha C3* Výpočet histogramu č. 2: Hist02

*Příloha C4* Výpočet histogramu č. 3: Hist03

*Příloha C5* Výpočet histogramu č. 4: Hist04

*Příloha C6* Výpočet histogramu č. 5: Hist05

*Příloha D* Video záznam nastavení: Video\_manual\_CloudCompare

*Příloha E* Prohlášení o užití generativní umělé inteligence